تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال نوزدهم، شماره ۳، پائیز ۱۴۰۲، ویژه‌نامه تخصصی: آب زیرزمینی
Volume 19, No.3, Fall 2023 (IR-WRR)- Special Issue: Groundwater
۲۱۲-۲۳۰

مقاله مروری

مروری بر سیر بازاندیشی در تجدیدپذیری آب زیرزمینی

هاشم درخشان[۱]، کامران داوری[۲*] و ابوالفضل مساعدی[۳]

چکیده

مدیریت آب زیرزمینی وابسته به تخصیص، و تخصیص صحیح وابسته به فهم تجدیدپذیری است. در واقع، تعیین کمیّت تجدیدپذیری آب زیرزمینی، شالوده اصلی تخصیص است. اما علی‌رغم این اهمیت؛ این مفهوم با ابهام روبرو است. در این مقاله، ابتدا تعاریف تجدیدپذیری آب زیرزمینی بر اساس شار طبیعی تغذیه، تخمین حجم انبارش آبخوان و یا دوره جایگزینی آب زیرزمینی مرور گشته است. سپس مفاهیم اخیر در تعریف تجدیدپذیری آب زیرزمینی مبتنی بر اصل «گیرش» (دخالت بشر در بر هم زدن تعادل آب زیرزمینی) نیز مرور و تحلیل قرار گرفته است. اصل «گیرش» اشاره به اثر پمپاژ بر شارش–انبارش آبخوان و تجدیدپذیری آن دارد. رویکردهای اخیر، تعاریف «شارش–مبنا» و «انبارش–مبنا» را با یکدیگر ترکیب نموده و همچنین تجدیدپذیری آب زیرزمینی را به پویایی کاربری‌های آب مرتبط نموده‌اند. در مجموع نتایج نشان داد که تجدیدپذیری آب زیرزمینی مفهومی پیچیده بوده، که همچنان در حال توسعه و بهبود است. در انتها به دلیل ارتباط تنگاتنگ مدیریت آب زیرزمینی و مدیریت خشکسالی (به ویژه با توجه به ضرورت تاب‌آوری)، یک گام جدید بر گام‌های حاصل از مرور افزوده شد؛ زیرا ضروری است برای افزایش تاب‌آوری توسعه، ریسک ابرخشکسالی مورد توجه قرار گیرد. چارچوب ارائه شده جدید می‌تواند درک بهتری از ارتباط سه–جانبه «گیرش–تجدیدپذیری– تاب‌آوری» به نمایش بگذارد؛ که توجه به آن برای مدیریت آب زیرزمینی ضروری است.

کلمات کلیدی: آب زیرزمینی، تجدیدپذیری، شارش، انبارش، گیرش.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱/۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۵/۸

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
۳- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۲ امکانپذیر است.

Review Paper

A Review of the Rethinking Groundwater Renewability

H. Derakhshan [1], K. Davary[2], and A. Mosaedi[3]*

Abstract

Groundwater management depends on allocation and the correct allocation depends on understanding groundwater renewability. In other words, determining the groundwater renewability is the main foundation for the allocation of these resources. Though many definitions of groundwater renewability are developed, the concept still has ambiguity. In this article, we reviewed the definition of groundwater renewability based on flux, storage and residence time and challenged these old definitions with the more recent ones. The principle of "capture" refers to the effect of pumping on the flux-storage of the aquifer and the groundwater renewability. Recent approaches have combined the "flux-based" and "storage-based" definitions and furthermore related the definition of groundwater renewability to the behavior of human societies and the dynamism of the water uses. The results showed that groundwater renewability is altogether a complex concept which is still to be developed and improved. Also, due to the close relationship between groundwater management and drought management (especially considering of resilience) a new step was added to the steps resulting from this review. This addressed the necessity to take into account the risk of megadroughts and secure a more resilient development. In this framework we showed a better understanding of the trilateral relationship of "capture-renewability-resilience" which is essential for groundwater management.

Keywords: Groundwater, Renewability, Flux, Storage, Capture.

Received: March 24, 2023
Accepted: July 30, 2023

1- Ph.D. Student of Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: h.derakhshan@um.ac.ir
2- Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: k.davary@um.ac.ir
3- Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: mosaedi@um.ac.ir
*- Corresponding Author
Dor: 20.1001.1.17352347.1402.19.3.9.8

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

۱- مقدمه

اگرچه که آب زیرزمینی به عنوان بزرگترین ذخیره آب شیرین قابل دسترسی بر روی زمین شناخته شده است؛ اما امروزه به دلیل عدم تخصیص صحیح، تحت فشار فزاینده‌ای از توسعه اقتصادی-اجتماعی قرار دارد. در حال حاضر آب زیرزمینی زیربنای بخش بزرگی از کشاورزی فاریاب در سراسر جهان بوده و منبع آب آشامیدنی برای بیش از حدود ۲ میلیارد نفر است (Bierkens and Wada, 2019; Famiglietti, 2014)، که تخصیص بیش از اندازه از این منبع حیاتی توسعه اقتصادی-اجتماعی را با ریسک و مخاطرات جدی رو به رو نموده است. بنابراین به بیان دیگر مدیریت صحیح منابع آب به شدت به چگونگی تخصیص منابع آب زیرزمینی وابسته بوده و غفلت از توجه به این ضرورت، می‌تواند به اکوسیستم های وابسته به آب زیرزمینی آسیب برساند و باعث شور شدن آب زیرزمینی، کاهش تاب‌آوری در برابر ابرخشکسالی‌های پیش رو، فرونشست زمین و سایر پیامدهای نامطلوب شود (de Graaf et al., 2019).

گسترش کشاورزی فاریاب در مناطق خشک و نیمه خشک مانند کشورمان که بارندگی و منابع آب‌سطحی بسیار محدود در اختیار دارد؛ نیاز کشاورزی فاریاب را به برداشت از آب زیرزمینی به شدت افزایش داده است (Siebert et al., 2010; Wada et al., 2012). این روند در بسیاری از کشورهای در حال توسعه رخ داده که از آن به «انقلاب خاموش در استفاده گسترده از آب زیرزمینی» یاد می‌شود (Llamas and Martínez-Santos, 2005). علاوه بر این، افزایش تعداد افرادی که در شهرهای بزرگ (مانند تهران، مشهد، یزد و غیره در کشورمان) بدون دسترسی به منابع آب‌سطحی قابل قبول، زندگی می‌کنند باعث افزایش میزان برداشت آب زیرزمینی شده و احتمال نابودی این ذخایر با ارزش را دوچندان نموده است (McDonald et al., 2014). نتیجه این روندها در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، موجب افزایش مداوم استفاده از آب زیرزمینی تجدیدناپذیر است. به عبارت دیگر شواهد نشان می‌دهد آبی که از آب زیرزمینی خارج می‌شود، مطمئناً در «دوره عمر زندگی بشری»[1] قابل تجدید نیست. در نتیجه، میزان افت منابع آب زیرزمینی طی دهه‌های گذشته افزایش یافته و احتمالاً در دهه‌های آینده نیز ادامه خواهد داشت (Aeschbach-Hertig and Gleeson, 2012; de Graaf et al., 2017; Döll et al., 2012; Konikow, 2011; Richey et al., 2015; Wada et al., 2011)؛ لذا برای حفظ توسعه پایا[2]، توجه به رعایت ظرفیت تجدیدپذیری آب زیرزمینی مبتنی بر مدیریت پایای منابع آب ضرورتی اجتناب‌ناپذیر بوده، که دستیابی به آن در گروی فهم صحیح تجدیدپذیری منابع آب زیرزمینی است (Elshall et al., 2020).

علی رغم اینکه تعریف صحیح از تجدیدپذیری آب زیرزمینی شالوده و اساس برای دستیابی به پایایی آب زیرزمینی است (Elshall et al., 2020)، اما این مفهوم، به دلیل زمان‌مند بودن، تغییر با پویایی شرایط آب‌وهوایی و همچنین روند داشتن به دلیل وقوع تغییر اقلیم مفهومی پیچیده است (Taylor et al., 2013b, 2013a). وجود ابهام در تعریف تجدیدپذیری آب زیرزمینی موجب گردیده است تا تعریف شاخص‌های مناسب برای پایش دستیابی به اهداف پایایی آب زیرزمینی با چالش جدی رو به رو شود (Voss and Soliman, 2014). لذا امروزه ابهام در تعریف این مفهوم اساسی و چگونگی دستیابی به پایایی آب زیرزمینی به یک مشکل جهانی در این زمینه تبدیل شده است (Gleeson et al., 2021). در واقع رویکرد تعیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی مبتنی بر شارش (حل معادلات بیلان) تا انتهای قرن بیستم مورد پذیرش بوده است. اما با اضافه برداشت از ذخایر آب زیرزمینی این بحث مطرح گردید که این رویکرد از کفایت لازم برای تعیین ظرفیت تجدیدپذیری آب زیرزمینی برخوردار نیست. این مفهوم با تعبیر افسانه عدم تجاوز پمپاژ از ظرفیت تغذیه آب زیرزمینی مطرح گردید (Bredehoeft, 2002). لذا رویکردهای جدید در تبیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی در تکمیل رویکرد شارش مبنا مطرح گردیده، که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

هم‌اکنون دخالت جوامع بشری در برهم زدن تعادل منابع طبیعی، موجب شده است تا این رویکرد (شارش مبنا مبتنی بر حل معادلات بیلان) از کفایت لازم برای تبیین مقدار تجدیدپذیری آب زیرزمینی برخوردار نباشد (de Graaf et al., 2017). با این حال، واضح است که تعاریف و معیارهای متناقض و گیج کننده در تبیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی، می‌تواند انگیزه حفاظت از این ذخایر با ارزش را تضعیف نمایند (Ferguson et al., 2020). بنابراین همواره این سؤال مطرح بوده، آیا آب زیرزمینی یک منبع تجدیدپذیر است که باید بر اساس پارادایم پایایی حفاظت شود و یا منبعی تجدیدناپذیر است که می‌توان به استخراج از آن ادامه داد؟ تاکنون تعاریف بسیاری از تجدیدپذیری یا تجدیدناپذیری آب زیرزمینی مبتنی بر مبانی: ۱- شار طبیعی تغذیه، ۲- تخمین حجم ذخیره استاتیک آبخوان[3] (انبارش) و ۳- برآورد نمودن زمان‌ماند آب زیرزمینی برای تبیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی ارائه شده است. بدیهی است که تعاریف اولیه برای برآورد تجدیدپذیری آب زیرزمینی از جنس رویکرد «شارش-مبنا»[4] بوده و تنها بر حل معادلات بیلان استوار بوده است؛ این دخالت در برهم زدن تعادل منابع آب زیرزمینی با اضافه برداشت از ذخایر آب زیرزمینی ظهور نموده است؛ که موجب ورود مفهوم گیرش[5] در تبیین تجدیدپذیری ذخایر آب زیرزمینی شده است (Bredehoeft and Durbin, 2009). امروز

اصول گیرش از آب زیرزمینی تعاریف ساده تعیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی مبتنی بر مبانی ذکر شده (شارشی و یا انبارشی) را به چالش کشیده است. بنابراین لحاظ نمودن این اصل موجب شده تا برآورد تجدیدپذیری آب زیرزمینی امری بسیار پیچیده‌تر نسبت به برآورد تجدیدپذیری سایر منابع تجدیدپذیر باشد. لازم به توضیح است که اگرچه رویکرد اول (تبیین تجدیدپذیری مبتنی بر شار طبیعی تغذیه) که در قالب بیلان منابع آب تا حدودی در مدیریت آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته، اما رویکرد دوم و سوم تا کنون در کشورمان مورد بحث و کاربرد قرار نگرفته است؛ و لذا از این جهت مرور این مفاهیم و رویکردها برای بهبود وضع موجود مدیریت آب زیرزمینی ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

بدیهی است که در راستای تبیین این رویکردهای جدید شفاف‌سازی اصطلاحات برای حل ناسازگاری و سردرگمی موجود بین پژوهشگران، مدیران، سیاست گذاران و سایر گروداران بسیار مهم است (Cuthbert et al., 2022). لذا در راستای پاسخ به این ضرورت روند تکامل مفاهیم مرتبط با تجدیدپذیری آب زیرزمینی که مبنای اصلی در تعیین میزان تخصیص آب زیرزمینی است برای بهبود مدیریت منابع آب زیرزمینی تحلیل و طبقه‌بندی شده است. تعریف تجدیدپذیری آب زیرزمینی مفهومی پیچیده بوده (Huggins et al., 2022) و شرایط منابع آب زیرزمینی نشانگر این امر است که رویکردی مناسب برای تبیین تجدیدپذیر منابع آب زیرزمینی در کشورمان مورد کاربرد نیست. این مقاله به تحلیل رویکردهای برآورد تجدیدپذیری آب زیرزمینی پرداخته است و مفهوم «گیرش» به عنوان یک مفهوم بنیادی برای تبیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی را مورد تشریح قرار داده است. همچنین در بخش فراتحلیل توجه به مفهوم افزایش ظرفیت تاب‌آوری در برابر ابرخشکسالی برای لحاظ نمودن در تعریف تجدیدپذیری منابع آب زیرزمینی را مورد پیشنهاد قرار گرفته است.

