



## Groundwater Resources Balance Estimation Using Remote Sensing Approach: A Case Study of Qamshe Plain

Amirreza Nemati Mansour<sup>1</sup> | Hamid Kardan Moghaddam<sup>2</sup> | Saman Javadi<sup>3</sup>

1. MSc Student, Department of Irrigation and Reclamation, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. Research Assistant Professor, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran.
3. Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Tehran, Iran.

✉Corresponding Author: [Hkardan@ut.ac.ir](mailto:Hkardan@ut.ac.ir)

Received:  
05 February 2024

Accepted:  
18 February 2024

Published:  
19 March 2024

### Keywords:

*WaPOR Sensor,  
Evapotranspiration,  
Infiltration from Rainfall,  
Return Flow,  
Water balance.*

### Extended abstract

#### Introduction

Accurate estimation of groundwater balance components, including recharge, discharge, and storage, is essential for the sustainable management of these vital resources. Numerous studies have been conducted in this field and have shown that various factors such as abstraction volume, interaction with surface water and ecosystems, and climatic and geological conditions affect groundwater balance and storage. However, one of the major challenges in this field is the low accuracy in estimating the groundwater resources balance. This problem occurs due to inadequate monitoring, lack of modern methods, and errors in the process of estimating groundwater balance components.

To improve the accuracy of groundwater balance estimation, it is necessary to employ modern methods such as remote sensing. Previous research has shown that using various remote sensing sensors has contributed to improving the accuracy of groundwater balance estimation. In this study, for the first time, the WaPOR sensor is used to estimate the evapotranspiration component of the groundwater balance. This study aims to improve the accuracy of groundwater balance estimation in the Qomsheh study area. Finally, the measured balance was compared with the calculated balance, and the effect of the WaPOR sensor on the accuracy of balance calculations was evaluated.

**Cite this article:** Nemati mansour, A., Kardan Moghaddam, H. & Javadi, S. (2024). Estimation Of Groundwater Resources Balance Of Qamesheh Aquifer Using Remote Sensing Approach. *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 4 (2), 35-48. DOI: <http://doi.org/10.22077/jaaq.2024.7258.1061>



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### Material and method

The Qomsheh plain has 28,855 hectares of irrigated land and orchards, 606 deep and semi-deep wells, 112 qanats, 20 springs, and one water canal. The average annual rainfall is 140 mm. Data on rainfall, water abstraction, groundwater level, etc. were collected for the period 2002 to 2016 and used in this study.

A conceptual water balance model was used to estimate the water balance (Figure 1). This model includes input components (precipitation, surface flows, return flow) and output components (abstraction, outflow, evaporation).

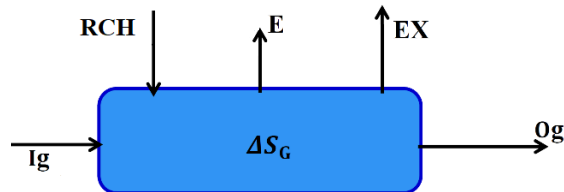


Fig 1. Conceptual Model of Groundwater Balance.

Infiltration from rainfall was calculated using the Horton equation, evaporation and transpiration using the FAO WaPOR product, water abstraction from wells, qanats, and springs, inflow and outflow using Darcy's law, and evaporation from the groundwater surface using the Thornthwaite diagram. The hydrograph of the aquifer was also drawn to evaluate the conceptual model (Figure 2).

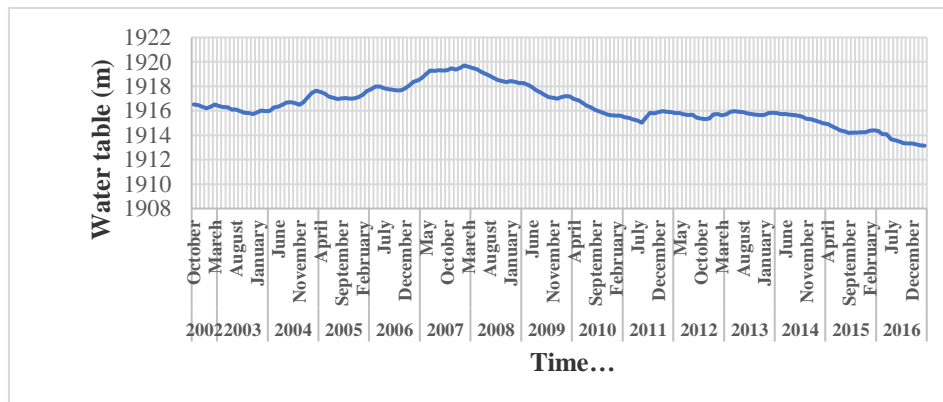


Fig 2. Hydrograph of the Aquifer in the Qomsheh Study Area between 2002 and 2016.

### Results and Discussion

The results showed that during this period, the volume of precipitation was 1427.5 million cubic meters, evaporation and transpiration was 1804.1 million cubic meters, runoff was 872 million cubic meters, and infiltration was 14.27 million cubic meters. Also, the volume of inflow to the aquifer was estimated at 10.21 million cubic meters and the outflow from it was 0.73 million cubic meters. Studies show that the groundwater level has dropped by 0.224 meters per year during this period and a total of 120 million cubic meters have been depleted from the aquifer storage. A notable point of this study is the use of WaPOR sensor data to calculate evaporation and transpiration. This has significantly increased the accuracy of the water balance components estimation, which ultimately has led to increased accuracy of groundwater balance estimation. Considering the storage of the Qomsheh aquifer during the study period, the necessity of planning and implementing compensatory solutions to reduce its environmental and economic consequences it is evident.

### Conclusion

In this study, novel remote sensing methods were employed to reduce uncertainty in groundwater balance calculations of the Qomsheh aquifer. Evapotranspiration (ET), a major component of the water balance, is not directly measurable and was estimated in this study using the WaPOR sensor. This allowed for more accurate calculation of the other effective recharge components,

namely the amount of water infiltration from precipitation, and return flow from drinking, agricultural, and industrial uses. Based on remote sensing data, the average annual ET from the Qomsheh aquifer was estimated at 1804.1 million cubic meters between 2002 and 2016. Using the effective rainfall technique, the evaporation from rainfall was separated from irrigation-induced evaporation. The groundwater reservoir deficit was estimated at 120 million cubic meters, resulting in an average annual decline of 22.4 centimeters in the groundwater level. These results highlight the need for increased attention to groundwater management and improved capabilities for more accurate estimates to ensure proper management of these resources in the future.



