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
۱-۲۲

مروری بر تکامل مفاهیم آبدهی آبخوان و نقش این مفاهیم در مدیریت آب‌زیرزمینی

هاشم درخشان[۱]، آمنه میان‌آبادی[۲]، ابوالفضل مساعدی[۳] و کامران داوری[۴*]

چکیده

پایایی منابع کره زمین حیاتی‌ترین موضوع روز است که آب‌زیرزمینی یکی از مهمترین این منابع است. بهره‌برداری پایا از این منبع، از ضروریات اجتناب‌ناپذیر برای دستیابی به توسعه پایا در ایران محسوب می‌شود. اما اضافه برداشت و غفلت از توجه به مفاهیم بنیادی برای بهره‌برداری پایا از آب‌زیرزمینی در بسیاری از حوضه‌های آبریز، نابودی اکوسیستم‌های وابسته به آب‌زیرزمینی و دیگر خسارات جبران‌ناپذیر را در پی داشته است. با توجه به ضرورت تعریف مفاهیم بنیادی در مدیریت آب‌زیرزمینی برای تعیین حداکثر عمق کف‌شکنی چاه‌ها، در این مقاله پراستنادترین مفاهیم طی قرن اخیر از مقالات مختلف استخراج و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. پس از بررسی سیر تاریخی تغییر در این مفاهیم بنیادی، این مفاهیم برای استفاده متخصصان طبقه‌بندی شده است. نتایج تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌دهد که سه مفهوم بنیادی (آبدهی مطمئن، آبدهی استخراجی و آبدهی پایا) بیشتر مورد توجه قرار گرفته و دیگر مفاهیم حول این سه مفهوم هستند. به بیان دیگر این تحول در پاسخ به این سؤال که حداکثر چه مقدار از ذخیره قابل‌بهره‌برداری آبخوان قابل پمپاژ است توسعه یافته‌اند. مرور سیر تحول در رویکردهای پمپاژ آب از آب‌زیرزمینی نشان می‌دهد که تعیین حداکثر پمپاژ، نیازمند تبیین معیارهایی معقول و مطلوب مبتنی بر این مفاهیم می‌باشد. در انتهای مقاله، در بخش فرا تحلیل و جمع‌بندی، جایگاه رویکرد جاری (اجرایی و علمی) در ایران با تحول مدیریت آب‌زیرزمینی در دنیا (مرور شده در این مقاله)، مقایسه شده است. این مقایسه نشانگر وجود شکاف عمیقی میان بهره‌برداری پایا با شرایط موجود بهره‌برداری از آب‌زیرزمینی در ایران است.

کلمات کلیدی: پایایی آب‌زیرزمینی، آبدهی پایا، آبدهی مطمئن، آبدهی استخراجی، نشانگرهای معقول.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۲/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۶/۱۶

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
۲- استادیار گروه اکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.
۳- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
۴- 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.

A Review on the Evolution of Aquifer Yield Concepts and the Role of these Concepts in Groundwater Management

H. Derakhshan [1], A. Mianabadi [2], A. Mosaedi [3], and K. Davary[4]*

Abstract

The sustainability of earth's crucial resources, such as groundwater, is a critical issue. Physically sustainable groundwater use is an unavoidable necessity for sustainable development in Iran. In many watersheds, overexploitation and neglecting the reasonable criteria for sustainable use of groundwater have led to the destruction of groundwater-dependent ecosystems as well as many other inevitable losses. Considering the necessity of defining fundamental concepts in groundwater management to determine the maximum admissible depth of wells, this paper assessed the most cited concepts from various published articles during the last century. After examining the historical changes in these fundamental concepts, the concepts have been categorized for the use of water resources experts. We found that three basic concepts of sustainable yield, safe yield, and Mining Yield are the most commonly used and the others are defined according to these three. In other words, the evolution occured in response to the question of how much water can maximally be extracted from the aquifer. A review of the evolution of approaches to groundwater pumping showed that determining the maximum amount of pumping requires the reasonable and desirable criteria based on the aquifer yield concepts. In the meta-analysis and summary section, the paper compared the current (executive and scientific) approach in Iran with the evolution of groundwater management in the world (reviewed in this article). This comparison indicated that there is a profound gap between sustainable groundwater exploitation and the current groundwater management conditions in Iran.

Keywords: Groundwater Sustainability, Sustainable Yield, Safe Yield, Mining Yield, Reasonable Indices.

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

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- Assistant Professor, Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. Email: a.mianabadi@kgut.ac.ir
3- Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: mosaedi@um.ac.ir
4- Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: k.davary@um.ac.ir
*- Corresponding Author
Dor: 20.1001.1.17352347.1402.19.3.1.0

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

۱- مقدمه

در یک بررسی اجمالی در مقالات و گزارش‌های ملی و بین‌المللی مرتبط با مدیریت آب‌زیرزمینی سیر تغییر و تحول قابل توجه طی سده گذشته به آسانی قابل مشاهده است. این در حالی است که این تحول در مقالات و گزارش‌های منتشر شده در داخل کشور در ارتباط با مدیریت آب‌زیرزمینی در ایران مشاهده نمی‌شود. به همین منظور در این تحقیق هر دو گروه مقالات و گزارش‌ها بطور مبسوط مرور شد. فرآیند انجام این تحقیق در شکل ۱ نمایش داده شده است. همانگونه که در این شکل مشهود است، در بخش دوم مقالات منتشر شده در داخل کشور در ارتباط با تعیین حداکثر برداشت از آب‌زیرزمینی بررسی شده است. سپس در بخش سوم رویکردهای مرتبط با تعیین حداکثر برداشت از آب‌های زیرزمینی ارائه و توضیح داده شده است. در بخش چهارم به بررسی سیر تاریخی تکامل این مفاهیم در جهان برای تعیین حداکثر برداشت پرداخته می‌شود. در بخش پنجم (فراتحلیل) یک طبقه‌بندی از مفاهیم فوق‌الذکر ارائه شده است و جایگاه مدیریت منابع آب زیرزمینی در ایران از ابعاد پژوهشی و اجرایی در آن تحلیل شده است. جمع‌بندی نهایی نیز در بخش ششم ارائه شده است.

با توجه به اهمیت مفهوم پایایی در این مقاله، لازم است تفاوت دو کلمه پایایی و پایداری بطور اختصار شرح داده شود. منظور از پایایی[۱] آن است که یک فرآیند[۲] و یا حالت[۳] می‌تواند در یک سطح معین برای زمان طولانی بقا یابد. در واقع در اکولوژی، پایایی به معنای بقای یک گونه از موجودات زنده بر مبنای استفاده از منابع موجود است. این دوام تابع ظرفیت پشتیبانی[۴] محیط طبیعی است، به گونه‌ای که اطمینان حاصل گردد بقای گونه برای مدت طولانی دچار مشکل نخواهد شد. در مجموع مفهوم پایایی به دوام یافتن برای مدت طولانی اشاره دارد (Keeble, 1988). اصطلاح پایایی در اصل در حوزه منابع طبیعی و ظرفیت زیست‌پذیری موجودات زنده کاربرد داشته است. بعدها این واژه در اوایل قرن بیستم برای پایایی در صنعت چوب به کار برده شده است. واژه پایایی بر مفهوم برش چوب از جنگل به‌گونه‌ای که ظرفیت تولید چوب در آینده دچار مشکل نشود دلالت دارد (Waggener, 1977). سپس این مفهوم در صنعت شیلات و ماهی‌گیری مورد کاربرد قرار گرفت (Rudestam and Langridge, 2014). در اواخر قرن بیستم مفهوم پایایی به عنوان راهی برای ترکیب مسائل آب‌زیرزمینی و اجتماع در حوزه مدیریت آب‌زیرزمینی به طور قابل توجهی مورد استفاده قرار گرفت. مفهوم «آبدهی پایا[۵]» که به منظور تعیین حداکثر آب قابل برداشت از آب‌زیرزمینی (حداکثر عمق کف‌شکنی) به گونه‌ای که افت آب‌زیرزمینی حداقل گردد و اطمینان حاصل شود که تاب‌آوری بلندمدت سیستم آب‌زیرزمینی دچار مخاطره قرار نخواهد گرفت، در طی چند دهه گذشته مورد توجه جدی قرار گرفته است (Alley and Leake, 2004; Maimone, 2004; Sophocleous, 1997).

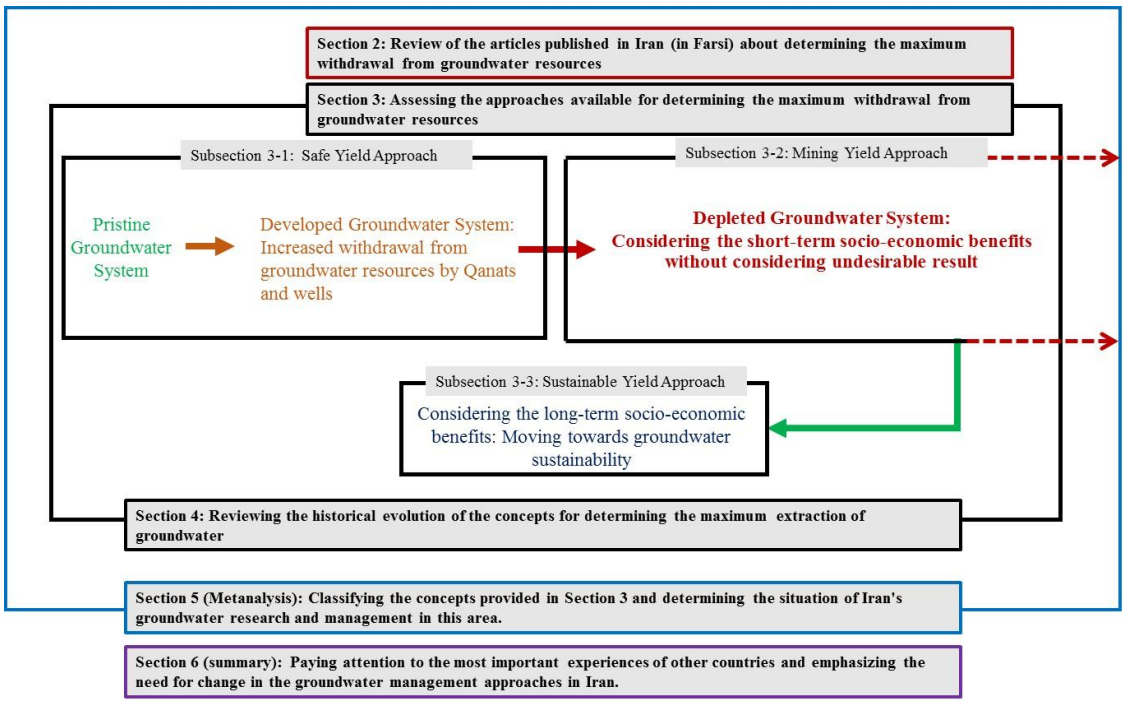

Fig. 1- The process of conducting research

شکل ۱- فرآیند انجام پژوهش

۲- بررسی مقالات منتشر شده در داخل کشور درارتباط با تعیین حداکثر برداشت از آب‌زیرزمینی

رشد جمعیت و تغییر سبک زندگی، موجب افزایش تقاضا برای مصرف آب شده است و از طرف دیگر توزیع زمانی و مکانی نامتناسب با توسعه در مناطق خشک و نیمه خشک و همچنین تغییر اقلیم موجب شده‌است تا ظرفیت تغذیه آبخوان‌ها کاهش یابد و استخراج از این منبع حیاتی به دلیل دسترسی آسان و ارزان، روندی افزایشی داشته باشد (Wada et al., 2012). روندی که از آن با نام «انقلاب خاموش در استفاده گسترده از آب‌زیرزمینی» یاد می‌شود (Llamas and Martínez-Santos, 2005). افت مستمر و شتابان آبنمود اکثر آبخوان‌های کشور هشداری جدی برای نابودی این منبع حیاتی و غیر قابل جایگزین است.

با وجود اینکه سال‌ها است که از ظرفیت تجدیدپذیری آبخوان‌های کشور عبور شده است، اما همچنان برداشت‌های غیر مجاز، صدور پروانه‌های جدید برای شرب و توسعه صنایع و کف‌شکنی چاه‌های موجود موجب افزایش تقاضا برای برداشت بیشتر آبهای زیرزمینی شده است (Samani, 2020). افزایش تقاضا برای برداشت بیشتر آب، فقط بخشی از فشارهای جامعه انسانی به آبخوان است، در حالی که تغییر اقلیم نیز با ایجاد تغییر در خصوصیات بارش‌ها (تغییر الگوی بارشی از برف به باران و افزایش وقوع بارش‌های حدی) موجب شده تا همان مقدار اندک بارشی که در قالب برف و یا باران ملایم موجب تغذیه آبخوان می‌شد از دسترس خارج شده و درنتیجه باعث کاهش ظرفیت تغذیه آب‌زیرزمینی شود (Langridge and Daniels, 2017). افزایش تقاضا ناشی از رشد جمعیت و کاهش تغذیه آب‌زیرزمینی ناشی از تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی موجب شده است تا فشاری مضاعف بر آبخوان‌های کشور وارد شود (Zeraati et al., 2021).

در راستای کاهش برداشت از منابع آب‌زیرزمینی کشور، در سال ۱۳۹۳ طرح احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب‌زیرزمینی به تصویب شورای عالی آب رسید. در این طرح که در سال ۱۳۹۴ شروع به فعالیت نموده است، بررسی اثر کف‌شکنی چاه‌های کشاورزی و حتی‌الامکان محدود نمودن آن جهت صیانت از منابع آب زیرزمینی مورد توجه واقع شده است (Bijani et al., 2017). در این طرح یک برنامه ۱۵ ساله درنظر گرفته شده است تا در کوتاه‌مدت ۵۰۰ میلیون متر مکعب کسری مخزن در سال ۱۳۹۴، در میان‌مدت ۵/۷ میلیارد متر مکعب کسری مخزن در طی ۶ سال یعنی تا سال ۱۴۰۰ و در بلندمدت ۱۲۰ میلیارد متر مکعب کسری مخزن را جبران نماید. اما علی‌رغم کلیه تلاش‌های انجام شده از سال ۱۳۹۳ تا سال ۱۳۹۸ بیش از ۱۸ میلیارد متر مکعب کسری مخزن ایجاد شده است (Samani, 2020).

تا کنون بر اساس دستورالعمل تعیین سقف کف‌شکنی چاه‌ها در طرح تعادل‌بخشی ابلاغیه وزارت نیرو، مطالعات بسیاری برای تعیین حداکثر عمق کف‌شکنی چاه‌ها صورت پذیرفته است. مطالعه (Bijani et al., 2017) نشان داد که بهره‌برداری بیش از پتانسیل تجدیدپذیری آبخوان دشت علی‌آباد موجب افت آب زیرزمینی و نیاز به کف‌شکنی برای رسیدن به دبی اولیه شده است. عمق بحرانی[۶] برای کف‌شکنی با استفاده از مدل‌های ریاضی آب‌زیرزمینی دشت علی‌آباد ۸۰ متر برآورد شد. افت مزمن سطح آب زیرزمینی ناشی از برداشت‌های مجاز و غیر مجاز و نیز تغییر اقلیم، منجر به کاهش جدی دبی چاه‌ها پس از مدت زمان کوتاهی (چند سال) می‌شود. در چنین شرایطی کشاورزان برای دستیابی به دبی اولیه چاه باید چاه جدید حفر و یا چاه موجود را کف‌شکنی نمایند. تحقیق (Mojarad and Sabouni, 2010) با استفاده از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی و با فرض اینکه با حفاری دوباره چاه‌های موجود می‌توان آب مورد نیاز قبل را تأمین نمود، به تعیین عمق بهینه چاه‌های کشاورزی دشت بجنورد پرداخته است. به گونه‌ای که هزینه‌های اقتصادی پمپاژ و حفاری به حداقل برسد. عمق بهینه اقتصادی کف‌شکنی برای چاه‌های کشاورزی این دشت تا ۲۰۵ متری اقتصادی اعلام شده و لذا حفاری چاه حداکثر تا این عمق برای کشاورزی مقرون به‌صرفه می‌باشد. Mosavi and Gholami (2012) به منظور تعیین پرسودترین ژرفای چاه‌های آب کشاورزی با هدف مدیریت پایای آبخوان دشت سیدان- فاروق و با استفاده از مدل‌های ریاضی عمق ۱۳۸ متر را مقرون به صرفه‌ترین عمق کف‌شکنی برآورد نمودند. در این تحقیق پیشنهاد شده است که تنها چاه‌هایی کف‌شکنی شوند که عمق آنها به طور قابل توجهی از چاه‌های اطراف کمتر است.