تاکنون تشریح شد که تبیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی مبنایی کلیدی در تعیین میزان تخصیص آب زیرزمینی است. این مفهوم به دلیل درهم‌تنیدگی با مبانی پایایی و تاب‌آوری مفهومی پیچیده بوده، که بصورت کلی از کاربرد جدی این مفهوم در مدیریت منابع آب غفلت شده است (بخش مقدمه شکل ۱) به بیان دیگر برای تبیین مفهوم پیچیده تجدیدپذیری آب زیرزمینی رویکردهای بسیاری برای برآورد آن مورد کاربرد قرار گرفته است؛ اما در حال حاضر نبود رویکردی مشخص برای تعیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی که شالوده‌ای اساسی برای تعیین مقدار حقابه‌های برداشت از منابع آب زیرزمینی است به شدت احساس می‌شود. در راستای فهم بهتر تجدیدپذیری آب زیرزمینی در بخش دوم مقاله مبانی کلیدی مرتبط با تعیین تجدیدپذیری منابع آب زیرزمینی مورد تشریح قرار گرفته است. پس از تشریح مفاهیم بنیادی در تبیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی در بخش سوم مقاله مفهوم کلیدی «گیرش» مورد تشریح قرار گرفته است. در بخش چهارم تکامل رویکردهای برآورد تجدیدپذیری آب زیرزمینی (باکس نقطه‌چین درون شکل ۱) و این تکامل از رویکرد شارش مبنا (حل معادلات بیلان) تا رویکرد اخیر «بازتعادل منابع آب زیرزمینی در دوره عمر بشری» (Cuthbert et al., 2022) تشریح شده است. به بیان ساده‌تر در بخش سوم و چهارم به این پرسش پرداخته شده است که «واقعیت تجدیدپذیری آب زیرزمینی چیست؟» برای پاسخ به این پرسش، نویسندگان تحقیق حاضر به تشریح چگونگی تکامل رویکردهای تبیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی پرداخته‌اند. در بخش پنجم (فراتحلیل) چارچوبی مفهومی از تعاریف ارائه شده مورد توسعه قرار گرفته، و گام‌های بعدی برای حرکت از رویکرد موجود در مدیریت منابع آب زیرزمینی به رویکردهای بهتر برای تبیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی بر پایه «پایایی و تاب‌آوری» تشریح شده است. در نهایت به دلیل ارتباط تنگاتنگ مدیریت آب زیرزمینی و مدیریت خشکسالی (به ویژه با توجه به ضرورت تاب‌آوری)، یک گام جدید بر گام‌های حاصل از مرور افزوده شد؛ زیرا ضروری است برای افزایش تاب‌آوری توسعه، ریسک ابرخشکسالی مورد توجه قرار گیرد.

۲- مبانی تجدیدپذیری آب زیرزمینی

در این بخش سعی شده است تا مفاهیم پایه مرتبط با تجدیدپذیری آب زیرزمینی تشریح شود. سه مفهوم که در تشریح تجدیدپذیری منابع آب زیرزمینی در متون مختلف مورد استفاده قرار گرفته است شامل مفهوم Residence Time معادل «زمان ماند»، مفهوم Groundwater Age معادل «سن آب زیرزمینی» و مفهوم Turnover rate معادل «نرخ جایگزینی» استفاده شده است (Schilling et al., 2019).

منابع آب بر روی کره زمین از «زمان‌ماند» یکسانی برخوردار نیستند، و می‌توان زمان‌ماند[۶] را برای هر یک از بخش‌ها و یا زیربخش‌های مختلف چرخه هیدرولوژی بصورت «میانگین مدت زمانی که طی آن مولکول آب در یک مکان یا شرایط معین در قرار دارد» تعریف نمود (Winter, 1998). در تعریفی دیگر «زمان‌ماند» آب زیرزمینی به مدت زمانی که «یک مولکول آب برای حرکت از منطقه تغذیه به منطقه تخلیه آبخوان نیاز دارد» تعریف می‌شود (Broers, 2004).

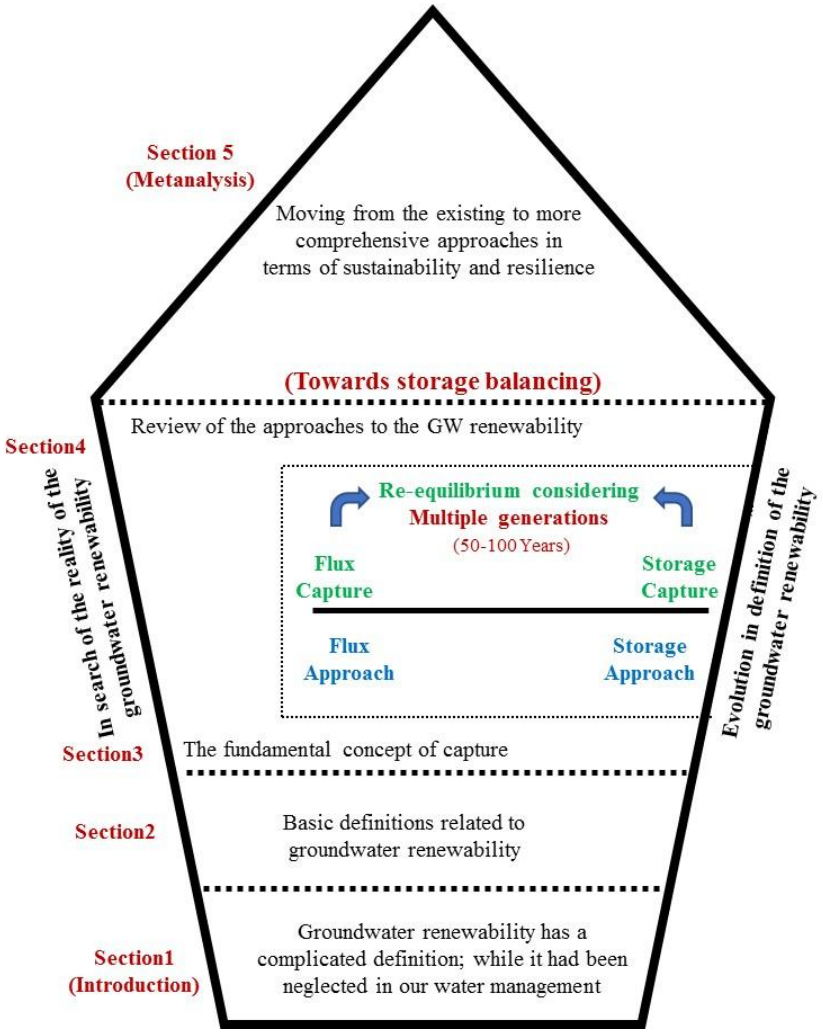

Fig. 1- The structure of the review

شکل ۱- ساختار مقاله

این مفهوم کلی است و در حوزه‌های سیاست‌گذاری بیشتر از این کلمه استفاده شده است. برای بیان «زمان‌ماند» در منابع آب زیرزمینی بیشتر در بین زمین‌شناسان مفهوم سن آب زیرزمینی[۷] برای بیان زمان مورد نیاز برای جایگزینی مجدد منابع آب زیرزمینی مورد استفاده است. بنا بر تعریف «به فاصله زمانی بین ورود آب به داخل آبخوان و خارج شدن همان آب از آبخوان سن آب زیرزمینی می‌گویند» (Kazemi et al., 2006). همچنین، می‌توان پیشنهاد کرد که سن آب زیرزمینی همان زمان‌ماند در آب زیرزمینی است، اما فقط در منطقه تخلیه (یعنی در منطقه تخلیه، سن آب زیرزمینی برابر با زمان‌ماند آب زیرزمینی است). مفهوم سن آب زیرزمینی و زمان‌ماند در آب زیرزمینی به ترتیب با سن و طول عمر یک فرد قابل مقایسه است (Kazemi et al., 2006). مفهوم «نرخ جایگزینی»[۸] بعد مفهوم «سن آب زیرزمینی» و «زمان‌ماند» از پر تکرارترین مفاهیم مرتبط با تجدیدپذیری آب زیرزمینی است. مفهوم «نرخ جایگزینی» از مفاهیم پرکاربرد در میان هیدرولوژیست‌ها است و این مفهوم عکس مفهوم «زمان‌ماند» است که مطابق معادله ۱ قابل تشریح است (Befus et al., 2017):

$$\text{Residence Time} = V_{gw}/R = (1/\text{ Turnover rate}) \quad (۱)$$

در معادله ۱، R: نرخ متوسط تغذیه سالیانه آبخوان و V_{gw} کل حجم آب موجود در آبخوان است. برای تبیین تفاوت این مفاهیم سعی شده است که از یک مثال استفاده شود. فرض کنید که مخزن آب دارای حجمی معادل ۴۰۰ مترمکعب بوده، که در هر روز ۲۰ متر مکعب از آن خارج (شار خروجی) و ۲۰ متر مکعب وارد می‌شوند (شار ورودی). بدین ترتیب همواره یک تعادل در مخزن برقرار است (حجم ثابت مخزن ۴۰۰ متر مکعب). «زمان‌ماند» آب در این مخزن برابر است با حجم آب خروجی (یا ورودی) به کل حجم آب مخزن است؛ یعنی ۲۰ = ۲۰ / ۴۰۰=(شار جریان)/(حجم کل مخزن). که بیانگر این موضوع است

که زمان باقیماندن هر مولکول آب داخل این مخزن ۲۰ روز است؛ از طرف مقابل «نرخ جایگزینی» این مخزن بیانگر چرخش ۵ درصد از حجم مخزن در هر روز است. هر در واقع «زمان‌ماند» و «نرخ جایگزینی» معکوس یکدیگر هستند (Maxwell et al., 2016). به بیان ساده، زمان‌ماند آب زیرزمینی برابر فاصله زمانی از ورود یک مولکول آب به آبخوان تا خروج کامل همان مولکول از آبخوان است و از نظر محاسباتی حاصل تقسیم کل آب موجود در آبخوان بر شار تغذیه و یا تخلیه (در صورت برابر بودن) بوده و بر حسب زمان (روز، سال و غیره) بدست می‌آید. «نرخ جایگزینی» عکس زمان‌ماند بوده و بر حسب درصد قابل تفسیر است. لازم به ذکر است که مفهوم «سن آب زیرزمینی» در میان زمین‌شناسان، مفهوم «نرخ جایگزینی» در میان هیدرولوژیست‌ها و مفهوم «زمان‌ماند» در حوزه سیاستگذاری استفاده از منابع آب زیرزمینی بیشتر مورد توجه و کاربرد قرار دارد (Kazemi et al., 2006).

۲-۱- زمان‌ماند آب در اجزای چرخه هیدرولوژی

«زمان‌ماند آب» (برعکس میزان نرخ جایگزینی منابع آب) با اشکال مختلف در چرخه هیدرولوژی بسیار متفاوت بوده که در شکل ۲ تشریح شده است . فلش مشکی در این شکل زمان ماند (بر حسب ساعت) را نشان می‌دهد. کمترین زمان‌ماند مربوط به چرخه آب در پوشش گیاهی (فتوسنتز) است که در طول شبانه روز چندین مرتبه آب جذب شده توسط گیاه بعد از انجام فتوسنتز وارد اتمسفر می‌شود (خروج از فاز مایع و ورود به فاز گازی). بعد از فتوسنتز کمترین زمان‌ماند از فاز مایع (آب دریا) به فاز گاز و رطوبت موجود در جو اختصاص می‌یابد. رطوبت موجود در جو از طریق بارندگی بر سطح زمین جریان می‌یابد و زمان‌ماند برای رودخانه‌ها را شکل می‌دهد (خروج از فاز گاز و ورود به فاز مایع). بخشی از این آب باران وارد خاک می‌شود؛ آب موجود در خاک از طریق پدیده موئینگی و یا جذب آب توسط گیاهان مرتعی می‌تواند دوباره وارد جو شود که زمان‌ماند آب موجود در خاک به رطوبت جو را تشکل می‌دهد که این فرآیند حدود ۱ سال به طول خواهد انجامید (خروج از خاک و ورود به فاز گازی در جو) (Gleeson et al., 2012). زمان‌ماند بعدی مربوط به تالاب‌ها و دریاچه‌ها است که از حدود ۵ تا ۲۰ سال متغیر است. این در حالی است که برآورد زمان‌ماند در منابع آب زیرزمینی بسیار متفاوت از سایر منابع است. در واقع زمان‌ماند منابع آب زیرزمینی از حدود ۱ سال تا بیش از ۱۰ هزار سال متغییر است. معمولاً زمان‌ماندهای کوچک اشاره به ذخایر تجدیدپذیر آب زیرزمینی که معمولاً در اعماق کم هستند و به راحتی از طریق چشمه به رودخانه تخلیه می‌گردند دارد (در شکل ۲ با نماد G با پس زمینه سبز رنگ مشخص شده است). زمان‌ماندهای بسیار بزرگ آب زیرزمینی (در شکل ۲ با نماد G’ با پس زمینه مشکی مشخص شده)؛ به ذخایر آب زیرزمینی اشاره دارد که در اعماق زیاد قرار دارند و معمولاً به دلیل زمان‌ماند بسیار بالا تجدیدناپذیر محسوب می‌شوند (UNESCO, 1978).

