University of Tehran Press

Journal of Water and Irrigation Management **Online ISSN: 2382-9931**

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

A Review Analysis of Groundwater Resources Budget Calculations in Hashtgerd Study Area Located in Alborz Province, Iran

Hamed Ketabchi[1]✉ | Davood Mahmoodzadeh[2] | Mohammad Reza Zaghiyan[3] | Tofigh Saadi[4] | Mahsa Jamdar[5]

1. Corresponding Author, Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: h.ketabchi@modares.ac.ir
2. School of Engineering, University of Northern British Columbia, British Columbia, Canada. E-mail: davood.mahmoodzadeh@unbc.ca
3. Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: m.zaghiyan@modares.ac.ir
4. Alborz Regional Water Authority, Karaj, Iran. E-mail: saadi@albrw.ir
5. Alborz Regional Water Authority, Karaj, Iran. E-mail: mahsa_jam@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 23 May 2023
Received in revised form
22 June 2023
Accepted 1 August 2023
Published online 12 October 2023

Keywords:
Comparative analysis
Uncertainty and errors
Water resources budget

ABSTRACT

Water budget evaluations are important research topics in various regions of the world, as they aim to determine one or more components of the water balance. To estimate these components accurately, it is necessary to have adequate knowledge and methods. Therefore, reviewing the common methods used in international models can help to improve the estimation of water resources budget. The present study seeks to identify the challenges of groundwater budget estimation and to propose solutions for enhancing the accuracy of calculations, based on a critical analysis of previous studies conducted in Hashtgerd from 1987 to 2022. A three-level analysis was performed at the technical, institutional-structural, and infrastructural levels. The technical analysis of water budget components indicates that in the recent periods, the total output and input of groundwater were 257 and 245 MCM, respectively. Moreover, the average storage deficit was estimated at 18 MCM, which showed an increasing trend. This research suggests several measures to address the challenges, such as: equipping the study area with hardware facilities (lysimeters and data loggers); revising and updating the monitoring network of observation wells in the region; using remote sensing techniques to estimate evapotranspiration and other water budget components; updating the hydrodynamic information of the aquifer; measuring the withdrawal amount from exploitation wells and Qanats at a frequency of less than five years with more accurate methods; and establishing facilities for recording and displaying online components of the water budget in Hashtgerd at different scales. In this regard, the need for conducting water resources budget studies is emphasized, considering the uncertainties associated with the estimation of inputs and outputs.

Cite this article: Ketabchi, H., Mahmoodzadeh, D., Zaghiyan, M. R., Saadi, T., & Jamdar, M. (2023). A Review Analysis of Groundwater Resources Budget Calculations in Hashtgerd Study Area Located in Alborz Province, Iran. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (3), 693-713. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2023.359789.1079

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2023.359789.1079

انتشارات دانشگاه تهران

مدیریت آب و آبیاری

شاپا الکترونیکی: ۹۹۳۱-۲۳۸۲

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

واکاوی پیشینه محاسبات بیلان منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی هشتگرد واقع در استان البرز، ایران

حامد کتابچی[1]✉ | داود محمودزاده[2] | محمدرضا زاغیان[3] | توفیق سعدی[4] | مهسا جمعدار[5]

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: h.ketabchi@modares.ac.ir

۲. دانشکده مهندسی، دانشگاه بریتیش کلمبیای شمالی، بریتیش کلمبیا، کانادا. رایانامه: davood.mahmoodzadeh@unbc.ca

۳. گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: m.zaghiyan@modares.ac.ir

۴. شرکت آب منطقه‌ای البرز، کرج، ایران. رایانامه: saadi@albrw.ir

۵. شرکت آب منطقه‌ای البرز، کرج، ایران. رایانامه: mahsa_jam@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰

کلیدواژه‌ها:

بیلان منابع آب

تحلیل هم‌سنجی

راه‌کارها

عدم‌قطعیت و خطاها

چکیده

ارزیابی بیلان آب از جمله مباحث مهم پژوهشی در مناطق مختلف جهان است که به‌منظور تعیین یک یا تمامی اجزای معادله بیلان آب صورت می‌گیرد. به‌جهت برآورد صحیح بیلان آب، لزوم بررسی روش‌های رایج در الگوهای بین‌المللی برای بهبود برآوردها ضروری است. مطابق با روش‌شناسی مدنظر در مطالعه حاضر، چالش‌های موجود در برآورد بیلان آب زیرزمینی شناسایی شده و راه‌کارهایی برای افزایش دقت آن ارائه شده است. هم‌چنین با رویکردی نقادانه به واکاوی پیشینه محاسبات بیلان منابع آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی هشتگرد از سال ۱۳۶۶ تا ۱۴۰۱ پرداخته شده است. واکاوی‌های مذکور در سه سطح فنی، نهادی- ساختاری و زیرساخت‌ها صورت پذیرفت. تحلیل فنی اجزای بیلان نشان می‌دهد در دوره‌های اخیر، مجموع خروجی و ورودی آب زیرزمینی به‌ترتیب ۲۵۷ و ۲۴۵ میلیون مترمکعب محاسبه شده است. هم‌چنین، متوسط کسری مخزن ۱۸ میلیون مترمکعب برآورد شده که با روندی افزایشی روبه‌رو بوده است. از جمله پیشنهادهای ارائه‌شده در راستای حل چالش‌ها، می‌توان به تجهیزنمودن محدوده مطالعاتی به امکانات سخت‌افزاری از جمله لایسیمتر و دیتالاگر، بازنگری و به‌روزرسانی شبکه پایش چاه‌های مشاهده‌ای، به‌کارگیری تکنیک‌های سنجش‌ازدور با دقت مناسب برای برآورد تبخیر و تعرق و یا سایر اجزای بیلان، به‌روزرسانی اطلاعات هیدرودینامیکی آبخوان، اندازه‌گیری مقدار برداشت از چاه‌های بهره‌برداری و قنوات در تواتر کم‌تر از پنج سال و پیشنهاد برقراری امکانات ثبت و نمایش برخط اجزای بیلان در محدوده مطالعاتی هشتگرد در مقیاس‌های مختلف، اشاره نمود. در این راستا، با توجه به اجزای ورودی و خروجی بیلان منابع آب و عدم‌قطعیت‌هایی که در تخمین آن‌ها وجود دارد، ضرورت انجام مطالعه بیلان منابع آب با هدف شناسایی منابع عدم‌قطعیت در محاسبه اجزای آن، دوچندان می‌شود.