Zeraati (2018) با درنظر گرفتن مدیریت یکپارچه منابع آب و تغییر اقلیم با تعریف چند سناریو و تحلیل آنها در نرم‌افزار ویپ در دشت خاش (از توابع استان سیستان و بلوچستان) عمق بهینه چاه‌ها جهت کفشکنی را تعیین نمود. در این تحقیق تعیین حداکثر عمق کف‌شکنی به‌گونه‌ای تعیین شده است که از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۴۴ نیاز به کف‌شکنی چاه‌ها در دشت خاش وجود نداشته باشد. در این تحقیق ۸ سناریوی برداشت در نرم‌افزار ویپ مورد استفاده قرار گرفته و بر اساس هر سناریو حداکثر عمق کف‌شکنی برآورد شد. در این تحقیق کنترل آب کشاورزی به عنوان یکی از راهکارهای پیشنهادی وزارت نیرو برای تأمین آب شرب و صنعت دشت پیشنهاد شده است (Zeraati et al., 2021).

Faryabi (2019) به تعیین عمق بهینه و یا حداکثر عمق کف‌شکنی به گونه‌ای پرداخته است که آبخوان پاسخگوی نیاز شرب و صنعت در افق مشخص باشد. با افزایش عمق چاه‌های بهره‌برداری و افت سطح آب‌زیرزمینی بخش‌هایی از آبخوان خشک خواهد شد. لذا افت ۲۵ درصدی نسبت به افت بهنجار آبخوان در افق طرح به عنوان عمق بهینه دشت کاشان درنظر گرفته شده است و افزایش عمق و کف‌شکنی چاه‌های موجود به هیچ وجه پیشنهاد نمی‌شود. Gholami et al. (2017) درمطالعه خود عمق اقتصادی چاه کشاورزی را برای دو سوخت برقی و گازوئیلی در دو حالت یارانه‌ای و غیر یارانه‌ای در تعدادی از مزارع مجهز به سیستم آبیاری بارانی در دشت قزوین مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که بخش کشاورزی محدودیتی از نظر زیاد شدن هزینه برای افزایش عمق چاه ندارد.

علی‌رغم افزایش چشم‌گیر تعداد چاه‌ها در سال‌های اخیر میزان تخلیه از آبخوان کاهش یافته است. دلیل این امر را می‌توان چنین توضیح داد که در اثر کاهش شدید پتانسیل آب‌زیرزمینی در سطح کشور، متوسط آبدهی چاه‌ها در سال‌های اخیر کاهش یافته است. از پیامد نامطلوب کف‌شکنی چاه‌ها می‌توان بـه از بین رفتن حقوق حقابه‌دارن پیشین، و تضییع حقوق نسل‌های آتی اشاره نمود (Bijani et al., 2017). ادامه اضمحلال منابع آب‌زیرزمینی باعث از بین رفتن بخش‌های حاشیه‌ای آبخوان شده و این روند به سمت مرکز آبخوان ادامه می‌یابد. این مسأله باعث بیکاری مردم روستا و در نتیجه مهاجرت اجباری روستاییان ساکن در آن منطقه خواهد شد که پیامدهای اجتماعی را برای شهرها به وجود می‌آورد (Mianabadi et al., 2021a; Noori et al., 2021).

طی قرن اخیر در ایران، تغییر روش برداشت آب‌زیرزمینی از قنات به پمپاژ (چاه)، موجب تحمیل برداشت‌های بی‌رویه‌ای بر این منبع بی‌همتا گشته است و هم‌اکنون بسیاری از دشت‌ها با خسارات جبران‌ناپذیر روبرو شده‌اند. با توجه به اهمیت آب‌زیرزمینی در توسعه کشور، لزوم تغییر رویکرد در مدیریت آب‌زیرزمینی و حرکت به سمت پایایی این منبع حیاتی اجتناب‌ناپذیر است (Alipor and Derakhshan, 2019). تحقیقاتی که تاکنون در حوزه تعیین حداکثر عمق کف‌شکنی انجام شده مبتنی بر مفاهیم آبدهی پایا نمی‌باشد و به این نکته توجه نشده است که حداکثر چه مقدار از ذخیره آبخوان قابل استخراج است. پاسخ به این سؤال و دستیابی به بهره‌برداری پایا از آب‌زیرزمینی نیازمند تبیین معیارهایی معقول و مطلوب است (Derakhshan and Davary, 2019). بررسی تحقیقات انجام شده در ایران (مقالاتی که به آن اشاره شد) نشان می‌دهد که در حال حاضر در تعیین حداکثر برداشت از آب‌های زیرزمینی تنها به مسائل اقتصادی آن توجه شده و متأسفانه شکاف عمیقی میان بهره‌برداری پایا با شرایط موجود بهره‌برداری از آب‌زیرزمینی (اجرایی) وجود دارد. این مسأله باعث وخیم شدن وضعیت آبخوان‌های کشور شده و دستیابی به پایایی آنها را با چالش‌های متعددی روبه‌رو کرده است. بخش بعدی این مقاله سعی در تبیین مفهوم بهره‌برداری پایا و اضافه‌برداشت (مفهوم آبدهی استخراجی) از آب‌زیرزمینی دارد تا متخصصان، تصمیم‌گیران، سیاستگذاران و پژوهشگران بتوانند با درک این مفاهیم در جهت دستیابی به مدیریت پایای آب‌زیرزمینی در کشور گام بردارند.

۳- رویکردهای تعیین حداکثر برداشت از آب‌زیرزمینی

برای بررسی رویکردهای تعیین حداکثر برداشت از آب‌زیرزمینی، در این پژوهش مفاهیم مرتبط با تعیین حداکثر قابل برداشت از ذخایر آب‌زیرزمینی (حداکثر کف‌شکنی چاه) به سه گروه اصلی شامل آبدهی مطمئن، آبدهی استخراجی و آبدهی پایا طبقه‌بندی شده و بر اساس روند زمانی مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اینکه آبدهی مطمئن قدیمی‌ترین مفهوم است ابتدا این مفهوم تشریح می‌شود. تعاریف اولیه از مفهوم آبدهی مطمئن نادقیق بوده و دامنه بسیار بزرگی را در بر می‌گرفت. سپس با اضافه برداشت جوامع بشری از آب‌زیرزمینی، رویکرد آبدهی استخراجی[۷] مطرح شد. این مفهوم بر ادامه روند اضافه برداشت و ورود به منابع آب‌تجدیدناپذیر (مشابه برداشت کانی از معادن) تا تخلیه کامل منابع آب‌زیرزمینی دلالت دارد. اگرچه رویکرد آبدهی استخراجی امری اشتباه و متضاد با پایایی سرزمینی بوده است، اما این رویکرد در اکثر کشورهای دنیا رخ داده و یا در حال گذار از این رویکرد هستند. در نهایت از نیمه دوم قرن بیستم میلادی مبحث پایایی آب‌زیرزمینی مطرح و تجربه شده است و هم اکنون مقالات و گزارشات متعددی در این حوزه در حال نشر است که در بخش سوم مورد تشریح قرار گرفته می‌گیرد.

۳-۱- رویکرد مبتنی بر آبدهی مطمئن

از جمله اولین تلاش‌ها برای درک مفهوم پایایی آب‌زیرزمینی، معرفی اصطلاح «آبدهی مطمئن» است که توسط (Lee, 1915) به این شکل تعریف شده است: «محدودیت در مقدار کمیّت آبی که می‌توان به طور منظم و دائمی بدون کاهش خطرناک ذخیره رزرو (استاتیک)، از آبخوان برداشت شود». این اصطلاح و تعریف آن دستخوش تغییرات زیادی شده و در سالهای بعد توسط چندین مطالعه مورد بحث قرار گرفته و در نهایت به «آبدهی پایا» تبدیل شده است (Kalf and Woolley, 2005). اگرچه مفهوم آبدهی مطمئن توسط برخی از محققان مبهم

درنظرگرفته شده و توصیه شده است که مورد استفاده قرار نگیرد (Kazmann, 1956; Thomas, 1955)، در عین حال با وجود تعداد زیادی مقاله در مورد این موضوع و علی‌رغم ابهام‌آمیز بودن آن، بیش از یک قرن است که این مفهوم مورد استفاده قرار داشته و حتی یکی از پر استنادترین مفاهیم در این حوزه محسوب می‌شود. به بیان توماس «آبدهی مطمئن یک اصطلاح مانند آلیس در سرزمین عجایب است که هر آب‌بری با توجه به منافع بخش خود تعبیری از این اصطلاح دارد.» این ابهام به دلیل درک ذهنی کنشگران مختلف و با اهداف متفاوت پدیدار می‌شود، در حالی که ممکن است اصول آب‌زیرزمینی از نظر علمی به خوبی تثبیت شده باشد. برای نشان دادن بیشتر پیچیدگی ذاتی «آبدهی مطمئن»، رادستون و لنگریج (Rudestam and Langridge, 2014)، تکامل این مفهوم به «آبدهی پایا» و سپس «پایایی آب‌زیرزمینی» را از دیدگاه پژوهشگران و دیدگاه متولیان و بهره‌برداران مورد بررسی قرار داده و مشخص نمودند که این سه مفهوم از یکدیگر مستقل هستند.

در این بخش یکی از کامل‌ترین تعاریف که برای آبدهی مطمئن ارائه شده است تشریح می‌شود. آبدهی مطمئن به مقدار آبی که از یک آبخوان در سطح یک حوضه آبریز مشخص مبتنی بر ظرفیت تغذیه آب‌زیرزمینی می‌توان برداشت نمود اشاره دارد به گونه‌ای که کمیّت و کیفیت آب آبخوان دچار اشکال نشود و بتوان به‌صورت دائمی این مقدار آب را برداشت نمود. این تعریف در شکل ۲ (Domenico, 1972) تشریح شده است. آبدهی مطمئن در واقع مقدار آب قابل برداشت از آب‌زیرزمینی در سطح حوضه آبریز را نشان می‌دهد. اگرچه در تعاریف اخیر این مفهوم مباحث کیفیت آب نیز مطرح شده است، اما آبدهی مطمئن بیشتر بر حداکثر کمیّت قابل برداشت از یک آبخوان توجه دارد.

در شکل ۲ مفهوم آبدهی مطمئن از سه جنبه مورد توجه قرار گرفته است. بخش (a) برای آبدهی مطمئن آب‌زیرزمینی است و به این مفهوم اشاره دارد که همواره باید متوسط تغییرات تراز آب‌زیرزمینی (در یک دوره زمانی) برابر صفر باشد. این به معنای آن است که متوسط نرخ پمپاژ سالیانه باید تضمین کننده ثبات تراز آبخوان[۸] باشد. بخش (b) برای آبدهی مطمئن آبهای سطحی (مرتبط با آب زیر زمینی) است و به این مفهوم اشاره دارد که همواره باید متوسط تغییرات جریان آب‌های سطحی (و نیز جریان چشمه‌ها و قنوات) برابر صفر باشد. این به معنای آن است که تغییرات تراز آب سطحی (در یک دوره زمانی) برابر صفر باشد. بخش (c) به این مفهوم اشاره دارد که همواره تراز متوسط آب‌زیرزمینی در مقابل زمان برای یک دوره مشخص باید خطی افقی تشکیل دهد و این بدان معنا است که کل آبی که از آبخوان[۹] برداشت می‌شود قطعاً دوباره به آبخوان بازگردانده خواهد شد. نکته مورد تأکید آن است که چنانچه نوسانات آب و هوایی و یا تغییر اقلیم موجب کاهش تجدیدپذیری آبخوان گردند، میزان برداشت از آب‌زیرزمینی بایستی از آن تبعیت نماید. عدم رعایت این نکته موجب افت آبخوان، کاهش جریان‌های سطحی، فرونشت زمین و کاهش کمیّت و کیفیت آبخوان خواهد شد (Smith et al., 2010).

۳-۲- رویکرد مبتنی بر آبدهی استخراجی

برای درک بهتر مفهوم آبدهی استخراجی سه سناریوی برداشت آب از آب‌زیرزمینی در شکل ۳ به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

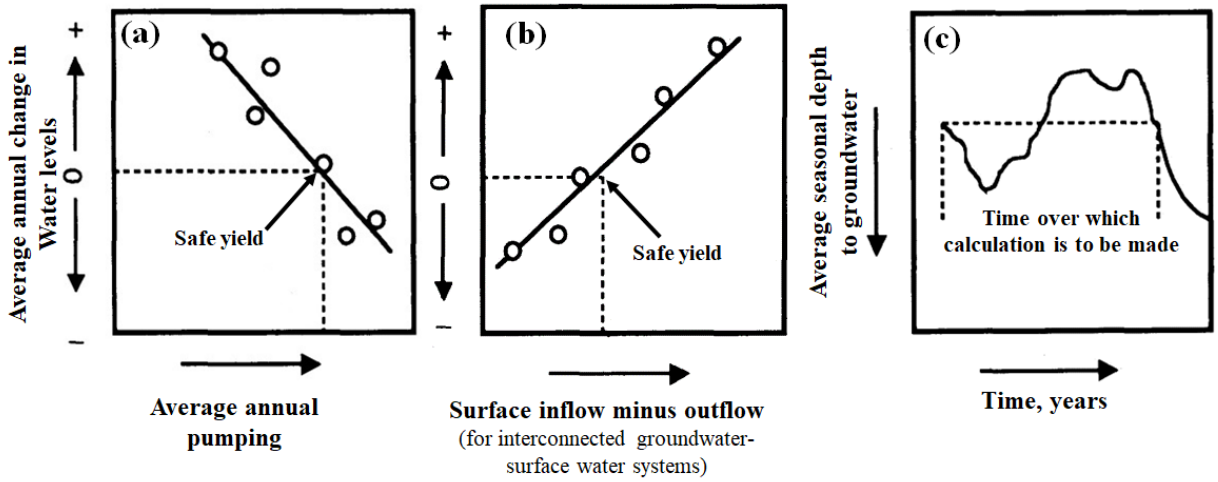

Fig. 2- Safe yield analyzed (Domenico, 1972)

شکل ۲- مفهوم آبدهی مطمئن (Domenico, 1972)

– **سیستم طبیعی آب‌زیرزمینی (بکر[10]):** سناریوی (a) به شرایطی اشاره دارد که در آن سیستم آب زیرزمینی در حالت طبیعی (بکر) قرار دارد، آبخوان دارای تعادل پایا بوده و هیچ‌گونه برداشت آبی در قالب پمپاژ از داخل این منبع صورت نمی‌پذیرد. در این سناریو تعادل بیلان آب همواره برقرار است و جریان ورودی به آبخوان در قالب تغذیه طبیعی همواره با جریان خروجی از آبخوان در قالب تخلیه طبیعی به رودخانه، چشمه و تالاب برابر است.

– **توسعه برداشت[11]:** سناریوی (b) به شرایطی اشاره دارد که در آن یک سیستم طبیعی، توسط انسان مورد دخل و تصرف قرار گرفته است. در این سناریو جوامع بشری با پمپاژ شروع به برداشت منابع آب‌زیرزمینی نموده‌اند. این برداشت به دو حالت انجام می‌شود. در حالت اول مقداری از آبی که قبلاً منبع تغذیه آبخوان بوده است و در حالت دوم مقداری از جریان آب‌زیرزمینی که قبلاً منبع تغذیه چشمه، رودخانه و تالاب بوده است توسط پمپاژ برداشت می‌شود. به عبارت دیگر می‌توان گفت که در سناریوی توسعه برداشت از منابع آب‌زیرزمینی مقداری از سهم تغذیه آبخوان و مقداری هم از سهم تخلیه به اکوسیستم توسط پمپاژ برداشت می‌شود. همانگونه که در بخش قبل مفهوم آبدهی مطمئن تشریح شد، بر اساس این مفهوم مقدار برداشت آب از آبخوان محدود به میزان تغذیه آبخوان است. در این سناریو پمپاژ فقط در یک عمق مشخص صورت می‌پذیرد، به گونه‌ای که تعادل آبخوان برقرار باشد و پایداری[12] آن دچار اشکال نشود.