## برآورد بیلان منابع آب زیرزمینی با رویکرد سنجش از دور: مطالعه موردی دشت قمشه

امیررضا نعمتی منصور<sup>✉</sup> | حمید کاردان مقدم<sup>۲</sup> | سامان جوادی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آموزشی مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
  ۲. استادیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران.
  ۳. دانشیار، گروه آموزشی مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
- ✉ نویسنده مسئول: [Hkardan@ut.ac.ir](mailto:Hkardan@ut.ac.ir)

### چکیده

یکی از روش‌های پایش آب زیرزمینی، محاسبه بیلان می‌باشد که اطلاعاتی مهم درباره وضعیت و تغییرات آبخوان‌ها ارائه می‌دهد. با وجود این، برآورد مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی با چالش‌هایی همراه است که به کاهش دقت نتایج می‌انجامد. هدف این مطالعه، ارتقای دقت محاسبه تبخیر و تعرق در بیلان آب زیرزمینی با به‌کارگیری سنجش از دور است که به بهبود تخمین آب برگشتی و نفوذ ناشی از بارش منجر می‌شود. در نتیجه بیلان آب زیرزمینی با دقت بیشتری محاسبه می‌گردد. برای این منظور، داده‌های چاه‌های مشاهداتی، بارش، برداشت‌ها، رودخانه‌ها و آبخوان‌ها در محدوده مطالعاتی قمشه بین سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۹۵ جهت ارزیابی بیلان آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت و از یک مدل مفهومی بیلان و محصولات سنجنده WaPOR برای تخمین تبخیر و تعرق استفاده شد. در نهایت بیلان مشاهداتی با بیلان محاسبه شده مقایسه شد. نتایج نشان داد که در دوره مورد نظر، ۴۰/۵۴ میلیون مترمکعب آب از طریق بارش، آبیاری و جریان سطحی به سفره زیرزمینی نفوذ کرده است. در مقابل، ۲۶۲ میلیون مترمکعب آب از آبخوان برداشت شده که ۱۰۵/۵۳ میلیون مترمکعب آن به سفره بازگشته است. همچنین ۱۰/۲۱ میلیون مترمکعب آب به صورت جریان جانبی وارد و ۰/۷۳ میلیون مترمکعب آب از آبخوان خارج شده است. بیلان آب زیرزمینی با استفاده از دو روش محاسباتی و مشاهداتی به ترتیب ۱۲۰/۰۲ و ۱۱۹/۰۹ میلیون مترمکعب برآورد شد. مقایسه این دو بیلان نشان می‌دهد که استفاده از محصولات سنجنده WaPOR در برآورد مؤلفه‌های بیلان آب، عدم قطعیت را کاهش و دقت محاسبات را در محدوده مطالعاتی قمشه افزایش می‌دهد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۶  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۹  
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۹

### کلیدواژه‌ها:

سنجنده WaPOR

تبخیر و تعرق،  
نفوذ از بارش،  
آب برگشتی،  
بیلان آب.

## مقدمه

در مطالعات مختلف، به دلیل ماهیت متنوع مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی و تنوع داده‌های موجود، روش‌های گوناگونی برای برآورد تغذیه، تخلیه و ذخیره این منابع استفاده شده است. دقت در برآورد این مؤلفه‌ها مستلزم دقت در روش‌های مورد استفاده می‌باشد و افزایش دقت در برآورد این مؤلفه‌ها باعث بهبود قابل توجهی در دقت محاسبات بیلان منابع آب زیرزمینی می‌شود. اهمیت این موضوع در مناطقی که منابع آب زیرزمینی آن‌ها به طور پیوسته در حال کاهش است، بیشتر احساس می‌شود (IWPRI, 2014; Ketabchi et al., 2018). مطالعات زیادی در مورد برآورد مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی و حجم ذخیره آبخوان انجام شده است (Mookiah et al., 2021, Aslam et al., 2021, Janardhanan et al., 2021, Weatherl et al., 2023). در سال ۲۰۲۱ برای حوضه بالادست کابل افغانستان و دشت ورامین ایران پارامترهای تغذیه، تخلیه، تراز آب زیرزمینی محاسبه شدند. نتایج نشان دادند که بیلان آب زیرزمینی برای هر دو محدوده مطالعه افغانستان و ایران منفی بوده که به ترتیب برابر با  $-۱۴/۷۵$  و  $-۵۹/۳۹$  می‌باشند. علت کسری مخزن برای هر دو منطقه برداشت بیش از حد آب زیرزمینی گزارش شده است (Farahmand et al., 2021, Azizi and Nejatian, 2021). مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۱ به منظور تعیین میزان برداشت بهینه از آب های زیرزمینی حوضه رودخانه زاینده‌رود انجام شد. در این تحقیق از دو دوره زمانی مختلف ۲۰۰۶ الی ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ الی ۲۰۱۹ جهت ارزیابی تغییرات سطح آب زیرزمینی و تعیین عوامل مؤثر بر آن استفاده شد. نتایج نشان داد که سطح آب زیرزمینی از سال ۲۰۱۳ با کاهش فاحش روبه‌رو بوده و با توجه به کاهش بارش، جریان سطحی و افزایش تبخیر-تعرق، برداشت آب زیرزمینی باید از  $۲۲۲۸/۹$  به  $۱۹۲۹/۱$  میلیون مترمکعب یعنی  $۱۳/۱$  درصد کاهش یابد (Zareian and Eslamian, 2021). در استان خراسان رضوی به‌منظور افزایش دقت برآورد تغذیه آب زیرزمینی، روشی مبتنی بر کمینه‌سازی مجموع کل خطای مؤلفه‌های معادلات بیلان آب ارائه شد. در این روش با استفاده از ضرایب تصحیح خطا، دقت برآورد تغذیه آب زیرزمینی تا  $۵۵$  و  $۶۵$  درصد افزایش یافت. نتایج نشان

داد که ضرایب تغذیه آب زیرزمینی ناشی از بارش و جریان برگشتی آبیاری به ترتیب  $۲$  و  $۱۶/۵$  درصد است (Jovein et al., 2023).

از مطالعات ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که عوامل متعددی بر مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی مؤثر هستند که در رقم زدن ذخیره زیرزمینی مثبت یا منفی نقش دارند. عواملی که در بیلان آب زیرزمینی یک آبخوان نقش مؤثری ایفا می‌کنند عبارت‌اند از حجم بهره‌برداری برای مصارف مختلف، اندرکنش مخزن آب زیرزمینی با آب‌های سطحی مانند رودخانه‌ها، کانال‌ها و خطوط انتقال، اندرکنش با اکوسیستم‌های طبیعی مانند تالاب‌ها و همچنین اندرکنش با آبخوان‌های مجاور یا لایه‌های زیرین خود، شرایط اقلیمی و زمین‌شناسی (Healy, 2010; Coelho et al., 2017; Ketabchi et al., 2023).