با توجه به شکل ۲ اگرچه توجه به زمان‌ماند در دوره‌های سیاست‌گذاری، سال‌ها پیش در گزارشات سازمان یونسکو (UNESCO, 1978) مورد اشاره قرار گرفته است اما در عرصه عمل در بسیار از کشورها از این امر مهم غفلت شده است. بدیهی است که مقیاس‌های زمانی مدیریت آب بسیار متفاوت با زمان‌ماند منابع آب است.

معمولاً برنامه‌های خرد مدیریت آب سالانه بوده و هر ۵ سال یکبار (در حدود عمر دولت‌ها) مورد تجدید نظر قرار می‌گیرند؛ اما منابع آبی مانند تالاب، دریاچه و آب زیرزمینی دارای زمان‌ماند بسیار بزرگتر از عمر دولت‌ها هستند و لذا در صورتی که برنامه‌ها و سیاست‌های مدیریت آب زمان‌ماند هر یک از منابع آب را مورد توجه قرار ندهد موجب خواهد شد تا به این منابع خسارات جبران ناپذیر و غیر قابل برگشت وارد شود. در برخی از موارد این خسارت به حدی بزرگ است که جبران آن خارج از ظرفیت شرایط موجود است. بنابراین زمان‌ماند منابع آب از چند ساعت تا چندین هزار سال می‌تواند متغیر باشد؛ که در این میان منابع آب زیرزمینی بیشترین تغییر زمان ماند را به خود اختصاص داده‌اند. بنابراین ضروری است تا برای حفاظت از منابع آب برنامه بلندمدت متناسب با زمان‌ماند منابع مورد استفاده تنظیم شود (Gleeson et al., 2021).

تعیین زمان‌ماند و نرخ جایگزینی منابع آب زیرزمینی به ویژه با توجه به منشاءهای بسیار متفاوت تغذیه، بسیار متغییر است لذا بدیهی است که زمان‌ماند منابع آب زیرزمینی در لایه‌های آب یک آبخوان مشخص با یکدیگر بسیار متفاوت باشد. لایه‌های زیرین معمولاً دارای زمان‌ماند بسیار طولانی‌تر از لایه‌های فوقانی هستند این مفهوم در میان زمین‌شناسان با اصطلاح «سن آب زیرزمینی» مورد کاربرد است که با روش‌هایی مانند ایزوتوپ قابل اندازه‌گیری است که در بخش بعد به آن پرداخته شده است (Gleeson et al., 2016).

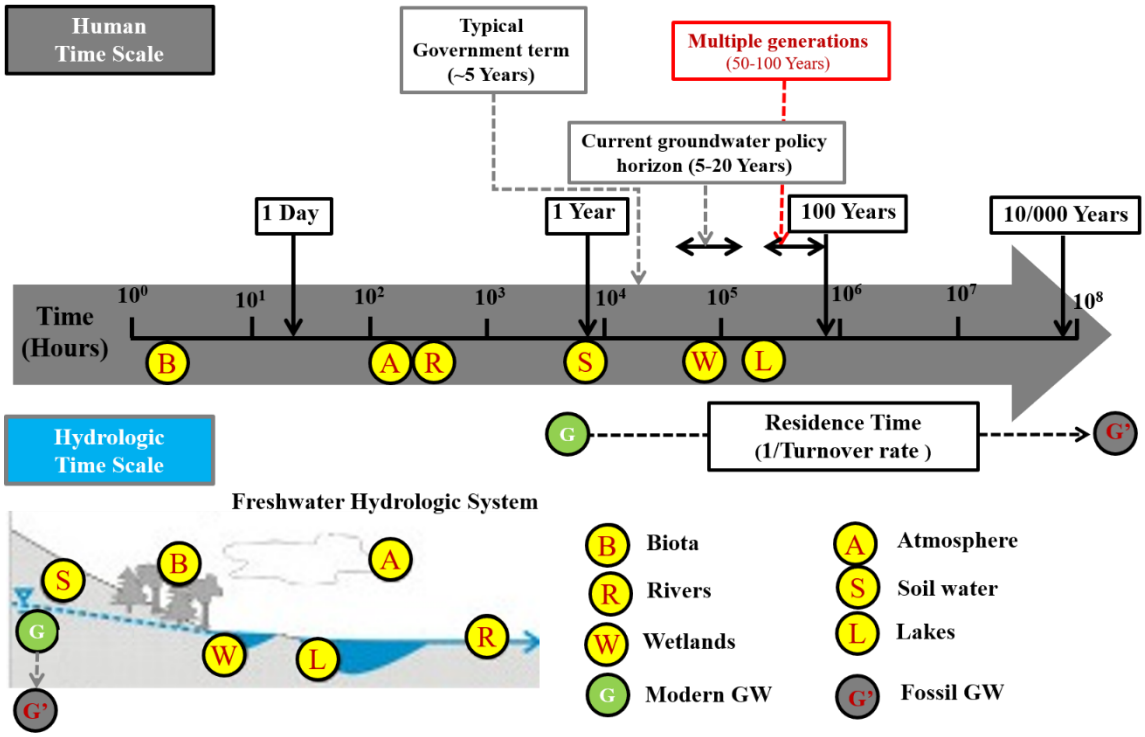

Fig. 2- The comparison of the concept of residence time in the hydrological cycle and the policymaking process in water management adapted from UNESCO, 1978

شکل ۲- مقایسه مفهوم زمان‌ماند منابع آب در چرخه هیدرولوژی و فرآیند سیاست‌گذاری مدیریت آب با اقتباس از (UNESCO, 1978)

۲-۲- سن آب زیرزمینی

شکل ۳ شماتیکی از ارتباط منابع آب مبتنی بر توجه به سن منابع آب را نشان می‌دهد. این شکل سعی نموده است تا تمایز آب زیرزمینی با سن کم (تجدیدپذیر) با آب زیرزمینی با سن بسیار زیاد (تجدیدناپذیر) را تشریح نماید. در این شکل سه نوع آب زیرزمینی متفاوت از نظر سن، مشخص شده است. بخش‌های که با نماد G مشخص شده‌اند مربوط به آب زیرزمینی با سن کم است که طی چند دهه‌ی اخیر مورد تغذیه قرار گرفته‌اند و به آنها آب زیرزمینی جدید می گویند. منابع آب زیرزمینی که با نماد G' مشخص شده‌اند مربوط به آب زیرزمینی با سن بسیار زیاد است، که تقریباً به دلیل زمان‌ماند بسیار زیاد تجدیدناپذیر محسوب می‌شوند.

منابع آب زیرزمینی که بین منابع تجدیدناپذیر و منابع آب زیرزمینی جدید قرار می‌گیرند، آب زیرزمینی جوان نامیده می‌شوند (Ferguson et al., 2020).

تفکیک تجدیدپذیر و یا تجدیدناپذیر بودن منابع آب زیرزمینی بر اساس سن آب زیرزمینی مفهومی جدید است که حدود دو دهه است که مطرح شده است (Margat et al., 2006)؛ اما علی‌رغم اهمیت این موضوع، متأسفانه در بسیاری از مقالات، از جمله مقالاتی که توسط نویسندگان این مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اصطلاحات آب زیرزمینی فسیلی[۹]، آب زیرزمینی تجدیدناپذیر[۱۰] و اضافه برداشت[۱۱] به جای یکدیگر استفاده شده‌اند، در حالی که مفاهیم کاملاً یکسانی را نشان نمی‌دهند و مترادف یکدیگر نیستند. بنابراین برای رفع ابهام، این تعاریف در جدول ۱ خلاصه شده است (Schulz et al., 2017).

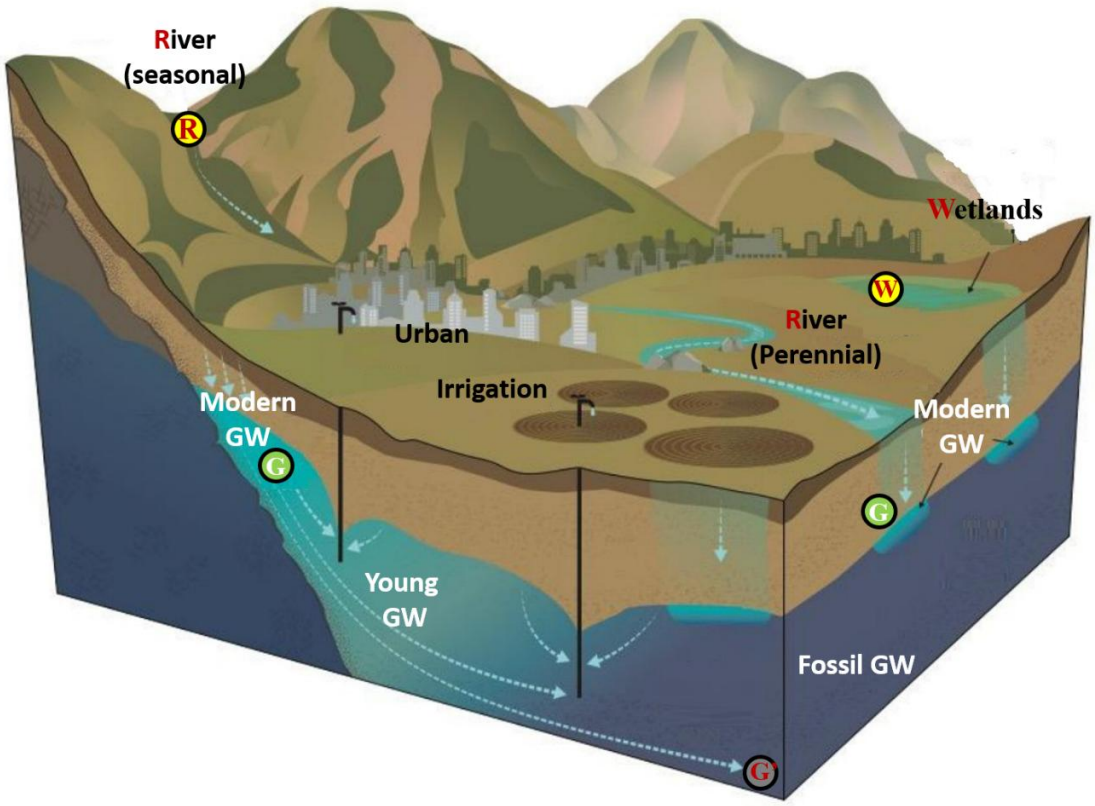

Fig. 3- Classification of GW resources, adapted from Ferguson et al. (2020)
شکل ۳- تقسیم‌بندی انواع منابع آب زیرزمینی، با اقتباس از Ferguson et al. (2020)

اصطلاح «فسیل» در آب زیرزمینی فسیلی مربوط به آب زیرزمینی با دوره جایگزینی بسیار بالا است که زمان‌ماند آن، از سن تاریخ بشر پیشی می‌گیرد. به عبارت سن آب زیرزمینی که در آن آب زیرزمینی، «فسیل» نامیده می‌شوند، به طور دقیق تعریف نشده است (Gleeson et al., 2021). تمام آب زیرزمینی را که مربوط به آغاز هولوسن[۱۲] (تقریباً ۱۲۰۰۰ سال قبل از آخرین یخبندان کره زمین) هستند به عنوان آب زیرزمینی فسیلی تعریف می‌کنند (Series, 2005). آب زیرزمینی غیرفسیلی مربوط به کمتر از ۱۲۰۰۰ سال قبل از آخرین یخبندان است. آب زیرزمینی مدرن یا جدید (دارای عمری کمتر از ۵۰ سال) و آب زیرزمینی جوان دارای عمری بین آب زیرزمینی فسیلی و مدرن بوده که با آب زیرزمینی فسیلی بسیار متفاوت است. اگر آبخوان همگن و همسان باشد، یعنی هدایت هیدرولیکی در همه جا یکسان و مستقل از جهت باشد، خطوط هم‌پتانسیل، به جز نزدیک به منابع آب‌سطحی، تقریباً افقی هستند. در این مورد، یک معادله ساده که سن آب زیرزمینی را به عنوان تابعی از فاصله از سطح آب زیرزمینی (z) توصیف می‌کند، می‌تواند به صورت زیر تعریف شود (Broers, 2004):

$$t = \frac{nD}{R}\ln\left(\frac{D}{D-z}\right) \quad (۲)$$

در معادله ۲، t سن لایه‌های آب زیرزمینی بر حسب سال، n تخلخل قابل تخلیه، R نرخ تغذیه بر حسب میلیمتر در سال، D ضخامت لایه اشباع آبخوان بر حسب متر و z عمق زیر سطح آب زیرزمینی بر حسب متر است. این معادله نشان می‌دهد که از نظر تئوری، آب زیرزمینی جدید تجدیدپذیر فقط نزدیک به سطح آبخوان، وجود دارد. بدیهی است که در واقعیت سفره‌های آب زیرزمینی ناهمگن و ناهمسان هستند در حالی که نرخ تغذیه معمولاً به طور همگن در سراسر سطح توزیع نمی‌شود. بنابراین، اگرچه زمان‌ماند آب زیرزمینی به طور کلی با عمق افزایش می‌یابد، اما سن آب زیرزمینی برای یک عمق معین ممکن است به طور قابل توجهی متفاوت باشد. آبخوان‌هایی که در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارند، میانگین بارندگی بلندمدت کمتر از تبخیر پتانسیل بلندمدت است. در این حالت، سطح ایستابی خیلی پایین‌تر از تراز رودخانه است. این نوع آبخوان‌ها گه‌گاه در اثر دوره‌های کوتاه بارندگی شدید و جریان‌های نشتی تغذیه می‌شود. در چنین سیستم‌هایی، ذخایر آب زیرزمینی باقیمانده از زمان‌هایی که تغذیه

بسیار زیاد بوده است؛ به عنوان مثال می‌توان به آبخوان نوبین در آفریقا[13] اشاره کرد (Margat and Van der Gun, 2013) کـه آخرین بـار در طول دوره مرطوب آفریقا بین ۵ تا ۱۵ هزار سال قبل از آخـرین یخبندان تغذیه شده است (Claussen et al., 2017). در ایـن سیستم، سن آب زیرزمینی منعکس کننده بزرگی نرخ جایگزینی در مقابل مقدار تغذیه است. در مـورد آبخوان نوبین، همچنین شواهدی از تناوب دوره‌های خشک و مرطوب در ۲۰۰ هزار سال گذشته (Castañeda et al., 2009) پیدا شده و احتمالاً قبل از آن وجود دارد، زیرا مدت زمان ایزوتوپ‌های کریپتون نشان داد که سن نمونه‌های گرفته شده از آبخوان نوبین در عمق ۱۲۰۰ متری سنی در حدود یک میلیون سال دارند (Sturchio et al., 2004).

