



## Groundwater Resources Withdrawal and Depletion Estimation Methods (Part 2: An Overview of the World and Iran Condition)

Mohammad Mehdi Rasouli<sup>1</sup> | Elmira Valipour<sup>2</sup> | Hamed Ketabchi<sup>3</sup>

1. Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: [r.mohammadmehdi@modares.ac.ir](mailto:r.mohammadmehdi@modares.ac.ir)
2. Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: [elmira.valipour@modares.ac.ir](mailto:elmira.valipour@modares.ac.ir)
3. Corresponding Author, Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: [h.ketabchi@modares.ac.ir](mailto:h.ketabchi@modares.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

### Article history:

Received: 23 February 2023  
Received in revised form:  
17 April 2023  
Accepted: 6 June 2023  
Published online: 2 July 2023

### Keywords:

*Groundwater level depletion,  
Subsidence,  
Sustainable use,  
Water balance.*

### ABSTRACT

Groundwater resources are critical water resources for present and future generations. However, it has not been used sustainably in most of Iran's plains, and due to the increase in population and food demand caused by it in the last century, it has been withdrawn more than in the past. The issue has been raised as a serious threat to the maintenance of livelihoods, the stability of local communities, and economic investments in the region. To prevent the continuation of this process, it seems necessary to identify, review, and formulate solutions. A variety of methods can be employed for estimating the withdrawal (country reports and hydrological modelling) and depletion (water balance methods, volume-based methods and indirect geodetic estimates or geodetic) amounts according to their limitations and characteristics. Based on literature reviews in two parts of the world and in Iran, the methods of estimation of withdrawal and depletion were evaluated to obtain a general understanding of its situation. Studies show that 800 and 184 billion cubic meters are respectively withdrawn and depleted on a global scale. In addition, there are 71 and 6.9 billion cubic meters (which is 10% and 4% of the global amount) for Iran, and this reflects Iran's dependence on groundwater resources. The dependency leads to the emergence of problems such as salinity and groundwater level depletion, subsidence and related social and economic issues. Moreover, most of the use of groundwater is linked to agriculture, and despite the decrease in its portion of withdrawals, the relationship between depletion and withdrawals has not changed.

**Cite this article:** Rasouli, M. M., Valipour, E., & Ketabchi, H. (2023). Groundwater Resources Withdrawal and Depletion Estimation Methods (Part 2: An Overview of the World and Iran Condition). *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (2), 407-427. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.355855.1058>





## روش‌های برآورد مقادیر برداشت و تخلیه منابع آب زیرزمینی (بخش دوم: بررسی وضعیت جهان و ایران)

محمد مهدی رسولی<sup>۱</sup> | المیرا ولی پور<sup>۲</sup> | حامد کتابچی<sup>۳</sup>

۱. گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: [r.mohammadmehdi@modares.ac.ir](mailto:r.mohammadmehdi@modares.ac.ir)

۲. گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: [elmira.valipour@modares.ac.ir](mailto:elmira.valipour@modares.ac.ir)

۳. نویسنده مسئول، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: [h.ketabchi@modares.ac.ir](mailto:h.ketabchi@modares.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>نوع مقاله:</b> مقاله پژوهشی</p> <p><b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۱/۱۲/۰۴</p> <p><b>تاریخ بازنگری:</b> ۱۴۰۲/۰۱/۲۸</p> <p><b>تاریخ پذیرش:</b> ۱۴۰۲/۰۳/۱۶</p> <p><b>تاریخ انتشار:</b> ۱۴۰۲/۰۴/۱۱</p> <p><b>کلیدواژه‌ها:</b> استفاده پایدار، بیلان آب، کاهش تراز آب زیرزمینی، فرونشست.</p>	<p>منابع آب زیرزمینی به عنوان منابعی حیاتی برای نسل‌های فعلی و آینده، در بسیاری از دشت‌های ایران به طور پایدار مورد استفاده قرار نگرفته است. منابع آب زیرزمینی در سده اخیر بر اثر افزایش جمعیت و افزایش تقاضای غذایی ناشی از آن بیش از پیش برداشت شده‌اند. این مسئله تهدیدی جدی برای حفظ معیشت، پایداری جوامع محلی و سرمایه‌گذاری‌های اقتصادی است. از این رو شناخت، بررسی و تدوین راه‌کارهایی به منظور جلوگیری از ادامه این روند ضروری به نظر می‌رسد. روش‌های متداولی برای برآورد مقادیر برداشت (آمارهای کشوری و مدل‌سازی هیدرولوژیکی) و تخلیه (روش بیلان آب، روش‌های مبتنی بر حجم و برآوردهای غیرمستقیم زمین‌سنجی یا ژئودزیکی) وجود دارد که با توجه به محدودیت و ویژگی‌های هر یک می‌توان از آن‌ها بهره جست. از این رو، در این مطالعه به ارزیابی روش‌های برآورد مقادیر برداشت و تخلیه با استفاده از مرور مطالعات صورت گرفته در دو بخش جهان و ایران پرداخته شده است. تا چشم‌انداز کلی از وضعیت منابع آب زیرزمینی جهان و ایران به دست آید. جمع‌بندی حاصل از مطالعات صورت گرفته بیانگر برداشت و تخلیه ۸۰۰ و ۱۸۴ میلیارد مترمکعب در سطح جهانی و ۷۱ و ۶/۹ میلیارد مترمکعب (۱۰ و چهار درصد میزان جهانی) برای ایران می‌باشد که نشان‌دهنده اتکای منابع آب کشور به منابع آب زیرزمینی است. اتکایی که منجر به بروز مشکلاتی اعم از شوری و کاهش تراز آب زیرزمینی، فرونشست و مسائل اجتماعی اقتصادی حاصل از آن می‌شود. هم‌چنین بیش‌ترین استفاده از منابع آب زیرزمینی مربوط به کشاورزی می‌باشد و با وجود کاهش سهم مقدار برداشت، نسبت مقدار تخلیه به مقدار برداشت تغییری ننموده است.</p>

**استناد:** رسولی، محمد مهدی؛ ولی پور، المیرا و کتابچی، حامد (۱۴۰۲). روش‌های برآورد مقادیر برداشت و تخلیه منابع آب زیرزمینی (بخش دوم: بررسی وضعیت جهان و ایران). نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۳ (۲)، ۴۰۷-۴۲۷. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.355855.1058>



## ۱. مقدمه

در قرن گذشته افزایش چهار برابری جمعیت جهان منجر به افزایش تقاضای مواد غذایی شده است (Godfray *et al.*, 2010). از سوی دیگر گسترش کشاورزی آبی در مناطق نیمه‌خشک (Hanasaki *et al.*, 2018; Van Dijk *et al.*, 2014)، توسعه شهرنشینی در مناطقی بدون دسترسی به منابع آب سطحی (United Nations, 2014)، توسعه اقتصادی و تغییر رژیم غذایی (Hoekstra and Chapagain, 2006)، باعث افزایش برداشت<sup>۱</sup> از منابع آب زیرزمینی از حدود ۵۰۰ به ۴۰۰۰ مترمکعب در سال در سطح جهانی شده است (Hanasaki *et al.*, 2018; Van Dijk *et al.*, 2014). از طرفی در مناطق مرطوب نیز روند افزایشی در برداشت از منابع آب زیرزمینی در پاسخ به خشک‌سالی‌های هیدرولوژیکی مشاهده می‌شود (Scanlon *et al.*, 2012). در نتیجه در بسیاری از حوضه‌ها، منابع آب زیرزمینی تجدیدناپذیر به‌طور افزایشی برداشت می‌شوند (Gleeson *et al.*, 2012). با این‌حال، روند مطالعات نشان می‌دهد، مقادیر برداشت (حجم آب خارج‌شده از آبخوان مثلاً از طریق پمپاژ) و تخلیه<sup>۲</sup> (مقداری از حجم آب خارج‌شده از آبخوان که به مصرف رسیده مثلاً تبخیر و تعرق شده و دوباره به آبخوان برگشت نمی‌کند) منابع آب زیرزمینی، طی دهه‌های گذشته افزایش یافته است (De Graaf *et al.*, 2017) و احتمالاً در دهه‌های آینده نیز ادامه خواهد داشت (Wada *et al.*, 2012b).

اولین روش‌های برآورد مقادیر تخلیه و برداشت از منابع آب زیرزمینی، روش‌های مبتنی بر حجم هستند که شامل روش‌های مبتنی داده‌های تراز هیدرولیکی (MacDonald *et al.*, 2016)، روش سنجش از دور با GRACE (Rodell *et al.*, 2018) و براساس مدل‌های جهانی (De Graaf *et al.*, 2017) می‌شوند. در ادامه روش‌های بیلان آب براساس مدل‌های هیدرولوژیکی جهانی (De Graaf *et al.*, 2014) و براساس روش‌های سنجش از دور (Cheema *et al.*, 2014) به این منظور مورد استفاده قرار گرفته است. یکی دیگر از روش‌های برآورد مقادیر تخلیه و برداشت، روش‌های غیرمستقیم ژئودزیکی است (Minderhoud *et al.*, 2017). با توجه به ارزیابی روش‌های برآورد مقادیر برداشت و تخلیه می‌توان گفت روش‌های مبتنی بر داده‌های تراز هیدرولیکی به‌دلیل محدودیت‌های آماربرداری و تغییرات مکانی خصوصیات فیزیکی خاک و در نتیجه آن، تغییرات مکانی نرخ نفوذ و هدایت هیدرولیکی در برآورد نرخ تغذیه، عدم‌قطعیت‌های فراوان در برآورد مقادیر برداشت و تخلیه به همراه دارد. از این‌رو، بدون داشتن داده‌های دقیق، کاربرد رویکردهای مبتنی بر داده‌های تراز هیدرولیکی توصیه نمی‌شود. از طرفی برآورد مقادیر برداشت و تخلیه از منابع آب زیرزمینی براساس مدل‌های جهانی هزینه‌بر و زمان‌بر بوده و نیازمند داده‌ها و اطلاعات جزئی‌تری است. همچنین عدم‌قطعیت‌هایی در پارامترهای برآورد بیلان آب زیرزمینی وجود دارد؛ لازم به ذکر است روش مبتنی بر بیلان آب نیز دارای اجزای مختلف ورودی و خروجی آب زیرزمینی است که برخی از این مؤلفه‌ها، خود نیاز به برآورد دارند. به‌دلیل حضور آب در خاک، اجزای بیلان آب زیرزمینی به خصوصیات خاک وابسته هستند که به‌دلیل ماهیت ناشناخته و پیچیده، معمولاً با ساده‌سازی‌ها و فرضیاتی در محاسبات اعمال می‌شوند که همین امر باعث افزایش خطا و عدم‌قطعیت در برآورد بیلان می‌شود. بنابراین، توجه به تحلیل‌های عدم‌قطعیت در برآورد مقادیر تخلیه و برداشت از منابع آب زیرزمینی بسیار مهم است که به لزوم آن در مطالعات مختلف بین‌المللی اشاره شده است.