مسئله کاهش دقت در برآورد بیلان منابع آب زیرزمینی به دلیل چند عامل مهم مطرح شده است. یکی از این عوامل، پایش نامناسب و وجود خطا در فرآیند پایش منابع آب زیرزمینی است که منجر به ناکارآمدی در جمع‌آوری داده‌های مشاهداتی و اطلاعات مربوط به آبخوان می‌شود. این امر باعث عدم درک درست از وضعیت آبخوان می‌شود و در نتیجه، برآوردهای بیلان با دقت کافی انجام نمی‌شود. یکی دیگر از مسائل مطرح شده، عدم استفاده از روش‌های نوین جهت برآورد مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی است که شامل استفاده از روش‌های سنجش از دور و رویکردهای نوآورانه است که باعث افزایش دقت در اندازه‌گیری و تخمین منابع آب زیرزمینی می‌شود. بنابراین جهت افزایش دقت در برآورد مؤلفه‌های بیلان منابع آب زیرزمینی، به‌کارگیری روش‌های نوین مانند روش‌های سنجش از دور، از اهمیت بالایی برخوردار است (Healy, 2010; IWPRI, 2014; Morgan et al., 2015). تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که محققین تلاش کرده‌اند با بهره‌گیری از روش‌های سنجش از دور مانند استفاده از سنجنده TRMM برای برآورد بارش ماهانه، سنجنده‌های SEBS و Landsat8 برای تخمین تبخیر و تعرق، سنجنده MODIS برای اندازه‌گیری بارش برف و سنجنده SEBS-SM برای سنجش رطوبت خاک، بهبودهای قابل توجهی در برآورد بیلان آب زیرزمینی ایجاد کنند (Gokmen et al., 2013; Gemitzi et al., 2017; )

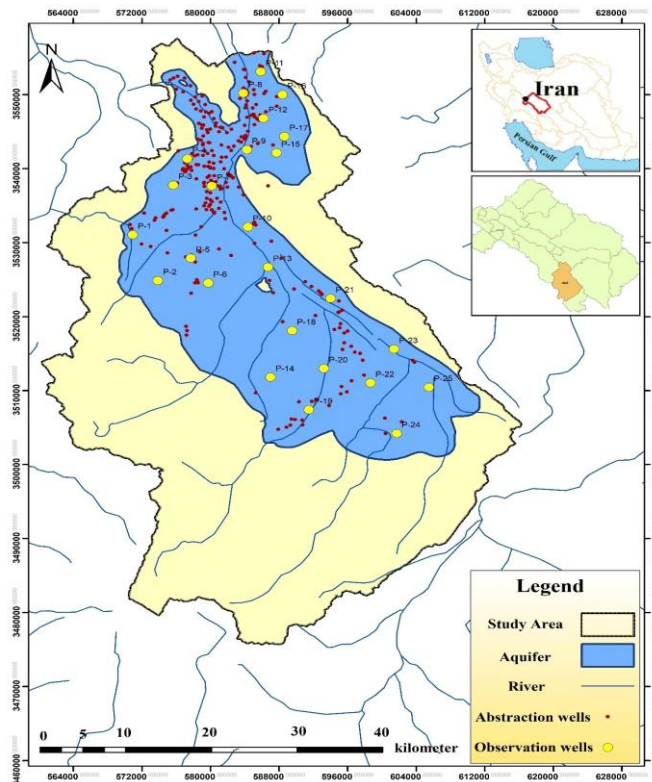
## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی قمشه (شهرضا) در استان اصفهان، در طول شرقی ۵۱ درجه و ۵۲ دقیقه و عرض شمالی ۳۲ درجه و ۱ دقیقه واقع شده است. این محدوده دارای ۲۸۸۵۵ هکتار اراضی آبی و باغ میوه، ۶۰۶ حلقه چاه عمیق و نیمه عمیق، ۱۱۲ رشته قنات، ۲۰ دهنه چشمه و یک رشته کانال آب به عنوان منابع آبی است. متوسط بارندگی سالانه ۱۴۰ میلی‌متر است که بیشترین آن در ماه های دی و بهمن رخ می‌دهد. از نظر اقلیمی، قسمت‌های شمالی و مرکزی نیمه‌خشک با تابستان‌های گرم و زمستان‌های نیمه‌سرد و قسمت‌های جنوبی و جنوب غربی نیمه‌مرطوب با تابستان‌های معتدل و زمستان‌های سرد هستند. شکل ۱ محدوده مطالعاتی قمشه را نشان می‌دهد.

Falalakis and Gemitzi, 2020; Babaei and (Ketabchi, 2022; Colombani et al., 2021

بررسی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که به‌کارگیری تکنیک‌های مختلف سنجش از دور، به‌طور قابل‌توجهی دقت تخمین بیلان آب زیرزمینی را ارتقا داده است. با این وجود، در هیچ‌یک از این مطالعات از سنجنده WaPOR برای برآورد بیلان سنتی آب زیرزمینی استفاده نشده است. بنابراین هدف این مطالعه، برآورد مؤلفه تبخیر و تعرق بیلان آب زیرزمینی با استفاده از سنجنده WaPOR است. این امر به ارتقای دقت برآورد مؤلفه‌های آب برگشتی و نفوذ عمقی منجر خواهد شد. در نتیجه، بیلان آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی قمشه با دقتی بیشتر محاسبه می‌شود. در نهایت، بیلان اندازه‌گیری شده با بیلان محاسبه شده مقایسه و اثر سنجنده WaPOR بر دقت محاسبات بیلان ارزیابی خواهد شد.



شکل ۱. نقشه موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی قمشه.

Fig 1. Map of the geographical location of the Qomshah study area.

از پارامترها، مانند داده‌های چاه‌های مشاهداتی، دارای نقص بودند که با استفاده از روش‌های رگرسیونی و هم بستگی رفع شدند.

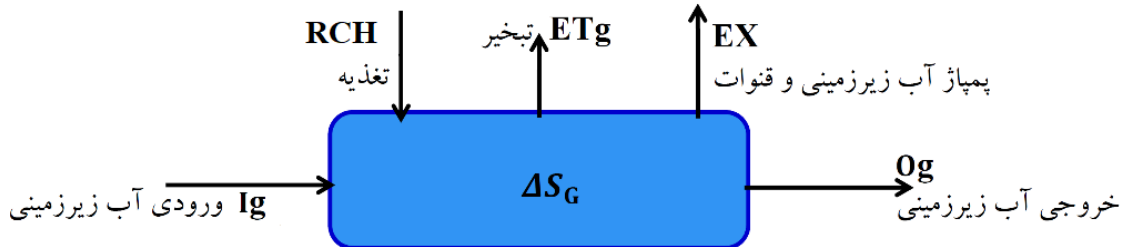
مدل مفهومی برآورد بیلان آب زیرزمینی

پیش‌پردازش داده‌ها

داده‌های چاه‌های مشاهداتی، میزان بارش، حجم برداشت ها، اطلاعات رودخانه‌ها و آبخوان محدوده مطالعاتی قمشه بین سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵ از مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو دریافت و در این مطالعه استفاده شدند. برخی

خارج می‌شود. مؤلفه‌های ورودی آب زیرزمینی شامل تغذیه آبخوان (نفوذ از بارش و جریان‌های سطحی و آب برگشتی از مصارف در بخش‌های مختلف) و همچنین جریان ورودی زیرزمینی از طریق منابع آبی بالادست می‌باشد.