درک تفاوت بین آب زیرزمینی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، بر نوع استفاده از آن نیز تأثیر می‌گذارد. اگر آب زیرزمینی تجدیدپذیر باشند، یعنی حجم و/یا نرخ جایگزینی آن بالا باشد، نرخ برداشت آب زیرزمینی حداقل در ابتدا، با نرخ جایگزینی آن تعیین می‌شود. زمانی که آب زیرزمینی تا حد زیادی تجدیدناپذیر است، بهره‌برداری از آب زیرزمینی با «ذخیره قابل استخراج» تعیین می‌شود، یعنی حجم آب زیرزمینی با کیفیت کافی که می‌تواند (از لحاظ فنی و اقتصادی) از سفره در یک دوره طولانی استخراج شود (Jasechko et al., 2017).

مبتنی بر تعریف (Margat et al., 2006)، افت آب زیرزمینی، به عنوان برداشت طولانی (چند سالانه) آب زیرزمینی از یک سفره زیرزمینی در مقادیری بیش از متوسط ظرفیت جایگزینی سالانه تعریف شده است که منجر به افت مداوم تراز آب زیرزمینی و کاهش حجم آبخوان می‌شود. در صورتی که عملاً تغذیه برای آب زیرزمینی صورت نپذیرد، برداشت از آب زیرزمینی تجدیدناپذیر منجر به تخلیه تقریباً نامحدود آبخوان می‌شود که به آن آبدهی استخراجی[14] نیز می‌گویند (جدول ۱). باید توجه داشت که این تعریف یک دیدگاه حالت ماندگار در مورد افت آب زیرزمینی است. در واقع، افزایش برداشت در فصول خشک اغلب باعث افت زیاد و به دنبال آن بازتعادل جزئی تراز آب ناشی از تغذیه در فصول مرطوب می‌شود. همچنین، تنوع چند ساله در سال‌های خشک و مرطوب ممکن است باعث شود دوره‌های تخلیه با دوره‌های احیاء آبخوان متناوب شود (Scanlon et al., 2012). در این حالت یک الگوی نوسانی تغییر ذخیره آب زیرزمینی مبتنی بر یک روند نزولی بلندمدت قرار می‌گیرد.

با توجه به مفهوم سن آب زیرزمینی می‌توان گفت که آب زیرزمینی تجدیدناپذیر بخش از منابع آب زیرزمینی هستند که زمان تجدیدپذیری آنها بسیار بزرگ است. در واقعیت چون مفهوم تجدیدپذیری به «دوره عمر بشری» محدود شده است؛ بسیار از منابع در دوره عمر بشری قابل «جایگزینی» نیست و لذا از این بابت به این منابع، منابع تجدیدناپذیر گفته می‌شود (Bierkens and Wada, 2019). به بیان دیگر این منابع به دلیل ناچیز بودن متوسط نرخ تغذیه سالانه امکان جایگزینی آن در صورت مصرف به دلیل داشتن زمان‌ماند بسیار زیاد وجود ندارد. در برخی از منابع پیشنهاد شده است تا منابعی که دوره تجدید آن بیش از ۵۰۰ سال است ذخایر تجدیدناپذیر تلقی شوند. این ذخایر بر اساس معادله (۲) متوسط تجدید آبخوان کمتر از ۰/۲ درصد ذخیره آبخوان را دارند (Bredehoeft and Alley, 2014). به بیان دیگر مطابق تعاریف جدول مرزی مشخص در تعارف برای بیان تجدیدپذیر بودن و یا تجدیدناپذیر بودن آب زیرزمینی وجود ندارد. لذا ضروری است تا رویکردهایی که تاکنون برای تعریف تجدیدپذیر آب زیرزمینی استفاده شده است مورد بررسی قرار گیرد. هنوز هم در بسیاری از کشورها این امر کاملاً شفاف نیست که آیا آب زیرزمینی منبعی تجدیدپذیر است که باید بر اساس «پارادایم پایایی» حفظ و نگهداری شود و یا منبع تجدیدناپذیر است و می‌توان بر اساس رویکرد آبدهی استخراج آن را تخلیه نمود (Derakhshan et al., 2022). در این بخش مفهوم بنیادی برای درک مفهوم تجدیدپذیری آب زیرزمینی به پایان رسیده است و اکنون می‌توان تشریح مقالات اخیر که به تشریح مفهوم «گیرش» پرداخته‌اند مورد بحث قرار گیرد.

۲-۳- مفهوم بنیادی گیرش

قبل از اینکه این سؤال پاسخ داده شود که «آیا آب زیرزمینی یک منبع تجدیدپذیر هست یا خیر؟» لازم است تا ابتدا «منبع تجدیدپذیر» تعریف شود «منابع طبیعی (مانند آب شیرین، جنگل و یا انرژی تجدیدپذیر) اگر با نرخی کمتر از نرخ جایگزینی استفاده شوند؛ به گونه‌ای که قابلیت تجدید خود تحت این شرایط به‌طور نامحدود بتواند حفظ کند و امکان استفاده از آن منبع وجود داشته باشد منبع تجدیدپذیر نامیده می‌شوند.

Table 1- Concepts related to groundwater renewability (Persian columns are redundant of English columns)
جدول ۱- تعاریف اتخاذ شده مرتبط با تجدیدپذیری آب زیرزمینی (ستون‌های فارسی تکرار ستون‌های انگلیسی است)

نویسنده	Concepts/ Term	مفهوم/گزاره	Definition adopted	شرح
Margat et al. (2006)	Non-renewable GW Average GW Age ~ >=100	آب زیرزمینی تجدیدناپذیر متوسط سن =><۱۰۰	Groundwater with mean renewal times surpassing human time scales (>100 years)	آب زیرزمینی که میانگین زمان تجدیدپذیری آن فراتر از مقیاس‌های «دوره عمر بشری» است (بیش از ۱۰۰ سال)
	Non-sustainable GW (Called 'overexploitation')	استفاده ناپایا از آب زیرزمینی (اضافه‌برداشت)	Prolonged (multi-annual) withdrawal of groundwater from an aquifer in quantities exceeding average annual replenishment, leading to a persistent decline in groundwater levels and reduction of groundwater volumes	برداشت بیش از متوسط ظرفیت تغذیه آب زیرزمینی در یک دوره طولانی مدت (چند سالانه) بگونه‌ای که باعث افت مزمن تراز آبخوان شده، و موجب کاهش ذخیره استاتیک آبخوان شود.
	GW Mining	آب زیرزمینی استخراجی	Withdrawal of groundwater from an aquifer having predominantly non-renewable groundwater and very small or no replenishment, causing virtually indefinite depletion of aquifer reserves	برداشت قابل‌توجه از ذخایر آبخوان تجدیدناپذیر، و یا آبخوانی که تجدیدپذیری آن بسیار کوچک است بگونه‌ای که موجب افت مستمر، قابل توجه و گسترده آبخوان شود.
Jasechko et al. (2017)	Fossil GW (GW Age<12000)	آب زیرزمینی فسیلی (<۱۲۰۰۰ سن)	Groundwater that has recharged before 12000 BP. Relates to the absolute age of groundwater	آب زیرزمینی که تغذیه آن مربوط به بیش از ۱۲۰۰۰ سال قبل می باشد (آخرین یخبندان کره زمین)
Gleeson et al. (2016)	Young GW (50<GW Age<12000)	آب زیرزمینی جوان (۱۲۰۰۰>سن > ۵۰)	Groundwater that has recharged after 12000 BP but more than 50 years ago. Relates to the absolute age of groundwater	آب زیرزمینی که تغذیه آن مربوط به کمتر از ۱۲۰۰۰ سال قبل است. اما سن تغذیه آن بیش از ۵۰ سال بیشتر است
	Modern GW (GW Age<50)	آب زیرزمینی جدید (۵۰> سن)	Groundwater that has recharged less than 50 years ago. Relates to the absolute age of groundwater	آب زیرزمینی که تغذیه آن کمتر از ۵۰ سال قبل است

اما اگر در معرض بهره‌برداری بیش از حد/ بهره‌کشی (برداشت بیشتر از نرخ جایگزینی) قرار گیرند، می‌تواند به یک منبع تجدیدناپذیر تبدیل شوند (Park and Allaby, 2017). برای تبیین بهتر مفهوم نرخ جایگزینی در دوره عمر بشری (Gleeson et al., 2020b) بهتر است تا ابتدا با مفهوم گیرش آشنا شد. معادلات ۳ تا ۶ برای تبیین مفهوم گیرش آورده شده است در تمام این معادلات با فرض اینکه تغییرات طبیعی (ناشی از تغییر اقلیم و غیره) وجود ندارد نوشته شده‌اند. در سال ۲۰۰۹ بردهوف (Bredehoeft and Durbin, 2009) و سپس کاتبرت در سال ۲۰۲۲ (Cuthbert et al., 2022) گیرش را به عنوان «میزان تغییرات در مجموع نرخ‌های تغذیه و تخلیه طبیعی» تعریف نمودند؛ که بر اساس معادله ۶ محاسبه شده و با نماد C مشخص شده است. در معادله ۳، ds/dt تغییرات حجم ذخیره آبخوان نسبت به زمان، R نرخ تغذیه بر حسب میلیمتر در سال، D نرخ تخلیه به جز پمپاژ و Q نرخ پمپاژ است در معادله ۴، R_0 نرخ تغذیه قبل از پمپاژ (توسعه برداشت آبخوان) ΔR_Q تغییر نرخ تغذیه ناشی از پمپاژ و در معادله ۵، D_0 نرخ تخلیه قبل از توسعه برداشت از آب زیرزمینی ΔD_Q تغییر در نرخ تخلیه ناشی از پمپاژ تعریف می‌شود:

$$\frac{ds}{dt} = R - D - Q \quad (۳)$$

$$R = R_0 + \Delta R_Q \quad (۴)$$

$$D = D_0 + \Delta D_Q \quad (۵)$$

$$C = \Delta R_Q - \Delta D_Q \quad (۶)$$

در یک تعریف کلی از منابع طبیعی تجدیدپذیر، ادغام ضمنی دو حالت متمایز با یکدیگر مطابق شکل ۴ ترکیب شده‌اند اول: گیرش از شار و یا جریان انرژی یا ماده به عنوان مثال، این مورد بیشتر برای گیرش انرژی خورشیدی یا گیرش انرژی باد مورد کاربرد است که ممکن است همراه با وسایل ذخیره انرژی مورد استفاده قرار گیرند، سپس آنها را به اشکال دیگر انرژی قابل استفاده تبدیل می‌کنند. تجدیدپذیری برخی منابع آب سطحی را نیز می‌توان مشابه مثال‌های بالا درک شود. به این روش «گیرش از شارش»[۱۵] گفته می‌شود. به عنوان نمونه گیرش باد در یک آسیاب بادی نمونه‌ای دیگر است. در زمان‌های گذشته که امکان ذخیره انرژی خورشیدی در باتری وجود نداشته است بنابراین، گیرش نور خورشید نیز توسط جوامع بشری اتفاق نمی‌افتاده، اما اکنون که به سرعت پانل‌های خورشیدی و باتری‌های لیتیمی در حال رشد هستند این جذب و ذخیره‌سازی گیرش محسوب می‌شود. در مورد آب فقط مورد آبیاری که آب را از حالت اولیه (حالت مایع) خارج می‌کند و با تبخیر– تعرق به ماده خشک تبدیل می‌کند گیرش محسوب می‌شود (Wada et al., 2010). در مقابل این روش، در سایر منابع طبیعی که ظرفیت بسیار بیشتری برای ذخیره‌سازی طبیعی دارند، و امکان انباشته شدن و سپس برداشت یا بهره‌برداری برای استفاده انسانی را فرآهم

می‌آورند، گیرش از جریان مستقیماً صورت نمی‌پذیرد؛ و گیرش از ذخیره است (نوع دوم). برای مثال، گیرش چوب از جنگل، گیرش ماهی از دریا، و گیرش آب از تجمع آب‌سطحی با حجم زیاد (مانند دریاچه) نمونه‌هایی از گیرش از ذخیره هستند که برای آنها در این مقاله از اصطلاح «گیرش از انبارش»[16] استفاده شده است. به بیان ساده، در گیرش از شارش محدودیت زمانی جدی است و اگر در هر لحظه گیرش اتفاق نیافتد، با عبور جریان امکان گیرش از دست می‌رود. اما در نوع دوم که گیرش از انبارش است، تا حدودی محدودیت زمانی به دلیل وجود ذخیره مناسب از قبل، برداشته شده است. به عنوان نمونه اگر برش چوب از جنگل (گیرش چوب) یک یا چند روز دیرتر صورت نپذیرد، چیزی از دست نرفته است؛ زیرا برای زمان‌های آتی امکان گیرش فراهم است. ولی در جریان رودخانه و یا جریان باد، اگر در لحظه عبور جریان، انحراف استفاده از جریان به شکل دلخواه (گیرش از شارش) اتفاق نیافتد در زمان‌های دیگر امکان آن فراهم نیست (Taylor, 2009).