در ایران نیز در سده گذشته عوامل مختلفی از جمله افزایش جمعیت، حفر چاه‌های غیرمجاز با پیشرفت فناوری و تسهیل حفاری چاه‌ها منجر به تبدیل ایران به یکی از بزرگ‌ترین تخلیه‌کنندگان منابع آب زیرزمینی در جهان شده است. از طرفی عواملی نظیر کمبود بارش (Mansouri Daneshvar *et al.*, 2019) و رخداد خشک‌سالی‌های پی‌درپی (Zarch *et al.*, 2011) در سال‌های اخیر، عدم اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی و پخش سیلاب جهت مهار سیلاب‌ها و احیای آبخوان‌ها منجر به کسری ذخیره منابع آب زیرزمینی و کاهش توان مدیریتی در آبخوان‌ها شده است. در حال حاضر میزان کسری تجمعی ذخیره منابع آب زیرزمینی ایران به بیش از ۱۳۲ میلیارد مترمکعب رسیده که تنها حدود ۱۰۵ میلیارد

مترمکعب از این رقم مربوط به ۱۷ سال اخیر و ۱۸ میلیارد مترمکعب آن مربوط به پنج سال اخیر است (Valipour and Ketabchi, 2021). با افزایش تعداد چاه‌ها در دهه گذشته، تعداد نقاط برداشت از منابع آب زیرزمینی با ۸۴/۹ درصد افزایش از ۵۴۶۰۰۰ در سال ۲۰۰۲ به بیش از ۱۰۰۰۰۰۰ در سال ۲۰۱۵ رسیده است. در حال حاضر تعداد ۷۹۴۰۰۰ حلقه چاه فعال (مجاز و غیرمجاز) در کنار ۴۱۱۶۹ رشته قنات و ۱۷۴۲۴۸ چشمه در کشور وجود دارند که از منابع آب زیرزمینی برداشت می‌نمایند (WRMC, 2017).

با توجه به تعدد چاه‌های غیرمجاز در آبخوان‌های کشور، امکان کنترل مناسب برداشت آب وجود ندارد، از این رو اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی به مشکلات اجتماعی-اکولوژیکی مختلفی از جمله خشک‌شدن تالاب‌ها، بیابان‌زایی، طوفان‌های شن، گرد و غبار، کاهش کیفیت آب و وقوع مکرر سیلاب‌ها منجر می‌شود (Danaei et al., 2019; Madani, 2014; Madani et al., 2016). از طرفی فرونشست زمین به دلیل تخلیه منابع آب زیرزمینی خطری انسان‌ساز برای زیرساخت‌های حیاتی و ساکنان دشت‌های آسیب‌پذیر است. پدیده فرونشست زمین به‌وفور در نقاط مختلف کشور و به‌ویژه فلات مرکزی به‌عنوان کانون بحرانی در برداشت منابع آب زیرزمینی، قابل مشاهده است. بنابراین آگاهی از مقادیر برداشت و تخلیه از منابع آب زیرزمینی، نیاز اولیه برای بررسی وضعیت و اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی می‌باشد.

هدف این مطالعه، ارائه یک نمای کلی از مقادیر برداشت، تخلیه و ذخیره منابع آب زیرزمینی در سطح جهان و ایران است. از این رو پس از بخش مقدمه، در بخش دوم به‌طور خلاصه به روش‌های برآورد مقادیر برداشت و تخلیه منابع آب زیرزمینی اشاره شده است. سپس در بخش سوم نتایج برآورد منابع آب زیرزمینی جهان و ایران ارائه شده است. در واقع ابتدا برآوردهای جهانی برداشت از منابع آب زیرزمینی در قالب آمار کشوری و مدل‌سازی هیدرولوژیکی شرح داده شده است، سپس به برآورد جهانی مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی براساس روش‌های بیلان آب و روش‌های مبتنی بر حجم پرداخته شده است، در ادامه با برآورد مقادیر برداشت و تخلیه منابع آب زیرزمینی در مقیاس بزرگ به پیش‌بینی تخلیه منابع آب زیرزمینی و برآورد حجم جهانی منابع آب زیرزمینی پرداخته شده است. هم‌چنین در بخش سوم مقادیر برداشت و تخلیه منابع آب زیرزمینی ایران به تفکیک نوع مصرف ارائه شده است. در بخش چهارم به اثرات برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در سطح جهان و ایران پرداخته شده است. بخش پنجم نیز مربوط به نتیجه‌گیری کلی مطالعه حاضر است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱. روش‌های برآورد مقادیر برداشت و تخلیه منابع آب زیرزمینی

در بخش اول مقاله با عنوان روش‌های برآورد مقادیر برداشت و تخلیه از منابع آب زیرزمینی (بخش اول: رویکردها و روش‌های مبتنی بر تجربیات بین‌المللی) به ارزیابی روش‌های برآورد مقادیر تخلیه منابع آب زیرزمینی پرداخته شده است. به‌طور خلاصه در مقیاس جهانی مقادیر تخلیه منابع آب زیرزمینی بر مبنای روش‌های مبتنی بر حجم (براساس داده‌های تراز هیدرولیکی، سنجش از دور با GRACE و براساس مدل‌های جهانی) روش‌های بیلان آب (براساس مدل‌های هیدرولوژیکی جهانی و براساس روش‌های سنجش از دور) و روش‌های غیرمستقیم ژئودزیکی است. در این مطالعه به تفکیک، برآورد مقادیر برداشت براساس آمار کشوری و مدل‌سازی هیدرولوژیکی و مقادیر تخلیه براساس روش‌های بیلان آب و روش‌های مبتنی بر حجم ارائه شده است.

## ۲-۲. برآورد مقادیر جهانی برداشت و تخلیه از منابع آب زیرزمینی

### ۲-۲-۱. برآورد مقدار جهانی برداشت از منابع آب زیرزمینی

با وجود محدودیت آمار و اطلاعات موجود، مطالعاتی هم‌چون Zektser and Everett (2004) و Shah (2005) مقادیر برداشت از منابع آب زیرزمینی مبتنی بر گزارش‌های منتشرشده از کشورهای مختلف را ارائه نموده‌اند. براساس آمار منتشرشده مقدار برداشت از منابع آب زیرزمینی در سطح جهانی ۶۰۰ تا ۸۰۰ میلیارد مترمکعب در سال برآورد شده است. علاوه بر این مطالعات، مرکز بین‌المللی ارزیابی منابع آب زیرزمینی<sup>۳</sup> پایگاه داده‌ای جامع از اطلاعات مرتبط با منابع آب زیرزمینی شامل مقادیر برداشت آب کشورهای مختلف را فراهم نموده است. چنین برآوردهایی وابسته به گزارش‌های دولتی در سطح کشورها و مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری شده است. اگرچه تلاش‌های قابل‌توجهی برای برآورد مقادیر برداشت از منابع آب زیرزمینی در سراسر جهان انجام شده است اما باتوجه به توسعه اقتصادی-اجتماعی و تغییرات اقلیمی با مشکل به‌روزرسانی مواجه می‌باشند (Foster and Loucks, 2006).

از سوی دیگر، باید توجه داشت که مقادیر برداشت منابع آب زیرزمینی هر کشور به‌طور قابل‌توجهی متفاوت از سایر کشورهاست. درواقع کشورهای مختلف در گام‌های زمانی مشخص اما متفاوتی آماربرداری می‌نمایند. سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده<sup>۴</sup>، مقادیر برداشت منابع آب زیرزمینی را هر پنج سال یک‌بار براساس سرشماری در سطح کشور ارائه می‌کند. در برخی از کشورها از جمله کمیسیون ملی آب<sup>۵</sup> مکزیک، شورای مرکزی آب زیرزمینی<sup>۶</sup> هند، وزارت بوم‌شناسی و محیط‌زیست<sup>۷</sup> چین، شرکت مدیریت منابع آب<sup>۸</sup> ایران، مقادیر برداشت منابع آب زیرزمینی در سطح استانی برآورد و به‌صورت گزارش ارائه شده است. مقادیر برداشت از منابع آب زیرزمینی در گزارش‌های فوق‌الذکر (بجز ایران) در مطالعه Wada and Heinrich (2013) با استفاده از مدل‌های جهانی هیدرولوژیکی برآورد و اعتبارسنجی شده است. با این‌حال، دستیابی به برآوردی قابل اعتماد از مقدار برداشت و کسری مخزن منابع آب زیرزمینی به کل برداشت به‌ازای هر کشور در سراسر جهان دشوار است، زیرا در مقیاس‌های بزرگ به سختی قابل اندازه‌گیری است (Ruddell, 2018).

به‌منظور برآورد مقادیر برداشت و تخلیه منابع آب زیرزمینی، باتوجه به وضعیت آمار در دسترس که ممکن است به‌دلیل داده‌های برداشت‌نشده و مشکلات به‌روزرسانی سالانه نواقصی داشته باشند، مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی جایگزین روش‌های مبتنی بر داده شده است. مقدار برداشت جهانی منابع آب زیرزمینی توسط Döll (2009) و Döll et al. (2012) با استفاده از IGRAC GIS، بین ۱۱۰۰ تا ۱۵۰۰ میلیارد مترمکعب در سال برآورد شده است. درحالی‌که با بررسی اطلاعات بیش از ۱۵۰۰۰ واحد اداری ملی و زیرملی مقدار برداشت جهانی منابع آب زیرزمینی توسط Döll et al. (2014) در حدود ۷۰۰ میلیارد مترمکعب در سال تخمین زده شده است. برآوردهای مبتنی بر مدل در مقایسه با برآوردهای مبتنی بر داده، در مقیاس جهانی انجام شده است، اما اغلب محدودیت‌های برداشت از منابع آب در کشورهای مختلف نادیده گرفته شده است (Wada et al., 2014). با توجه به تنوع روش‌های برآورد و داده‌های موردنیاز، مقادیر قابل‌توجهی خطا در محاسبات دور از انتظار نیست (Wada, 2016). با این‌حال مقدار برداشت جهانی منابع آب زیرزمینی در مطالعات اخیر ۷۰۰ تا ۹۰۰ میلیارد مترمکعب در سال برآورد شده است.

### ۲-۲-۲. برآورد مقدار جهانی تخلیه منابع آب زیرزمینی

مقادیر جهانی تخلیه منابع آب زیرزمینی اغلب با روش‌های بیلان آب برآورد شده است (Wada, 2016). یکی از اولین مقادیر برای تخلیه منابع آب زیرزمینی براساس روش بیلان آبی توسط Postel (1999)، ۲۰۰ میلیارد مترمکعب در سال برآورد شده است. پس از آن بیش‌تر روش‌های بیلان آب متکی به مدل‌های هیدرولوژیکی جهانی شدند (Bierkens, 2004).

2015). مطالعات مرتبط با مدل‌های هیدرولوژیکی براساس تفاوت مقدار آب موردنیاز با مقدار آب سطحی در دسترس به‌عنوان نماینده‌ای برای "آب تجدیدناپذیر"، مقادیر تخلیه منابع آب زیرزمینی را ۴۰۰ تا ۱۷۰۰ میلیارد مترمکعب در سال برآورد کرده‌اند. اولین برآورد جهانی تخلیه منابع آب زیرزمینی مبتنی بر مدل توسط Wada *et al.* (2010) انجام شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد در نواحی نیمه‌مرطوب تا خشک، مقدار تخلیه جهانی منابع آب زیرزمینی از  $126 \pm 32$  به  $40 \pm 283$  میلیارد مترمکعب در سال طی بازه زمانی ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۰ افزایش یافته است. در ادامه Wada *et al.* (2012a) با استفاده از ضریب تصحیحی که مبتنی بر اعداد گزارش شده محلی بود، مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی را ۳۰ درصد کمتر ( $240 \pm 30$  میلیارد مترمکعب در سال) برآورد کرد. این در حالی است که مقدار تغذیه در نظر گرفته شده در این مطالعات فقط از نوع تغذیه پراکنده است. برای رفع این شکاف، Döll *et al.* (2014) با استفاده از مدل‌سازی هیدرولوژیکی براساس اطلاعات پیژومترها و ماهواره GRACE تغذیه متمرکز منابع آب زیرزمینی از پهنه‌های آبی در مناطق خشک را شبیه‌سازی کرده است. براساس نتایج این مطالعه مقدار تخلیه از منابع آب زیرزمینی ۱۱۳ میلیارد مترمکعب در سال برآورد شده است. درحالی‌که Pokhrel *et al.* (2015) با استفاده از یک مدل هیدرولوژیکی یکپارچه مقدار تخلیه جهانی منابع آب زیرزمینی را ۳۳۰ میلیارد مترمکعب در سال برآورد نمودند. همان‌طور که مشهود است براساس مطالعات انجام‌گرفته برآوردهای جهانی مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی کاملاً متفاوت است، اما در مواردی این برآوردها بادقت بسیار بالایی انجام شده است. به‌طور مثال، برآورد مقدار تخلیه در کانون‌های تخلیه منابع آب زیرزمینی با آنچه که Wada *et al.* (2010) برآورد نموده است، کاملاً مطابقت دارد. برای مرور بیشتر برآوردهای جهانی مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی به جدول (۱) رجوع شود.