روش‌شناسی مدنظر در این مطالعه، مبتنی بر مدل مفهومی بیلان می‌باشد که شمای آن در شکل ۲ ارائه شده است. در بخش بیلان آب زیرزمینی، بخشی از آب از طریق چاه‌ها، قنات و چشمه‌ها تخلیه می‌شود و بخشی دیگر نیز از طریق جریان خروجی و تبخیر از سطح آب زیرزمینی



شکل ۲. مدل مفهومی بیلان آب زیرزمینی (Ketabchi et al., 2023).

Fig 2. Conceptual Model of Groundwater Balance (Ketabchi et al., 2023).

$$Q = P - (ET + R) \quad (1)$$

در رابطه ۲،  $Q$  میزان نفوذ،  $P$  میزان بارندگی،  $ET$  میزان تبخیر و تعرق ناشی از بارندگی و  $R$  میزان رواناب سطحی است. جهت ارزیابی میزان بارش ( $P$ )، از داده‌های بارش ثبت شده در ایستگاه‌های سینوپتیک، باران‌سنجی، کلیماتولوژی و تبخیرسنجی استفاده و براساس منحنی های هم‌بارش حجم بارش ورودی به حوضه برآورد شد. جهت برآورد میزان تبخیر و تعرق ( $ET$ ) در حوضه آبریز قمشه با توجه به صحت سنجی صورت گرفته در حوضه زاینده‌رود (Rahimpour et al., 2018)، محصول Wapor فائو جهت تعیین تبخیر تعرق در حوضه استفاده گردید (شکل ۳).

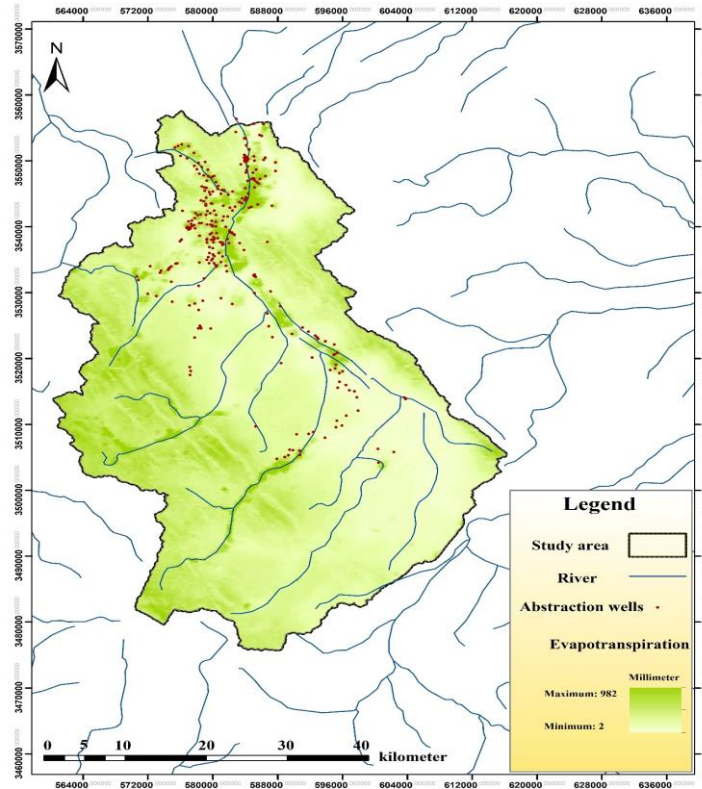
براساس مدل مفهومی ارائه شده در شکل ۲ بیلان آب زیرزمینی با رابطه ۱ بررسی می‌شود (Healy, 2010).

$$\Delta S_{G-calc} = RCH + I_g - O_g - ET_g - EX \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $RCH$  مقدار تغذیه  $I_g$  جریان ورودی آب زیرزمینی و  $O_g$  جریان خروجی آب زیرزمینی و  $ET_g$  تبخیر از سطح آب زیرزمینی می‌باشد. تغذیه آب زیرزمینی ( $RCH$ ) شامل نفوذ ناشی از آبیاری و بارش، جریان سطحی و آب برگشتی می‌باشد.

#### نفوذ ناشی از نزولات جوی

در این مطالعه به‌منظور محاسبه نفوذ از بارندگی از رابطه ۲ استفاده شد.



شکل ۳. نقشه میزان تبخیر و تعرق محدوده مطالعاتی قمشه با استفاده از تصاویر ماهواره سنجنده WaPOR. **Fig 3. Map of Evapotranspiration (ET) in the Qomsheh Study Area Using WaPOR Satellite Images.**

میزان تبخیر تعرق واقعی در محصول Wapor فائو از طریق الگوریتم ETLook اندازه‌گیری می‌شود. مدل ETLook بر پایه رابطه پنمن-مانتیث بنا گردیده است. در الگوریتم ETLook مقدار تبخیر از سطوح خاکی، آب و گیاهان از رابطه ۳ و میزان تعرق از سطوح گیاهان از رابطه ۴ به دست می‌آید (Kivi et al., 2022).

میزان تبخیر تعرق واقعی در محصول Wapor فائو از طریق الگوریتم ETLook اندازه‌گیری می‌شود. مدل ETLook بر پایه رابطه پنمن-مانتیث بنا گردیده است. در الگوریتم ETLook مقدار تبخیر از سطوح خاکی، آب و گیاهان از رابطه ۳ و میزان تعرق از سطوح گیاهان از رابطه ۴ به دست می‌آید (Kivi et al., 2022).

$$E = \frac{\Delta(R_{n,soil} - G) + \rho C_p \left( \frac{\Delta_e}{r_{a,soil}} \right)}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_{soil}}{r_{a,soil}} \right)} \quad (3)$$

$$T = \frac{\Delta(R_{n,canopy} - G) + \rho C_p \left( \frac{\Delta_e}{r_{a,canopy}} \right)}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_{canopy}}{r_{a,canopy}} \right)} \quad (4)$$

در این معادلات E مقدار تبخیر، T مقدار تعرق،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار اشباع (mbarK-1) براساس دمای هوا (C, Tair) و فشار بخار اشباع (mbar, es) تغییر می‌نماید.  $s\Delta$  کمبود فشار بخار (mba) است که از تفاوت بین مقادیر بخار اشباع و واقعی حاصل می‌گردد.  $\rho$  چگالی هوا

های هیدرومتری منطقه محاسبه شد. **نفوذ ناشی از جریان سطحی**  
نفوذ ناشی از جریان سطحی با توجه به مطالعات Hoehn در سال ۲۰۰۹ برای همین منطقه تحلیل شد. براساس طبقه‌بندی ارائه شده حجم آب تبدالی براساس رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$Q = C. L. D \quad (5)$$



۰/۰۶ در نظر گرفته می‌شود شایان ذکر است که این رودخانه‌ها به صورت فصلی می‌باشند.