– **افت آبخوان[13]:** سناریوی (c) به شرایطی اشاره دارد که در آن جوامع بشری به برداشت ظرفیت تجدیدپذیری آبخوان بسنده نمی‌کنند و شروع به برداشت بیش از حد از ذخایر تجدیدناپذیر آبخوان می‌کنند. در این شرایط است که در اثر پمپاژ زیاد از ذخایر تجدیدناپذیر آبخوان، ذخایر سیستم آب‌زیرزمینی شروع به تخلیه شدن می‌کند و در قالب افت سطح آبخوان ظهور می‌نماید. برداشت از ذخایر آبخوان به گونه‌ای که این ذخیره قابل جبران نباشد با مفهوم آبدهی استخراجی تبیین می‌شود. بدیهی است در این حالت سیستم آب‌زیرزمینی از حالت تعادل پایدار خارج می‌شود.

۳-۳- رویکرد مبتنی بر آبدهی پایا

یکی از تمایزهای اساسی در ارائه مفهوم آبدهی پایا نسبت به مفهوم آبدهی مطمئن که بر عدم تجاوز پمپاژ از ظرفیت تجدیدپذیری آبخوان تأکید دارد، الزام به رعایت حقابه محیط زیست از ظرفیت تجدیدپذیری آبخوان می‌باشد. هر نهاد مدیریتی تعریف آبدهی پایا را متناسب با شرایط خود ارائه نموده است. به عنوان نمونه اداره آب کالیفرنیا (DWR)[14] آبدهی پایا را بدین شرح تعریف نمود: «حداکثر مقدار آب‌زیرزمینی قابل برداشت سالانه، که بر پایه تحلیل یک دوره مدیریتی بلندمدت برای یک حوضه آبریز معین محاسبه می‌شود و برداشت به این میزان بصورت سالانه پیامدهای نامطلوب[15] نخواهد داشت.

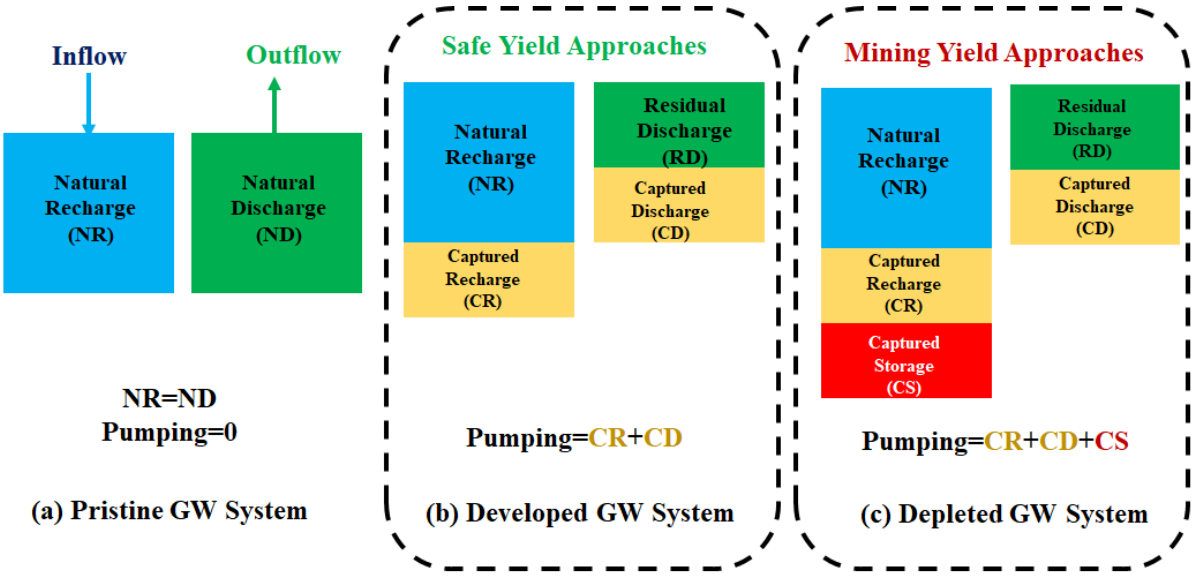

Fig. 3- Comparing a) Pristine GW System by b) Safe Yield and c)Mining Yield Approaches (adapted from (Ponce, 2007))

شکل ۳- مقایسه سیستم طبیعی آب‌زیرزمینی (بکر) (a) با رویکرد آبدهی مطمئن (b) و آبدهی استخراجی (c) با اقتباس از (Ponce, 2007)

اما پیاده‌سازی مدیریت آب‌زیرزمینی بر مبنای «آبدهی پایا» هم‌چنان یک چالش اساسی است. از این‌رو، مفهوم «مدیریت پایای آب‌زیرزمینی» را اداره آب کالیفرنیا به این شرح تعریف نموده است: «مدیریت و استفاده از آب‌زیرزمینی به گونه‌ای که در افق یک برنامه برداشت بلند مدت و در طول پیاده‌سازی این برنامه، پیامدهای نامطلوب رخ ندهد (DWR, 2015). در این بخش سعی شده است تا رویکرد پایایی آب‌زیرزمینی برخواسته از آبدهی پایا مورد تشریح قرار گیرد.

حدود یک قرن طول کشید تا مفهوم آبدهی مطمئن از تعریف (Lee, 1915) تا تعریف (Smith et al., 2010) توسعه یابد. با این حال، اصطلاح «آبدهی» (اصلاح شده از مطمئن به پایا) به‌صورت ذاتی بر بهره‌برداری دلالت دارد در حالی که «مدیریت پایای آب‌زیرزمینی» یا «پایایی آب‌زیرزمینی» بصورت شفاف بر مشارکت تأکید دارد (Gleeson et al., 2020). این انتقال از سطح آکادمیک و سطوح مختلف قوانین و سیاست‌ها، مانند دستورالعمل چارچوب آب اتحادیه اروپا، قانون مدیریت پایایی آب‌زیرزمینی در کالیفرنیا (Owen et al., 2019) و قانون پایایی آب در بریتیش کلمبیا (Gleeson et al., 2020) رخ داده است. رویکرد پایایی در شکل ۴ تبیین شده است. برای فهم بهتر این شکل توجه به مطالب زیر مفید است:

۱- بهره‌برداری بیش از حد از آب‌زیرزمینی، تهدیدهایی مانند نفوذ آب شور و فرونشست زمین را در برخی مناطق به همراه داشته و منجر به نگرانی‌های جدی در این زمینه شده است (Michael et al., 2017). علاوه بر این، ظهور این تهدیدات برای آب‌زیرزمینی اغلب به طور غیر مستقیم بر افزایش فقر تأثیر می‌گذارد (Baguma et al., 2017). برای سازش با این تهدیدات، و افزایش استفاده مفید از این منبع حیاتی، مفاهیم پایایی شامل مفاهیم آبدهی مطمئن، آبدهی پایا، توسعه پایای آب‌زیرزمینی[۱۶] و مدیریت پایای آب‌زیرزمینی[۱۷] مورد استفاده قرار گرفته است. در بسیاری از موارد اصطلاح پایایی آب‌زیرزمینی[۱۸] برای اشاره به این چهار مفهوم استفاده شده است. پایایی آب‌زیرزمینی به محیط زیست بستگی دارد و معیارهای کاربرد این مفهوم در سطح جهانی از مناطق خشک تا مناطق مرطوب بسیار متفاوت است (Cuthbert et al., 2019). علاوه بر این، بدیهی است که تقریباً هیچ آبخوان‌ای در طول (مقیاس زمانی) زندگی بشری قابل تجدید نیست. به طور کلی، پایایی آب‌زیرزمینی را می‌توان به بصورت «حفظ کمیّت و کیفیت ذخایر آبخوان در یک دوره درازمدت [و جریان‌های آن] با استفاده عادلانه مبتنی بر حکمرانی خوب و مدیریت در یک دوره بلندمدت» تعریف کرد (Gleeson et al., 2020). به عنوان مثال، در مورد کالیفرنیا افزایش استفاده از مفاهیم «آبدهی پایا» و «مدیریت پایای آب‌زیرزمینی» نسبت به «آبدهی مطمئن» در این ایالت نشان دهنده تغییر رویکرد به سمت دیدگاه یکپارچه و نگاه کلان به سیستم آب‌زیرزمینی است (Kretsinger Grabert and Narasimhan, 2006). Gorelick and Zheng (2015) مفهوم مدیریت پایای آب‌زیرزمینی را به شرح زیر تعریف نموده‌اند: سیستم آب‌زیرزمینی پایا، سیستمی است که در آن پمپاژ می‌تواند به طور مطمئن در مدت نامحدودی ادامه یابد. مدیران آب در صورتی می‌توانند راه‌حل‌های استفاده پایا از آب‌زیرزمینی را شناسایی کنند که تعریف آبدهی پایا را به عنوان حداکثر پمپاژ در یک دوره بسیار طولانی مدت به گونه‌ای که تمام محدودیت‌های محیط‌زیستی، قانونی، اجتماعی، اقتصادی و فیزیکی برآورده شود بپذیرند. با این حال، نیاز ضروری دیگر درک کامل سیستم هیدروژئولوژیکی آینده از جمله میزان برداشت طولانی مدت از منابع سطحی و تغییرات تغذیه آبخوان و همچنین تخریب کیفیت آب است؛

۲- تعریف مدیریت پایای آب زیرزمینی توسط Gleeson et al. (2020) تکمیل و اصطلاح «پایایی آب‌زیرزمینی» پیشنهاد شد. برای تبیین بهتر این مفهوم شکل ۴ از مقاله McCartney et al. (2000) که به تشریح چشم‌اندازی برای آب و طبیعت پرداخته است اقتباس شده و برای انتقال مفهوم پایایی آب‌زیرزمینی اصلاح شده است. همانگونه که در شکل ۳ تشریح شد پمپاژ از سیستم طبیعی آب‌زیرزمینی موجب شده است تا تعادل اولیه آب‌زیرزمینی برهم بخورد و در بسیاری از مناطق شروع به افت نماید. در شکل ۴ منافع بلندمدت حاصل از آب‌زیرزمینی در مقابل رویکردهای برداشت آب‌زیرزمینی (مطابق شکل ۳ – سیستم طبیعی (a)، توسعه برداشت (b) و تخلیه آبخوان (c)) ترسیم شده است و هدف آن انتقال این مفهوم است که پایایی آب‌زیرزمینی هنگامی می‌تواند به وقوع بپیوند که جامعه بشری کل تغذیه و تخلیه از آبخوان را توسط پمپاژ برداشت نکند؛

۳- با ورود سیستم پمپاژ آب منافع اقتصادی جامعه بشری از آبخوان به دلیل توسعه صنایع، خدمات و توریسم افزایش پیدا کرده است و از طرف دیگر با پمپاژ آب (به چنگ آوردن تخلیه و یا تغذیه آبخوان) سیستم‌های طبیعی وابسته به آب‌زیرزمینی مانند چشمه، تالاب، تنوع زیستی و غیره اضمحلال یافته‌اند. بدیهی است این منابع منافع غیر مستقیم بسیاری برای جامعه بشری دارند و نابودی آنها زیان‌های مستقیم و غیر مستقیم بسیاری مانند ریزگردها را به دنبال دارد.

در شکل ۴ محور افقی نمایانگر شرایط سیستم آب‌های زیرزمینی (بکر تا تخلیه شده) و محور عمودی بیان کننده منافع بلندمدت از منابع آب‌زیرزمینی می‌باشد. رویکرد پایایی آب‌زیرزمینی به دنبال این مهم

است تا منافع بلندمدت برداشت آب از آبخوان را به سمت بهینه شدن هدایت نماید. منافع کل از مجموع دو منحنی منافع حاصل از توسعه سیستم پمپاژ آب و منافع بلندمدت باقی مانده از اکوسیستم حاصل می‌شود. حفاظت از اکوسیستم پیامدهای مطلوب بسیاری ناشی از در اختیار داشتن آب سالم و تمیز برای جوامع بشری ایجاد می‌کند که حفظ تنوع زیستی موجودات زنده، احیاء تالاب‌ها، حفظ حیات آبزیان وابسته به آب‌زیرزمینی و غیره نمونه‌هایی از این منافع بلندمدت است. برداشت آب به روش‌های مختلف از منابع آب‌زیرزمینی مانند سد و بند سارها، توسعه کشاورزی فاریاب، انتقال آب رودخانه‌ها، افزایش تولیدات صنعتی و غیره نمونه‌هایی هستند که منافع مستقیم و کوتاه مدتی برای جوامع بشری به همراه دارند. منافع حاصل از توسعه با منافع غیر مستقیم ناشی از حفظ اکوسیستم با یکدیگر در تعارض قرار دارند. لذا ضروری است تا مدیریت آب‌های زیرزمینی به جای حداکثر کردن منافع کوتاه مدت به سمت پایایی و بهینه نمودن منافع بلندمدت حرکت کند.

۴- بررسی سیر تاریخی تکامل مفاهیم مبتنی بر حداکثر برداشت از آب‌زیرزمینی

روند مفاهیم مرتبط با آبدهی آبخوان[۱۹] (برخاسته از مفهوم آبدهی مطمئن) و مفاهیم مرتبط با آبدهی پایا[۲۰] بر اساس بررسی‌های انجام شده در شکل ۵ ارایه شده است. البته لازم به ذکر است که این تفکیک صرفاً جهت فهم بیشتر مفاهیم صورت پذیرفته است. روند زمانی مفاهیم مرتبط با آبدهی مطمئن در بخش فوقانی شکل ۵ و با رنگ آبی مشخص شده است. از جمله عوامل مرتبط با این مفهوم می‌توان به نرخ تغذیه، شکل (هندسه) و شرایط هیدرودینامیکی آبخوان اشاره نمود. این عوامل تحت تأثیر تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بوده که می‌تواند تغذیه آبخوان را تغییر دهد. کارایی آبخوان افت مزمن تراز آبخوان و کاهش (در مواردی غیر قابل برگشت) ذخایر استراتژیک آبخوان را نیز در بردارد (Qin et al., 2013; Shu et al., 2012).