روش‌های مبتنی بر بیان آب به‌دلیل اشتباهات رایج در ورودی و پارامترهای مدل هیدرولوژیکی و همچنین مفروضات در نظر گرفته‌شده برای ساده‌سازی اندرکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی در معرض عدم قطعیت‌های قابل‌توجهی قرار دارند. یکی از عوامل عدم قطعیت‌دار مربوط به برداشت جهانی از منابع آب زیرزمینی، عدم قطعیت‌های ناشی از شبیه‌سازی تغذیه منابع آب زیرزمینی است. برآوردهای جهانی مقدار تغذیه منابع آب زیرزمینی مبتنی بر مدل‌سازی، ۱۱۰۰۰ تا ۱۷۰۰۰ میلیارد مترمکعب در سال است که معادل ۳۰ تا ۴۰ درصد از منابع آب شیرین تجدیدپذیر جهان است (De Graaf *et al.*, 2014; Hanasaki *et al.*, 2018). مقدار تغذیه جهانی مدل‌سازی‌شده، تغذیه متمرکز را در برنمی‌گیرد و این امر می‌تواند در نواحی نیمه‌خشک قابل‌توجه باشد. یکی از راه‌های بهبود برآورد مقدار تغذیه در مدل‌های هیدرولوژیکی جهانی، استفاده از ایزوتوپ‌ها است (Jasechko *et al.*, 2014). از این رو، Wada and Heinrich (2013) مقدار جهانی تغذیه ناشی از آبیاری را با استفاده از این روش، ۵۰۰ میلیارد مترمکعب در سال برآورد نمودند.

اولین مقدار تخلیه جهانی منابع آب زیرزمینی براساس روش‌های مبتنی بر حجم توسط Konikow (2011) برآورد شده است. در این مطالعه با فرض این‌که نسبت آب تجدیدناپذیر به کل برداشت آب زیرزمینی از نظر زمانی ثابت است، با استفاده از برون‌یابی داده‌های تراز سطح آب، مشاهدات ماهواره GRACE و مدل‌های واسنجی شده آب زیرزمینی، مقدار تخلیه جهانی  $145 \pm 39$  میلیارد مترمکعب در سال برآورد شده است. در رویکردی مشابه با نتیجه نزدیک، De Graaf *et al.* (2017) با استفاده از ترکیب روش‌های مبتنی بر حجم و مدلی با مقیاس جهانی مقدار تخلیه از منابع آب زیرزمینی را ۱۳۷ میلیارد مترمکعب در سال برآورد نمودند. با توجه به آمار و برآوردهای در دسترس، یکپارچه‌سازی مقدار برآوردهای جهانی ضروری است.

از این رو، Van Dijk *et al.* (2014) برآوردهای به‌دست‌آمده از GRACE، ارتفاع‌سنجی سطح آب ماهواره‌ای و

برآوردهای خطی مبتنی بر چندین مدل هیدرولوژیکی را با چهارچوب همسان‌سازی داده‌ها یکپارچه نمودند. براساس این مطالعه مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی از ۱۶۸ به ۹۲ میلیارد مترمکعب در سال تغییر کرد. در ادامه Rodel *et al.* (2018) ارزیابی جهانی از روند ذخیره و تخلیه منابع آب زیرزمینی را ارائه داده‌اند. جدول (۱) نمای کلی از برآوردهای اخیر مقادیر برداشت و تخلیه جهانی منابع آب زیرزمینی را ارائه می‌نماید.

**Table 1.** Global estimates of groundwater withdrawal and depletion (BCM yr<sup>-1</sup>)

References	Groundwater withdrawal/depletion BCMyr <sup>-1</sup>	Year	Notes	Sources
Postel (1999)	NA/200			
Shah (2005)	800-1000/NA	Contemporary	Data-based estimate	Literature and reports Country statistics
Zektser and Everett (2004)	600-700/ NA			
Wada <i>et al.</i> (2010)	312(±37)/126(±32)	1960	Model based water balance method	IGRAC GGIS database PCR-GLOBWB (0.5°)
	734(±82)/283(±40)	2000		
Konikow (2011)	NA/145(±39)	2000-2008	Model and GRACE based volume based method with extrapolation for other than USA, north India, North China Plain, Saudi Arabia, Nubian and Sahara	In situ groundwater level measurements, GRACE satellite observation, calibrated groundwater model, extrapolation (15.4%; depletion to abstraction ratio of USA)
Wada <i>et al.</i> , (2012a and 2012b)	312(±37)/64(±16)	1960	Model based water balance method with correction against reported regional depletion estimates	IGRAC-GGIS PCR-GLOBWB (0.5°)
	734(±82)/64(±16)	2000		
	1248(±118)/295(±47)	2050		
Döll <i>et al.</i> , (2014)	NA/113	2000-2009	Model based water balance method	WaterGAP (0.5°), In situ groundwater level measurements, GRACE satellite observation
Van Dijk <i>et al.</i> , (2014)	NA/92	2003-2012	GRACE based volume based method with data assimilation (original depletion equals 168 BCM yr <sup>-1</sup> )	Data assimilation with GRACE satellite observation
Wada and Bierkens, (2014)	372/90	1960		IGRAC-GGIS PCR-GLOBWB (0.5°)
	952/304	2010		
	1621(±128)/597(±85)	2099		
Yoshikawa <i>et al.</i> , (2014)	-/510	2000		H08 (1.0°)
	-/1150	2050		
Pokhrel <i>et al.</i> , (2015)	570/330	2000	Model based water balance method	MATSIRO (1.0°)
De Graaf <i>et al.</i> , (2017)	460/NA	1960		PCR-GLOBWB (0.083 33°) coupled to a global two-layer MODFLOW model
	980/NA	2010		
	NA/137	1960-2010		
Hanasaki <i>et al.</i> , (2018)	789(±37)/182(±26)	2000		H08 (0.5°)
OECD, (2020)	1024/NA	1970-2020	Data-based estimate	Literature and reports Country statistics
Shamsudduha and Taylor, (2020)	982/145	2010	Model based water balance method	ensemble of datasets from GRACE satellite and land surface models
UN Water and UNESCO, (2022)	959/NA	2017	Data-based estimate	Literature and reports country statistics

### ۲-۳. برآورد منطقه‌ای مقادیر برداشت و تخلیه منابع آب زیرزمینی در مقیاس بزرگ

به‌طور معمول برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی و تخلیه ناشی از آن‌ها به‌صورت محلی است، بنابراین می‌توان با استفاده از مدل‌های جریان آب زیرزمینی واسنجی شده، برآوردهای بهتری از تغییرات میزان ذخیره منابع آب زیرزمینی ارائه نمود (Konikow, 2011). از طرفی برای واسنجی مدل‌های منطقه‌ای آب زیرزمینی، به داده‌های مشاهداتی همانند

سطح تراز آب‌های زیرزمینی و داده‌های جریان نیاز است که در اغلب مواقع به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه در دسترس نیست. وجود داده‌های مشاهداتی از سطح تراز آب‌های زیرزمینی برای واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی ضروری است. سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده شبکه‌ای متراکم از داده‌های سطح تراز آب زیرزمینی در سراسر کشور را جمع‌آوری نموده است (بیش از ۸۰۰۰۰۰) که امکان ساخت مدل‌های آب زیرزمینی واسنجی‌شده را میسر می‌سازد. از این رو، مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی شبیه‌سازی‌شده توسط Scanlon *et al.* (2012a) (۵/۷ میلیارد مترمکعب در سال) با برآورد مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی ماهواره GRACE (هفت میلیارد مترمکعب در سال) مطابقت دارد. اما برای دشت شمالی چین که فاقد چنین داده‌های مشاهداتی است، مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌سازی (۵/۵ میلیارد مترمکعب در سال) Cao *et al.*, (2013) و با استفاده از ماهواره GRACE (۸/۳±۱/۱ میلیارد مترمکعب در سال) برآورد شده است (Feng *et al.*, 2013) که نتایج با هم مطابقت ندارند. وجود چنین اختلاف‌هایی میان نتایج هر یک از روش‌های مورد استفاده، به عدم قطعیت هر روش بستگی دارد. از آنجایی که هر روش ساده‌سازی‌های خاص خود را دارد و تمامی پارامترهای دخیل در فرایندهای هیدرولوژیکی را در نظر نمی‌گیرد (Kundzewicz, 1995)، این اختلاف به‌وجود می‌آید.

## ۲-۲-۴. پیش‌بینی مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی

پیش‌بینی مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی اغلب مبتنی بر شبیه‌سازی مدل‌های هیدرولوژیکی است که در معرض عدم قطعیت‌های بزرگی است. مدل‌های شبیه‌سازی آینده به پیش‌بینی‌های اقلیمی از مدل‌های گردش عمومی<sup>۱</sup> یا مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای<sup>۲</sup>، سناریوهای اجتماعی-اقتصادی و همچنین تغییرات کاربری اراضی نیاز دارند که هر کدام عدم قطعیت‌هایی دارند. با توجه به این که تغییرات کاربری اراضی به‌شدت تحت تأثیر عواملی مانند رشد جمعیت است که با تقاضای غذایی مرتبط می‌باشد، احتمالاً نرخ توسعه اقتصادی نتواند به‌تنهایی برای پیش‌بینی تخلیه منابع آب زیرزمینی در آینده مناسب باشد.

نخستین مطالعه جهانی در مورد پیش‌بینی مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی توسط Wada *et al.* (2012b) انجام شده است که مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی در آینده براساس ترکیب سه سناریوی اجتماعی-اقتصادی و اقلیمی پیش‌بینی شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مقدار تخلیه جهانی منابع آب زیرزمینی از ۲۰۴±۳۰ میلیارد مترمکعب در سال به ۲۹۵±۴۷ میلیارد مترمکعب در سال افزایش خواهد یافت. در حالی که Yoshikawa *et al.* (2014) مقدار تخلیه بسیار بیشتری را تحت گسترش مداوم مناطق آبی پیش‌بینی کردند، به این صورت که مقدار تخلیه جهانی منابع آب زیرزمینی تا سال ۲۰۵۰ به ۱۱۵۰ میلیارد مترمکعب در سال برسد. Wada *et al.* (2014) مقدار تخلیه ناشی از برداشت غیرپایدار از منابع آب سطحی و زیرزمینی را کمی نمودند. به طوری که مجموع مقادیر برداشت و تخلیه منابع آب تجدیدناپذیر در سطح جهان به ترتیب ۹۵۲ و ۳۰۴ میلیارد مترمکعب در سال و افزایش آن تا ۱۶۲۱±۲۸ و ۵۹۷±۸۵ میلیارد مترمکعب در سال تا انتهای قرن جاری پیش‌بینی شده است. نتایج این پیش‌بینی‌های آبی نشان می‌دهد که نه تنها نقاط بحرانی فعلی تشدید می‌شوند، بلکه کانون‌های بحرانی تخلیه منابع آب زیرزمینی احتمالاً به مناطق دیگری که به لحاظ جمعیت، تولید مواد غذایی و توسعه اقتصادی افزایش قابل توجهی از آن‌ها انتظار می‌رود، گسترش یابد. به‌طور کلی، می‌توان انتظار افزایش سریع مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی را در کشورهای در حال توسعه و کاهش تدریجی آن را در کشورهای توسعه‌یافته داشت.