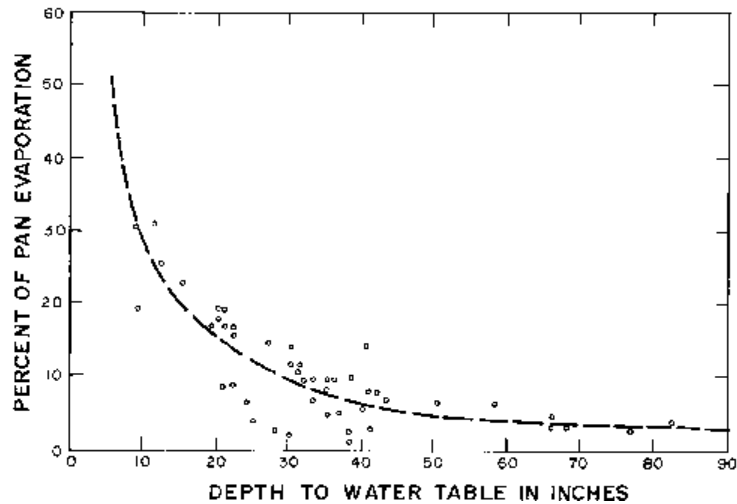
### آب برگشتی

در محدوده مطالعاتی قمشه ۶۰۶ چاه بهره‌برداری، ۱۱۲ رشته قنات و ۲۰ دهنه چشمه موجود هست بر این اساس مقادیر بهره‌برداری در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین نقشه پراکنش چاه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. میزان برداشت آب جهت مصارف کشاورزی، شرب و صنعت در محدوده مطالعاتی قمشه.

**Table 1. Water Withdrawal for Agricultural, Drinking, and Industrial Purposes in the Qomsheh Study Area.**

مصارف کشاورزی، زراعت، گلخانه، دام و طیور Agricultural, Arable, Greenhouse, Livestock and Poultry Uses	مصارف صنعت و شرب Industrial and Drinking Water Uses
MCM 196	MCM 66.7
<p>پس از تعیین جبهه‌های ورودی و خروجی جریان آب زیرزمینی در نقشه‌های تهیه شده سطح آب زیرزمینی محقق می‌شود.</p>	<p>به‌منظور محاسبه آب برگشتی ابتدا طبق رابطه ۶ مقدار تبخیر تعرق طبیعی محاسبه شد. این مقدار نشان دهنده تبخیر تعرق ناشی از بارش باران می‌باشد. بنابراین مابقی تبخیر تعرقی که در محدوده صورت گرفته است، ناشی از فعالیت‌های بشر (آبیاری، شرب و صنعت) می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که اگر مقدار برداشت آب از تبخیر تعرق ناشی از فعالیت‌های انسانی کسر شود آب برگشتی حاصل می‌شود.</p>
$Q = T.W. \frac{\Delta h}{L} \quad (7)$	$IF: P < 250 \text{ mm}$
<p>در این رابطه Q حجم جریان ورودی یا خروجی جبهه آبخوان، T ضریب قابلیت انتقال آبخوان برآورد شده برای هر یک از جبهه‌های ورودی و خروجی جریان آب زیرزمینی، W عرض جبهه ورودی و یا خروجی جریان آب زیرزمینی و <math>\Delta h/L</math> گرادیان هیدرولیکی جریان در جبهه مربوطه است.</p>	$P_{ef} = (P/125) * (125 - 0.2P) \quad (6)$
<p><b>تبخیر از سطح آب زیرزمینی</b></p>	$IF: P > 250 \text{ mm}$
<p>به‌منظور برآورد میزان تبخیر از سطح آب زیرزمینی از نمودار تورنت وایت استفاده شد (شکل ۴). جهت مشخص شدن میزان تبخیر با استفاده از نمودار تورنت وایت، نقشه هم‌عمق برای آبخوان قمشه رسم شد.</p>	$P_{ef} = 125 + 0.1P$
	<p><b>جریان ورودی و خروجی از آب زیرزمینی</b> برآورد جریان ورودی (Ig) و خروجی (Og) آب زیرزمینی با قانون دارسی و استفاده از رابطه ۷ صورت می‌گیرد که</p>



شکل ۴. نمودار تورنت وایت جهت برآورد میزان تبخیر از آب‌های زیرزمینی.

Fig 4. Thornthwaite Diagram for Estimating Evaporation from Groundwater.

ناشی از تبخیر تعرق آبیاری می‌باشد. میزان رواناب در سطح حوضه ۸۷۲ میلیون متر مکعب برآورد گردید. در نهایت مقدار نفوذ ناشی از بارش باران و آبیاری ۱۴/۲۷ میلیون متر مکعب برآورد شدند. همچنین با توجه به طول رودخانه‌های موجود در محدوده قمشه و ضریب انتقال آن، ۱۳/۴ میلیون متر مکعب نفوذ آب از جریان سطحی به منابع آب زیرزمینی برآورد شد. حجم آب برگشتی نیز در این مطالعه با توجه به میزان برداشت از آبخوان (۲۶۲/۷ میلیون متر مکعب) و تبخیر و تعرق ناشی از فعالیت انسانی به میزان ۱۰۵/۵۳ میلیون متر مکعب برآورد شد. با تفاسیر فوق میزان کل نفوذ به مخزن آب زیرزمینی (RCH) برابر با ۱۳۳/۱۳ میلیون متر مکعب می‌باشد.

جهت تخمین جریان زیرزمینی ورودی و خروجی به آبخوان قمشه در دوره ۱۵ ساله مورد بررسی، با استفاده از طول جبهه‌های ورودی آب زیرزمینی، گرادیان هیدرولیکی، ضریب قابلیت انتقال، میزان حجم آب ورودی و خروجی زیرزمینی برآورد شده است (شکل ۵). در آبخوان قمشه حجم جریان‌های ورودی از مقاطع به محدوده بیلان به‌طور متوسط در حدود ۱۰/۲۱ میلیون مترمکعب و حجم جریان‌های خروجی از محدوده بیلان معادل ۰/۷۳ میلیون مترمکعب می‌باشد. بیشترین حجم ورودی به آبخوان از جبهه غربی است. جریان‌های اندک خروجی نیز غالباً از دو بخش شمالی می‌باشند (جدول ۲ و شکل ۵).