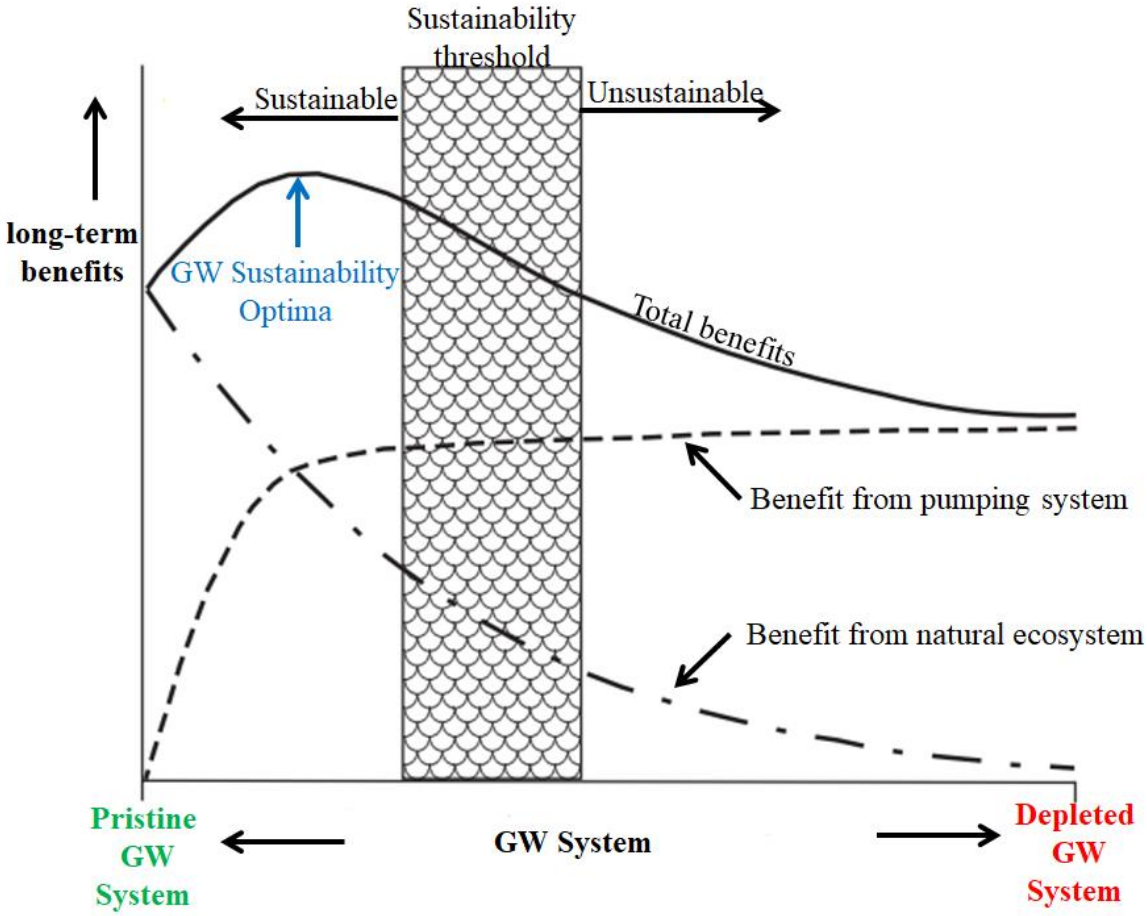

Fig. 4- Long-term benefits of GW pumping vs. GW pumping scenarios (adapted fromMcCartney et al. (2000))

شکل ۴- منافع بلندمدت برداشت آب از آب‌زیرزمینی در مقابل سناریوهای پمپاژ آب با اقتباس از McCartney et al. (2000)

از دیگر عوامل مرتبط با کارایی آبخوان می‌توان به کیفیت آب آبخوان اشاره نمود. کیفیت آب آبخوان شامل آلودگی نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای منبع، نفوذ غیر منطقی آب شور و ورود فلزات سنگین مانند آرسنیک به آبخوان است. کارایی آبخوان با دیگر مخاطرات طبیعی مانند فرونشست زمین، فروچاله‌ها، افزایش سطح آب دریا و خشکسالی شدید نیز مرتبط می‌باشد (Pierce et al., 2012). به بیان دیگر کارایی آبخوان کلیه زیرساخت‌های مرتبط با پمپاژ از آب‌زیرزمینی، تغذیه مصنوعی، پایش، تصفیه و توزیع را در بر می‌گیرد (Scanlon et al., 2007; Shu et al., 2012).

روند زمانی مفاهیم مرتبط با آبدهی پایا در مستطیل سبز رنگ پایین در شکل ۵ ارائه شده است. مفاهیم مرتبط با این مفهوم شامل فرآیندهای تصمیم‌گیری در مورد اهداف منابع، قوانین و اقدامات عملی تعریف شده برای دستیابی به این اهداف است. نظام حقوقی و نهادی جزء اصلی در حکمرانی آب‌زیرزمینی است (Gleeson et al., 2020). به طور خلاصه حکمرانی آب‌زیرزمینی به این جنبه توجه دارد که چگونه می‌توان قوانین و نهادی را به طور مستقیم با ارزیابی پایایی آب‌زیرزمینی برای عملیاتی کردن یک سیاست مرتبط نمود.

محدودیت‌های قانونی و نهادی شامل حقابه‌های محیط‌زیستی، رعایت تخصیص‌های قبلی و توجه به حقوق افراد بومی می‌شود (Sophocleous, 2012). استفاده از آب‌زیرزمینی برای آبیاری از دیگر موارد حکمرانی آبخوان است (Piscopo et al., 2019). این عامل همچنین شامل مقررات مربوط به بهره‌وری و صرفه‌جویی آب مانند مشوق‌ها یا تعرفه‌ها می‌شود (Fishman et al., 2015; Piscopo et al., 2019). ایجاد ارتباط بین آب سطحی و زیرزمینی و محدودیت‌های قانونی و نهادی نیز شامل پایایی آب‌زیرزمینی، عدم اضافه‌برداشت و سیاست‌های مرتبط با مدیریت آبخوان است (Llamas et al., 2015; Owen et al., 2019).

توسعه مفهوم پایایی آب‌زیرزمینی راه طولانی را پیموده است. شروع آن با ارائه مفهوم «آبدهی پایا» بوده است و تاریخچه تکامل آن تا رسیدن به مفهوم پایایی آب‌زیرزمینی توسط مطالعات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (Alley & Leake, 2004; Maimone, 2004; Rudestam & Langridge, 2014). هسته اصلی تعاریف و محدودیت‌های برداشت از آب‌زیرزمینی اولین مرتبه توسط مفهوم «آبدهی مطمئن» معرفی شد (Lee, 1915). در این تعریف اولیه، مفهوم آبدهی مطمئن به‌عنوان هر میزان پمپاژ آب کمتر یا برابر با نرخ تغذیه در شرایط ماندگار[۲۱] بدون توجه به نقش تخلیه از آبخوان تعریف شد و به پارامترهای قابل سنجش در هیدرولوژی آب‌زیرزمینی پایبند بود. اما این مفهوم قانون بقای جرم را درنظر نگرفته است که به آن در (Bredehoeft, 2002; Devlin & Sophocleous, 2005) اشاره شده است.

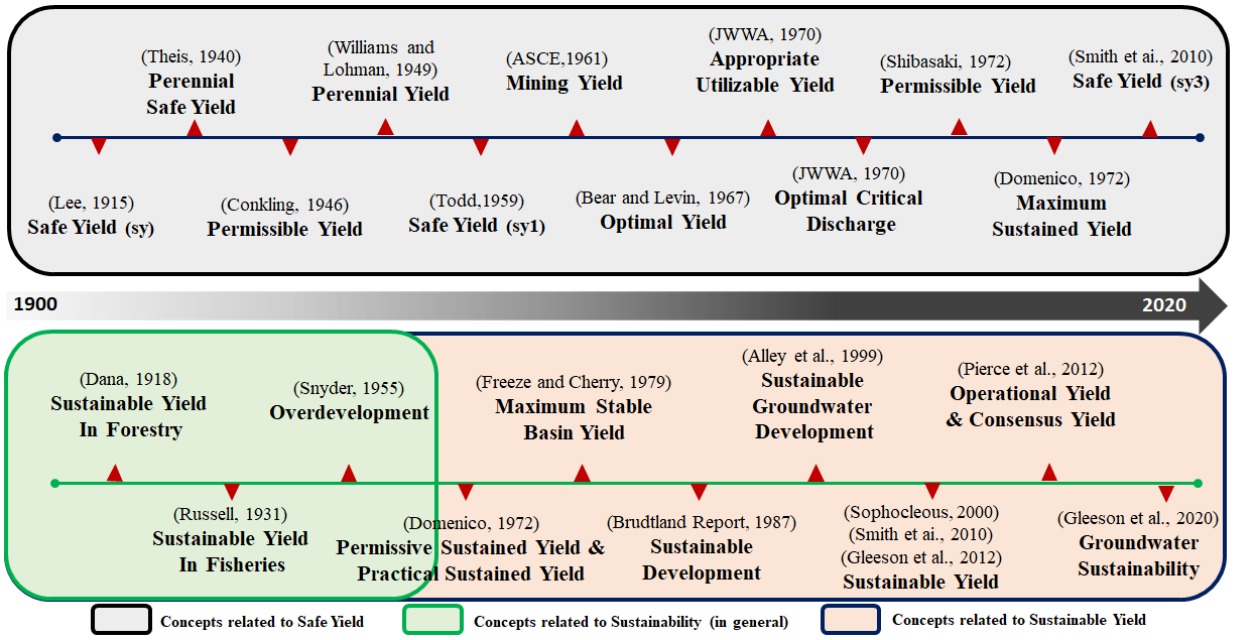

Fig. 5- Cronical trend of evolution of previous concepts related to groundwater management

شکل ۵- روند تکامل مفاهیم مرتبط با مدیریت آب‌زیرزمینی

به طور صحیح‌تر Theis (1940) نتیجه می‌گیرد که پمپاژ آب‌زیرزمینی با از دست دادن آب در جاهای دیگر (عمدتاً از برداشت از ذخایر قبلی، و احتمالاً ناشی از تغذیه آبخوان، کاهش تخلیه آبخوان و یا هر دو) همراه بوده و آبخوان به تعادل جدید می‌رسد. سپس تغییری در استفاده از مفهوم «پایا» به جای آبدهی «مطمئن» صورت گرفته است (Alley and Leake, 2004). Alley et al. (1999) بر این مورد که سیستم آب‌زیرزمینی، سیستم هیدرولوژیکی گسترده‌تری را در برگرفته است تأکید دارد. مفهوم آبدهی پایا از طریق ایجاد درک فنی از پیوند میان آب‌زیرزمینی و سایر مؤلفه‌های مدیریتی تکامل یافت. این مؤلفه‌ها شامل مباحث اقتصادی، تخریب کیفیت آب، حقابه‌ها و سایر عوامل مرتبط است (Alley and Leake, 2004; Kalf and Woolley, 2005). به عبارت ساده‌تر می‌توان گفت که مفاهیم مرتبط با آبدهی مطمئن بر خصوصیات هیدرولوژیکی آبخوان برای تعیین سقف برداشت آب توجه دارد و مفاهیم مرتبط با آبدهی پایا بر چگونگی سیاستگذاری برای مدیریت پایای آب‌زیرزمینی تأکید دارد.

روند تکامل مفاهیم مرتبط با تعیین حداکثر برداشت از آب‌زیرزمینی در جدول ۱ آورده شده است. تعریف آبدهی مطمئن (Lee, 1915) تعریف کاملاً دقیقی نیست و از نظر هیدرولوژیکی کمیّت قابل برداشت از آب آبخوان کمتر از افت خطرناک دقیقاً معلوم نیست که به چه معناست و همچنین مفهوم خطرناک و برداشت منظم نیز مبهم است. در حدود همان زمان‌ها که تعریف آبدهی مطمئن برای برداشت از آب‌زیرزمینی مطرح شد، برای تعیین حداکثر برداشت چوب از جنگل‌ها برای اولین کاربرد اصطلاح Sustainable Yield در حوزه منابع طبیعی مورد استفاده قرار گرفت و بیش از یک دهه بعد، این مفهوم برای اولین بار در صنعت ماهیگیری به کارگرفته شد (Rudestam and Langridge, 2014). سپس این مفهوم که بتوان مقدار مشخصی آب بصورت دائمی از آب‌زیرزمینی برداشت نمود توسط Theis (1940) مورد توجه قرار گرفته و مفهوم آبدهی مطمئن دائمی ارائه شد. در حقیقت مفهوم آبدهی مطمئن دائمی برای آبخوان‌های کوچک توسعه یافته و معمولاً برای آبخوان‌های بزرگ قابل کاربرد نیست. به عبارت دیگر این مفهوم مرزهای هیدرولوژیکی را به درستی ندیده است.

مفهوم آبدهی مطمئن سپس توسط Conkling (1946) اصلاح شد. در این تعریف به عدم تجاوز نرخ برداشت از ظرفیت طبیعی تغذیه آبخوان از نظر هیدرولوژیکی، و همچنین اقتصادی بودن برداشت آب از آبخوان توجه شده است و در ضمن تغییر کیفیت آب آبخوان نیز به مفهوم اضافه شده است. Williams and Lohman (1949) به حریم هیدرولوژیکی تغذیه آبخوان نیز توجه نمودند و مفهوم آبدهی دائمی را پیشنهاد دادند. در تعریف آبدهی دائمی اشاره‌ای به برداشت آب از ذخایر تجدیدناپذیر آبخوان نشده است. در این تحقیق به این مورد نیز اشاره شده است که اقتصادی بودن پمپاژ در حدی نیست که بخواهد به عنوان محدودیتی برای تعیین حداکثر کف‌شکنی مورد توجه باشد. تعریف اضافه برداشت یا توسعه بیش از حد برداشت از آب‌زیرزمینی در کتاب Snyder (1955) مورد توجه قرار گرفته است. همچنین در این کتاب تأکید شده است که این اضافه برداشت پایایی آبخوان را با مخاطره مواجه خواهد نمود و از آن به آبدهی استخراجی یاد نموده است. همچنین بین آبدهی مطمئن و آبدهی استخراجی که منجر پیامدهای بازگشت‌ناپذیر برای آبخوان می‌شود تمایز قائل شده است. این تعریف توسط Domenico (1972) تکمیل شده است.

Todd (1959) تعریف بسیار فشرده و خوبی برای اصلاح مفهوم آبدهی مطمئن ارائه نموده است. در حقیقت این مفهوم بر عدم وقوع پیامدهای نامطلوب برای آبخوان در اثر برداشت آب تأکید داشته است، ولی به مواردی برای مشخص کردن پیامدهای نامطلوب شامل نگرانی برای دسترسی آب، تغییر کیفیت آب و تضییع حقوق حقابه‌دارن و غیره اشاره خاصی ننموده است. در سال ۱۹۶۱ گزارشی مبنی بر جمع‌بندی مفاهیم مرتبط با تعیین حداکثر برداشت از آبخوان توسط انجمن مهندسین عمران آمریکا (ASCE) به چاپ رسید که برداشت از ذخایر تجدیدناپذیر آبخوان را تشریح نموده و از آن با مفهوم آبدهی استخراجی یاد شده است. همچنین در این گزارش بر این نکته تأکید شده است که مفهوم آبدهی استخراجی از مفاهیم اجتناب‌ناپذیر در آب‌زیرزمینی محسوب می‌شود. آبدهی بهینه مبتنی بر معادلات ریاضی و تحلیل آزمایش پمپاژ فقط برای تعیین بهترین نقطه آبدهی چاه بر اساس آزمایش پمپاژ توسعه یافت (Bear and Levin, 1967). به عبارت دیگر آبدهی بهینه معیاری است که فقط بر میزان آبدهی یک چاه تمرکز دارد. در این تعریف هیچ اظهار نظری در رابطه با تعیین حداکثر برداشت از آبخوان نشده است. بعد از چند سال برای تعیین حداکثر برداشت آب از مجموعه‌ای از چاه‌های مشخص و تعیین فاصله‌گذاری مناسب برای محل حفر چاه دو مفهوم آبدهی متناسب و آبدهی بحرانی بهینه توسط انجمن آب ژاپن در سال ۱۹۷۰ توسعه پیدا کرد. این دو مفهوم را می‌توان جزء اولین مفاهیمی که به حریم هیدرولیکی توجه نموده است درنظر گرفت. عدم رعایت حریم هیدرولیکی باعث افت تراز آبخوان و کاهش آبدهی چاه‌های مجاور می‌شود. البته بایدتوجه داشت که این دو مفهوم از توجه به تعیین حداکثر برداشت در سطح حوضه آبریز یک آبخوان غفلت نموده‌اند. لازم به ذکر است که مفهوم آبدهی بحرانی بهینه محدود نمودن برداشت به مقدار تغذیه آبخوان را مورد توجه قرار داده است.