## ۲-۲-۵. برآورد حجم جهانی منابع آب زیرزمینی

برداشت دائمی از منابع آب زیرزمینی تجدیدناپذیر، همانند هر منبع تجدیدناپذیر دیگر در نهایت منجر به از بین رفتن کامل ذخایر آب زیرزمینی می‌شود. از این رو، این سؤال مطرح می‌شود که منابع آب زیرزمینی تا چه مدت دوام خواهند داشت؟ برای پاسخ به این پرسش باید به دو سؤال که چه مقدار آب زیرزمینی موجود است؟ و این که مقدار برداشت در آینده چه مقدار خواهد بود؟ پاسخ داده شود.

باتوجه به این که منابع آب زیرزمینی یک منبع مشترک جهانی نیستند، سؤالات فوق متناسب با منطقه و موقعیت مکانی هر مطالعه، پاسخ‌های متفاوتی را به دنبال خواهند داشت. عدم قطعیت زیادی در برآورد ذخایر منابع آب زیرزمینی جهانی و همچنین در ارزیابی‌های منطقه‌ای وجود دارد (Gleeson *et al.*, 2015). علاوه بر این، سناریوهای تقاضای آب در آینده هنوز در حال توسعه می‌باشند، این در حالی است که نتایج پیش‌بینی‌ها در سناریوهای یکسان بین مدل‌های جهانی، متغیر است (Wada *et al.*, 2016) و باعث می‌شود که سؤال «تا چه مدت دوام خواهد داشت؟» به یک مسئله بدل شود. از این رو، در این بررسی فقط بر روی سؤال اول تمرکز خواهد شد. باتوجه به مطالعه Shiklomanov (1993) منابع آب زیرزمینی ۳۰ درصد مجموع منابع آب شیرین جهان را شامل می‌شود. با در نظر گرفتن دانش محدود برای شبیه‌سازی فرایندهای ناحیه زیرخاک (Bierkens, 2015)، برآورد حجم کل منابع آب زیرزمینی همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شده است (بین یک تا ۶۰ میلیارد مترمکعب در سطح جهان) متغیر است. به‌طور کلی، تمامی برآوردهای موجود بر این فرض استوار است که فضای منافذ آزاد زیرسطح آب با آن پر شده است و تخلخل باتوجه به یک تابع معین، با عمق کاهش می‌یابد.

قدیمی‌ترین برآورد از حجم منابع آب زیرزمینی جهانی (Vernadskiy, 1933) معادل ۶۰ میلیون کیلومترمکعب است، که حد بالای برآورد را شامل می‌شود. در مطالعه دیگری که توسط Nace (1969) انجام شده است، به دلیل کم‌تر در نظر گرفتن تخلخل (یک درصد)، حد پایین برآورد (هفت میلیون کیلومترمکعب) به دست آمده است. اما برآورد Korzun (1978) به‌طور کلی قابل قبول‌ترین برآورد (۲۳/۴ میلیون کیلومترمکعب) است. به‌طوری‌که Gleeson *et al.* (2015) با استفاده از رویکرد فشرده‌سازی داده<sup>۱۱</sup>، مقدار مشابهی برآورد کردند. اما در عین حال بیان می‌کنند که تمام منابع آب زیرزمینی از کیفیت کافی برای استفاده برخوردار نمی‌باشند. Richey *et al.* (2015a) با فرض این که ضخامت اشباع بیش‌تر آبخوان‌ها به‌منظور برداشت از منابع آب زیرزمینی به‌طور متوسط ۲۰۰ متر است (Margat and van der Gun, 2013)، به حجم بسیار کم‌تری از منابع آب زیرزمینی قابل برداشت دست یافتند (۱/۱ میلیون کیلومترمکعب)، هرچند که نتایج آن‌ها بیش‌ترین مطابقت را با حجم برآورد شده از مطالعات آبخوان‌های منطقه‌ای دارد، چراکه در مطالعات منطقه‌ای عموماً بر سیستم‌های کم‌عمق تمرکز می‌شود که به راحتی قابل برداشت و نمونه‌برداری هستند.

با بررسی مطالعات موجود، توافق فعلی این است که مقدار ذخیره جهانی منابع آب زیرزمینی تقریباً ۲۳ میلیون کیلومترمکعب است. با این حال، محدودیت فیزیکی مهمی مانند حجم قابل برداشت و قابل استفاده از منابع آب زیرزمینی مطرح است، چرا که حجم قابل استفاده به کیفیت آب بستگی دارد. باتوجه به Shikomanov (1993) حجم منابع آب زیرزمینی شیرین کم‌تر از نیمی از کل آن است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای ارزیابی حجم منابع آب زیرزمینی قابل برداشت و قابل استفاده در سطح جهانی و منطقه‌ای به مدل جهانی جریان و انتقال آب زیرزمینی نیاز است. در این زمینه De Graaf *et al.* (2017) مدلی ارائه نمودند که می‌تواند مقدار جریان و برداشت از منابع آب زیرزمینی در سطح جهان را شبیه‌سازی کند.

**Table 2.** Estimates of global aquifer storage

References	Extent, depth/domain and detail	Global estimate	Method
Nace, (1969)	Global, 1000 m	7×106 BCM	Assuming single effective porosity of 1% up to 1000 m depth times 5
Korzuns, (1978)	Global, 2000 m, per continent	23.4×106 BCM	Total volume: Three layers 100, 200, 200m thickness with effective porosity of 15%, 12%, 5%
Richey <i>et al.</i> , (2015)	Global, saturated thickness of 200 m, Major aquifers of the world	1.1(0.6-1.6) ×106 BCM	Fixed minimum and maximum specific yield per aquifer based on major aquifer lithology and using asaturated thickness of 200 m.
	Global, 2000 m,	Total: 22.6 (15.8-29.5) ×106 BCM	Total: volume fraction 4 lithology classes and depth-porosity profiles per class
Gleeson <i>et al.</i> , (2015)	Both total groundwater volume and modern <50 m groundwater volume (over 900 000 watersheds)	Modern(<50years): 0.35(0.24-3.8) ×106 km	Modern: groundwater modelling and tritium dating
De Graaf <i>et al.</i> , (2016)	Global at 5 arcminutes, only sedimentary deposits and sedimentary rocks in major aquifers	6×106 BCM	Based on mapped aquifer thickness and porosities (fixed with depth) in de PCRGLOBWB/MODFLOW global groundwater model
Lall <i>et al.</i> , (2020)	Global, 200 m	23×106 BCM	Compiling regional estimates from various sources and applying a correction factor based on the specific yield
Shamsudduha and Taylor, (2020)	Global, 37 world major aquifer	23.4×106 BCM	Based on an ensemble of datasets from GRACE and land surface models
UN Water and UNESCO, (2022)	Global, 30 m	10.5×106 BCM	Based on an ensemble of datasets from GRACE

### ۲-۳. برآورد مقادیر برداشت، تخلیه و ذخیره منابع آب زیرزمینی ایران

به‌طور کلی، ایران به شش حوضه آبی، ۳۰ زیرحوضه و ۶۰۹ محدوده مطالعاتی تقسیم شده است. مقادیر برداشت، تخلیه و تغذیه در ایران بیش‌تر به‌صورت زیرحوضه‌ای و در غالب محدوده‌های مطالعاتی برآورد شده است که شامل گزارش‌های بیلان، پایان‌نامه‌های دانشجویی و پژوهش‌های علمی می‌باشد. درواقع به‌صورت سراسری و جامع مقادیر برداشت و تخلیه برآورد نشده است، با این حال می‌توان با ادغام اطلاعات حاصل از موارد زیرحوضه‌ای به اطلاعات دقیقی از وضعیت منابع آبی در سراسر ایران دست یافت. لازم به ذکر است این امر مستلزم زمان و دقت کافی است، به‌گونه‌ای که عدم قطعیت موجود در هر مطالعه می‌تواند بر روی نتیجه نهایی تأثیرگذار باشد. از این‌رو در این مطالعه به بررسی مطالعات کلی اقدام می‌گردد.

### ۲-۳-۱. برآورد مقادیر برداشت از منابع آب زیرزمینی

مقادیر برداشت از منابع آب زیرزمینی در ایران نیز همانند جهان از طریق دو رویکرد گزارش‌های کشوری و مدل‌سازی هیدرولوژیکی برآورد شده است. درواقع با استفاده از گزارش‌های منتشرشده از طرف سازمان آب منطقه‌ای هر محدوده مطالعاتی، مقادیر برداشت به‌ترتیب در بخش‌های کشاورزی، صنعت و شهری ارائه شده است. اما اطلاعاتی را در پایگاه‌های جهانی به‌صورت مفرد (در زمان نگارش پژوهش) یافت نمی‌شود. در زمینه گزارش‌های بیلان که به‌صورت محدوده‌های مطالعاتی منتشر شده است، به‌دلیل محدودیت‌های موجود، دسترسی به کل آمار مقدور نیست. به‌گونه‌ای که هیچ اطلاعاتی از چندین محدوده مطالعاتی یافت نگردید، هرچند که مقادیر برداشت موجود با توجه به‌وجود خیل عظیمی از چاه‌های غیرمجاز (۴۵ درصد از کل چاه‌های کشور) (Mazaheri and Abdolmanafi, 2016) نمی‌تواند از دقت مناسبی برخوردار باشد. طبق آخرین گزارش WRMC (2017) مقدار برداشت از منابع آب زیرزمینی (شامل چاه، چشمه و قنات) برای دوره ۱۳۹۵-۱۳۸۱ به‌طور متوسط ۷۱/۱۸ میلیارد مترمکعب در سال برآورده شده است. هرچند که این عدد نمی‌تواند نماینده خوبی برای مقدار برداشت باشد، چراکه طبق سری زمانی ارائه‌شده در شکل (۱)، این مقدار متوسط مایل به برداشت در اوازل دوره آماری است. درحالی‌که

در سال‌های انتهایی دوره آماری مقدار برداشت دچار افت ۱۴ درصدی شده و مقدار آن در سال ۱۳۹۵-۱۳۹۴ به ۶۱/۲۶ میلیارد مترمکعب در سال رسیده است. با وجود خشک‌سالی سال ۲۰۰۷ (۱۳۸۶) و طبعاً افزایش مقدار برداشت از منابع آب زیرزمینی (Safdari et al., 2022; Voss et al., 2013)، میان سال‌های قبل (۱۳۸۵-۱۳۸۱) و بعد از رخداد خشک‌سالی ۱۳۸۶ مقدار برداشت تغییر چندانی نکرده است فقط نحوه برداشت از منابع آب زیرزمینی تغییر کرده است. در سال‌ها اخیر از تعداد قنات و چشمه کاسته شده و به تعداد چاه‌ها افزوده شده است که در شکل (۲) قابل مشاهده می‌باشد. نکته قابل توجه در این نمودار تغییر بسیار جزئی مقدار برداشت است، به‌گونه‌ای که با وجود افزایش در تعداد چاه، قنات و چشمه، مقدار برداشت افزایشی چندانی نداشته است. این در حالی است که طبق مطالعات جهانی مقدار برداشت در آینده افزایشی برآورد شده است (Steward and Allen, 2016; Wada and Bierkens, 2014). از دلایل این امر می‌توان به کاهش تراز سطح آب زیرزمینی و به دنبال آن کاهش کیفیت و ظرفیت آبخوان‌ها اشاره نمود که خود را در غالب فرونشست نمایان می‌سازد.

براساس اطلاعات حاصل از بررسی‌های صورت‌گرفته که در جدول (۳) قابل مشاهده است نمی‌توان برای مقدار برداشت سالانه از منابع آب زیرزمینی نماینده مناسبی انتخاب نمود، چراکه برآوردهای موجود بسیار متغیر است. اما می‌توان نتیجه گرفت که مقدار برداشت سالانه از منابع آب زیرزمینی بر اثر گذشت زمان کاهش یافته است.