### هیدروگراف آبخوان

به‌منظور ارزیابی مدل مفهومی برآورد بیلان آب زیرزمینی، می‌توان به صورت مستقل و براساس هیدروگراف معرف آبخوان که در دوره زمانی مورد نظر به‌دست‌آمده، تغییرات ذخیره زیرزمینی مشاهداتی را برآورد نمود و با نتایج حاصل از مدل مفهومی مقایسه کرد.

$$\Delta G_{-obs} = A \times S \times \Delta h \quad (8)$$

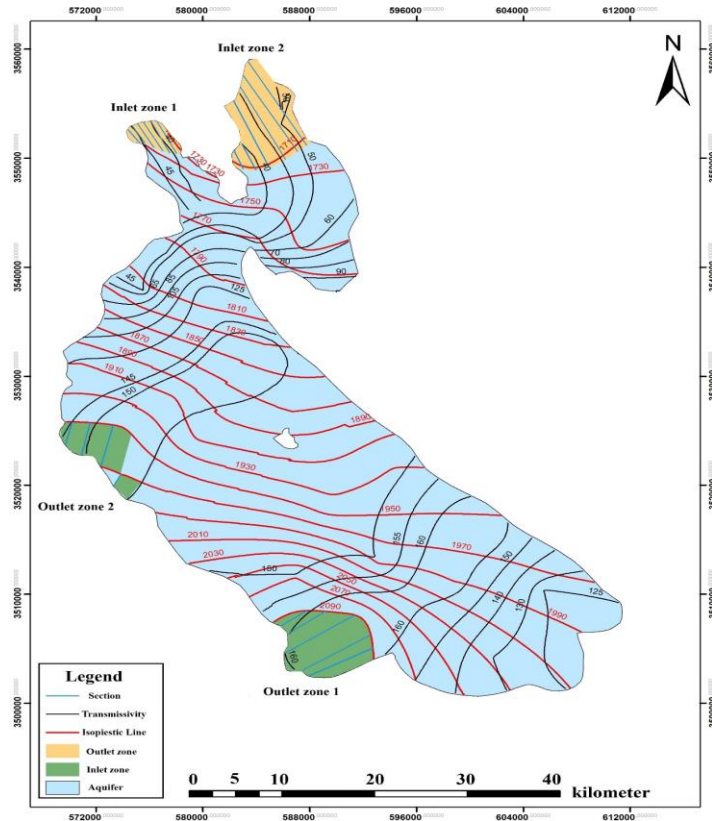
می‌توان از رابطه ۸ تغییرات ذخیره زیرزمینی مشاهداتی را برآورد کرد. که در رابطه فوق، A مساحت آبخوان محدوده مورد نظر، S ضریب ذخیره و  $\Delta h$  تغییرات سطح آب زیرزمینی است.

### نتایج و بحث

محدوده بیلان در این مطالعه منطبق بر آبخوان محدوده مطالعاتی قمشه با مساحت ۱۰۱۹/۶۴ کیلومترمربع است که در بازه زمانی سال ۱۳۸۱ و ۱۳۹۵ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### برآورد بیلان آب زیرزمینی

بر اساس مقدار بارش برآورد شده از ایستگاه‌های زمینی و نرخ تبخیر و تعرق برآورد شده با رویکرد سنجش از دور مدنظر در این پژوهش، به‌طور متوسط در آبخوان قمشه در بازه سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۹۵، حجم بارش برابر ۱۴۲۷/۵ میلیون متر مکعب، کل تبخیر و تعرق ۱۸۰۴/۱ میلیون مترمکعب است که ۵۴۱/۲۳ میلیون مترمکعب آن تبخیر و تعرق طبیعی (بارش مؤثر) و ۱۲۶۲/۸۷ میلیون متر مکعب



شکل ۵. نقشه قابلیت انتقال و جبهه‌های ورودی و خروجی آبخوان محدوده مطالعاتی قمشه.

Fig. 5. Map of Transmissivity and Input and Output Fronts of the Aquifer in the Qomsheh Study Area.

جدول ۲. مقادیر جریان‌های ورودی و خروجی از جبهه‌ها برای منطقه مورد مطالعه قمشه.

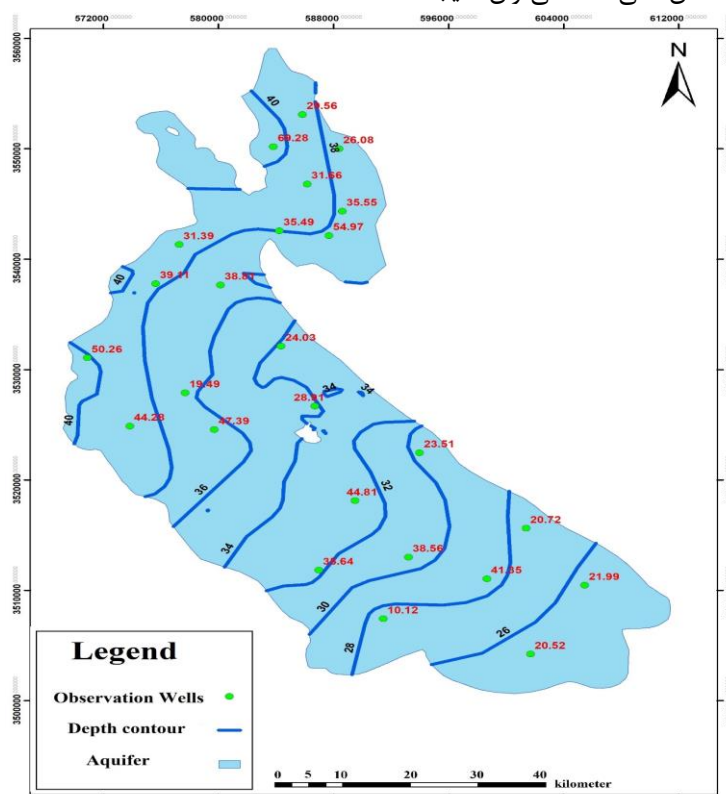
Table 2. Values of Input and Output Flows from Fronts for the Qomsheh Study Area.