در شکل ۴ ارتباط شارشی و یا انبارشی بودن منابع طبیعی با رویکرد تحلیل تجدیدپذیری مبتنی بر مبانی شارش و یا انبارش منبع مورد نظر مورد تحلیل قرار گرفته است. برای تبیین بهتر تجدیدپذیری آب زیرزمینی از رنگ سبز که خود از ترکیب رنگ آبی (نشانگر تجدیدپذیری منابع شارش مبنا) و رنگ زرد (نشانگر تجدیدپذیری منابع انبارش مبنا) استفاده شده است. منابعی که در سمت راست شکل ۴ واقع شده و با رنگ آبی مشخص شده‌اند به منابع طبیعی اشاره مانند باد اشاره دارد که کاملا شارشی بوده و نقش انبارش در تبیین تجدیدپذیری این منابع بسیار ناچیز است. و در نقطه مقابل منابعی که در سمت چپ شکل ۴ واقع شده و با رنگ زرد مشخص شده‌اند به منابعی اشاره دارد کاملا انبارشی بوده و شارش در تبیین تجدیدپذیری این منابع نقش ناچیزی دارد. بنابراین تجدیدپذیری منابع آب زیرزمینی با رنگ سبز (ترکیب رنگ زرد و آبی) مشخص گردیده است و بیان کننده این نکته است که شارش و انبارش بصورت توأم در تبیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی نقش دارند.

مطابق شکل ۴ گیرش از آب زیرزمینی با نوع اول گیرش از شار و نوع دوم گیرش از ذخیره بسیار متفاوت است؛ زیرا که در گیرش از آب زیرزمینی هر دو مورد بصورت توأم در حال رخ دادن است. در عوض، آب زیرزمینی باید در نقاط مجزا از طریق چاه‌ها، از زمین پمپاژ شود. از این رو، در حالی که ممکن است تعریف تجدیدپذیری آب زیرزمینی با استفاده از رویکرد «مبتنی بر انبارش» بسیار وسوسه‌انگیز باشد (Taylor, 2009)، زیرساخت‌های مورد نیاز برای گیرش آب زیرزمینی به دلیل هزینه بسیار زیاد در جابه‌جایی چاه در مقایسه با گیرش از جنگل یا شیلات بسیار متفاوت است. علاوه بر این، همانطور در ادامه توضیح داده می‌شود، و رخداد گیرش در سیستم آب زیرزمینی بسیار پیچیده‌تر است. میزان تخصیص آب زیرزمینی براساس نرخ تغذیه طبیعی (میزان شارش) به تنهایی قابل قبول نیست؛ زیرا نرخ تجدیدپذیری ناشی از شارش، مربوط به امروز بوده ولی حجم ذخیره آبخوان ممکن است متعلق به میلیون‌ها سال پیش باشد. به عنوان نمونه وقتی از دریا ماهی یا از جنگل درخت برداشت می‌شود، به اندازه یک زمان‌ماند مشخص (طول دوره رشد ماهی و یا طول دوره رشد درخت) وجود دارد (که همان ظرفیت جایگزینی است).

اما در مورد آب زیرزمینی مقیاس بسیار بزرگ و زمان ماند بسیار متغیر است؛ و از این رو، آب زیرزمینی به راحتی در هیچ یک از دو دسته بندی (مبتنی بر شارش یا مبتنی بر انبارش) قرار نمی‌گیرد (Ferguson et al., 2020). بنابراین ضروری است در تبیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی رویکردی توأم (از تجدیدپذیری مبتنی بر شارش و نیز تجدیدپذیری مبتنی انبارش) مورد استفاده قرار گیرد. که در شکل ۴، این مفهوم با گیرش از شارش–انبارش[17] معرفی گردیده است.

۲-۴- طبقه‌بندی رویکردهای تبیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی

توصیف رویکردهایی که برای تبیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی مورد توسعه قرار گرفته است در جدول ۲ و نمودار گرافیکی تحلیل این سیر تکامل در شکل ۵ آورده شده است. رویکردهای اولیه برای تعریف تجدیدپذیری آب زیرزمینی مبتنی بر شارش مورد توسعه قرار گرفته‌اند. این رویکرد فقط به مولفه‌های شارش جریان (ورودی و خروجی) را در نظر گرفته بر اساس اختلاف آن میزان تجدیدپذیری برآورد می‌شود.

این روش در میان هیدرولوژیست‌ها با عنوان بیلان معروف است (FAO, 2003). در این رویکرد، از توجه به انبارش و گیرش غفلت نموده، و همچنین چارچوب زمانی مناسب برای تعریف تجدیدپذیری آبخوان مورد توجه قرار نداده است (Gleeson and Richter, 2018). با توسعه برداشت از ذخایر آب زیرزمینی و شروع افت این منابع، تغییر ذخیره استاتیک آبخوان به عنوان یک فاکتور در تعیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی مورد توجه قرار گیرد. تغییر ذخیره استاتیک آبخوان به رویکرد انبارش مرتبط بوده، و بصورت میانگین زمان تجدیدپذیری تعریف گردید (Margat et al., 2006).

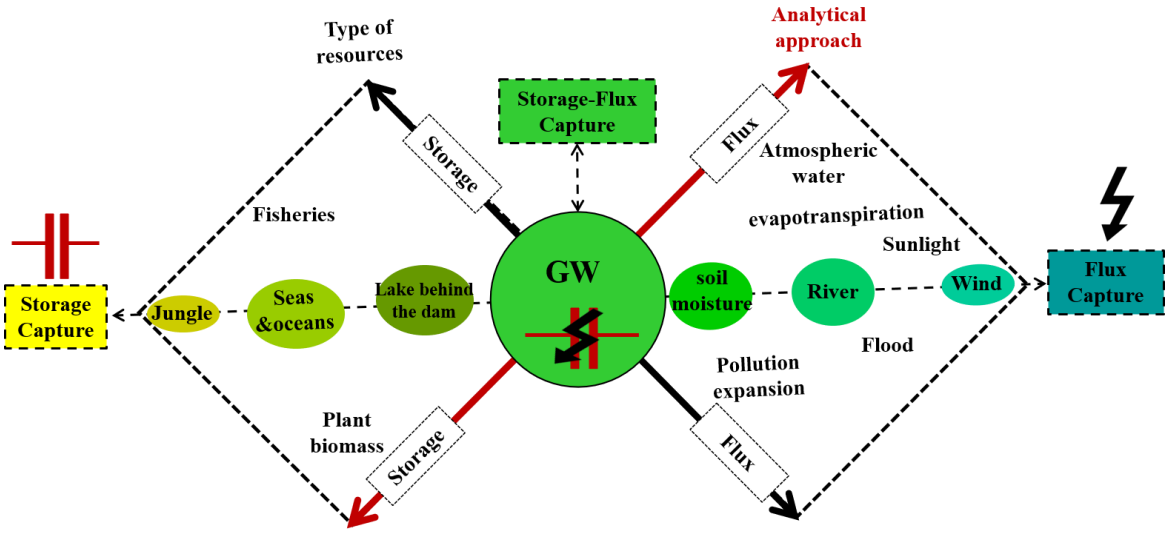

Fig. 4- Relation between the analytical approach and the resource type to determine the natural resources renewability base on flux and storage (based on this study)

شکل ۴- ارتباط رویکرد تحلیلی و نوع منبع، از نظر شارشی و یا انبارشی بودن برای تعیین تجدیدپذیری منابع طبیعی (تحقیق حاضر)

بر اساس این تعریف میانگین زمان تجدیدپذیری از تقسیم حجم ذخیره استاتیک آبخوان بر نرخ تغذیه سالیانه آب زیرزمینی بدست می‌آید. در صورتی که میانگین زمان تجدیدپذیری کمتر از ۱۰۰ سال شود ذخیره مورد نظر تجدیدپذیر و در صورتیکه بیشتر از ۱۰۰ سال شود ذخیره مورد نظر تجدیدناپذیر است. از نقاط قوت این رویکرد توجه به انبارش بوده، ولی باز هم این رویکرد از توجه به مفهوم گیرش در تعیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی غفلت نموده است. این رویکرد در تعریف تجدیدپذیری به ویژگی انبارشی بودن آب زیرزمینی (به شکل ۴ مراجعه نمایید) توجه نموده است و با مربوط کردن تجدیدپذیری به کل حجم آبخوان برای اولین بار تجدیدپذیری آب زیرزمینی مبتنی بر لحاظ نمودن ویژگی انبارشی بودن آب‌زیرزمینی مورد تعریف قرار گرفته است اما همچنان جلوگیری از افت مزمن در آن دیده نشده است. تعریف ارائه شده در این رویکرد بسیار راف بوده و قابل اثبات نیست و همچنین از منظر هیدرولیکی مورد سوال است. در سال های بعد این پیشنهاد مورد توجه واقع شد و دوره زمانی ۵۰ تا ۱۰۰ سال که معادل دوره عمر بشری نیز است برای برآورد متوسط تجدیدپذیری سالیانه توسط Bierkens and Wada (2019) مورد تأکید قرار گرفت.

Alley et al. (2018) برای اولین بار در تعریف تجدیدپذیر آب زیرزمینی دخالت‌های بشری در قالب پمپاژ آب زیرزمینی را مورد توجه قرار داد و بر اساس آن، شاخص استرس توسعه برداشت از ذخایر آب زیرزمینی ارائه نمود. این شاخص بر اساس نسبت نرخ متوسط بلندمدت پمپاژ به نرخ متوسط بلندمدت تغذیه تعریف گردید. شاخص ارائه شده فقط بحث شارش مورد توجه قرارداده، و از توجه به تغییر انبارش غفلت نموده است. از قوت این شاخص می‌توان به مورد توجه قرار دادن نقش دخالت بشری بصورت محلی یا منطقه‌ای در شاخص استرس توسعه آب زیرزمینی اشاره نمود. سپس Gleeson et al. (2020a) دخالت جوامع بشری در ایجاد اخلال در سیستم طبیعی آب زیرزمینی با مورد توجه قرار دادن مفهوم گیرش و کاربرد آن در ارائه مفهوم جدید برای تبیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی مورد توجه قرار گرفت. ایشان در دوره محاسبه گیرش از آب زیرزمینی را با اصلاح پیشنهاد (Bierkens and Wada, 2019) در دوره عمر بشری ارائه نمود که بیان کننده محدودیت عمر انسان تا به امروز است. این زمان کوتاه‌تر، به دلیل ارتباط بهتر این مفهوم با افق زمانی استفاده کنندگان از آب زیرزمینی انتخاب شده است. به عبارت دیگر اگر چنین آب‌زیرزمینی‌ای پمپاژ شود، دیگر امکان تجدید آن برای نسل کنونی فراهم نیست و در واقع می‌توان آن را برای نسل حاضر غیر قابل تجدید دانست.در این تعریف علاوه بر توجه توأم به شارش و انبارش به حفظ حداقل جریان برای حفاظت از اکوسیستم وابسته به آب زیرزمینی در تعریف اضافه نمود. مهمترین ایرادی که در این تعریف وجود دارد این است که به نقش بهره‌برداران در تعریف تجدیدپذیری آب زیرزمینی توجه نشده، تجدیدپذیری و یا تجدیدناپذیر را به خود منبع آب زیرزمینی مربوط ساخته است.

Cuthbert et al. (2022) به پویایی در سیستم آب زیرزمینی توجه ویژه نموده، و این سیستم را به عنوان یک سیستم دینامیک در نظر گرفته است. ایشان مفهوم «بازتعادل»[18] (تعادل مجدد) را به مفهوم «گیرش در دوره عمر بشری» ارائه شده توسط Gleeson et al. (2020a) را اضافه نمود. در این تعریف بهبود یافته، تجدیدپذیری آب زیرزمینی به نوع استفاده بهره‌برداران مرتبط شده است. در این تعریف به تنظیم برنامه مدیریتی موجود بر اساس برنامه‌های مبتنی بر رعایت حقوق بین نسلی، و همچنین توانمندسازی بهره‌برداران برای حفاظت از آب زیرزمینی تأکید دارد.