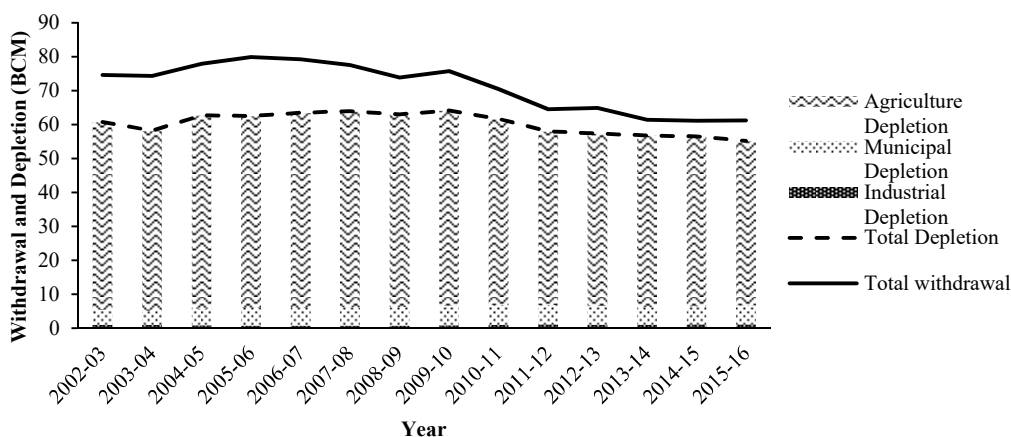


Figure 1. Groundwater withdrawal and depletion in country scale, retrieved from WRMC (2017)

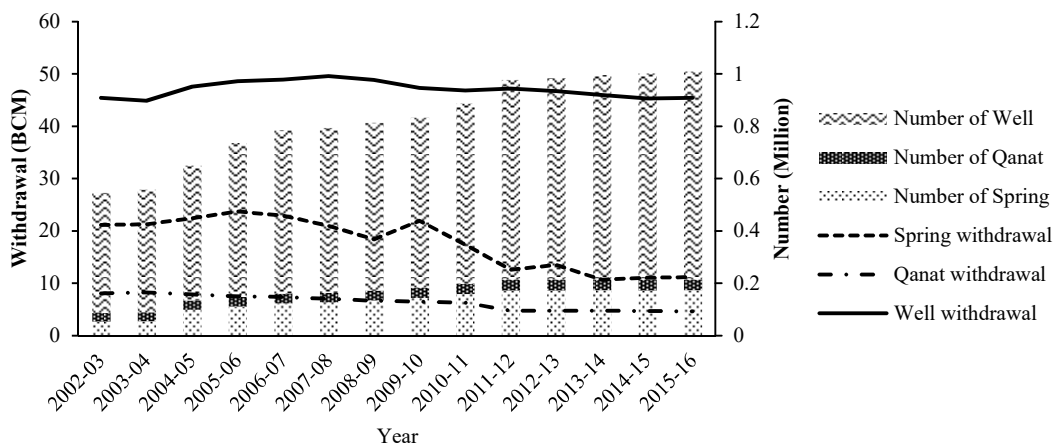


Figure 2. Number of Well, Qanat and Spring and their withdrawal, retrieved from WRMC (2017)

### ۲-۳-۲. برآورد تخلیه از منابع آب زیرزمینی

بهترین روش در زمینه برآورد مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی استفاده از پیژومترهاست. به طور معمول اطلاعات تراز آب‌های زیرزمینی به صورت ماهانه ثبت می‌شود، بنابراین مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی طبق اطلاعات دو ماه متوالی قابل برآورد است. هرچند این روش نیز دارای عدم قطعیت‌هایی است اما با توجه به واقعی بودن آمار، برای بررسی دقت سایر روش‌ها استفاده می‌شود. براساس آخرین آمار WRMC (2017) تعداد پیژومترهای فعال برای پایش تراز منابع آب زیرزمینی ۱۷۷۱۶ حلقه است. طبق مطالعاتی جهانی مبتنی بر آمار چاه‌های پیژومتری و هم‌چنین ماهواره GRACE، مقدار تخلیه از منابع آب زیرزمینی در دوره‌های آماری مختلف برآورد شده که در جدول (۳) قابل مشاهده است.

Table 3. Estimates of groundwater withdrawal and depletion in Iran (BCM yr<sup>-1</sup>)

Reference	Groundwater withdrawal/depletion BCM yr <sup>-1</sup>	Year	Note	Method
Voss <i>et al.</i> , (2013)	4.9±3.1/-	2003-2006	Middle east (northwest of Iran)	Hydrologic Model and GRACE
	34±4.5/-	2006-2009		
Döll <i>et al.</i> , (2014)	-/4.81	1960-2000		Hydrologic Model, GRACE and Well Data
	-/9.98	2000-1960		
Joodaki <i>et al.</i> , (2014)	25±3/-	2003-2015	All of Iran	Literature and reports Country statistics
Ashrafzadeh Afshar <i>et al.</i> , (2016)	45/-	2002-2010		
Mazaheri and Abdolmanafi (2016)	53.19/5	1973-2015		
Noori <i>et al.</i> , (2021)	-/5.4	2002-2015	All of Iran's Basins	Well Data
Safdari <i>et al.</i> , (2022)	20.08/-	2001-2017		Well Data
Saemian <i>et al.</i> , (2022)	-/9.5	2003-2019		GRACE and Well Data

آن چه دارای اهمیت است با وقوع خشک‌سالی سال ۲۰۰۷ و طبعاً افزایش چشم‌گیر در تخلیه منابع آب زیرزمینی (Voss *et al.*, 2013; Saemian *et al.*, 2022; Ashrafzadeh Afshar *et al.*, 2016)، آمار WRMC (2017) تغییری در مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی رخ نداده است. هرچند که اثر خشک‌سالی مشهود است، به گونه‌ای که در کنار کاهش میزان برداشت، تعداد عوامل برداشتی (چاه، چشمه و قنات) افزایش یافته است (شکل ۲). با توجه به بررسی مطالعات موجود، اگرچه میان مقادیر تخلیه منابع آب زیرزمینی برآورد شده تفاوت‌های قابل توجهی وجود دارد، اما می‌توان اذعان داشت که به طور متوسط سالانه ۶/۹ میلیارد مترمکعب از منابع آب زیرزمینی ایران تخلیه می‌شود. برای اطلاع از ابعاد گسترده مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی، عوامل وقوع این مسئله به تفکیک نوع مصارف در ادامه ارائه شده است.

### ۲-۳-۲-۱. برآورد تخلیه به تفکیک نوع مصارف

مصارف منابع آب زیرزمینی شامل سه بخش کشاورزی، صنعت و شهری است. براساس اطلاعات WRMC (2017) بخش کشاورزی و شهری به ترتیب بیش‌ترین مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی را دارند. متوسط مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی ۶۰/۳ میلیارد مترمکعب در سال است، که ۵۳/۹۹ معادل ۸۹/۵ درصد توسط بخش کشاورزی، ۵/۲۲ معادل ۸/۶۹ درصد توسط بخش شهری و ۱/۰۸ میلیارد مترمکعب در سال معادل ۱/۸۱ درصد توسط بخش صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است. طبق شکل (۳) و جدول (۴) طی دوره زمانی ۱۳۸۱-۱۳۹۵ میزان تغییرات مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی در هر بخش متفاوت است. به گونه‌ای که مقدار تخلیه منابع آب زیرزمینی توسط مصارف صنعتی و شهری افزایش یافته است، در حالی که مقدار مصرف کشاورزی کاهش یافته است. از دلایل این امر می‌توان به استفاده از سیستم‌های آبیاری نوین در کنار کاهش سطح زیر کشت ناشی از بحران آب اشاره نمود (Mazaheri and Abdolmanafi, 2016).

با بررسی رابطه میان مقادیر برداشت و تخلیه منابع آب زیرزمینی مقدار آب برگشتی قابل برآورد است. براساس شکل (۳) می‌توان ادعان داشت که به مرور زمان فاصله میان مقادیر برداشت و تخلیه منابع آب زیرزمینی کاهش یافته و مقدار آب برگشتی کمتر از دوره‌های قبل شده است. از دلایل این امر می‌توان به استفاده از سیستم‌های آبیاری نوین اشاره نمود (Perry et al., 2017) به گونه‌ای که همراه با کاهش مقدار برداشت، مقدار آب برگشتی نیز کاهش یافته است.

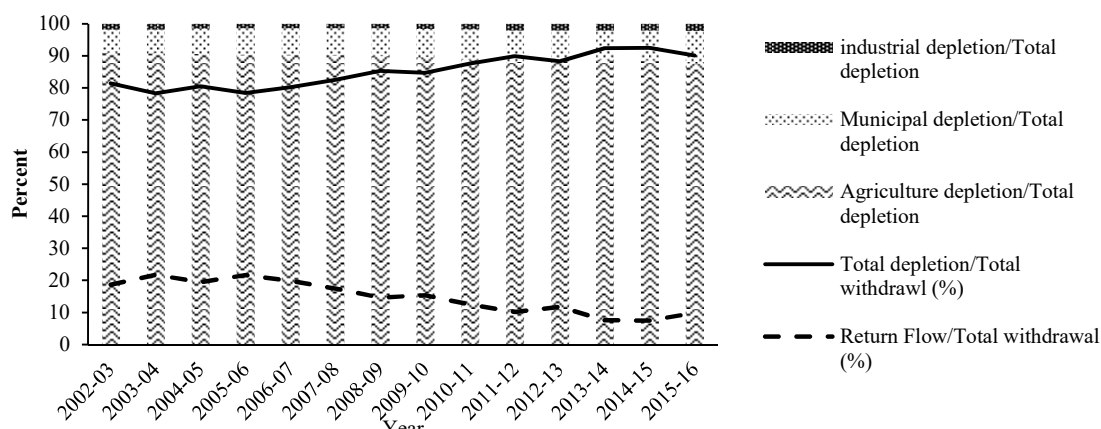


Figure 3. The ratios of depletion and return-flow, retrieved from WRMC (2017)

Table 4. Estimate of withdrawal and depletion and their components (WRMC, 2017)

Year	Withdrawal (BCM)	Depletion (BCM)			Total Depletion (BCM)	Return Flow (BCM)	Depletion ratio %			Depletion/Withdrawal (%)	Return Flow/Withdrawal (%)
		Agriculture	Domestic	Industrial			Agriculture	Domestic	Industrial		
2002-03	74.61	55.27	4.36	1.10	60.73	13.88	91.01	7.18	1.82	81.39	18.61
2003-04	74.35	52.85	4.26	1.10	58.20	16.14	90.80	7.31	1.89	78.29	21.71
2004-05	77.88	56.81	4.92	0.99	62.72	15.16	90.58	7.85	1.57	80.53	19.47
2005-06	79.84	56.52	5.12	0.92	62.56	17.28	90.34	8.19	1.47	78.36	21.64
2006-07	79.20	57.41	5.16	0.93	63.49	15.70	90.41	8.12	1.47	80.17	19.83
2007-08	77.50	57.73	5.31	0.93	63.97	13.53	90.25	8.30	1.45	82.54	17.46
2008-09	73.86	56.62	5.48	0.91	63.02	10.84	89.85	8.70	1.45	85.32	14.68
2009-10	75.71	57.43	5.67	1.02	64.12	11.60	89.56	8.84	1.60	84.68	15.32
2010-11	70.48	54.77	5.87	1.07	61.71	8.77	88.75	9.52	1.73	87.56	12.44
2011-12	64.52	51.07	5.63	1.26	57.96	6.56	88.11	9.71	2.18	89.83	10.17
2012-13	64.93	50.71	5.40	1.21	57.32	7.62	88.47	9.42	2.12	88.27	11.73
2013-14	61.40	50.43	5.11	1.20	56.74	4.66	88.88	9.00	2.11	92.40	7.60
2014-15	61.09	50.00	5.27	1.23	56.50	4.59	88.49	9.32	2.18	92.49	7.51
2015-16	61.26	48.32	5.60	1.26	55.18	6.08	87.56	10.15	2.29	90.08	9.92