Table 1- Definitions and Concepts of Aquifer Yield (Persian columns are redundant of English columns)
جدول ۱- تعاریف و مفاهیم مرتبط با آبدهی آبخوان (ستون‌های فارسی تکرار ستون‌های انگلیسی است)

تعریف	Definition	مفهوم	Concepts	نویسنده
حد کمیّت قابل برداشت از آب‌زیرزمینی به صورت منظم و مداوم، که افت خطرناک برای ذخیره رزرو آب‌زیرزمینی را در بر نداشته باشد.	The limit to the quantity of water which can be withdrawn regularly and permanently without dangerous depletion of the storage reserve	آبدهی مطمئن	**Safe Yield (sy1)**	Lee (1915)
حفظ نرخ برداشت چوب برابر با رشد چوب	Defined as setting timber harvest equal to timber growth	پایایی در برداشت چوب	**Sustainable Yield in Forestry**	Dana (1918)
به عنوان راهی برای پیش‌بینی عواقب فعالیت ماهی‌گیری بر جمعیت ماهی‌ها مورد استفاده قرار گرفت. «حداکثر پایایی» (MSY) در این زمینه، بیشترین میزان صیدی است که از یک گونه ماهی در یک دوره نامحدود، بدون کاهش جمعیت آن گونه می‌تواند صورت گیرد.	A way to predict the consequences of harvesting activities on fish populations. "Maximum sustainable yield" (MSY) in this context quantified the largest catch that could be taken from a species' stock over an indefinite period without causing depletion of the resource.	پایایی در صنعت ماهی‌گیری	**Sustainable Yield in Fisheries**	Russell (1931)
مقدار تغذیه و یا تخلیه از آبخوان که بصورت دائمی قابل برداشت است.	It is defined as equal to the amount of rejected recharge plus the fraction of natural discharge that it is feasible to utilize.	آبدهی مطمئن دائمی	**Perennial Safe Yield**	Theis (1940)
۱) برداشت آب در طی یک سال نباید بیش از میانگین تغذیه بلندمدت سالانه باشد، ۲) سطح ایستابی آنقدر افت پیدا نکند که هزینه پمپاژ آب از چاه توجیه اقتصادی نداشته باشد، ۳) سطح ایستابی نباید آنقدر پایین برود که آب شور وارد لایه‌های آب شیرین شده و کیفیت آب را نامناسب کند.	1) Water extraction in one year should not be more than the average long-term annual recharge, 2) The water level should not drop so that the permissible cost of pumping is exceeded, 3) The water level should not drop so much that it leads to salt water intrusion in wells and undesirable water quality.	آبدهی مطمئن	**Safe Yield (sy2)**	Conkling (1946)
به حداکثر نرخ حیازت آب (و یا احیاء آب) توجه نموده، که می‌توان آن را از ظرفیت تغذیه طبیعی و یا تخلیه [طبیعی] و یا هر دو برداشت نمود. در برخی گزارشات، پمپاژ اقتصادی نیز در این تعریف به عنوان یک عامل درنظر گرفته شده است. اما اقتصادی بودن پمپاژ ارتباطی با تعیین کمیت آبی که می‌توان از آبخوان برداشت نمود ندارد، بنابراین در اینجا نیز در نظر گرفته نشده است.	Has been regarded as the maximum rate at which water can be salvaged from the natural discharge, or added to the [natural] recharge or both. In some reports economical pumping lift has been a factor in this definition; however, the economics of recovery seems to be irrelevant to the determination of the quantity of water an aquifer will yield and so are not considered here	آبدهی دائمی	**Perennial Yield**	Williams and Lohman (1949)
اضافه برداشت/توسعه بیش از حد برداشت؛ شامل ۵ نوع است: ۱- توسعه برداشت به گونه‌ای که موجب افت مزمن سطح ایستابی در مناطق تخلیه/تغذیه طبیعی شود و تعادلی جدید به دست آید؛ ۲ و ۳- اضافه برداشت فصلی یا دوره‌ای: تغییر در سطح آب‌زیرزمینی در دوره زمانی (سالانه و یا فصلی) به گونه‌ای که بعد دو یا چند سال (و یا چند فصل) نتواند به سطح قبلی‌اش بازگردد؛ ۴- اضافه برداشت بلندمدت: پمپاژ دائمی از ظرفیت تغذیه آب‌زیرزمینی بیشتر شود (برداشت از آبخوان به مثابه استخراج از معادن)؛ ۵- اضافه برداشت بحرانی: اضافه برداشت به گونه‌ای که پیامدهای غیرقابل بازگشت (فرونشست و شور شدن و غیره) برای آبخوان حادث شود.	Overdraft/Overdevelopment (5 types): (1) Development overdraft which leads to lowering of the water table in the areas of natural recharge/discharge, resulting in a new equilibrium water table depth; (2) and (3) Seasonal/cyclical overdraft: change in water level in a time period (seasonal/annual) so that it can not return to its previous level after two or more seasons/years; (4) Long-run overdraft: perennial pumping exceeding replenishment capacity (i.e. mining); (5) Critical overdraft- pumping leads to irreversible undesirable result (e.g., subsidence and salinization).	اضافه‌برداشت	**Overdraft/ Overdevelopment**	Snyder (1955)
مقدار آبی است که بصورت سالانه بدون ایجاد پیامدهای نامطلوب (برای حوضه آب‌زیرزمینی) می‌توان برداشت نمود.	The amount of water which can be withdrawn annually without producing an undesirable result (for the groundwater basin).	آبدهی مطمئن	**Safe Yield (sy3)**	Todd (1959)
این آبدهی مربوط به حجم آب قابل استخراج از ذخایر تجدیدناپذیر است. این آبدهی از مفهوم استخراج در معادن ذغال سنگ و غیره اقتباس شده است.	Mining yield is the volume of extractable, Non-renewable water in a groundwater basin. It is an exhaustible resource of fixed supply, somewhat analogous to a mineral or petroleum deposit	آبدهی استخراجی	**Mining Yield**	ASCE[22] (1961)
حداکثر میزان آبدهی که از یک چاه بر اساس آزمایش پمپاژ قابل برداشت است.	It is a percentage of the critical discharge and is determined based on the pumping test.	آبدهی بهینه	**Optimal Yield**	Bear and Levin (1967)
مقدار آبی که از یک مجموعه چاه و در یک زمان مشخص و از یک آبخوان مشخص می‌توان برداشت نمود.	"The amount multiplied by a safety factor for water flow per unit of time of certain aquifer"	آبدهی متناسب	**Appropriate Utilizable Yield**	JWWA[23] (1970)
توسعه برداشت کمتر از تغذیه طبیعی آبخوان	Development overdraft which is less than the natural recharge of the aquifers.	آبدهی بحرانی بهینه	**Optimal Critical Discharge**	JWWA (1970)
ایشان با مفهوم آبدهی مطمن از دید اجتماعی-اقتصادی مخالفت نمود؛ و معتقد بود که تراز آبدهی مجاز در توسعه آب	He contradicted the concept of safe yield from socio-economic point of view and stated the permissible level in	آبدهی مجاز	**Permissible Yield**	Shibasaki (1972)

			groundwater development and preservation is determined by both scientific characteristics of the aquifers and socio-economic factors.	زیرزمینی تنها به وسیله خصوصیات علمی آبخوان تعیین نمی‌شود، بلکه عوامل اجتماعی–اقتصادی نیز بر آن اثر دارند.
Domenico (1972)	**1-Maximum sustained yield 2- Permissive sustained yield 3- Practical sustained yield**	۱– حداکثر آبدهی پایا ۲– آبدهی پایای مجاز ۳– آبدهی پایای عملیاتی	The concept of sustained yield is subdivided into the following three terms: 1- **Maximum sustained yield** is the maximum rate at which water can be withdrawn perennially from a particular source. 2- **Permissive sustained yield** is the maximum rate at which water can economically and legally be withdrawn perennially from a particular source for beneficial purpose without undesired results. 3- **Practical sustained yield** is the amount of water can be withdrawn annually without producing undesirable effects.	مفهوم آبدهی پایا به سه عبارت زیر تقسیم می‌شود: ۱– حداکثر آبدهی پایا: بیشترین نرخ برداشتی است که در آن می‌توان حجم مشخصی را به طور دائم از یک منبع خاص برداشت نمود؛ ۲– آبدهی پایای مجاز نرخ برداشتی است که در آن می‌توان حجم مشخصی را از نظر اقتصادی و قانونی به طور دائم از یک منبع خاص برای اهداف سودمند بدون ایجاد پیامد نامطلوب برداشت نمود؛ ۳– آبدهی پایای عملیاتی: مقدار آب قابل برداشت بصورت سالانه است که بدون ایجاد اثرات نامطلوب می‌توان از آبخوان برداشت نمود.
Freeze and Cherry (1979)	**Maximum Stable Basin Yield**	بیشترین آبدهی پایدار حوضه	He suggested that the "maximum stable basin yield" can be determined by using the 3D modeling of groundwater.	ایشان پیشنهاد نموده است برای تعیین «بیشترین آبدهی پایدار حوضه»، بیلان آب حوضه با استفاده از مدلسازی سه بعدی آب زیرزمینی تعیین شود.
Brudtland Report (1987)	**Sustainable Development**	توسعه پایا	Sustainable development is defined based on the needs of the current generation, with considering the needs of the future generations.	توسعه پایا آن است که نیازهای کنونی برآورده شوند در حالی که توانایی نسل‌های آینده برای برآوردن نیازهای ایشان آسیب نبیند. چنین توسعه‌ای مبتنی بر درنظر گرفتن مسائل محیط‌زیستی، اجتماعی و محافظت بلندمدت از منابع باید مورد توجه قرار گیرد.
Alley et al. (1999)	**Sustainable Groundwater Development**	توسعه پایای آب‌زیرزمینی	Pumping is estimated given hydrological, environmental, and socioeconomic consequences	نرخ پمپاژ با درنظر گرفتن پیامدهای هیدرولوژیکی، محیط زیستی و اقتصادی–اجتماعی تعیین می‌شود.
Sophocleous (2000)	**Sustainable Yield**	آبدهی پایا	Sustainable yield of an aquifer must be considerably less than recharge, if adequate amounts of water are to be available to sustain both the quantity and quality of streams, springs, wetlands, and ground-water-dependent ecosystems.	برای آنکه آب کافی با کیفیت مناسب برای جریان چشمه‌ها، رودخانه‌ها، تالاب‌ها و نیز اکوسیستم وابسته آب‌زیرزمینی وجود داشته باشد، آبدهی پایا باید به مقدار قابل ملاحظه ای کمتر از تغذیه آبخوان باشد.
Smith et al. (2010)	**Safe Yield (sy4)**	آبدهی مطمئن	Pumping is constrained by the amount of groundwater recharge	نرخ پمپاژ تا سقف نرخ تغذیه آبخوان مجاز است.
Smith et al. (2010)	**Sustainable Yield**	آبدهی پایا	Pumping is constrained by feasible capture of the groundwater outflow for groundwater dependent ecosystems	پمپاژ محدود به میزان توجیه‌پذیری از تخلیه آب‌زیرزمینی برای اکوسیستم‌های وابسته به آن شده است.
Gleeson et al. (2012)	**Sustainable Yield**	آبدهی پایا	Groundwater sustainability is not an objective goal, but is "a value-driven process of intra- and intergenerational equity that balances the environment, society and economy."	پایایی آب‌زیرزمینی یک هدف نیست، بلکه فرآیندی ارزش محور در ارتباط با عدالت (برابری) درون و میان نسلی است که موجب تعادل میان محیط زیست، اجتماع و اقتصاد می‌شود.
Pierce et al. (2012)	**Operational Yield**	آبدهی عملیاتی	Range of feasible pumping regimes is determined for the operational or technical implementation of policy	دامنه‌ای از پمپاژ (برداشت از آب‌زیرزمینی) به منظور پیاده‌سازی فنی و یا عملیاتی سیاست‌ها تعریف می‌شود.
Pierce et al. (2012)	**Consensus Yield**	آبدهی توافقی	Pumping is bounded by preference of affected actors through participation or adaptive governance processes	پمپاژ مبتنی بر ترجیحات کنشگرانِ تحت تأثیر از طریق فرآیندهای حکمرانی مشارکتی و تطبیقی تعریف می‌شود.
Gleeson et al. (2020)	**Groundwater Sustainability**	پایایی آب‌زیرزمینی	Long-term, dynamically stable storage [and flow] of high-quality groundwater [is maintained] using inclusive, equitable, and long-term governance and management	حکمرانی و مدیریت عادلانه و فراگیر برای حفظ کیفیت (و جریان) آب‌زیرزمینی با نگاه بلندمدت و پویا تعریف می‌شود.

Domenico (1972) در کتاب «مفاهیم و مدل‌سازی هیدرولوژی آب‌زیرزمینی» به بررسی این مسئله که آیا آب زیرزمینی باید بر مبنای آبدهی پایا حفظ شود و یا بر اساس آبدهی استخراجی مدیریت شود پرداخته و برای اولین بار مفاهیم بنیادی در کاربرد پایایی در آب‌زیرزمینی را مورد بحث قرار داده است. البته به این مسأله هنوز پاسخ دقیقی داده نشده است. زیرا میزان برداشت توسط شرایط و تقاضاهای محلی کنترل می‌شود نه با تصمیمات سیاستی. با وجود اینکه سیاست‌ها خیلی مهم هستند، ولی شرایط محلی معمولاً در اولویت قرار می‌گیرد. متأسفانه مشخص است که اکثر مردم تمایلی به سیاست‌های کاهش برداشت آب ندارند، در حالی که خود استفاده پایا به یک حلقه دوام/پایایی توجه دارد. معنای مطلق آبدهی پایا و استخراجی هرچه که باشد این دو مفهوم در آب‌زیرزمینی مهم هستند. در هر حال مدیریت آب‌زیرزمینی با این دو مفهوم عجین است. Domenico (1972) سه مفهوم برای تشریح پایایی شامل حداکثر آبدهی پایا، آبدهی پایای مجاز

و آبدهی پایای عملیاتی را ارائه نموده است. همچنین Freeze and Cherry (1979) پیشنهاد نموده است تا برای تعیین بیشترین آبدهی پایدار حوضه از بیلان آب حوضه با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی آب‌زیرزمینی استفاده گردد.

اولین کاربرد «توسعه پایای آب‌زیرزمینی» توسط Alley et al. (1999) صورت پذیرفت. سپس مفهوم آبدهی مطمئن Smith et al. (2010) مورد اصلاح قرار گرفت که آبدهی مطمئن به حداکثر ظرفیت تغذیه وابسته است و نمی‌تواند از ظرفیت تغذیه فراتر رود. سپس مفهوم آبدهی عملیاتی و آبدهی توافقی (Pierce et al., 2012) توسعه یافت. در آبدهی عملیاتی بر این نکته تأکید شده است که برداشت از منابع آب‌زیرزمینی باید متناسب با سیاستگذاری باشد. همچنین در آبدهی توافقی بر ضرورت توجه به مشارکت و حضور مردم در مدیریت آب توجه شده است. آخرین مفهومی که در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است مفهوم پایایی آب‌زیرزمینی (Gleeson et al., 2020) است. در این مفهوم به هم‌تکاملی سیستم‌های مرتبط با آب توجه و همچنین بر ضرورت اقدام مبتنی بر برنامه بلندمدت برای حفاظت از اکوسیستم تأکید شده است.

۵- فراتحلیل

آنچه تاکنون موردتوجه قرار گرفت مفاهیم ارائه شده در زمینه مفاهیم آبدهی آب‌های زیرزمینی، ارتباط این مفاهیم با مدیریت منابع آب زیرزمینی و سیر تکامل آن بر اساس نیاز جوامع بود. اما تنها دانستن این مفاهیم برای مدیریت پایای منابع آب زیرزمینی کافی نیست. عملیاتی‌سازی سیاست‌های آب‌زیرزمینی مرتبط با پایایی مستلزم ایجاد یک پایه مفهومی محکم برای انتقال دانش علمی به تصمیم‌سازان در اجتماع است (Archfield et al., 2010; Maimone, 2004; Pierce et al., 2012). لذا ضروری است تا بررسی دقیق پیرامون سه چالش اصلی صورت پذیرد:

۱- علم پایایی آب‌زیرزمینی، شامل علوم طبیعی و علوم اجتماعی است؛ از این‌رو، علمی درهم‌تنیده محسوب می‌شود. مدیریت آب‌زیرزمینی هم‌تکاملی سیستم بیوفیزیکی و اجتماعی-اقتصادی را در برمی‌گیرد که به طور کامل درنظر گرفتن همه این ابعاد در چارچوب مدل‌سازی آب‌زیرزمینی امری دشوار است. درک و مدل‌سازی هم‌تکاملی اجتماع با سیستم‌های منابع آب، اکوسیستم‌ها و چگونگی تعامل میان آن‌ها با محدودیت‌های مشخص، چالشی پیچیده و فرا رشته‌ای است که جنبه‌های فیزیکی، اجتماعی-اقتصادی، فناوری و نهادی را در بر می‌گیرد. اگرچه اخیراً در موارد بسیار زیادی به این برهم‌کنش‌ها در برنامه‌های پایایی آب توجه شده است که نمونه‌ای از تحقیقات در حال ظهور در ادبیات آب‌زیرزمینی می‌باشد (Archfield et al., 2010; Brown et al., 2015; Montanari et al., 2013; Thompson et al., 2013)؛

۲- این مدل‌های یکپارچه می‌توانند هر دو جنبه درهم‌تنیده طبیعی و اجتماعی و پویایی سیستم‌های آب همراه با عدم قطعیت‌های آن را دربر گیرد (Aeschbach-Hertig and Gleeson, 2012; Gober et al., 2010; Taylor et al., 2013; Wheater and Gober, 2015)؛

۳- اغلب یک شکاف ارتباطی بین جامعه دانشگاهی، تصمیم‌گیرندگان و خبرگان وجود دارد که باعث می‌شود خروجی‌های علمی کمتر تقاضا محور باشد (Castilla- Rho, 2017).