در این تعریف تعادل دینامیکی جدید در بازه‌های زمانی عمر بشری (تقریبا ۵۰ تا ۱۰۰ سال) نیز تجدیدپذیر محسوب می‌شود.

Table 2- Groundwater Renewability definitions in significant approaches (Persian columns are redundant of English columns)

جدول ۲- رویکردهای غالب توسعه یافته برای تعریف تجدیدپذیری آب‌زیرزمینی (ستون‌های فارسی تکرار ستون‌های انگلیسی هستند)

تعریف	Definition	مفهوم	Concepts	Classification Approach	نویسنده
این رویکرد تجدیدپذیری آب زیرزمینی را معادل تغذیه سالانه آب زیرزمینی می‌داند.	This approach equates the renewable portion of groundwater to mean annual groundwater recharge	رویکرد مبتنی بر شارش (ایجاد تعادل از شار جریان)	Balance of fluxes	Flux based	FAO (2003)
این رویکرد آب زیرزمینی تجدیدپذیر یا تجدیدناپذیر را با استفاده از مقدار آستانه یا میانگین زمان تجدید تعریف می‌کند، که معمولاً به عنوان نسبت حجم ذخیره آبخوان به نرخ شار (پیش از پمپاژ) تعریف گردید است.	Storage-based approaches define renewable or non-renewable groundwater using a threshold value or the mean renewal time, normally defined as the ratio of groundwater storage to the (pre-pumping) recharge rate	رویکرد مبتنی بر انبارش (میانگین زمان تجدیدپذیری برابر با نسبت حجم آبخوان به نرخ تغذیه سالانه است)	Mean renewal time S/R <100 years	Storage based	Margat et al. (2006)
نسبت نرخ متوسط بلندمدت پمپاژ به نرخ متوسط بلندمدت تغذیه (Q/R)	The ratio of long-term average annual pumping (Q) to the long-term average annual recharge (R)	شاخص استرس توسعه برداشت از آب زیرزمینی مبتنی بر توجه به مفهوم گیرش	Groundwater development stress = Q/R (Considers Capture)	Flux based	Alley et al. (2018)
حفاظت بلندمدت از ذخیره آبخوان، کیفیت و پویایی جریان‌های آب زیرزمینی با استفاده معقول، عادلانه همراه با حکمرانی و مدیریت بلندمدت.	Groundwater sustainability is maintaining long-term, dynamically stable storage and flows of high-quality groundwater using inclusive, equitable, and long-term governance and management	گیرش به وسیله پمپاژ در دوره عمر بشری	Capture of on *human timescale*	Flux & Storage Based	Gleeson et al. (2020)
استفاده از آب زیرزمینی تجدیدپذیر امکان تعادل‌بخشی پویا و پایدار تراز و کیفیت آب زیرزمینی را در عمر بشری (۵۰ تا ۱۰۰ سال) فراهم می‌کند.	Renewable groundwater use allows for dynamically stable re-equilibrium of groundwater levels and quality on human timescales (~ ۱۰۰-۵۰ years)	گیرش و بازیابی تعادل در دوره عمر بشری	Capture and re-equilibrium on *human timescale*	Flux & Storage Based	Cuthbert et al. (2022)

۳- جمع‌بندی

شکل ۵ به تشریح شماتیک از تکامل رویکردهای تبیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی پرداخته است. در این شکل ذوزنقه تو خالی نشان دهنده توجه به شارش بدون در نظر گرفتن انبارش، ذوزنقه تو پر نشان دهنده رویکرد شارش–انبارش است. رویکردهای اولیه در تعیین تجدیدپذیری دخالت جوامع بشری را در نظر نمی‌گرفتند. به عنوان نمونه کتاب FAO رویکرد تبیین تجدیدپذیری را مبتنی بر شارش (بیلان منابع آب) مورد تعریف قرار داده است (FAO, 2003). با توسعه برداشت از آب زیرزمینی افت ذخایر استاتیک آبخوان ظهور نمود؛ که کتاب (Margat et al., 2006) به این نکته توجه نموده و سعی کرده است تعریف تجدیدپذیری را مبتنی بر آن اصلاح کند. در راستای کنترل اضمحلال منابع آب زیرزمینی پژوهشگران سعی در توسعه شاخص برای مدیریت دخالت جوامع بشری در سیستم آب زیرزمینی پرداختند که شاخص نسبت پمپاژ بلندمدت به تجدیدپذیری بلندمدت نمونه از آن است (Alley et al., 2018). بنابراین امروزه دخالت جوامع بشری در سیستم آب زیرزمینی در قالب پمپاژ آب زیرزمینی به دلیل گستردگی پیامدهای نامطلوب (فرونشست، اضمحلال منابع سطحی، شور شدن آبخوان) انکارناپذیر است.

Gleeson et al. (2020) علاوه بر در نظر گرفتن کلیه مواردی که تاکنون در رابطه با تعریف تجدیدپذیری آب زیرزمینی مورد تشریح قرار گرفته است مفهوم «محدودیت فیزیکی برای پایایی آب زیرزمینی[۱۹]» که توسط Bierkens and Wada (2019) مورد توسعه قرار گرفت را به رویکرد تعریف تجدیدپذیری خود اضافه نمود.

محدودیت فیزیکی برای پایایی که بر تاثیر تخلیه آب زیرزمینی به اکوسیستم (فلش و حجم آب آبی رنگ داخل رودخانه) به این مفهوم اشاره دارد که تراز آب زیرزمینی نمی‌تواند از حدی پایین‌تر برود که جریان اکوسیستم وابسته به آب زیرزمینی قطع شود. همچنین توجه به این مفهوم که گیرش باید در دوره عمر بشری (۵۰ تا ۱۰۰ سال) رخ دهد را مورد تأکید قرار داد.

Cuthbert et al. (2022) به ارتباط توأم سیستم اقتصادی–اجتماعی به سیستم آب زیرزمینی توجه نموده، و سعی کرده تا با درنظر گرفتن این واقعیت عینی تعریف تجدیدپذیری آب زیرزمینی (Gleeson et al., 2020) را تکمیل نماید. بر اساس رویکرد ارائه شده توسط ایشان افت تراز آب زیرزمینی به شرط اینکه تعادل جدید در تراز آب زیرزمینی ایجاد کند تجدیدپذیر محسوب می‌شود در این رویکرد برای افت تراز آب زیرزمینی به پویایی در سیستم آب زیرزمینی توجه ویژه نموده، و این سیستم را به عنوان یک سیستم دینامیکی درنظر گرفته است. بر اساس این رویکرد تا زمانی که بهره‌برداری و ایجاد افت و تعادل جدید از محدودیت فیزیکی برای پایایی آب زیرزمینی (قطع ارتباط منابع آب‌سطحی- زیرزمینی) عبور ننموده است برداشت آب از منابع، تجدیدپذیر محسوب می‌شود و در صورتیکی ایجاد تعادل‌های جدید مستمراً کاهشی باشد و تراز آب زیرزمینی از محدودیت فیزیکی پایایی آب زیرزمینی (خشک شدن رودخانه) عبور نماید برداشت از این منابع تجدیدناپذیر محسوب می‌شود. از دیگر نکات بارز در رویکردهای اخیر برای تعریف تجدیدپذیری می‌توان توجه به دوره مدیریت آب زیرزمینی در حد اندازه دوره عمر بشری (۵۰ تا ۱۰۰ سال) اشاره نمود این مفهوم به بیان غیر مستقیم بر رعایت حقوق بین نسلی توسط نسل حاضر اشاره دارد.

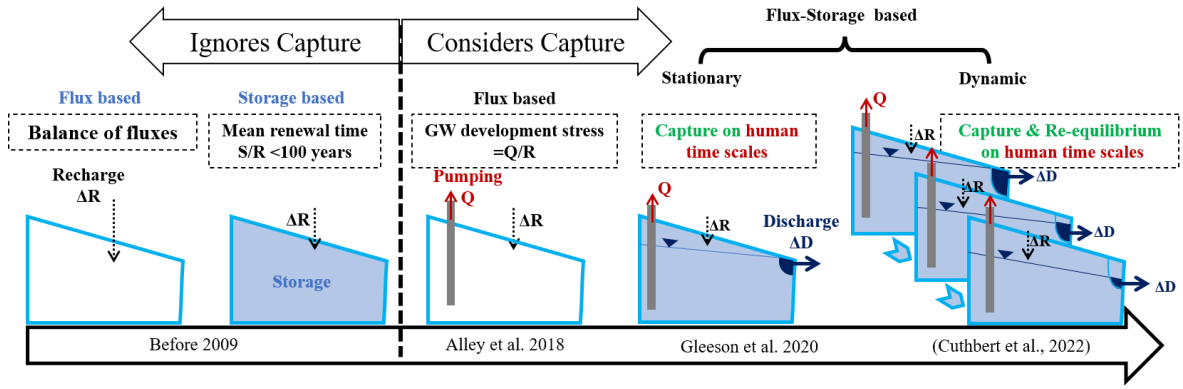

Fig. 5- The evolution of the approaches to Groundwater Renewability (Based on this study)

شکل ۵- تکامل رویکردهای تعیین میزان تجدیدپذیری آب زیرزمینی (تحقیق حاضر)

در مجموع می‌توان اظهار نمود که تجدیدپذیری یک مفهوم سیال بوده، که تبیین درست آن به سادگی امکان‌پذیر نیست. در این میان سیستم آب زیرزمینی به دلیل نقش‌آفرینی توأم شارش و انبارش در تعریف تجدیدپذیری آب زیرزمینی باعث پیچیدگی بیشتر در تعریف دقیق از تجدیدپذیری آب زیرزمینی شده است. بنابراین تعاریف متفاوتی از ظرفیت تجدیدپذیری بر اساس این رویکردهای تحلیلی ارائه شده؛ و این مفهوم در طی دهه‌های اخیر به شدت دستخوش تغییرات بسیار شده است. مفاهیم اخیر بسیار جامع بوده و در چارچوب پایایی گسترده‌تر برای مدیریت آب زیرزمینی قرار می‌گیرد (Ferguson et al., 2020). با پایان یافتن مرور مقالات یک نکته ناگفته مانده است؛ همان‌گونه که در مقدمه به آن اشاره گردید؛ مدیریت آب زیرزمینی با مدیریت خشکسالی یک وابستگی بسیار شدید دارند؛ اگر ذخایر کافی برای گذر از دوره‌های خشکسالی درنظر گرفته نشود آبخوان می‌تواند با چالش‌های جدی رو به رو شود. به ویژه این مورد در خشکسالی‌های شدید و طولانی مدت (ابرخشکسالی[20]) می‌تواند ریسک بسیار خطرناکی را متوجه توسعه نماید (Cook et al., 2015). مدیریت خشکسالی‌های کوتاه‌مدت در بازه «دوره عمر بشری» (دوره بازگشت کمتر از ۱۰۰ سال) مورد توجه بسیاری از مقالات بوده است؛ ولی مدیریت ریسک ابرخشکسالی که برای دوره بازگشت‌های بسیار بزرگ تعریف می‌شود مورد توجه جدی قرار نگرفته است. لذا با توجه و افزایش شدت و تواتر وقایع خشکسالی ناشی از تغییر اقلیم و افزایش آسیب‌پذیری شهرهای بزرگ برای تأمین آب مورد نیاز، ضروری است تا برای افزایش تاب‌آوری توسعه این مورد بررسی شود (Mianabadi et al., 2021). همچنین، لازم به ذکر است که مفهوم تجدیدپذیری آب زیرزمینی یک مفهوم پیچیده است و عدم توجه به این پیچیدگی‌ها موجب می‌شود تا برآورد دقیقی از آن به دست نیاید. برآورد دقیق تجدیدپذیری آب زیرزمینی ضرورتی است که مبتنی بر این مفهوم کمیّت قابل تخصیص از منابع آب را مشخص می‌کند، تخصیص صحیح و عادلانه ضرورتی است برای دستیابی به پایایی و پایایی ضرورتی برای رعایت حقوق اکوسیستم، محیط زیست و نسل‌های آینده است. بنابراین برای دستیابی به پایایی آب زیرزمینی کشورمان لازم است تا ابتدا تعریف و برآوردی دقیق از ظرفیت تجدیدپذیری آب زیرزمینی مشخص شود (Derakhshan, 2023). در راستای پاسخ به این ضرورت، شکل ۶ گام‌های آینده برای حرکت از رویکرد موجود به سوی رویکرد مطلوب (تبیین تجدیدپذیری مبتنی بر پایایی و تاب‌آوری) مورد تحلیل قرار گرفته است.