## ۲-۴. اثرات برداشت از منابع آب زیرزمینی و تخلیه آبخوان‌ها

### ۲-۴-۱. فرونشست زمین

فرونشست زمین اثرات مخرب زیادی مانند آسیب به زیرساخت‌ها (لوله‌های زیرزمینی، جاده‌ها، پل‌ها، ساختمان‌ها) افزایش خطر سیل ناشی از شکست دایک‌ها و کاهش سطح تراز (Cigna and Tapete, 2022) به همراه دارد. فرونشست زمین اغلب به دو دلیل اتفاق می‌افتد؛ ۱- آزاد شدن فشار منفذی که باعث می‌شود لایه‌های حامل آب به علت وزن رسوبات

فشرده شوند، ۲- متراکم شدن لایه‌های رس به دلیل افت سطح آب که منجر به متراکم شدن این مواد می‌شود. بخشی از فرونشست زمین حالت الاستیک دارد و این بدان معناست که اگر تراز آب‌های زیرزمینی به مقادیر قبلی بازگردانده شود، زمین دوباره بالا خواهد آمد. همچنین بخشی از فرونشست وجود دارد که حالت غیرکشسانی دارد و به دلیل تراکم برگشت-ناپذیر، کانی‌سازی و اکسیداسیون مواد آلی غیرالاستیک است (van Asselen *et al.*, 2009). با وقوع فرونشست غیرالاستیک نه تنها ارتفاع زمین به مقدار اولیه‌اش بازمی‌گردد، بلکه ظرفیت ذخیره آبخوان نیز به خطر می‌افتد، به این معنی که پس از توقف برداشت از منابع آب زیرزمینی نیز امکان بازیابی ذخیره کامل آبخوان وجود ندارد. به عنوان مثال، هنگامی که در تویو نرخ برداشت از منابع آب زیرزمینی به شدت کاهش داده شد تا فرونشست متوقف شود، فرونشست هنوز برای سال‌ها هرچند با سرعت کم‌تر ادامه داشت (Sato *et al.*, 2006)، در ایران نیز فرونشست متناسب با برداشت از منابع آب زیرزمینی در حال وقوع بوده به گونه‌ای که متوسط نرخ فرونشست برای آن شش سانتی‌متر در سال بیان شده است (Negahdary, 2022)، تا جایی که بیش‌ترین نرخ فرونشست در دنیا مربوط به استان تهران می‌باشد (Rahmani *et al.*, 2020).

### ۲-۴-۲. افزایش خشک‌سالی هیدرولوژیکی

خشک‌سالی هواشناسی به عنوان یک دوره طولانی با بارش کم‌تر از حد نرمال تعریف می‌شود. اگر خشک‌سالی هواشناسی به اندازه کافی پایدار باشد، با ایجاد تغییر در رطوبت و تبخیر آب خاک (خشک‌سالی کشاورزی)، کاهش تغذیه منابع آب زیرزمینی و سطح پایین آب (خشک‌سالی آب زیرزمینی) و در نهایت کاهش تخلیه منابع آب زیرزمینی به نهرها و کاهش جریان آب، در کل سیستم هیدرولوژیکی (خشک‌سالی هیدرولوژیکی) منتشر می‌شود (Tallaksen and Lanen, 2004). از آنجاکه برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی منجر به تخلیه آن می‌شود، بنابراین ممکن است خشک‌سالی هیدرولوژیکی نیز افزایش یابد (Wada *et al.*, 2013). حوضه رودخانه گنگ، که بیش از ۴۰۰ میلیون نفر جمعیت دارد، شامل آبخوان‌هایی با بالاترین نرخ تخلیه منابع آب زیرزمینی در سراسر جهان است (Gleeson *et al.*, 2012). در دهه اخیر، حوضه گنگ کاهش گسترده جریان تابستان را تجربه کرده است. مطالعه Mukherjee *et al.* (2018) گزارش می‌دهد که کاهش شدید منابع آب زیرزمینی دلیل احتمالی خشک شدن جریان تابستانی است که به دلیل کاهش سهم منابع آب زیرزمینی در جریان رودخانه رخ می‌دهد. همچنین، کاهش متعاقب جریان منابع آب سطحی منجر به کمبود آب برای تولید محصولات کشاورزی در پایین دست می‌شود و این کاهش بیش‌تر منابع آب زیرزمینی در مناطق بزرگ کشاورزی را در پی دارد (Scanlon, 2012; Faunt *et al.*, 2012)، با وجود تغییر اقلیم رخ داده در ایران که منجر به افزایش متوسط دما و کاهش بارندگی سالانه شده است، برداشت از منابع آب زیرزمینی افزایش یافته و این امر منجر به افت بیش‌تر سطح منابع آب زیرزمینی و در نتیجه کاهش تغذیه آبراهه و پیکره‌های آبی شده است (Madani *et al.*, 2016).

### ۲-۴-۳. افزایش سطح آب دریاها

یکی دیگر از پیامدهای کاهش منابع آب زیرزمینی، افزایش سطح جهانی دریاهاست. منابع آب زیرزمینی فسیلی عمیق بسته به حجم ذخیره‌سازی و نرخ تغذیه و تخلیه از معادله بیلان و چرخه هیدرولوژیکی مجزا در نظر گرفته می‌شوند. اما میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی با تأثیرگذاری بر آب ذخیره‌شده در خشکی باعث توزیع دوباره آب در چرخه هیدرولوژیکی می‌شود و به ذخیره‌سازی بیش‌تر اقیانوس‌ها و افزایش سطح دریا کمک می‌کند. Sahagian *et al.* (1994) اولین کسانی بودند که سهم تغییرات ذخیره منابع آب زمینی را در تغییرات سطح آب دریا برآورد کردند. مؤلفه‌های مثبت و منفی سهم منابع آب زیرزمینی شامل آبیاری در پشت مخازن (منفی)، کاهش آب زیرزمینی (مثبت)، تلفات

تالاب‌ها (مثبت) و تغییرات سطح آب در دریاچه‌ها و حوضه‌های آبریز (منفی یا مثبت) هستند. از طرفی برآوردهای بعدی از میزان تأثیرگذاری این مؤلفه بسیار متفاوت بوده (Gornitz *et al.*, 1994; Rodenburg, 1994) و مورد بحث قابل توجهی قرار گرفته است، به طوری که منجر به چهارمین گزارش ارزیابی IPCC شده است (IPCC, 2007).

پژوهش‌ها در مورد تخلیه منابع آب زیرزمینی جهانی (Konikow, 2011; Wada, 2016, 2012) حاکی از افزایش سهم مثبت این مؤلفه در افزایش سطح آب دریا در طول دهه گذشته در نتیجه افزایش تخلیه منابع آب زیرزمینی است. به عنوان مثال، Wada *et al.* (2012) افزایش سهم تخلیه منابع آب زیرزمینی جهانی بر افزایش سطح دریا را از  $0.57/0.09$  میلی‌متر در سال ۲۰۰۰ به  $0.82/0.13$  میلی‌متر تا سال ۲۰۵۰ پیش‌بینی کردند. این افزایش به طور عمده ناشی از افزایش تقاضای آب در طول قرن گذشته است، از طرفی تحت تأثیر افزایش تبخیر از مناطق کشاورزی به دلیل تغییر در الگوهای بارش و دماهای بالاتر، کاهش دسترسی به منابع آب و تغذیه منابع آب زیرزمینی است. مطالعات دیگر سهم تخلیه منابع آب زیرزمینی را در افزایش جهانی سطح دریا در حدود  $0.9/0.3$  میلی‌متر در سال برای حدود سال ۲۰۰۰ گزارش می‌کنند (De Graaf *et al.*, 2018; Hanasaki *et al.*, 2017). در برآوردهای فوق فرض شده است که نزدیک به ۱۰۰ درصد از منابع آب زیرزمینی برداشتی در نهایت به اقیانوس‌ها ختم می‌شود. مطالعه Wada *et al.* (2016) با استفاده از یک مدل شبیه‌ساز اقلیمی-هیدرولوژیکی نشان داده است که تنها ۸۰ درصد مقدار کاهش منابع آب زیرزمینی به اقیانوس‌ها ختم می‌شود و مابقی آب‌ها توسط بارش‌های محلی بازیافت می‌شوند. سهم تخلیه منابع آب زیرزمینی در افزایش سطح جهانی دریا از  $0.2/0.04$  میلی‌متر در سال از سال ۱۹۰۰ به  $0.27/0.04$  میلی‌متر در سال تا سال ۲۰۰۰ افزایش یافته است که نشان می‌دهد مطالعات انجام‌شده به طور قابل توجهی این سهم را بیش از حد برآورد کرده‌اند (Wada *et al.*, 2016).

## ۲-۴-۴. شور شدن منابع آب زیرزمینی

در عمق ۵۰۰-۱۰۰ متری آبخوان‌های بزرگ، می‌توان انتظار داشت که منابع آب زیرزمینی شیرین باشد (غلظت املاح محلول کم‌تر از یک گرم در لیتر). در زیر این اعماق، منابع آب زیرزمینی نسبتاً شور (غلظت املاح محلول ۱-۱۰ میلی‌گرم در لیتر)، شور (غلظت املاح محلول ۱۰-۳۵ میلی‌گرم در لیتر) یا فوق شور (غلظت املاح محلول بیش‌تر از ۳۵ میلی‌گرم در لیتر) هستند که منشأ شوری زمینی یا دریایی است (van Engelen *et al.*, 2018). در برخی از آبخوان‌ها یا مناطق، منابع آب زیرزمینی شور یا لب‌شور می‌توانند در اعماق کم ایجاد شوند. در این مناطق، پمپاژ منابع آب زیرزمینی، به دلیل کاهش فشار منابع آب زیرزمینی در زیر چاه پمپاژ، می‌تواند منجر به افزایش سطح مشترک منابع آب زیرزمینی شیرین و شور و در نتیجه شور شدن منابع آب زیرزمینی شود. van Weert *et al.* (2009) فهرستی از مناطقی را ارائه می‌دهند که در آن منابع آب‌های زیرزمینی شور را می‌توان در اعماق متوسط یا کم یافت.

پمپاژ منابع آب زیرزمینی منجر به شور شدن تدریجی منابع آب در بسیاری از نقاط جهان، به ویژه در آبخوان‌های ساحلی شده است (Post *et al.*, 2018). فرایند پیشروی آب شور در زیر چاه‌ها یا زهکش‌ها به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعات نشان می‌دهد که اگر سطح مشترک آب شیرین-شور در نزدیکی سطح تراز چاه باشد، پیشروی آب شور و آلودگی چاه نسبتاً سریع رخ می‌دهد. هم‌چنین بازگشت میزان پیشروی آب شور به حالت اولیه ممکن است دهه‌ها طول بکشد، به ویژه زمانی که تغذیه منابع آب زیرزمینی کم باشد. با این حال، این مطالعات تحلیلی مرز مشخصی بین منابع آب زیرزمینی شیرین و شور فرض می‌کنند که عموماً منجر به برآوردهای خوش‌بینانه از اثرات پمپاژ بر شوری می‌شود. در واقعیت با در نظر گرفتن پراکندگی هیدرودینامیکی، یک ناحیه انتقال آب شور ایجاد می‌شود که منجر به افزایش پیشروی آب شور (Jakovic *et al.*, 2016) و افزایش تدریجی غلظت منابع آب زیرزمینی می‌شود (Werner *et al.*, 2009). هم‌چنین، توسعه ناحیه انتقال آب شور منجر به

کاهش کندتر شوری پس از توقف پمپاژ می‌شود. بنابراین، مدل‌های عددی شامل پراکنندگی هیدرودینامیکی و نتایج تجربی نشان می‌دهند که در صورت وجود منابع آب زیرزمینی شور در نزدیکی چاه‌های پمپاژ، برداشت از منابع آب زیرزمینی در کوتاه‌مدت منجر به غیرقابل استفاده شدن چاه و در طولانی‌مدت نیز منجر به کاهش کیفیت آب (Jakovovic *et al.*, 2016) و عدم استفاده از منابع آب زیرزمینی در منطقه می‌شود. بنابراین مناطقی با برداشت شدید منابع آب زیرزمینی و منابع آب زیرزمینی شور کم‌عمق (van Weert *et al.*, 2009)، به‌ویژه آبخوان‌های ساحلی، به شوری برگشت‌ناپذیر منابع آب زیرزمینی شیرین بسیار حساس هستند (Konikow and Kendy, 2005). Ferguson and Gleeson (2012) معتقدند که تأثیر برداشت از منابع آب زیرزمینی بر آبخوان‌های ساحلی با توجه به طیف گسترده‌ای از شرایط هیدروژئولوژیکی و شدت برداشت، بیش‌تر از تأثیر افزایش سطح آب دریاها است. با وجود اهمیت جهانی شور شدن منابع آب زیرزمینی از طریق برداشت از منابع آب زیرزمینی، به‌ندرت پیش‌بینی‌های منطقه‌ای (Mabrouk *et al.*, 2018) از شوری آبخوان‌ها تحت توسعه و برداشت از منابع آب زیرزمینی وجود دارد این امر در بسیاری از آبخوان‌های ایران مشهود می‌باشد (Riahi Zamin *et al.*, 2019).