با این حال، Bredehoeft and Alley (2014) نشان دادند که چگونه واقعیت‌های عملی در مرحله اجرایی نمودن مدیریت آب‌زیرزمینی برآورد واقعی از دسترسی به پایایی منابع را در عمل دشوار می‌شود. این واقعیت عمدتاً به دلیل وجود دیدگاه‌های مختلف در مورد پایایی آب‌زیرزمینی توسط کنشگران مختلف و تنوع تفاسیر از مطلوبیت و کیفیت منابع آب‌زیرزمینی از طریق ارزش‌های اجتماعی مختلف است. علاوه بر این، پیوندهای پیچیده‌ای بین عوامل متعدد مرتبط با کارایی و حکمرانی آبخوان وجود دارد. بنابراین وجود چندین اصطلاح کارایی آبخوان مانند آبدهی مطمئن، آبدهی پایا، آبدهی چند ساله، آبدهی تجدیدپذیر، آبدهی مبتنی بر پیامدها، کارایی عملیاتی، آبدهی مدیریتی، پمپاژ بهینه با درنظر گرفتن هزینه‌های خصوصی و اجتماعی، عملکرد بهینه و بسیاری موارد دیگر که توسط Hata (1998) بررسی شده است، می‌تواند سوء تفاهم بیشتری ایجاد کند. Molle (2011) این ابهام اساسی را به شرح زیر بیان می‌کند:

به شرط حفظ بیلان مثبت، تخصیص آب در بسیاری از موارد مانند یک بازی است که همواره حاصل جمع آن صفر است. سود یک استفاده کننده در یک نقطه احتمالاً هزینه استفاده کننده دیگری را در نقطه‌ای دیگر در پی خواهد داشت. از نظر زمانی نیز استفاده کوتاه مدت در اینجا با استفاده نسل‌های آتی از همین منابع آب‌زیرزمینی مشترک تضاد دارد. آنچه برای یک استفاده کننده قابل اطمینان محسوب می‌شود، برای استفاده کننده دیگر ناامنی به حساب می‌آید. برخی از خسارات ممکن است از دیدگاه یک بخش بسیار ناچیز به نظر برسد، اما همان خسارات ممکن است که از دیدگاه بخش دیگر این گونه نباشد. به عبارت دیگر، بدلیل گستردگی و پیچیدگی منابع-مصارف آب، و نیز پیوستگی منابع آب (سطحی و زیرزمینی، بالادست و

پایین‌دست و غیره)، برای آب‌بران متفاوت تعاریف و مفاهیم مرتبط با ارزش آب، نحوه استفاده از آب و حقابه به یکدیگر وابسته است. به نظر می‌رسد استفاده از آب‌زیرزمینی به طور پیچیده‌ای با این چرخه گسترده مرتبط است و توجه به مسائل حقوقی، برابری، کارایی اقتصادی و ارزش‌های محیط‌زیستی اجتناب‌ناپذیر است. بررسی‌ها نشان داده است که توافق برای دستیابی به مدیریت پایای آب‌زیرزمینی در حال ظهور است که نیازمند رویکردی گرودار محور و توجه به هر دو جنبه سیاست و علم است (Aeschbach-Hertig and Gleeson, 2012; Alley et al., 2018; Rudestam and Langridge, 2014).

۵-۱- تغییر رویکرد از نگاه تک چاه به نگاه حوضه‌ای

یکی از مهمترین تغییراتی که در روند تکامل مفاهیم مرتبط با آبدهی آب‌زیرزمینی رخ داده است، تغییر رویکرد از تعیین آبدهی یک چاه مشخص بر اساس آزمایش پمپاژ به تعیین آبدهی یک آبخوان مشخص بر اساس حوضه آبریز آبخوان است. در شکل ۶ سه حریم (محدوده مساحت تحت تأثیر) مشخص برای طبقه‌بندی مفاهیم تعیین شده است. اولین محدوده مورد بررسی فقط محدوده خود چاه بوده است. پیشتر این عمل از طریق آزمایش پمپاژ و تعیین دانه‌بندی خاک صورت می‌پذیرفته است. این محدوده با رنگ سفید مشخص شده است. مفهوم آبدهی بهینه[۲۴] مبتنی بر ظرفیت پمپاژ آب از یک چاه تعیین می‌شد. می‌توان از مباحث مطرح در این دوران به بحث تخلیه آب بحرانی[۲۵]، حداکثر آب قابل تخلیه[۲۶] و مباحث اقتصادی[۲۷] مربوط به پمپاژ آب از آبخوان اشاره نمود (Hata, 1998).

دومین محدوده مورد بررسی که در شکل ۶ با مستطیل خاکستری رنگ مشخص شده است، مربوط به حریم هیدرولیکی مجموعه‌ای از چاه‌ها است. برای تشریح بیشتر ارتباط بین شعاع تأثیر مجموعه‌ای از چاه‌ها با تغییر تراز آب‌زیرزمینی در شکل ۷ نشان داده شده است. یکی از موضوعات مهم در برداشت آب از آبخوان، مسأله فاصله‌گذاری بین چاه‌ها برای پمپاژ آب است (شعاع تأثیر چاه). برای تعیین این فاصله‌گذاری مفهوم آبدهی بحرانی بهینه[۲۸] پیشنهاد شد. این شاخص بر اساس میزان آبدهی مجموعه‌ای چاه تعیین می‌شود، به گونه‌ای که فاصله‌گذاری بین چاه‌ها به حدی باشد تا علاوه برای رعایت شعاع تاثیر مجموعه چاه‌ها موجب افت تراز آبخوان نگردند (Walton, 1970) (شکل ۷).

سومین بخش مربوط به تعیین حداکثر برداشت از آب‌زیرزمینی مبتنی بر رعایت حریم هیدرولوژیکی است که در شکل ۶ با مستطیل سفید رنگ مشخص شده است که دو بخش اول را نیز دربر می‌گیرد. در حریم هیدرولوژیکی مقدار حداکثر برداشت برای یک آبخوان مشخص در سطح حوضه آبریز آن آبخوان مشخص می‌شود. تعیین برداشت مبتنی بر رعایت حریم هیدرولوژیکی می‌تواند با سه رویکرد اصلی انجام پذیرد. رویکرد اول رویکرد پایایی آب‌زیرزمینی است که در شکل ۶ با رنگ سبز مشخص شده است. در این رویکرد برداشت آب بخشی از ذخایر تجدیدپذیر آبخوان بوده، به‌گونه‌ای که معیار آبدهی پایا رعایت گردد. رویکرد دوم که با رنگ قرمز مشخص شده است، برداشت آب از آبخوان مبتنی بر آبدهی استخراجی است. در این رویکرد به آب‌زیرزمینی به عنوان یک منبع تجدیدپذیر نگاه نمی‌شود، بلکه به عنوان منبعی به مثابه دیگر معادن (طلا، نقره، مس و غیره) دیده می‌شود که برداشت از آن تا اتمام کامل آبخوان ادامه می‌یابد. در این رویکرد مفاهیم آبدهی استخراجی مطمئن[۲۹] و حداکثر آبدهی استخراجی[۳۰] مطرح شده است. این دو مفهوم برداشت از ذخایر تجدیدناپذیر آب[۳۱] را به شرط اینکه پیامدهای نامعقول گسترده برای آبخوان مانند فرونشست به وجود نیاید، پذیرفته است (Elshall et al., 2020). رویکرد سوم رویکردی بینابینی است، به‌گونه‌ای که در شرایط خاص اجازه برداشت از ذخایر تجدیدناپذیر آب‌زیرزمینی را می‌دهد، به شرط اینکه این ذخایر تجدیدناپذیر در دوره‌های آتی دوباره جایگزین شود. این رویکرد را می‌توان به زبان ساده‌تر برداشت مبتنی بر استخراج هوشمندانه[۳۲] نام نهاد. البته در مفهوم آبدهی مطمئن اگرچه تعاریف اولیه نادقیق بوده است، اما به گونه‌ای بر همین مفهوم اشاره دارد که برداشت نباید از سقف منابع تجدیدپذیر آب‌زیرزمینی بیشتر شود.

با توجه به آنچه در بخش مقدمه مقاله ارائه شد، مقالات منتشر شده در داخل کشور تا حدود بسیار زیادی بر محدودیت‌های اقتصادی برای تعیین حداکثر برداشت از آبخوان (عمق کف‌شکنی) تأکید داشته‌اند. همانگونه که در جدول ۱ نیز ارایه شده است، ابتدا توسط Conkling (1946) پیشنهاد شد تا هزینه پمپاژ از منابع آب‌زیرزمینی به عنوان یک فاکتور محدود کننده به مفهوم آبدهی مطمئن اضافه شود. سپس Williams and Lohman (1949) با توجه به اینکه منابع آب دارای ارزش بسیار بالایی بوده و افزایش هزینه‌های پمپاژ آب در قیاس با منافع ناشی از کاربری آب قابل اغماض هستند، پیشنهاد نمودند بهتر است که افزایش هزینه‌های پمپاژ کنار گذاشته شود. در طی نیمه دوم قرن بیستم، با تکیه بر مفهوم پایایی بتدریج «پیامدهای نامطلوب ناشی از اضافه برداشت» به عنوان مبنایی برای محدود نمودن (یا تعیین حداکثر) نرخ پمپاژ آب از آبخوان مطرح شدند (Derakhshan and Davary, 2019). برای نمونه، قانون پایایی آب زیرزمینی کالیفرنیا پرهیز از شش پیامد نامطلوب را مبنای مدیریت آب زیرزمینی قرار داده است (Owen et al., 2019).

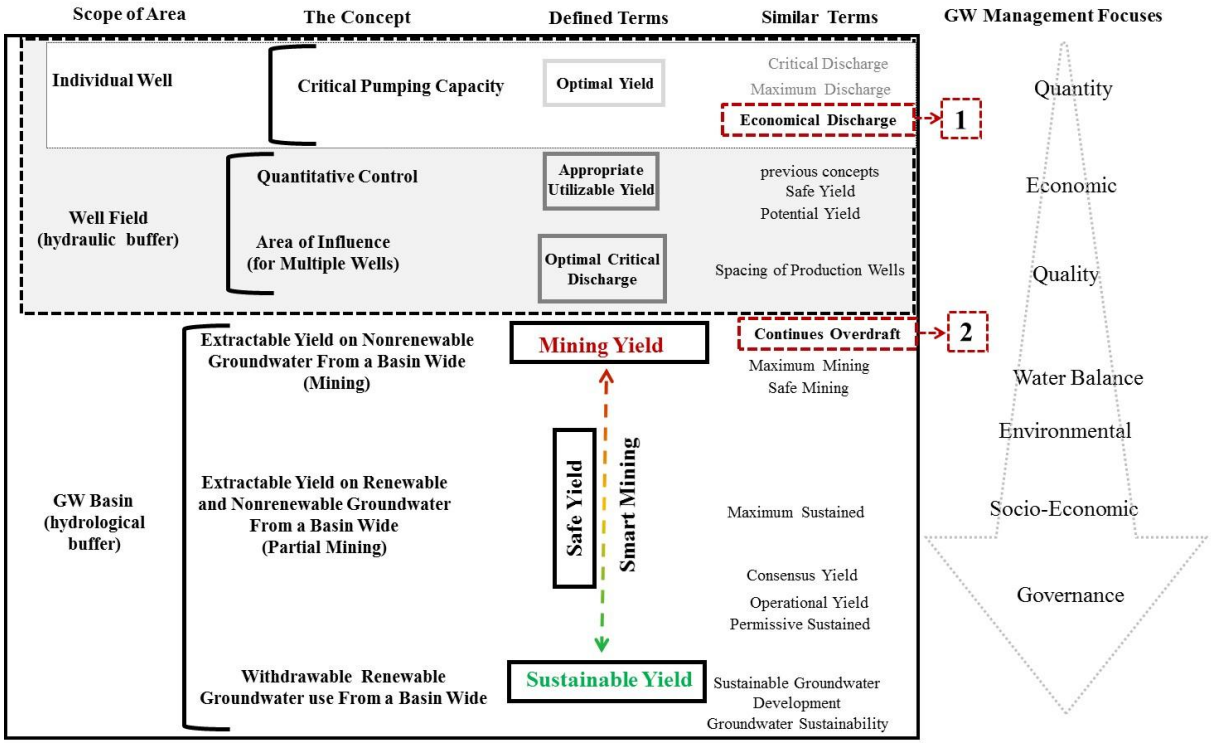

Fig. 6- Classification of the terms on Groundwater (GW) Yield (1- Focus of the Articles published in Iran & 2-State of the GW Management in Iran)

شکل ۶- طبقه‌بندی مفاهیم مرتبط با آبدهی آب‌زیرزمینی (۱- تمرکز مقالات منتشر شده در داخل کشور در تعیین حداکثر برداشت از آب‌زیرزمینی و ۲- جایگاه مدیریت آب‌زیرزمینی در ایران)

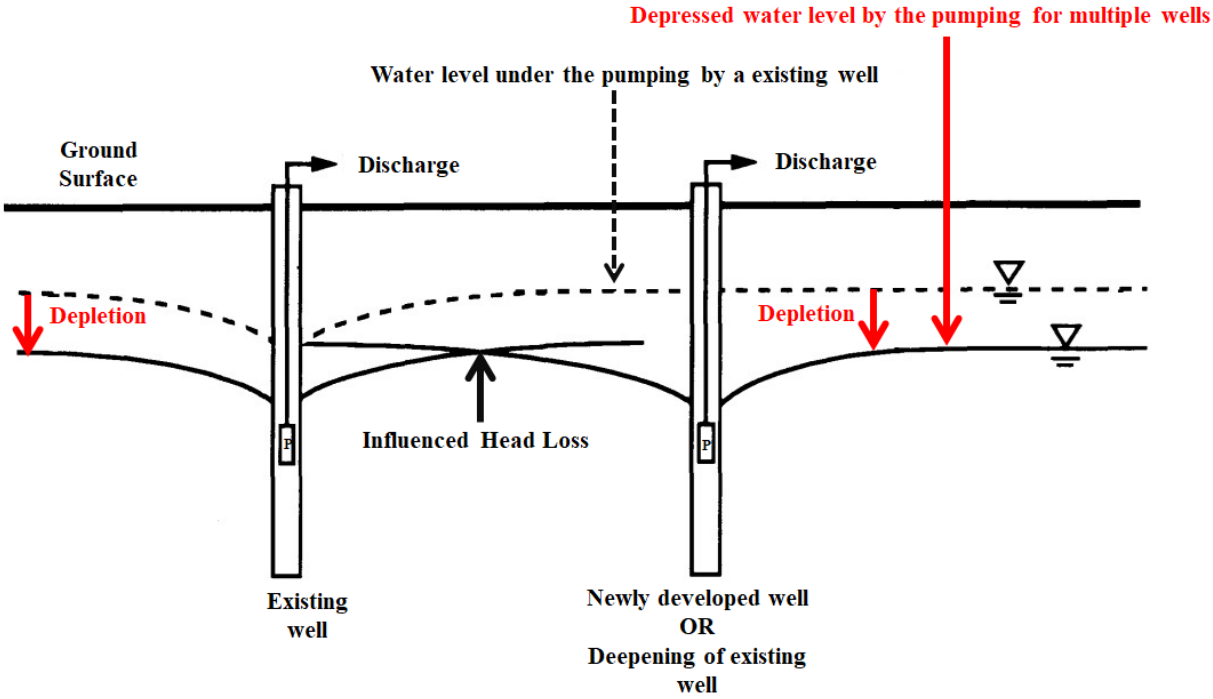

Fig. 7- Relation between influenced head loss and groundwater level for multiple wells (Walton, 1970)

شکل ۷- ارتباط بین شعاع تأثیر مجموعه‌ای از چاه‌ها با تراز آب‌زیرزمینی (Walton, 1970)

این شش پیامد شامل کاهش آبدهی آبخوان، کاهش منابع آب سطحی (ناشی از افت آب‌زیرزمینی)، تغییر کیفیت آب‌زیرزمینی ناشی از نفوذ آب شور به آبخوان، تغییر کیفیت آب ناشی از عوامل بیرونی مثل ورود آلودگی‌های بشری، فرونشست و اضمحلال ذخایر تجدیدناپذیر آبخوان است. مطابق شکل ۷ بر اساس مکانیزم رعایت حریم هیدرولیکی، مقدار حداکثر برداشت آب از آبخوان تابع فاصله‌گذاری مناسب چاه‌ها از یکدیگر است. سپس از نیمه دوم قرن بیستم با توجه به ضرورت پیشگیری از افت آبخوان، مبحث حریم هیدرولوژیکی مطرح شده و بر اساس آن حداکثر میزان برداشت آب از یک آبخوان (و حوضه آن) تابع بیلان آب زیرزمینی قرار داده شده است (Hata, 1998). طی قرن اخیر در ایران توجه کافی برای شناسایی و مدیریت پیشرانه‌های شکل‌گیری تقاضای آب و کنترل آنها در کوتاه‌مدت و مقیاس حوضه صورت نپذیرفته است؛ زیرا، این پیشرانه‌ها بر برداشت‌ها و مصارف آب مؤثرند و نقشی اساسی در ایجاد تعادل میان منابع و مصارف دارند. روند تغییرات اقلیمی و تأثیر آن بر تغییر ظرفیت دسترسی به منابع آب به طور صحیح تبیین نشده و جایگاهی در تعیین میزان برداشت از آب‌زیرزمینی ندارد. مطالعات اخیر حاکی از آن است که تغییر اقلیم موجب تغییر رژیم بارش‌ها و دما و نهایتاً تغییر تجدیدپذیری منابع آب می‌شوند (Wu et al., 2020). بنابراین لازم است تا چگونگی سازگاری و کاهش برداشت از آب‌زیرزمینی در میان‌مدت و مقیاس حوضه، و یا کنترل آنها در بلندمدت مورد توجه قرار گیرد.