مقطع Section	ضریب قابلیت انتقال Transmissivity	عرض جبهه ورودی Width of the Recharge Front	طول جبهه ورودی Length of the Recharge Front	اختلاف بار هیدرولیکی Hydraulic head difference	جریان آب زیرزمینی Ground water flow	مجموع جریان مقاطع Total flow rate	کل جریان‌های جبهه‌ها Total flow of fronts
	m <sup>2</sup> /day	m	m	m	MCM	MCM	MCM
جبهه ورودی ۱ Inlet Zone 1	1	160	1030	4878	20	0.34	2.9
	2	160	810	5764	20	0.20	
	3	160	2099	7174	20	0.53	
	4	160	1460	4613	20	0.59	
	5	160	1054	3000	20	0.68	
	6	160	703	2148	20	0.61	
جبهه ورودی ۲ Inlet Zone 2	1	150	1732	1615	20	3.39	7.2
	2	150	1566	4016	20	0.72	
	3	150	1713	3061	20	1.21	
	4	147.5	1357	2907	20	0.91	
	5	145	740	1613	20	0.86	
جبهه خروجی ۱ Outlet Zone 1	1	45	403	1338	20	0.11	0.28
	2	45	373	1789	20	0.06	
	3	42.5	430	2168	20	0.06	
	4	42.5	452	2900	20	0.04	
	5	40	503	3153	20	0.04	
	6	40	424	3365	20	0.03	
	7	40	287	3177	20	0.02	
جبهه خروجی ۲ Outlet Zone 2	1	40	542	1429	20	0.1	0.44
	2	40	809	2314	20	0.1	

Outlet Zone	3	40	1000	6538	20	0.04
	2	4	45	1293	6789	20
		5	47.5	1020	7780	20
		6	50	900	8384	20
		7	50	920	8871	20
						0.03

گرفت که تبخیر از سطح آبخوان در این شرایط خاص اتفاق نمی‌افتد.

با توجه به اینکه عمق آبخوان در جنوب قمشه حداقل ۲۶ متر است (شکل ۶) و بر اساس نمودار تورنت وایت که تبخیر در چنین عمقی را نشان نمی‌دهد، می‌توان نتیجه

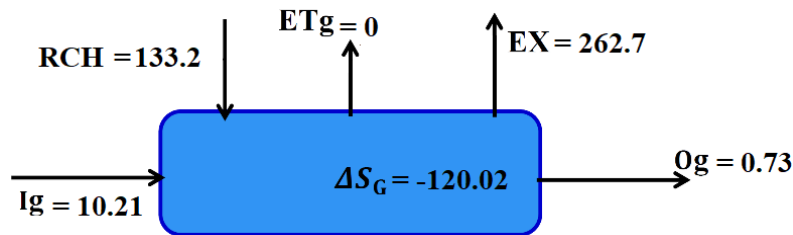


شکل ۶. نقشه هم عمق سطح آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی قمشه.

Fig 6. Map of Groundwater Level Contours in the Qomsheh Study Area.

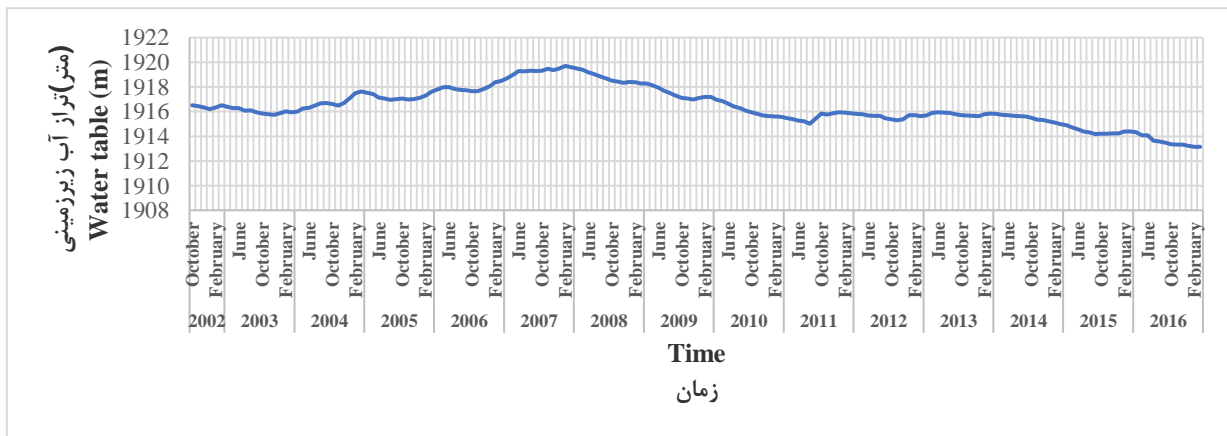
بر اساس این اطلاعات، حجم تغییرات ذخیره آب زیرزمینی به صورت مشاهداتی ۱۱۹/۹ میلیون مترمکعب برآورد شد که با مقدار محاسباتی آن (۱۲۰/۰۲ میلیون مترمکعب) اختلاف ناچیزی دارد. بنابراین به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که حجم ذخیره آبخوان قمشه در این دوره ۱۲۰ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. این وضعیت ضرورت برنامه‌ریزی و اجرای راهکارهای جبرانی برای کاستن از پیامدهای زیست‌محیطی و اقتصادی ناشی از کاهش دسترسی به منابع آب زیرزمینی را به وضوح نشان می‌دهد.

با تخمین مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی و جای‌گذاری آن‌ها در رابطه ۱، تغییرات ذخیره آبخوان در این دوره محاسبه شد. شکل ۷ مؤلفه‌های بیلان را نشان می‌دهد. نتایج محاسبات نشان داد که ۱۲۰/۰۲ میلیون مترمکعب از ذخیره آبخوان در این دوره کاسته شده است. با استفاده از ضریب ذخیره، اختلاف سطح آب زیرزمینی (شکل ۸)، مساحت آبخوان و رابطه ۸، می‌توان تغییرات ذخیره آب زیرزمینی را به صورت مشاهداتی برآورد کرد. در این دوره، متوسط افت سالانه آبخوان ۰/۲۲۴ متر، ضریب ذخیره آن ۳/۵ درصد و مساحت آبخوان ۱۰۱۹/۶۴ کیلومترمربع بود.



شکل ۷. حجم مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی بر حسب میلیون مترمکعب در بازه زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵.

Fig 7. The volume of Groundwater Balance Components in Million Cubic Meters in the period 2002-2016.



شکل ۸. هیدروگراف آبخوان محدوده مطالعاتی قمشه بین سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵.

Fig 8. Hydrograph of the Aquifer in the Qomshah Study Area between 2002-2016.

های سنجنده WaPOR می‌تواند به طور قابل توجهی به کاهش عدم قطعیت در برآوردهای مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی کمک کند.

#### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، از روش‌های نوین سنجش از دور برای کاهش عدم قطعیت در محاسبات بیلان آب زیرزمینی آبخوان قمشه استفاده شد. تبخیر و تعرق که یکی از مؤلفه‌های اصلی در بیلان آب است، به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست و در این مطالعه با استفاده از سنجنده WaPOR برآورد شد. این امر باعث شد که دیگر مؤلفه مؤثر تغذیه، یعنی میزان نفوذ آب از بارش، آب برگشتی از مصارف شرب، کشاورزی و صنعت به طور دقیق‌تری محاسبه شوند. در این مطالعه، بر اساس داده‌های سنجش از دور، مقدار متوسط تبخیر و تعرق از محدوده آبخوان قمشه در سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵، برابر ۱۸۰۴/۱ میلیون مترمکعب تخمین زده شد که با استفاده از تکنیک بارش مؤثر، مقدار تبخیر بارش باران از تبخیر ناشی از آبیاری تفکیک شد. در سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵، مقدار کسری

در تحلیل بیلان آب زیرزمینی، مؤلفه تغذیه آبخوان که ناشی از نفوذ بارش‌های باران و آب برگشتی است، به دلیل عدم قطعیت به عنوان یکی از چالش‌برانگیزترین متغیرها شناخته می‌شود (Ketabchi et al., 2023). در این مطالعه، از داده‌های سنجنده WaPOR برای محاسبه تبخیر و تعرق در محدوده مطالعاتی قمشه استفاده شده است. بهره‌گیری از این فناوری، امکان ارزیابی دقیق‌تر مؤلفه تغذیه آبخوان را با کاهش عدم قطعیت‌ها فراهم آورده است. بنابراین، این پژوهش بیانگر آن است که کاربرد سنجنده WaPOR در راستای کاهش عدم قطعیت برآوردهای مؤلفه‌های بیلان آب، به بهبود دقت در محاسبات بیلان کمک شایانی می‌کند. علاوه بر این، Kivi et al. (2022) با استفاده از داده‌های سنجنده WaPOR، به بررسی حساسیت بیلان آب زیرزمینی دشت پلاسجان پرداختند. نتایج این تحقیق تأکید می‌کند که استفاده از این سنجنده، دقت برآورد مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی را به طور معناداری افزایش داده است (Kivi et al., 2022). بنابراین، یافته‌های حاصل از این مطالعه و تحقیقات مرتبط نشان می‌دهند که استفاده مؤثر از داده

Healy, R. W. (2010). *Estimating groundwater recharge*: Cambridge University Press.

Iranian Water Policy Research Institute (IWPRI). (2014). *Groundwater Sustainability Plan, Case Study of Rafsanjan Plain, Part 1*.

Janardhanan, S., Islam, M. M., Islam, M. T., Peña-Arancibia, J., Hodgson, G., Karim, F ....., Kirby, J. M. (2023). Groundwater balance and long-term storage trends in the regional Indo-Gangetic aquifer in northwest Bangladesh. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 49, 101500 .

Jovein, E. B., Motlagh, A. G., & Hosseini, S. M. (2023). Estimation of the groundwater recharge coefficient by minimizing the sum total error of a regional water balance. *Environmental Earth Sciences*, 82(13), 323 .

Ketabchi, H., Mahmoudzadeh, D., & Jalilvand, E. (2021). Estimation of groundwater resources balance in an over-exploited aquifer located in the arid climate of Iran (Part 2: Calculation of different components of water balance). *Journal of Soil and Water Sciences of Iran*, 52, 1543-1556.

Ketabchi, H., Mahmoudzadeh, D., Ghadimi, S., & Saghi Jadid, M. (2018). A review of evaluating groundwater balance in Iran: Methods and suggestions. Islamic Parliament Research Center of The Islamic Republic Of Iran, Head of Research and Production, Department of Water and Environment. (In Persian).

Kivi, Z. R., Javadi, S., Karimi, N., Shahdany, S. M. H., & Moghaddam, H. K. (2022). Performance evaluation and verification of groundwater balance using WA+ as a new water accounting system. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(8), 580 .

Mookiah, M., Jha, S. K., & Biswas, A. (2021). Assessment of groundwater mass balance and zone budget in the semi-arid region: A case study of Palar sub-basin, Tamil Nadu, India. *Journal of Earth System Science*, 130, 1-18 .

Rahimpour, M., Karimi, N., Roozbahani, R., & Eftehkari, M. (2018). Validation and correction of actual evapotranspiration product estimated by FAO WaPOR product in Iran using ground-based data. *Iranian Journal of Water Resources Research*, 14(2), 254-263.

Weatherl, R. K., Henao Salgado, M. J., Ramgraber, M., Moeck, C., & Schirmer, M. (2021). Estimating surface runoff and groundwater recharge in an urban catchment using a water balance approach. *Hydrogeology Journal*, 29(7), 2411-2428 .

Zareian, M. J., & Eslamian, S. (2021). Groundwater withdrawal adjustment based on changes in groundwater balance components (a case study: an arid region in central Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-13.

مخزن آب زیرزمینی برابر ۱۲۰ میلیون مترمکعب برآورد شد که موجب افت متوسط سالانه ۲۲/۴ سانتیمتری سطح آب زیرزمینی شده است. این نتایج، لزوم توجه بیش از پیش به مدیریت مصرف آب زیرزمینی و ارتقای امکانات برآوردهای بهتر و دقیق‌تر برای مدیریت صحیح این منابع در آینده را ضروری می‌سازد.

## منابع

Aslam, M., Salem, A., Singh, V. P., & Arshad, M. (2021). Estimation of spatial and temporal groundwater balance components in Khadir Canal Sub-Division, Chaj Doab, Pakistan. *Hydrology*, 8(4), 178 .

Azizi, H. R., & Nejatian, N. (2021). Computation of groundwater balance in Varamin plain. *Geography and Human Relationships*, 3(3), 189-204 .

Babaei, M., & Ketabchi, H. (2022). Determining groundwater recharge rate with a distributed model and remote sensing techniques. *Water Resources Management*, 36(14), 5401-542.

Colombani, N., Gaiolini, M., Busico, G., & Postacchini, M. (2021). Quantifying the impact of evapotranspiration at the aquifer scale via groundwater modeling and MODIS data. *Water*, 13(7), 950 .

Falalakis, G., & Gemitzi, A. (2020). A simple method for water balance estimation based on the empirical method and remotely sensed evapotranspiration estimates. *Journal of Hydroinformatics*, 22(2), 440-451 .

Farahmand, A., Hussaini, M. S., & Aqili, S. W. (2021). *Assessment of groundwater balance and importance of geoethical approach for Upper Kabul Sub-basin, Afghanistan*. Paper presented at the Advances in Geoethics and Groundwater Management: Theory and Practice for a Sustainable Development: Proceedings of the 1st Congress on Geoethics and Groundwater Management (GEOETH&GWM'20), Porto, Portugal 2020.

Gemitzi, A., Ajami, H., & Richnow, H.-H. (2017). Developing empirical monthly groundwater recharge equations based on modeling and remote sensing data—Modeling future groundwater recharge to predict potential climate change impacts. *Journal of Hydrology*, 546, 1-13 .

Gokmen, M., Vekerdy, Z., Lubczynski, M. W., Timmermans, J., Batelaan, O., & Verhoef, W. (2013). Assessing groundwater storage changes using remote sensing-based evapotranspiration and precipitation at a large semiarid basin scale. *Journal of hydrometeorology*, 14(6), 1733-1753 .