## ۲-۴-۵. تأثیر بر اکوسیستم‌های وابسته به منابع آب زیرزمینی

میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی بر جریان منابع آب سطحی، تراز آب‌های زیرزمینی، تبخیر و به این ترتیب بر اکوسیستم‌های وابسته به منابع آب زیرزمینی<sup>۱۳</sup> (GDEs)، یعنی اکوسیستم‌هایی با موجودات زنده‌ای که به تخلیه منابع آب زیرزمینی حساس هستند، تأثیر دارد. Eamus *et al.* (2016)، اکوسیستم‌های وابسته به منابع آب زیرزمینی را به سه دسته تقسیم می‌کنند؛ ۱- جانوران گیاهی موجود در غارها، شکاف‌ها، ۲- چشمه‌ها، دریاچه‌ها، نهرها، تالاب‌ها و ۳- پوشش‌های گیاهی مانند جنگل‌ها، جنگل‌های ساحلی. Doody *et al.* (2017) چارچوبی برای نقشه‌برداری در مقیاس قاره‌ای از اکوسیستم‌های وابسته به منابع آب زیرزمینی با استفاده از سنجش از دور و دانش تخصصی ارائه می‌دهند. برای نقشه‌برداری اکوسیستم‌های وابسته به منابع آب زیرزمینی، نقشه عمق آب‌های زیرزمینی جهانی توسط Fan *et al.* (2013) براساس یک مدل آب زیرزمینی جهانی ارائه شده است. براساس نقشه عمق آب‌های زیرزمینی برآورد شده است که ۱۵ درصد از سطح زمین (بدون احتساب دریاچه‌های بزرگ) توسط مناطقی پوشیده شده است که در معرض تخلیه دائمی منابع آب زیرزمینی (دریاچه‌ها، مرداب‌ها، باتلاق‌ها، چشمه‌ها، نهرها) قرار دارند.

## ۳. نتیجه‌گیری

منابع آب زیرزمینی به‌عنوان منبعی حیاتی برای بقای انسان و اکوسیستم، اغلب در معرض برداشت و تخلیه ناپایدار قرار گرفته است که با افزایش تقاضا و برداشت‌های بیش از حد از منابع آب زیرزمینی، نفوذ آب شور، فرونشست، تهدیدات محیط‌زیستی و مخاطرات جغرافیایی بیش‌تر مورد توجه قرار می‌گیرد. برای مقابله با این تهدیدها، مفهوم مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی مطرح شده است. طی سال‌های اخیر، برداشت از منابع آب زیرزمینی مبتنی بر معیارهای معقول جهانی (مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی)، با توجه به محدودیت‌های کمی و کیفی و عدم قطعیت‌های مربوطه، نبوده است. بنابراین ضروری است این معیارها، عوامل، محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌ها بیش‌تر شناخته شوند تا برای هر یک از این محدودیت‌ها معیاری توسعه‌یافته و با مشارکت بیش‌تر گروه‌اران مبنای تخصیص، برداشت و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی مشخص شود. از منظر مدل‌سازی هیدرولوژیکی، پایداری منابع آب زیرزمینی لزوماً برابری برداشت با تغذیه نیست، بلکه شامل برابری برداشت با جذب از تعامل پیچیده بین سیستم منابع آب زیرزمینی و منابع آب سطحی است. حد بحرانی برداشت که منجر به جداسدن سطح منابع آب زیرزمینی از سیستم منابع آب سطحی می‌شود، مهم است. زیرا باعث خروج از یک رژیم تعادلی و تبدیل به رژیمی که منجر به



کاهش مداوم منابع آب زیرزمینی می‌شود، می‌گردد. برآورد نرخ تخلیه فعلی و تکامل آن‌ها در طول زمان بسیار نامشخص می‌باشد و با توجه به فرایند جذب، روش‌های مبتنی بر حجم ترجیح داده می‌شوند. به منظور محدود کردن برآورد تخلیه، نیاز به بهبود روش‌های مبتنی بر حجم می‌باشد و مهم‌تر از همه، نیاز به روش‌های بهتر برای برآورد برداشت آب زیرزمینی، مدل‌های بهتر آب زیرزمینی و مشاهدات بیش‌تر است که این امر چالش‌های زیر را در پی دارد:

۱- مدل‌سازی تقاضای آب و برداشت بخش‌های کشاورزی، شهری و صنعت باید با آمارهای گزارش شده ارزیابی شود به‌گونه‌ای که بتوان آن‌ها را در قالب حسابداری آب بیان نمود. چرا که بسیاری از آب‌های برداشتی بخش شهری در بخش‌های دیگر مورد استفاده دوباره قرار می‌گیرد.

۲- نیاز به بهبود برآورد تغذیه آبخوان در مدل‌ها وجود دارد. اکثر مدل‌ها فقط شامل نفوذ پراکنده از خاک هستند، درحالی‌که در مناطق نیمه‌خشک نظیر ایران، تغذیه متمرکز مکانی و فصلی از جریان منابع آب سطحی مهم است. این فرایندها باید در مدل‌ها گنجانده شده و اهمیت آن‌ها ارزیابی شود.

۳- دقت مدل‌های آب زیرزمینی به در دسترس بودن اطلاعات در مورد ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی زیر خاک، مشاهدات تراز آب زیرزمینی، سن و شوری آب زیرزمینی و جریان بستگی دارد و این امر مستلزم تلاش هماهنگ جامعه هیدروژئولوژیکی برای شروع ساخت یک پایگاه داده‌ای متشکل از تراز سنگ کف، داده‌های مشاهده‌ای و برداشت از چاه، پروفایل‌های هیدروژئولوژیکی و داده‌های ورودی مدل‌های آب زیرزمینی منطقه‌ای می‌باشد.

۴- روش سنجش‌ازدور در شناسایی مناطقی با کاهش آب زیرزمینی مفید واقع شده است، اما این مشاهدات هنوز هم وضوح بسیار کم یا فرایند خیلی پیچیده‌ای برای ارزیابی‌های محلی تا منطقه‌ای دارند. پیشرفت در فناوری، بهبود مدل‌سازی ژئوفیزیکی و همسان‌سازی داده‌ها برای حرکت به سمت وضوح‌های بهتر مورد نیاز است.

در نهایت با توجه به مرور مطالعات انجام شده، لازم به بیان است که با وجود تلاش‌های بسیار، عدم قطعیت‌ها در مورد نرخ تخلیه منابع آب زیرزمینی و محدودیت‌های آتی استفاده از منابع آب زیرزمینی تجدیدناپذیر شناخته نشده است. هم‌چنین توسعه و اجرای مدل‌های پایدار منابع آب زیرزمینی با کم‌ترین سطح عدم قطعیت، منوط به انجام پژوهش‌های میان‌رشته‌ای بیش‌تر مبتنی بر مدل‌سازی چندفرایندی و تحلیل عدم قطعیت است که خود منوط به تهیه آمار و اطلاعات پایه است. از طرفی تهیه اطلاعات و مدل‌سازی تغذیه و تخلیه منابع آب زیرزمینی به همراه ادغام عدم قطعیت‌های سیستم‌های تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی از منظر اقتصادی هزینه‌بر است. انجام چنین تحقیقاتی نیازمند مشارکت جامعه علمی و سیاست‌گذاری برای غلبه بر چالش‌ها است.

#### ۴. پی‌نوشت‌ها

1. Withdrawal
2. Depletion
3. International Groundwater Resource Assessment Center (IGRAC) GIS: <https://www.un-igrac.org/global-groundwater-information-system-ggis>
4. <https://water.usgs.gov/watuse/>
5. <https://www.gob.mx/conagua/>
6. <http://cgwb.gov.in/>
7. <http://english.mee.gov.cn/>
8. <https://stu.wrm.ir/>
9. General Circulation Model: GCM
10. Regional Climate Models: RCM
11. Data-Intensive Approach
12. Groundwater-Dependent Ecosystems

## ۵. تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی بین نویسندگان وجود ندارد.

## ۶. منابع

- Ashrafzadeh Afshar, A., Joodaki, G. R., & Sharifi, M. A. (2016). Evaluation of Groundwater Resources in Iran Using GRACE Gravity Satellite Data. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 5(4), 73-84. (In Persian).
- Bierkens, M. F. P. (2015). Global hydrology 2015: State, trends, and directions. *Water Resources Research*, 51(7), 4923-4947.
- Cao, G., Zheng, C., Scanlon, B. R., Liu, J., & Li, W. (2013). *Use of flow modeling to assess sustainability of groundwater resources in the North China Plain*, 49(1).
- Cigna, F., & Tapete, D. (2022). Urban growth and land subsidence: Multi-decadal investigation using human settlement data and satellite InSAR in Morelia, Mexico. *Science of The Total Environment*, 811, 152211.
- Danaei, G., Farzadfar, F., Kelishadi, R., Rashidian, A., Rouhani, O. M., Ahmadnia, S., Ahmadvand, A., Arabi, M., Ardalan, A., Arhami, M., Azizi, M. H., Bahadori, M., Baumgartner, J., Beheshtian, A., Djalalinia, S., Doshmangir, L., Haghdoost, A. A., Haghshenas, R., Hosseinpoor, A. R., ... Malekzadeh, R. (2019). Iran in transition. In *The Lancet* (Vol. 393, Issue 10184, pp. 1984-2005).
- De Graaf, I. E. M., van Beek, L. P. H., Wada, Y., & Bierkens, M. F. P. (2014). Dynamic attribution of global water demand to surface water and groundwater resources: Effects of abstractions and return flows on river discharges. *Advances in Water Resources*, 64, 21-33.
- de Graaf, I. E. M., van Beek, R. L. P. H., Gleeson, T., Moosdorf, N., Schmitz, O., Sutanudjaja, E. H., & Bierkens, M. F. P. (2017). A global-scale two-layer transient groundwater model: Development and application to groundwater depletion. *Advances in Water Resources*, 102, 53-67.
- Döll, P., Müller Schmied, H., Schuh, C., Portmann, F. T., & Eicker, A. (2014). Global-scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions: Combining hydrological modeling with information from well observations and GRACE satellites. *Water Resources Research*, 50(7), 5698-5720.
- Feng, W., Zhong, M., Lemoine, J. M., Biancale, R., Hsu, H. T., & Xia, J. (2013). *Evaluation of groundwater depletion in North China using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data and ground-based measurements*. 49(4), 2110-2118.
- Foster, S., & Loucks, D. (2006). *Non-renewable groundwater resources: a guidebook on socially-sustainable management for water-policy makers*. Retrieved from <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000146997>
- Gleeson, T., Befus, K. M., Jasechko, S., Luijendijk, E., & Cardenas, M. B. (2015). The global volume and distribution of modern groundwater. *Nature Geoscience* 2015 9:2, 9(2), 161-167.
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F. P., & Van Beek, L. P. H. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488(7410), 197-200.
- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M., & Toulmin, C. (2010). Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science*, 327(5967), 812-818.
- Gornitz, V., Rosenzweig, C., & Hillel, D. (1994). Is sea level rising or falling? *Nature* 1994 371:6497, 371(6497), 481-481.
- Hanasaki, N., Yoshikawa, S., Pokhrel, Y., & Kanae, S. (2018). A global hydrological simulation to specify the sources of water used by humans. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1), 789-817.

- Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2006). Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 21(1), 35-48.
- Jakovovic, D., Werner, A. D., de Louw, P. G. B., Post, V. E. A., & Morgan, L. K. (2016). Saltwater upconing zone of influence. *Advances in Water Resources*, 94, 75-86.
- Joodaki, G., Wahr, J., & Swenson, S. (2014). Estimating the human contribution to groundwater depletion in the Middle East, from GRACE data, land surface models, and well observations. *Water Resources Research*, 50(3), 2679-2692.
- Konikow, L. F. (2011). Contribution of global groundwater depletion since 1900 to sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, 38(17).
- Konikow, L. F., & Kendy, E. (2005). Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeology Journal*, 13(1), 317-320.
- Korzun, V. I. (Valentin I., & Mezhdudedomstvennyĭ komitet SSSR po mezhdunarodnomu gidrologicheskomu desiatiletiiu. (1978). *World water balance and water resources of the Earth*. 663.
- Mabrouk, M., Jonoski, A., Oude Essink, G. H. P., & Uhlenbrook, S. (2018). Impacts of Sea Level Rise and Groundwater Extraction Scenarios on Fresh Groundwater Resources in the Nile Delta Governorates, Egypt. *Water 2018, Vol. 10, Page 1690*, 10(11), 1690.
- Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4(4), 315-328.
- Madani, K., AghaKouchak, A., & Mirchi, A. (2016). Iran's Socio-economic Drought: Challenges of a Water-Bankrupt Nation. *Iranian Studies*, 49(6), 997-1016.
- Mansouri Daneshvar, M. R., Ebrahimi, M., & Nejadsoleymani, H. (2019). An overview of climate change in Iran: facts and statistics. *Environmental Systems Research*, 8(1), 1-10.
- Margat, J., & van der Gun, J. (2013). Groundwater around the World: A Geographic Synopsis. *Groundwater Around the World: A Geographic Synopsis*, 1-343.
- Mazaheri, M., & Abdolmanafi, N. (2016). *Investigating the water crisis and its consequences in the country*. Retrieved from <https://rc.majlis.ir/fa/report/show/1654990>. (In Persian).
- Nace, R. L. (1969). World water inventory and control. In *Introduction to Geographical Hydrology: Spatial Aspects of the Interactions between Water Occurrence and Human Activity* (Vol. 4, pp. 8-19). Taylor and Francis.
- Negahdary, M. (2022). Shrinking aquifers and land subsidence in Iran. *Science*, 376(6599), 1279.
- Noori, R., Maghrebi, M., Mirchi, A., Tang, Q., Bhattarai, R., Sadegh, M., Noury, M., Haghghi, A. T., Klöve, B., & Madani, K. (2021). Anthropogenic depletion of Iran's aquifers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(25), e2024221118.
- Perry, C. S., Steduto, P., & Karajeh, F. (2017). *Does improved irrigation technology save water? a review of evidence: Discussion paper on irrigation and sustainable water resources management in the Near East and North Africa*. Retrieved <https://www.fao.org/policy-support/tools-and-publications/resources-details/en/c/897549/>
- Pokhrel, Y. N., Koirala, S., Yeh, P. J. F., Hanasaki, N., Longuevergne, L., Kanae, S., & Oki, T. (2015). Incorporation of groundwater pumping in a global Land Surface Model with the representation of human impacts. *Water Resources Research*, 51(1), 78-96.
- Post, V. E. A., Oude Essink, G., Szymkiewicz, A., Bakker, M., Houben, G., Custodio, E., & Voss, C. (2018). Celebrating 50 years of SWIMs (Salt Water Intrusion Meetings). *Hydrogeology Journal*, 26(6), 1767-1770.
- Postel, S. (1999). Pillar of sand: can the irrigation miracle last? In *Worldwatch book*. W.W. Norton. <http://www.globalwaterpolicy.org/index.htm>

- Rahmani, A., Bolourchi, M. J., Shahbazi, R., Rahmani, H., & Khosroshahi, M. (2020). Land subsidence: Part 1 (causes and factors). *Iran Nature*, 4(6), 77-91. (In Persian).
- Riahi Zamin, R., TORHAMANI, J., & Shajari, S. (2019). Externalities of groundwater overdraft on the supply of agricultural products: A Case Study of wheat in Marvdasht (Vol. 11, Issue 141, pp. 263–275). *JOURNAL OF Agricultural Economics Research*. (In Persian)
- Richey, A. S., Thomas, B. F., Lo, M. H., Famiglietti, J. S., Swenson, S., & Rodell, M. (2015). Uncertainty in global groundwater storage estimates in a Total Groundwater Stress framework. *Water Resources Research*, 51(7), 5198-5216.
- Rodenburg, E. (1994). Man-made lakes and sea-level rise. *Nature*, 370(6487), 258.
- Ruddell, B. L. (2018). HESS Opinions: How should a future water census address consumptive use? (And where can we substitute withdrawal data while we wait?). *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(10), 5551-5558.
- Saemian, P., Tourian, M. J., AghaKouchak, A., Madani, K., & Sneeuw, N. (2022). How much water did Iran lose over the last two decades? *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41, 101095.
- Safdari, Z., Nahavandchi, H., & Joodaki, G. (2022). Estimation of Groundwater Depletion in Iran's Catchments Using Well Data. *Water (Switzerland)*, 14(1), 131.
- Sato, C., Haga, M., & Nishino, J. (2006). *Land Subsidence and Groundwater Management in Tokyo*.
- Scanlon, B. R., Faunt, C. C., Longuevergne, L., Reedy, R. C., Alley, W. M., McGuire, V. L., & McMahon, P. B. (2012). Groundwater depletion and sustainability of irrigation in the US High Plains and Central Valley. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(24), 9320-9325.
- Scanlon, B. R., Longuevergne, L., & Long, D. (2012). Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA. *Water Resources Research*, 48(4).
- Shah, T. (2005). Groundwater and human development: challenges and opportunities in livelihoods and environment. *Water Science and Technology*, 51(8), 27-37.
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., & Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation - A global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(10), 1863-1880.
- Steward, D. R., & Allen, A. J. (2016). Peak groundwater depletion in the High Plains Aquifer, projections from 1930 to 2110. *Agricultural Water Management*, 170, 36-48.
- Tallaksen, L., & Lanen, H. V. (2004). *Hydrological drought : processes and estimation methods for streamflow and groundwater*.
- United Nations. (2014). *World urbanization prospects: The 2014 revision [Highlights]*. Retrieved [esa.un.org/unpd/wup/](http://esa.un.org/unpd/wup/)
- van Asselen, S., Stouthamer, E., & van Asch, T. W. J. (2009). Effects of peat compaction on delta evolution: A review on processes, responses, measuring and modeling. *Earth-Science Reviews*, 92(1-2), 35-51.
- Van Dijk, A. I. J. M., Renzullo, L. J., Wada, Y., & Tregoning, P. (2014). A global water cycle reanalysis (2003-2012) merging satellite gravimetry and altimetry observations with a hydrological multi-model ensemble. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(8), 2955-2973.
- van Engelen, J., Oude Essink, G. H. P., Kooi, H., & Bierkens, M. F. P. (2018). On the origins of hypersaline groundwater in the Nile Delta aquifer. *Journal of Hydrology*, 560, 301-317.
- van Weert, F., van der Gun, J., & Reckman, J. (2009). Global Overview of Saline Groundwater Occurrence and Genesis (Report number: GP 2009-1). *Utrecht IGRAC - U. N. Int. Groundw. Resour. Assess. Cent.*, 1-32.
- Vernadskiy. (1933). History of Natural Water. *History of the Minerals of the Earth's Crust 2 Leningrad*.

- Voss, K. A., Famiglietti, J. S., Lo, M., Linage, C. De, Rodell, M., Swenson, S. C., Voss, C. :, Famiglietti, J. S., Lo, M., De Linage, C., Rodell, M., & Swenson, S. C. (2013). Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management in the Tigris-Euphrates-Western Iran region. *Water Resources Research*, 49(2), 904-914.
- Wada, Y. (2016). Modeling Groundwater Depletion at Regional and Global Scales: Present State and Future Prospects. *Surveys in Geophysics*, 37(2), 419-451.
- Wada, Y., & Bierkens, M. F. P. (2014). Sustainability of global water use: past reconstruction and future projections. *Environmental Research Letters*, 9(10), 104003.
- Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S., Satoh, Y., Van Vliet, M. T. H., Yillia, P., Ringler, C., Burek, P., & Wiberg, D. (2016). Modeling global water use for the 21st century: The Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches. *Geoscientific Model Development*, 9(1), 175-222.
- Wada, Y., Lo, M. H., Yeh, P. J. F., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., Wu, R. J., & Tseng, Y. H. (2016). Fate of water pumped from underground and contributions to sea-level rise. *Nature Climate Change*, 6(8), 777-780.
- Wada, Y., van Beek, L. P. H., & Bierkens, M. F. P. (2012). Nonsustainable groundwater sustaining irrigation: A global assessment. *Water Resources Research*, 48, 0-06.
- Wada, Y., Van Beek, L. P. H., Sperna Weiland, F. C., Chao, B. F., Wu, Y. H., & Bierkens, M. F. P. (2012). Past and future contribution of global groundwater depletion to sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, 39(9).
- Wada, Y., Van Beek, L. P. H., Van Kempen, C. M., Reckman, J. W. T. M., Vasak, S., & Bierkens, M. F. P. (2010). Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters*, 37(20).
- Wada, Y., Van Beek, L. P. H., Wanders, N., & Bierkens, M. F. P. (2013). Human water consumption intensifies hydrological drought worldwide. *Environmental Research Letters*, 8(3), 034036.
- Wada, Y., Wisser, D., & Bierkens, M. F. P. (2014). Global modeling of withdrawal, allocation and consumptive use of surface water and groundwater resources. *Earth System Dynamics*, 5(1), 15-40.
- Werner, A. D., Jakovovic, D., & Simmons, C. T. (2009). Experimental observations of saltwater up-coning. *Journal of Hydrology*, 373(1-2), 230-241.
- WRMC. (2017). *Water Resources Management Company*. Retrieved [https://stu.wrm.ir/tbl\\_amarrequests\\_add.asp](https://stu.wrm.ir/tbl_amarrequests_add.asp). (In Persian)
- Yoshikawa, S., Cho, J., Yamada, H. G., Hanasaki, N., & Kanae, S. (2014). An assessment of global net irrigation water requirements from various water supply sources to sustain irrigation: Rivers and reservoirs (1960&ndash;2050). *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(10), 4289-4310.
- Zarch, M. A. A., Malekinezhad, H., Mobin, M. H., Dastorani, M. T., & Kousari, M. R. (2011). Drought Monitoring by Reconnaissance Drought Index (RDI) in Iran. *Water Resources Management*, 25(13), 3485-3504.
- Zektser, Igor S., & Everett, L. G. (2004). *Groundwater resources of the world and their use*. Retrieved from <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000134433>