اگرچه که به منظور کنترل اضافه برداشت آب‌زیرزمینی در ایران برنامه‌های متعددی تاکنون ابلاغ شده است که به عنوان نمونه می‌توان به قانون ملی شدن آب در سال ۱۳۴۷، کنترل اضافه برداشت با اعلام ممنوعیت برای دشت‌ها در سال ۱۳۵۰، طرح تعادل‌بخشی آب‌زیرزمینی در سال ۱۳۸۲، تصویب تخصیص ۷۵ درصد تجدیدپذیری حوضه توسط شورای عالی آب در سال ۱۳۹۳ و طرح سازگاری با کم‌آبی در سال ۱۳۹۷ اشاره نمود، اما علیرغم تغییر رویکرد در بسیاری از کشورها به سمت حفاظت و پایایی آب‌زیرزمینی، هنوز هم مدیریت منابع آب‌زیرزمینی در ایران دارای برنامه عملیاتی مناسب برای کنترل اضافه برداشت و حرکت به سمت پایایی آب‌زیرزمینی نیست.

این در حالی است که عملاً مدیریت آب‌زیرزمینی در کشور در کنترل برداشت به پایایی منجر نشده است و نارضایتی بخشی از آب‌بران قانونی را در بر داشته است. به عنوان نمونه اقدام در راستای کاهش پروانه آب‌بران قانونی (بر خلاف ماده ۴۴[۳۳] قانون توزیع عادلانه آب)، احساس نارضایتی در ایشان بوجود آورده است (Davari et al., 2019). کشاورزان که حجم پروانه مجاز آن‌ها روز به روز در حال کاهش است، تصور می‌کنند به حقوق آن‌ها تجاوز شده است. با توجه به اتهاماتی که در عدم مصرف صحیح آب به کشاورزان و آب‌بران قانونی وارد شده است، این گروه به شدت رنجیده خاطر شده‌اند و حس مالکیت آب از ایشان سلب شده است. این شرایط بر اساس نظریه استروم درباره غارت منابع مشترک (Keeble, 1988) منجر به ازدیاد برداشت غیر قانونی از منابع آب گشته است. در مجموع ادامه تصمیمات مدیریتی چند دهه اخیر افزایش تعارضات، افت ذخایر استراتژیک آب‌زیرزمینی و نهایتا کاهش تاب‌آوری توسعه در مقابل ابرخشکسالی‌های آتی را به همراه خواهد داشت (Alipor and Derakhshan, 2019).

مدیریت آب‌زیرزمینی لازم است خشکسالی را نیز لحاظ کند؛ زیرا عملاً ادامه برداشت معمول طی خشکسالی‌ها موجب افت پلکانی تراز آب‌زیرزمینی می‌شود. اگر در نبود برنامه مدیریت خشکسالی کاهش برداشت‌ها صورت نپذیرد، امکان بازگشت آبخوان به تراز اولیه وجود ندارد. در ایران، اضافه برداشت‌ها از آب زیرزمینی موجب اُفت مستمر آبخوان است و در خشکسالی‌ها به دلیل کاهش بارش میزان تغذیه به شدت کاهش یافته و افت آبخوان تشدید می‌شود. بنابراین، ضروری است برنامه مدیریت خشکسالی وجود داشته باشد تا بر اساس آن برداشت‌ها از آبخوان به تناسب کاهش تجدیدپذیری، کاهش یابند. علاوه بر این، لازم است برداشت از منابع آب زیرزمینی بسیار کمتر از متوسط تجدیدپذیری آبخوان بـاشد تا در صورت وقوع خشکسالی‌های شدید و طولانی، آب‌زیرزمینی تاب‌آوری لازم را داشته بـاشد. همچنین، حفظ ذخیره‌ای مناسب از آب‌زیرزمینی به‌عنوان رزرو خشکسالی برای چنین شرایطی (ذخیره استراتژیک) ضروری است (Mianabadi et al., 2020).

در انتها باید خاطر نشان گردد که، سازگاری با پویایی محیط (با رصد آینده یعنی پیش‌نگری و آینده‌پژوهی) از اصول دستیابی به پایایی آب‌زیرزمینی محسوب می‌شود؛ لذا ضروری است تا نگرش بلندمدت مدیریت پایای آب زیرزمینی مبتنی بر معیارهای تاب‌آوری توسعه مدنظر پژوهشگران قرار گیرد.

۶- جمع‌بندی

این تحقیق به مرور مقالات و سایر منابع علمی در سطوح ملی و بین‌المللی در ارتباط با تعیین حداکثر برداشت آب از آب‌زیرزمینی پرداخته است. در این بخش مرور انجام یافته تحت دو عنوان: «تجارب سایر کشورها» و «ضرورت تغییر رویکرد در مدیریت آب‌زیرزمینی کشور» جمع‌بندی شده است.

۱- تجارب سایر کشورها: بررسی تجارب سایر کشورها حاکی از تحولی جدی و عمیق در مدیریت آب‌زیرزمینی طی ۱۲۰ سال گذشته است؛ که در سه مورد به شرح زیر جمع‌بندی می‌شود:

● تحول در مفاهیم مدیریت آب‌زیرزمینی: این تحول و سیر تکامل را می‌توان از حوزه‌های مستقیم مرتبط با آب مانند کمیّت آب، اقتصاد برداشت آب، کیفیت، و بیلان آب تا حوزه‌های فراتر از آب مانند محیط زیست، اقتصادی-اجتماعی و حتی حکمرانی درنظر گرفت. این جمع‌بندی در بخش سمت راست شکل (فلش رو به پایین) ارایه شده است.

● تعیین حداکثر برداشت از آبخوان مبتنی بر نشانگرهای مطلوب و معقول: پس از مشاهده زوال کیفی آب‌زیرزمینی (ناشی از نفوذ آب شور به آبخوان‌ها و یا شوری القایی) در اثر اضافه برداشت، محدودیت‌های ناشی از زوال کیفی آبخوان‌ها به عنوان یک عامل محدودکننده معرفی شد. استفاده از نشانگرها و شاخص‌ها در مدیریت، امری معمول و مفید است. در واقع به کمک نشانگرها به آسانی مطلوب و نامطلوب از یکدیگر تفکیک می‌شوند. برای نمونه، طی نیم‌قرن که جلوگیری از کاهش کیفیت آب به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین میزان برداشت محسوب شده، نشانگرهای منطقی و مبتنی بر اصول علمی برای مدیریت و کنترل برداشت از دیدگاه کیفیت آب مطرح شده است.

● ارزیابی مستمر پایایی آب‌زیرزمینی: طی دو دهه اخیر، سیر تحول در مفاهیم بنیادی برای تعیین حداکثر برداشت از آبخوان از بیلان و هیدرولوژی آب‌زیرزمینی به پیشرانه‌های برداشت آب (در حوزه اقتصاد و اجتماع) معطوف شده است. در این حوزه، طراحی برنامه‌های بلندمدت برای برداشت مبتنی بر پایایی آب‌زیرزمینی ضرورت یافته است. مسلماً پایش و ارزیابی برای کنترل پیشرفت هر برنامه، از ملزومات است. در همین راستا انتشار نتایج ارزیابی (شفافیت) موجب می‌شود تا حساسیت اجتماعی افزایش یابد و تضمینی برای دستیابی به پایایی آب‌زیرزمینی شود.

۲- ضرورت تغییر رویکرد در مدیریت منابع آب‌زیرزمینی کشور: مقایسه مدیریت آب در کشور با رویکردهای مدیریت آب‌زیرزمینی در دنیا، تحول عمیق و جدی در مدیریت آب‌زیرزمینی کشور را به شرح زیر ضروری می‌نماید:

● تعیین حداکثر برداشت مبتنی بر رعایت ظرفیت تجدیدپذیری و حفاظت از اکوسیستم‌های وابسته به آب‌زیرزمینی: رعایت حریم هیدرولوژیکی منابع آب (بیلان) علاوه بر حریم هیدرولیکی ضروری است. در قوانین فعلی کشور (قانون توزیع عادلانه آب- ۱۳۶۱) در مورد حریم‌های هیدرولیکی چاه‌ها، قوانینی وضع شده است که مخروط افت آن‌ها در هم تداخل نداشته و مشکل آبدهی برای متقدمین ایجاد نشود. اما در این قوانین حریم هیدرولوژیکی منابع آب (در مقیاس آبخوان و حوضه) مورد توجه نبوده است. به طوری که در اثر برداشت بی‌رویه از منابع آب حوضه، سطح ایستابی در بسیاری از آبخوان‌ها نقصان یافته و در بعضی موارد منجر به خشک شدت چشمه‌ها و قنات‌های کوهپایه‌ای نیز گشته است. لذا ضروری است تا قوانین و ضوابط به طور مستمر مورد بازبینی و اصلاح قرار گیرند. این بازنگری باید متناسب با رشد علم، تکامل مفاهیم پایایی آب‌زیرزمینی، و نیز پویایی محیط (اقلیمی و اقتصادی-اجتماعی) باشد. در مجموع باید گفت ضروری است قواعد محدودیت برداشت از آب‌زیرزمینی (برای پیش‌گیری از پیامدهای نامطلوب اضافه برداشت‌ها) در قانون تبیین و به طور مستمر روزآمد شود.

● در ایران کنترل برداشت‌ها عموماً بر اساس کاهش پروانه آب‌بران قانونی بوده و موجب نارضایتی آنان شده است. چنین شرایطی بر اساس نظریه استروم درباره غارت منابع مشترک، منجر به ازدیاد برداشت غیر قانونی از منابع آب گشته است. علاوه بر این کاهش ظرفیت تجدیدپذیری منابع آب‌زیرزمینی ناشی از تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی فشار بر این منابع را مضاعف نموده است. لذا ضروری است تا به منظور افزایش تاب‌آوری توسعه در مقابل خشکسالی‌های شدید و طولانی مدت احتمالی پیش رو، برنامه مدوّنی جهت حفاظت و احیاء منابع آب‌زیرزمینی تدوین و در دستور کار قرار گیرد.

● توجه به مدیریت ریسک و افزایش تاب‌آوری به عنوان ابزاری کارآمد در مدیریت تقاضا: برای پیشگیری از ادامه زوال آبخوان‌های کشور، توجه به مفهوم تاب‌آوری مبتنی بر مدیریت ریسک خشکسالی ضروری است. به منظور بهبود مدیریت این منابع بی‌همتا، لازم است به مفاهیم مرتبط با مدیریت برداشت از ذخایر تجدیدناپذیر (مانند آبدهی استخراجی، آبدهی ایمن، آبدهی استخراجی حداکثری و استخراج هوشمندانه) توجه جدی شود. به‌ویژه با توجه بـه تغییر اقلیم و افزایش احتمال رخداد وقایع فرین، لازم است مفهوم ابرخشکسالی (خشکسالی شدید و طولانی مدت) و تعیین ذخیره رزرو آبخوان (ذخیره استراتژیک) برای مدیریت این شرایط مورد توجه قرار گیرد (Mianabadi et al., 2021b).

● توجه به مشارکت کلیه گرودارن[۳۴] در سطوح مدیریتی (از سیاستگذاری تا بهره‌برداری): مطابق تحول در مفاهیم مرتبط با مفهوم آبدهی پایا ضروری است تا مشارکت کلیه گرودارن در تمام سطوح مدیریتی (از سیاستگذاری تا بهره‌برداری) در مدیریت آب‌زیرزمینی مورد توجه قرار گیرد. بدیهی است که با توجه به شرایط کشورمان جلب مشارکت آب‌بران قانونی به عنوان اثرگذارترین گروه گرودارن، اولین و مهمترین گام در تغییر رویکرد مدیریت منابع آب‌زیرزمینی محسوب می‌شود. طی قرن گذشته مدیریت آب‌زیرزمینی دولتی بجای تمرکز بر

مسئولیت‌های حاکمیتی خویش در مالکیت‌های خصوصی افراد دخالت نموده است. در نتیجه نهادهای عرفی که به صورت ریشه‌دار با مشارکت مردم آب را مدیریت می‌نموده است (برای مثال نظام برداشت آب از زاینده‌رود) رنگ باخته‌اند و جای آن‌ها را نهادهای دولتی گرفته‌اند. در حالی که همانگونه که در تکامل مدیریت منابع آب‌زیرزمینی مشاهده می‌شود (جدول ۱ و شکل ۶)، مدیریت آب‌زیرزمینی از تمرکز بر یک چاه به نگاه حوضه‌ای تغییر رویکرد داده است که پیاده‌سازی این رویکرد در سطوح حوضه‌ای و محلی بدون جلب مشارکت گرورداران امکان‌پذیر نیست. علاوه بر این، در مفاهیم جدید تعیین آبدهی آبخوان مشارکت کلیه گرورداران در سطوح محلی برای کنترل مؤثر پیامدهای نامطلوب اضافه برداشت مورد توجه جدی قرار گرفته است. اما مدیریت منابع آب‌زیرزمینی به جای آن که «پیشرانه» افزایش برداشت را شناسایی و با پاسخ مناسب آنرا کنترل نماید، دچار سیکل معیوب گشته که سرانجام آن تشدید ناپایایی و نیز کاهش تاب‌آوری توسعه خواهد بود.

● ایجاد زیرساخت‌های اقدام جمعی: ساختار مدیریت آب‌زیرزمینی کشورمان شفاف نبوده و معیار مشخصی برای تعیین حداکثر برداشت از منابع آب‌زیرزمینی ندارد که صدور مجوزهای تخصیص جدید برای شرب علی رغم ممنوعه‌بودن و افت مستمر آبخوان اکثر دشت‌ها نمونه‌ای از آن است. مدیریت آب‌زیرزمینی دولتی بوده و نهادهای مردمی نقش ناچیزی در مدیریت آب‌زیرزمینی دارند. به بیان دیگر «مدیریت یک‌تنه (یا مدیریت صرفاً دولتی) ناکارا است؛ و باید به جای آن مدیریت مشارکتی مستقر شود». آنچه مدیریت آب‌زیرزمینی به آن احتیاج دارد مدیریت مشارکتی (هم‌آهنگی) است. این اصل که در متون علمی از آن به اقدام جمعی[۳۵] یاد می‌شود می‌تواند مدیریت منابع آب‌زیرزمینی را بهبود بخشد.