۳-۱- فراتحلیل

فهم درست تجدیدپذیری موضوعی کلیدی برای مدیریت آب زیرزمینی و مدیریت خشکسالی بوده و رعایت تجدیدپذیری به این دلیل که باید دامنه بسیار طولانی مدتی در ذهن مدیران آبی باشد و همزمان هم باید برای تاب‌آوری در مقابل خطر ابرخشکسالی چاره‌اندیشی شود موضوعی چالش برانگیز است. در ادامه برای درک بهتر این موضوع، مسیر حرکت از وضع موجود مدیریت آب زیرزمینی به وضع مطلوب بر اساس مبانی تشریح شده برای تجدیدپذیری آب زیرزمینی ترسیم شده است. شکل ۶ در راستای پاسخ به این ضرورت مورد توسعه قرار گرفته است. این شکل به تحلیل ارتباط زمان‌ماند آب زیرزمینی (شکل ۲) با «پارادایم پایایی آب زیرزمینی» پرداخته و مسیر حرکت از وضع موجود به وضع مطلوب را ترسیم می‌نماید. خط قرمز رنگ نشان‌دهنده وضعیت پمپاژ از منابع آب زیرزمینی بوده، که به دلیل عدم توجه به ظرفیت تجدیدپذیری، موجب زوال مستمر منابع آب زیرزمینی شده است. بدیهی است که توقف این روند اضمحلال بصورت ناگهانی امکان‌پذیر نیست. لذا ضروری است تا شیب این برداشت از ذخایر آب زیرزمینی تجدیدناپذیر طی یک برنامه بلندمدت کم شده و در نهایت برداشت از ذخایر آب زیرزمینی در اولین مرحله[21] (طی مسیر (۰ ←۱)) به گیرش از شارش (رعایت بیلان منابع آب) محدود شود. در صورت وقوع این مرحله، از نابودی تدریجی آبخوان و سپس توسعه وابسته به آن جلوگیری به عمل خواهد آمد. مرحله دوم تعادل‌بخشی آب زیرزمینی[22] در شکل با طی مسیر (۱ ←۲) مشخص شده است. برای درک بهتر، این مرحله به سه گام خرد شده است.

۱- گام اول: در شرایط خشکسالی، بارش کاهش یافته و در نتیجه میزان تغذیه نیز کاهش می‌یابد. در این شرایط اگر نیاز به پمپاژ از ذخایر استاتیک باشد، لازم است تا این برداشت (و جایگزینی آن) مبتنی بر رعایت اصول «گیرش از انبارش» صورت پذیرد. بافر خشکسالی[23] را در مطالعات Alipor and Derakhshan (2019) و Gazor Habib Abadi and Derakhshan (2023) ببینید.

۲- گام دوم: پس از پیاده‌سازی گام اول، کافی است رویکرد مبتنی بر بازه «عمر بشری» (۵۰ تا ۱۰۰ ساله) و با لحاظ نمودن توأم گیرش از شارش و انبارش شود. در این صورت، خشکسالی‌های با دوره بازگشت تا ۱۰۰ سال در دامنه برنامه مدیریت آب زیرزمینی قرار خواهند گرفت. رزرو خشکسالی[24] را در مطالعه Derakhshan and Omranian Khorasani (2019) ببینید.

۳- گام سوم: با توجه به تغییر اقلیم و تشدید وقایع فرین، آسیب‌پذیری جوامع بشری در مقابل ابرخشکسالی‌ها، به ویژه در شهرهای بزرگ و

پر جمعیت، افزایش یافته است؛ لذا تعیین ذخیره رزرو برای مدیریت این شرایط حاد ضرورت یافته است (Mianabadi et al., 2020). در غیر این صورت آبخوان زوال یافته و توسعه در مقابل وقوع ابرخشکسالی تاب‌آوری لازم را نخواهد داشت و لذا آسیب جدی خواهد دید (Derakhshan et al., 2018). بنابراین در تکمیل رویکردهای پیش‌گفته، پیشنهاد می‌شود در این گام برای تاب‌آوری توسعه در مقابل ابرخشکسالی، رزرو استراتژیک[۲۵] و مدیریت ابرخشکسالی منظور شود. حداکثر خشکسالی محتمل (PMD)[۲۶] را در مطالعه Mianabadi et al. (2021) ببینید.

بصورت خلاصه می‌توان گفت طی این گام‌ها می‌تواند موجب می‌شود تا تبیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی از رویکردهای موجود به سمت رویکردهای مطلوب که مبتنی بر رعایت حقوق نسل‌های آینده است تبدیل شود؛ رعایت رویکردهای اخیر در تبیین تجدیدپذیری می‌تواند محیط زیست، جامعه و اقتصاد را با یکدیگر متعادل نماید (Cuthbert et al., 2022). بر اساس مطالب پیش گفته می‌توان نتیجه گرفت که تعریف دقیق تجدیدپذیری آب زیرزمینی و سپس پیاده‌سازی آن، به دلیل تفاوت بسیار زیاد بین مقیاس‌های زمان‌ماند آب زیرزمینی و عدم ارتباط این مقیاس‌ها، با دوره‌های کوتاه مدیریتی (عمر دولت‌ها که حدود ۵ سال است) بسیار دشوار است. در تعاریف اخیر تجدیدپذیری به نحوه استفاده از آب زیرزمینی، چگونگی مدیریت و ارزش‌گذاری این منابع حیاتی گره خورده است و همانگونه که در شکل ۶ مشخص شده است ضروری است تا افق برنامه‌ریزی برای تخصیص آب زیرزمینی با افق جایگزینی این منابع مرتبط شود. توجه به ارتباط دوره‌های سیاستگذاری برای بهره‌برداری از منابع آب با زمان ماند برای جایگزینی منابع آب زیرزمینی در چرخه هیدرولوژی از نکات مورد توجه در رویکردهای اخیر است که در محور افقی شکل ۶ بصورت مشخص مجزا گردیده است (توجه به مفهوم برداشت و جایگزینی انبارش آبخوان در دوره عمر بشری).

بنابراین، ضروری است تا اهداف پایایی آب زیرزمینی را برای بسیاری از سفره‌های زیرزمینی در افق زمانی چند نسلی (۵۰ تا ۱۰۰ سال) تعیین شود؛ و در عین حال باید تأثیرات بلندمدت مورد توجه قرار گیرد. از طرف دیگر، میانگین زمان‌ماند و توجه به نرخ جایگزینی آب زیرزمینی می‌تواند به عنوان ابزاری کارا و مفید برای سنجش دستیابی به اهداف پایایی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۲- نتیجه‌گیری

مدیریت آب زیرزمینی وابسته به تخصیص، و تخصیص صحیح وابسته به فهم تجدیدپذیری است. در واقع، تعیین کمیّت تجدیدپذیری آب زیرزمینی، شالوده اصلی تخصیص است. اما علی‌رغم این اهمیت؛ تا کنون این مفهوم با ابهام روبرو بوده است.

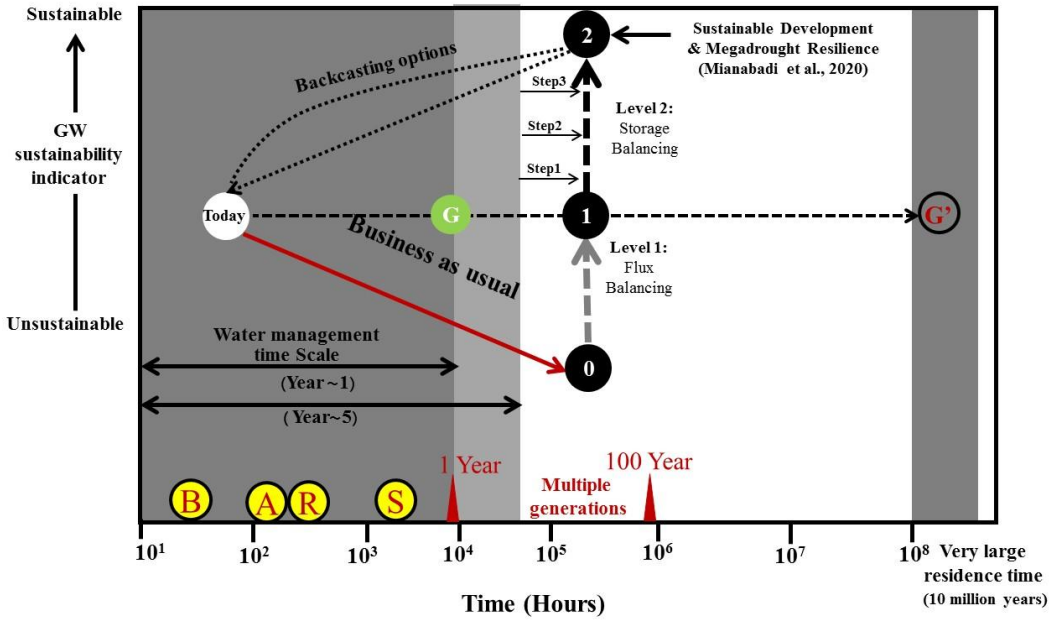

Fig. 6- Towards storage balancing base on groundwater renewability concepts (Based on this study)
شکل ۶- حرکت از وضع موجود به وضعیت مطلوب بر اساس رعایت مبانی تجدیدپذیری (نتایج پژوهش حاضر)

این مقاله، با تحلیل رویکردهای تعیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی به رفع ابهام از این مفهوم کلیدی در مدیریت آب پرداخته است. به عبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت که دانستن تجدیدپذیری آب زیرزمینی خیلی مهم است و در صورت عدم درک درست از مفهوم تجدیدپذیری نه تنها امکان تخصیص معقول وجود ندارد بلکه امکان ایجاد تاب‌آوری در مقابل خشکسالی هم فراهم نخواهد گردید.

همانگونه در که در شکل ۴ توضیح داده شده است. تعریف تجدیدپذیری منابعی مانند باد که «گیرش» فقط از شارش رخ می‌دهد با تعریف تجدیدپذیری منابعی مانند جنگل که «گیرش» از انبارش درختانی که در دوره‌های قبل رشد کرده‌اند رخ می دهد بسیار متفاوت است. در این تحقیق تشریح گردید که کاربرد «گیرش» در تبیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی بسیار پیچیده‌تر از کاربرد آن در سایر منابع است؛ زیرا در آب زیرزمینی «گیرش» از شارش (تغذیه و یا تخلیه) و از انبارش (ذخایر استاتیک قبلی آبخوان) بصورت توأم رخ می‌دهد. بنابراین فهم درست تجدیدپذیری سیستم پیچیده آب زیرزمینی چالشی جدی هم در حوزه مفهوم و هم در حوزه پیاده‌سازی مفهوم است. در این تحقیق سعی شد تا در پاسخ به این ضرورت، به مرور رویکردهای تبیین مفهوم تجدیدپذیری آب زیرزمینی بپردازد. بدیهی است که تمام موارد از جمله تخصیص، تجدیدپذیری، تاب‌آوری، مدیریت ابرخشکسالی، مدیریت اثرات تغییر اقلیم و غیره به چگونگی مدیریت آب بر می‌شود و همه بگونه‌ای در داخل مدیریت آب قرار دارد. در واقع اتخاذ رویکرد صحیح در تجدیدپذیر آب زیرزمینی شالوده اصلی بوده که با سایر عوامل مدیریتی از این جهت مرتبط است در نتیجه اگر سیستم مدیریت آب نداند و یا نفهمد که تجدیدپذیری آب زیرزمینی چیست حتی اگر بهترین پیاده‌سازی قوانین هم وجود داشته باشد، باز هم نتیجه‌ای مطلوب برای بهبود وضعیت آب زیرزمینی در پی نخواهد داشت.

این تحقیق از مبانی توسعه داده شده یونسکو «لزوم ارتباط دوره سیاستگذاری با دوره جایگزینی منابع آب زیرزمینی» استفاده کرده و بر اساس این مفهوم بنیادی شکل ۶ را توسعه داده است؛ که هدف نهایی آن «لزوم توجه به مرتبط شدن دوره‌های سیاستگذاری برداشت از آب زیرزمینی با زمان‌ماند آب زیرزمینی» است. در واقع در تعاریف اخیر تبیین تجدیدپذیری آب زیرزمینی مفهوم گیرش و بازتعادل در دوره مدیریتی چند نسلی (۵۰ تا ۱۰۰ سال) مورد پیشنهاد بوده است که می‌تواند به عنوان راهکاری برای سنجش دستیابی به پارادایم پایایی آب زیرزمینی مورد توجه قرار گیرد. بر اساس نتایج تحقیق حاضر برای حرکت به سمت پایایی آب زیرزمینی دو مرحله پیشنهاد شده است که اکنون مدیریت آب کشورمان در مرحله اول (طی مسیر (۰ ←۱)) قرار دارد. این مرحله مبتنی بر تبیین تجدیدپذیر آب زیرزمینی بر اساس مبانی «گیرش از شارش» است. به بیان ساده‌تر «گیرش از شارش» همان رعایت بیلان منابع آب است؛ که اقدامی حداقلی در راستای بهبود بهره‌برداری از آب زیرزمینی بوده؛ که در صورت عدم انجام نابودی آب زیرزمینی و سپس توسعه وابسته به آن را به همراه خواهد داشت. مرحله دوم تعادل‌بخشی آب زیرزمینی مبتنی بر رعایت مبانی تجدیدپذیری که اخیراً توسعه داده شده بوده، و بعد از موفقیت در محله اول آغاز می‌شود. به عبارت دیگر تبیین چگونگی تجدیدپذیر آب زیرزمینی بر اساس مبانی «گیرش از انبارش» از نکات مورد توجه در رویکردهای اخیر است. بنابراین ضروری است تا مدیریت آب مرحله اول را در اولویت گذاشته و در یک مدت زمان مشخص به آن دست پیدا کند و همزمان برنامه‌ای بلندمدت برای دستیابی به مرحله دوم تدوین و در دستور کار قرار دهد.