پی‌نوشت‌ها

۱- در حال حاضر برای برگردان Sustainability و Stability هر دو، عبارت «پایداری» در مقالات منتشر شده در داخل کشور به کار می‌رود. این دوگانگی منجر به ابهام و سردرگمی می‌شود. کاربرد عبارت‌های «پایداری سازه‌ای» و «ثبات» به عنوان برگردان Stability، مقدم بوده است. لذا، عبارت «پایایی» به عنوان برگردان Sustainability پیشنهاد می‌شود.

2- Process

3- State

۴- ظرفیت پشتیبانی (Carrying capacity) ظرفیت حمل یا ظرفیت بارگیری، به حداکثر میزان جمعیت یک گونه بیولوژیکی در محیطزیست اطلاق می‌شود که با توجه به میزان مواد غذایی، زیستگاه، آب و سایر نیازهای موجود در محیط، بتواند به‌طور نامحدود ادامه یابد. ظرفیت پشتیبانی در ابتدا برای تعیین تعداد حیواناتی مورد استفاده قرار می‌گرفت که می‌توانستند یک قسمت از زمین را، بدون از بین بردن آن استفاده کنند، ولی بعدها کاربرد این مفهوم به سایر موجودات زنده همچون جمعیت‌های انسانی توسعه پیدا کرد.

5- Sustainable Yield

۶- در مقالات و گزارشات منتشر شده در داخل کشور برای بیان مفهوم «حداکثر برداشت از آبخوان» کلمات بسیاری متفاوتی مانند: حداکثر عمق کف‌شکنی چاه، عمق بحرانی، عمق بهینه اقتصادی، پرسودترین ژرفای چاه و غیره به کار رفته است. این کلمات جهت رعایت امانت در نقل قول از پژوهش‌های انجام شده، عیناً از خود مقالات آورده شده است. به‌عبارت دیگر، در این مقاله سعی شد تا در اصطلاحات بکار رفته در مقالات فارسی دخل و تصرف صورت نپذیرد. البته بدیهی است که بسیاری از این اصطلاحات معادل مشخصی در زبان انگلیسی ندارند.

7- Mining Yield

8- Water Table

9- Aquifer

10- Pristine GW System

11- Developed GW System

12- Stability

13- Depleted GW System

14- California Department of Water Resources (DWR)

15- Undesirable Results

16- Sustainable Groundwater Development

17- Groundwater Sustainable Managements

18- Groundwater Sustainability

19- Aquifer Performance

20- Aquifer Governance

21- Steady

22- American Society of Civil Engineers

23- Japan Water Works Association

24- Optimal Yield

25- Critical Discharge

26- Maximum Discharge

27- Economical Discharge

28- Optimal Critical Discharge

29- Safe Mining

30- Maximum Mining

۳۱- منظور از ذخایر تجدیدناپذیر آب‌زیرزمینی، ذخایری از آب‌زیرزمینی است که میانگین زمان تجدیدپذیری آن فراتر از مقیاس‌های زمانی عمر انسان (بیش از ۱۰۰ سال) است (Margat et al., 2006).

32- Smart Mining

۳۳- متن ماده ۴۴ قانون توزیع عادلانه آب اشاره دارد که کاهش آبدهی آب‌بران مجاز آب‌زیرزمینی اگر ناشی از توسعه برداشت‌ها باشد، وزارت نیرو ملزم به جبران خسارت است. متأسفانه این ماده قانون برای ۴۰ سال متروک مانده است؛ و به جای آن توسعه برداشت‌ها بدون توجه به ظرفت آبدهی آبخوان موجب افت مستمر آبخوان شده است. مایه تعجب است که وزارت نیرو برای کنترل این مخاطره به جای عدم صدور مجوز جدید و پرداخت جریمه، به کاهش حجم پروانه آب‌بران قانونی مبادرت می‌نماید.

34- Stakeholders

35- Collective Action

۷- مراجع

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

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

Alley WM and Leake SA (2004) The journey from safe yield to sustainability. Groundwater. Wiley Online Library 42(1):12–16

Alley WM, Reilly TE, and Franke OL (1999) Sustainability of ground-water resources. US Department of the Interior, US Geological Survey

Archfield SA, Vogel RM, Steeves PA, Brandt SL, Weiskel PK, and Garabedian SP (2010) The Massachusetts sustainable-yield estimator: A decision-support tool to assess water availability at ungaged stream locations in Massachusetts. US Department of the Interior, US Geological Survey

Baguma A, Bizoza A, Carter R, Cavill S, Foster S, Foster T, Jobbins G, Hope R, Katuva J, and Koehler J (2017) Groundwater and poverty in sub-Saharan Africa. UPGro Working Paper. Skat Foundation

Bear J and Levin O (1967) The optimal yield of an aquifer. International Association of Scientific Hydrology. Bulletin 72:401–412

Bijani M, Moridi A, and Majdzadeh Tabatabaie MR (2017) Investigation of well deepening effects on aquifer yeild using numerical model. Iran-Water Resources Research 12(4):83–92

Bredehoeft JD (2002) The water budget myth revisited: Why hydrogeologists model. Groundwater 40(4):340–345

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

Brown CM, Lund JR, Cai X, Reed PM, Zagona EA, Ostfeld A, Hall J, Characklis GW, Yu W, and Brekke L (2015) The future of water resources systems analysis: Toward a scientific framework for sustainable water management. Water Resources Research 51(8):6110–6124

Castilla-Rho JC (2017) Groundwater modeling with stakeholders: Finding the complexity that matters. Groundwater 55(5):620–625

Chen J, Famigliett JS, Scanlon BR, and Rodell M (2016) Groundwater storage changes: Present status from GRACE observations. Surveys in Geophysics 37(2):397–417

Conkling H (1946) Utilization of ground-water storage in stream system development. Transactions of the American Society of Civil Engineers, American Society of Civil Engineers 111(1):275–305

Cuthbert MO, Gleeson T, Moosdorf N, Befus KM, Schneider A, Hartmann J, and Lehner B (2019) Global patterns and dynamics of climate–groundwater interactions. Nature Climate Change 2019 9:2. Nature Publishing Group 9(2):137–141

Davari K, Rashidi M, and Omranian Khorasni H (2019) The need to revise the law of equitable distribution of water in Iran. Public Policy. University of Tehran 5(3):253–269

Derakhshan H and Davary K (2019) Developing criteria, as key solution for sustainable groundwater withdrawal. Iran-Water Resources Research 14(5):483–489

Devlin JF and Sophocleous M (2005) The persistence of the water budget myth and its relationship to sustainability. Hydrogeology Journal 13(4):549–554

Domenico PA (1972) Concepts and models in groundwater hydrology. McGraw-Hill

DWR (2015) Groundwater sustainability program draft strategic Plan. California Department of Water Resources, Groundwater Sustainability Program DRAFT Strategic Plan

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)

Faryabi M (2019) Determining the optimal depth of water wells in Kashan aquifer. Journal of Water Resources Engineering: (107-109) (In Persion)

Fishman R, Devineni N, and Raman S (2015) Can improved agricultural water use efficiency save India's groundwater? Environmental Research Letters, IOP Publishing 10(8):84022

Freeze RA and Cherry JA (1979) Groundwater Prentice-Hall Inc. Eaglewood Cliffs, NJ

Gholami Z, Ibrahimian H, and Noory H (2017) Determining economic depth of agricultural well in sprinkler irrigated farms in Qazvin plain. Iranian

Journal of Soil and Water Research, University of Tehran 48(2):441–449

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 50(1):19–26

Gleeson T, Cuthbert M, Ferguson G, and Perrone D (2020a) Global groundwater sustainability, resources, and systems in the anthropocene. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055251. Annual Reviews 48:431–463, Available at: https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-earth-071719-055251

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

Gober P, Kirkwood CW, Balling RC, Ellis AW, and Deitrick S (2010) Water planning under climatic uncertainty in Phoenix: Why we need a new paradigm. Annals of the Association of American Geographers, Taylor & Francis 100(2):356–372

Gorelick SM and Zheng C (2015) Global change and the groundwater management challenge. Water Resources Research 51(5):3031–3051

Hata Y (1998) Review and evaluation of previous concepts and methods for the determination of extractable groundwater yield. Earth Science (Chikyu Kagaku), The Association for the Geological Collaboration in Japan 52(4):251–261

Kalf FRP and Woolley DR (2005) Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater systems. Hydrogeology Journal 13(1):295–312

Kazmann RG (1956) "Safe Yield" in ground-water development, reality or illusion? Journal of the Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers 82(3):1101–1103

Keeble BR (1988) The Brundtland report: "Our Common Future". Medicine and War 4(1):17–25

Knüppe K, Pahl-Wostl C, and Vinke-de Kruijf J (2016) Sustainable groundwater management: A comparative study of local policy changes and ecosystem services in South Africa and Germany. Environmental Policy and Governance 26(1):59–72

Kretsinger Grabert V and Narasimhan TN (2006) California's evolution toward integrated regional water management: A long-term view. Hydrogeology Journal 14(3):407–423

Langridge R and Daniels B (2017) Accounting for climate change and drought in implementing sustainable groundwater management. Water Resources Management 31(11):3287–3298

Lee CH (1915) The determination of safe yield of underground reservoirs of the closed-basin type. American Society of Civil Engineers XL(4)

Lijzen JPA, Otte P, and van Dreumel M (2014) Towards sustainable management of groundwater: Policy developments in The Netherlands. Science of The Total Environment 485–486(1):804–809

Llamas MR, Custodio E, De la Hera A, and Fornés JM (2015) Groundwater in Spain: Increasing role, evolution, present and future. Environmental Earth Sciences 73(6):2567–2578

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 337–341

Alley M and Leake A (2004) The journey from safe yield to sustainability. Ground Water 42(1):12-16

Maimone M (2004) Defining and managing sustainable yield. Ground Water 42(6):809–814

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

McCartney MP, Acreman MC, and Bergkamp G (2000) Freshwater ecosystem management and environmental security. Background paper to Vision for Water and Nature Workshop, San Jose (Costa Rica), 20–22

Mianabadi A, Davary K, Kolahi M, and Fisher J (2021a) Water/climate nexus environmental rural-urban migration and coping strategies. Journal of Environmental Planning and Management 1–25

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 (2021b) Estimating the aquifer's renewable water to mitigate the challenges of upcoming megadrought events. Water Resources Management 35(14):4927–4942

Michael HA, Post VEA, Wilson AM, and Werner AD (2017) Science, society, and the coastal groundwater squeeze. Water Resources Research 53(4):2610–2617

Milne-Home W (2016) Sustainable groundwater management: Policy and practice. Green Technologies for Sustainable Water Management, American Society of Civil Engineers 107–146

Mojarad A and Sabouni MS (2010) Determining optimized depth of agriculturecher wells for extension (Case study of Bojnourd plain). Recent Agricultural Economics Research

Molle F (2011) Aquifer safe yield: hard science or boundary concept. Ground Water

Montanari A, Young G, Savenije HHG, Hughes D, Wagener T, Ren LL, Koutsoyiannis D, Cudennec C, Toth E, and Grimaldi S (2013) "Panta Rhei-everything flows": Change in hydrology and society-the IAHS scientific decade 2013–2022. Hydrological Sciences Journal, Taylor & Francis 58(6):1256–1275

Mosavi S and Gholami M (2012) Determining the optimal depth of water wells in Seydan Farooj Plain. Water Resources Engineering Journal 104-107 (In Persian)

Noori A, Sarveram H, Eshaghi Sharabiani H, Nouri Gheidari MH, and Ghasemi F (2021) An investigation into groundwater exploitation in Abhar plain and determination of maximum well deepening. Iran-Water Resources Research 17(1):33–46

Ohdedar B (2017) Groundwater law, abstraction, and responding to climate change: Assessing recent law reforms in British Columbia and England. Routledge 42(6):691–708

Owen D, Cantor A, Green Nylen N, Harter T and Kiparsky M (2019) California groundwater management, science-policy interfaces, and the legacies of artificial legal distinctions. Environmental Research Letters, IOP Publishing 14(4):045016

Pierce SA, Sharp JM, Guillaume JHA, Mace RE, and Eaton DJ (2012) Aquifer-yield continuum as a guide and typology for science-based groundwater management. Hydrogeology Journal 21(2):331–340

Piscopo V, Di Luca S, Dimasi M, and Lotti F (2019) Sustainable yield of a hydrothermal area: From theoretical concepts to the practical approach. Groundwater 57(2):337–348

Ponce VM (2007) Sustainable yield of groundwater. California Department of Water Resources

Qin H, Cao G, Kristensen M, Refsgaard JC, Rasmussen MO, He X, Liu J, Shu Y, and Zheng C (2013) Integrated hydrological modeling of the North China Plain and implications for sustainable water management. Hydrology and Earth System Sciences, Copernicus GmbH 17(10):3759–3778

Quevauviller P, Batelaan O, and Hunt RJ (2016) Groundwater regulation and integrated water planning. Integrated groundwater management. Springer, Cham, 197–227

Rudestam K and Langridge R (2014a) Sustainable yield in theory and practice: Bridging scientific and mainstream vernacular. Groundwater 52(S1):90–99

Rudestam K and Langridge R (2014b) Sustainable yield in theory and practice: bridging scientific and mainstream vernacular. Groundwater 52(S1):90–99

Samani S (2020) Providing sustainable global groundwater resources management models to improve the sustainability plan in Iran. Iran-Water Resources Research 16(2):271–291

Scanlon BR, Reedy RC, and Tachovsky JA (2007) Semiarid unsaturated zone chloride profiles: Archives of past land use change impacts on water resources in the southern High Plains, United States. Water Resources Research 43(6)

Shu Y, Villholth KG, Jensen KH, Stisen S, and Lei Y (2012) Integrated hydrological modeling of the North China Plain: Options for sustainable groundwater use in the alluvial plain of Mt. Taihang. Journal of Hydrology 464:79–93

Smith AJ, Walker G, and Turner J (2010) Aquifer sustainability factor: A review of previous estimates. International Association of Hydrogeologists (AIH) and the Geological Society of Australia (GSA). EP104589

Snyder JH (1955) Ground water in California: The experience of Antelope Valley. Unversity of California, Diversion of Agricultural Sciences

Sophocleous M (1997) Managing water resources systems: Why" safe yield" is not sustainable. Groundwater, Ground Water Publishing Company 35(4):561

Sophocleous M (2000) From safe yield to sustainable development of water resources-the Kansas experience. Journal of hydrology 235(1–2):27–43

Sophocleous M (2012) The evolution of groundwater management paradigms in Kansas and possible new steps towards water sustainability. Journal of Hydrology 414:550–559

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

Theis C V (1940) The source of water derived from wells. Civil Engineering 10(5):277–280

Thomas HE (1955) Water rights in areas of ground-water mining. US Geological Survey

Thompson SE, Sivapalan M, Harman CJ, Srinivasan V, Hipsey MR, Reed P, Montanari A, and Blöschl G (2013) Developing predictive insight into changing water systems: Use-inspired hydrologic science for the Anthropocene. Hydrology and Earth System Sciences, Copernicus GmbH 17(12):5013–5039

Todd DK (1959) Groundwater hydrology. John Wiley & Sons, Inc, New York .

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 39(9)

Waggener TR (1977) Community stability as a forest management objective. Journal of Forestry, Oxford University Press 75(11):710–714

Walton WC (1970) Groundwater resource evaluation. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering (USA) eng. McGraw-Hill

Wheater HS and Gober P (2015) Water security and the science agenda. Water Resources Research 51(7):5406–5424

Williams CC and Lohman SW (1949) Geology and ground-water resources of a part of south-central Kansas, with specific references to the Wichita municipal water supply. Kansas Geological Survey Bulletin 79

Wu W-Y, Lo M-H, Wada Y, Famiglietti JS, Reager JT, Yeh PJ-F, Ducharne A, and Yang Z-L (2020) Divergent effects of climate change on future groundwater availability in key mid-latitude aquifers. Nature Communications, Nature Publishing Group 11(1):1–9

Zeraati E (2018) Determining optimized depth of wells for extension considering integrated water resources management and climate change in a watershed. MSc Thesis,University of Sistan & Baluchestan

Zeraati E, Zeinodini S, Pirzadeh B, and Monfared SAH (2021) Determining optimized depth of wells by considering climate change and water resources management (Case study: Khash watershed). Journal of Agricultural Economics Research 13(4):160–174