پی‌نوشت‌ها

1- Human Time Scales
2- Sustainable Development
3- Aquifer
4- Flux Based
5- Capture
6- Residence Time
7- Groundwater Age
8- Turnover Rate
9- Fossil Groundwater
10- Non-Renewable Groundwater
11- Groundwater Depletion
12- Holocene
13- Nubian Aquifer in Africa
14- Groundwater Mining
15- Flux Capture
16- Storage Capture
17- Flux & Storage Based
18- Re-Equilibrium
19- Physically Groundwater Sustainable Limit
20- Megadrought
21- Groundwater Balancing First Level
22- Groundwater Balancing Second Level
23- Drought Buffer
24- Drought Reserve
25- Strategic Reserve
26- Probable Maximum Drought (PMD)

۴- منابع

Aeschbach-Hertig W and Gleeson T (2012) Regional strategies for the accelerating global problem of groundwater depletion. Nature Geoscience. Nature Publishing Group 5(12):853–861

Alipor A and Derakhshan H (2019) Strategies for achieve groundwater sustainable management. Strategic Studies of Public Policy, Center of Strategic Studies 8(29):261–275 (In Persian)

Alley WM, Clark BR, Ely DM, and Faunt CC (2018) Groundwater development stress: Global-scale indices compared to regional modeling. Groundwater 56(2):266–275

Befus KM, Jasechko S, Luijendijk E, Gleeson T, and Bayani Cardenas M (2017) The rapid yet uneven turnover of Earth's groundwater. Geophysical Research Letters., Wiley Online Library 44(11):5511–5520

Bierkens MFP and Wada Y (2019) Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: A review. Environmental Research Letters, IOP Publishing 14(6):063002

Bredehoeft J and Durbin T (2009) Ground water development-The time to full capture problem. Groundwater, John Wiley & Sons, Ltd 47(4):506–514

Bredehoeft JD (2002) The water budget myth revisited: Why hydrogeologists model. Groundwater, John Wiley & Sons, Ltd 40(4):340–345

Bredehoeft JD and Alley WM (2014) Mining groundwater for sustained yield. The Bridge 44(1):33–41

Broers HP (2004) The spatial distribution of groundwater age for different geohydrological situations in the Netherlands: implications for groundwater quality monitoring at the regional scale. Journal of Hydrology, Elsevier 299(1–2):84–106

Castañeda IS, Mulitza S, Schefuß E, dos Santos RAL, Damsté JSS, and Schouten S (2009) Wet phases in the Sahara/Sahel region and human migration patterns in North Africa. Proceedings of the National Academy of Sciences, National Acad Sciences 106(48):20159–20163

Claussen M, Dallmeyer A, and Bader J (2017) Theory and modeling of the African humid period and the green Sahara. Oxford Research Encyclopedia of Climate Science

Cook ER, Seager R, Kushnir Y, Briffa KR, Büntgen U, Frank D, Krusic PJ, Tegel W, Schrier G Vander, Andreu-Hayles L, …, Zang C (2015) Old world megadroughts and pluvials during the Common Era. Science Advances 1(10):1–10

Cuthbert MO, Gleeson T, Bierkens MFP, Ferguson G, and Taylor RG (2022) Defining renewable groundwater use to improve groundwater management. EarthArXiv, https://doi.org/10.31223/X5891C

de Graaf IEM, Gleeson T, (Rens) van Beek LPH, Sutanudjaja EH, and Bierkens MFP (2019) Environmental flow limits to global groundwater pumping. Nature. Nature Publishing Group 574(7776):90–94

de Graaf IEM, van Beek RLPH, Gleeson T, Moosdorf N, Schmitz O, Sutanudjaja EH, and Bierkens MFP (2017) A global-scale two-layer transient groundwater model: Development and application to groundwater depletion. Advances in Water Resources, Elsevier 102:53–67

Derakhshan H (2023) Why is groundwater balancing easy yet difficult to imitate? Water and Sustainable Development 9(3):147–155 (In Persian)

Derakhshan H, Davary K, Hasheminia SM, and Ziaei AN (2018) Estimation and conservation of strategic groundwater resources based on Probable Maximum Drought (PMD). Journal of Water and Sustainable Development, Ferdowsi University of Mashhad 4(2):121–130 (In Persian)

Derakhshan H, Mianabadi A, Mosaedi A, and Davary K (2023) A review of the evolution aquifer yield and role of these concepts in groundwater management. Iran-Water Resources Research, Iranian Water Resources Association 19(3) (In Persian)

Derakhshan H and Omranian Khorasani H (2019) Drought reserve, necessity for sustainability. Journal of Water and Sustainable Development, Ferdowsi University of Mashhad 6(1):77–84 (In Persian)

Döll P, Hoffmann-Dobrev H, Portmann FT, Siebert S, Eicker A, Rodell M, Strassberg G, and Scanlon BR (2012) Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. Journal of Geodynamics. Elsevier 59:143–156

Elshall AS, Arik AD, El-Kadi AI, Pierce S, Ye M, Burnett KM, Wada CA, Bremer LL, and Chun G (2020) Groundwater sustainability: A review of the interactions between science and policy. Environmental Research Letters 15(9)

Famiglietti JS (2014) The global groundwater crisis. Nature Climate Change, Nature Publishing Group 4(11):945–948

FAO (2003) Review of world water resources by country: 2. Concepts and Definitions, Water Reports 1–110

Ferguson G, Cuthbert MO, Befus K, Gleeson T, and McIntosh JC (2020) Rethinking groundwater age. Nature Geoscience, Nature Publishing Group 13(9):592–594

Gazor Habib Abadi N and Derakhshan H (2023) Groundwater-drought conjunctive management: A review of California Experiences. Journal of Water and Sustainable Development, Ferdowsi University of Mashhad 10(1):77–86 (In Persian)

Gleeson T, Alley WM, Allen DM, Sophocleous MA, Zhou Y, Taniguchi M, and VanderSteen J (2012) Towards sustainable groundwater use: Setting long-term goals, backcasting, and managing adaptively. Groundwater, Wiley Online Library 50(1):19–26

Gleeson T, Befus KM, Jasechko S, Luijendijk E, and Cardenas MB (2016) The global volume and distribution of modern groundwater. Nature Geoscience, Nature Publishing Group 9(2):161–167

Gleeson T, Cuthbert M, Ferguson G, and Perrone D (2020a) Global groundwater sustainability, resources, and systems in the anthropocene. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Annual Reviews Inc., 431–463

Gleeson T and Richter B (2018) How much groundwater can we pump and protect environmental flows through time? Presumptive Standards for Conjunctive Management of Aquifers and Rivers, River Research and Applications, Wiley Online Library 34(1):83–92

Gleeson T, Wagener T, Döll P, Zipper SC, West C, Wada Y, Taylor R, Scanlon B, Rosolem R, and Rahman S (2021) GMD perspective: The quest to improve the evaluation of groundwater representation in continental-to global-scale models. Geoscientific Model Development, Copernicus GmbH 14(12):7545–7571

Gleeson T, Wang-Erlandsson L, Porkka M, Zipper SC, Jaramillo F, Gerten D, Fetzer I, Cornell SE, Piemontese L, and Gordon LJ (2020b) Illuminating water cycle modifications and Earth system resilience in the Anthropocene. Water Resources Research, Wiley Online Library 56(4):e2019WR024957

Huggins X, Gleeson T, Castilla-Rho J, Holley C, Re V, and Famiglietti JS (2022) Groundwater in complex adaptive social-ecological systems. EarthArXiv, https://doi.org/10.1111/gwat.13305

Jasechko S, Perrone D, Befus KM, Bayani Cardenas M, Ferguson G, Gleeson T, Luijendijk E, McDonnell JJ, Taylor RG, and Wada Y (2017) Global aquifers dominated by fossil groundwaters but wells vulnerable to modern contamination. Nature Geoscience, Nature Publishing Group 10(6):425–429

Kazemi GA, Lehr JH and Perrochet P (2006) Groundwater Age. Groundwater Age 42(4):1142

Konikow LF (2011) Contribution of global groundwater depletion since 1900 to sea-level rise. Geophysical Research Letters, Wiley Online Library 38(17)

Korzoun VI, Sokolov AA, Budyko MI, Voskresensky KP, Kalinin GP, Konoplyantsev AA, Korotkevich ES, Kuzin PS, and Lvovich MI (1978) World water balance and water resources of the earth. Unesco Press

Llamas MR and Martínez-Santos P (2005) Intensive groundwater use: silent revolution and potential source of social conflicts. Journal of water resources planning and management. American Society of Civil Engineers, 337–341

Margat J, Foster S, and Droubi A (2006a) Concept and Importance of non-renewable resources. Non-Renewable Groundwater Resources, UNESCO Paris, France 10:13

Margat J, Foster S, and Droubi A (2006b) Concept and importance of non-renewable resources. Non-renewable groundwater resources: A guidebook on socially-sustainable management for water-policy makers. UNESCO Paris,, France 10:13–24

Margat J and Van der Gun J (2013) Groundwater around the world: A geographic synopsis. Crc Press

Maxwell RM, Condon LE, Kollet SJ, Maher K, Haggerty R, and Forrester MM (2016) The imprint of climate and geology on the residence times of groundwater. Geophysical Research Letters, Wiley Online Library 43(2):701–708

McDonald RI, Weber K, Padowski J, Flörke M, Schneider C, Green PA, Gleeson T, Eckman S, Lehner B, and Balk D (2014) Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure. Global Environmental Change, Elsevier 27:96–105

Mianabadi A, Derakhshan H, Davary K, Hasheminia SM, and Hrachowitz M (2020) A novel idea for groundwater resource management during megadrought events. Water Resources Management 34(5):1743–1755

Mianabadi A, Hasheminia SM, Davary K, Derakhshan H, and Hrachowitz M (2021) Estimating the

aquifer's renewable water to mitigate the challenges of upcoming megadrought events. Water Resources Management 35(14):4927–4942

Park C and Allaby M (2017) A dictionary of environment and conservation. Oxford University Press

Richey AS, Thomas BF, Lo M, Reager JT, Famiglietti JS, Voss K, Swenson S, and Rodell M (2015) Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. Water Resources Research, Wiley Online Library 51(7):5217–5238

Scanlon BR, Longuevergne L, and Long D (2012) Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA. Water Resources Research, Wiley Online Library 48(4)

Schilling OS, Cook PG, and Brunner P (2019) Beyond classical observations in hydrogeology: The advantages of including exchange flux, temperature, tracer concentration, residence time, and soil moisture observations in groundwater model calibration. Reviews of Geophysics, Wiley Online Library 57(1):146–182

Schulz S, Walther M, Michelsen N, Rausch R, Dirks H, Al-Saud M, Merz R, Kolditz O, and Schüth C (2017) Improving large-scale groundwater models by considering fossil gradients. Advances in Water Resources, Elsevier 103:32–43

Foster S, Kemper K, Garduno H, et al., (2005) Utilization of non-renewable groundwater a socially-sustainable approach to resource management. Technical Report, 10.13140/RG.2.1.4297.9925

Siebert S, Burke J, Faures JM, Frenken K, Hoogeveen J, Döll P, and Portmann FT (2010) Groundwater use for irrigation - A global inventory. Hydrology and Earth System Sciences 14(10):1863–1880

Sturchio NC, Du X, Purtschert R, Lehmann BE, Sultan M, Patterson LJ, Lu Z, Müller P, Bigler T, and Bailey K (2004) One million year old groundwater in the Sahara revealed by krypton-81 and chlorine-36. Geophysical Research Letters, Wiley Online Library 31(5)

Taylor R (2009) Rethinking water scarcity: The role of storage. Eos, Transactions American Geophysical Union, Wiley Online Library 90(28):237–238

Taylor RG, Scanlon B, Döll P, Rodell M, Beek R Van, Longuevergne L, Leblanc M, Famiglietti JS, and Edmunds M (2013a) Groundwater and climate change: Recent advances and a look forward. Nature Climate Change 3:322–329

Taylor RG, Scanlon B, Döll P, Rodell M, Van Beek R, Wada Y, Longuevergne L, Leblanc M, Famiglietti JS, and Edmunds M (2013b) Ground water and climate change. Nature Climate Change, Nature Publishing Group 3(4):322–329

Voss CI and Soliman SM (2014) The transboundary non-renewable Nubian Aquifer System of Chad, Egypt, Libya and Sudan: Classical groundwater questions and parsimonious hydrogeologic analysis and modeling. Hydrogeology Journal, Springer 22(2):441–468

Wada Y, Van Beek LPH, Sperna Weiland FC, Chao BF, Wu Y, and Bierkens MFP (2012) Past and future contribution of global groundwater depletion to sea-level rise. Geophysical Research Letters, Wiley Online Library 39(9)

Wada Y, Van Beek LPH, Van Kempen CM, Reckman JWTM, Vasak S, and Bierkens MFP (2010) Global depletion of groundwater resources. Geophysical Research Letters, Wiley Online Library 37(20)

Wada Y, Van Beek LPH, Viviroli D, Dürr HH, Weingartner R, and Bierkens MFP (2011) Global monthly water stress: 2, Water Demand and Severity of Water Stress. Water Resources Research, Wiley Online Library 47(7)

Winter TC (1998) Ground water and surface water: A single resource. Diane Publishing