استناد: کتابچی، حامد؛ محمودزاده، داود؛ زاغیان، محمدرضا؛ سعدی، توفیق؛ و جمعدار، مهسا (۱۴۰۲). واکاوی پیشینه محاسبات بیلان منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی هشتگرد واقع در استان البرز، ایران. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۳ (۳)، ۶۹۳-۷۱۳.

DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2023.359789.1079

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

CC BY NC

۱- مقدمه

برآورد بیلان منابع آب با دقت مناسب و با هدف ارزیابی وضعیت فعلی این منابع و برنامه‌ریزی برای توسعه پایدار این منابع از اهمیت بسیاری برخوردار است. این مسئله در آبخوان‌هایی که با بهره‌برداری بیش از حد مواجهند، به جهت داشتن یک تخمین جامع، دقیق و قابل‌اطمینان از بیلان منابع آب آن‌ها مهم‌تر است. یکی از چالش‌های مهم پیش‌روی برآورد بیلان منابع آب، وجود عدم‌قطعیت‌ها در عوامل ورودی و خروجی ازجمله به سبب تنوع خصوصیات خاک و ماهیت پیچیده حرکت آب در خاک است (Crosbie *et al*., 2018; IPRC, 2018; Ketabchi *et al*., 2018). هم‌چنین طولانی‌بودن زمان محاسبات مربوط به بیلان آب، با توجه به نبود اطلاعات لازم و هم‌چنین عدم امکان اندازه‌گیری برخی از اجزای بیلان آب، برآورد بیلان را با مشکلات فراوانی از لحاظ دقت و زمان کاربرد مواجه کرده است (Han *et al*., 2020). برای نمونه Mahmoodzadeh and Ketabchi (2021) به عدم امکان اندازه‌گیری تبخیر و تعرق و نفوذ در آبخوان رفسنجان اشاره شده است. در جهت اهمیت این موضوع، مطالعات متعددی به‌منظور برآورد بیلان منابع آب انجام شده است. این پژوهش‌ها مطابق با وسعت محدوده مطالعاتی و محدودیت‌های زمانی و مکانی، روش‌شناسی‌های مختلفی را در برآورد اجزای مهم بیلان آب به کار گرفته‌اند.

از جمله پژوهش‌های انجام‌شده می‌توان به Garcia *et al*. (2022) در سیستم آب زیرزمینی جنوب‌شرقی اورگان ایالات‌متحده آمریکا اشاره نمود. این مطالعه که توسط سازمان زمین‌شناسی این کشور تهیه شده است، بیلان‌های آب زیرزمینی جداگانه‌ای را در مناطق مرتفع و پست ارائه کرده تا از محاسبه مجدد آب تخلیه‌شده به چشمه‌های بالادست و تغذیه مجدد سیستم آب زیرزمینی پایین‌دست جلوگیری کند. روش‌های مختلفی برای تخمین اجزای تغذیه و تخلیه بیلان آب زیرزمینی مانند مدل تعادل خاک- آب، جداسازی هیدروگراف، اندازه‌گیری دبی چشمه، داده‌های پمپاژ آب زیرزمینی، برآورد تبخیر و تعرق و مدل‌سازی در این مطالعه به‌کار گرفته شده است. هم‌چنین برای هر جزء، تحلیل‌های مربوط به عدم‌قطعیت آن‌ها مانند روش مونت‌کارلو استفاده شده است.

برآورد جزء تغذیه منابع آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای بیلان آبی مورد توجه پژوهش‌های فراوانی نیز بوده است. به‌عنوان مثال Lee *et al*. (2008) در پژوهش خود از دو روش بیلان رطوبتی خاک و یک مدل تخمین جریان پایه، جزء تغذیه آب زیرزمینی را به‌دست آوردند. نتایج حاکی از نزدیکی میانگین تغذیه سالانه دو روش مذکور است. لازم به ذکر است، این مطالعه عدم‌قطعیت‌های مرتبط با یکنواختی کاربری اراضی، خواص خاک- آب و پارامترهای تبخیر و تعرق را در نظر نگرفتند. هم‌چنین در پژوهشی که توسط Beigi and Tsai (2014) انجام گرفت، یک چارچوب بیلان آبی مبتنی بر GIS برای تخمین توزیع مکانی- زمانی تغذیه آب زیرزمینی برای آبخوانی در جنوب‌غربی می‌سی‌سی‌پی ایالات متحده توسعه داده شد. در این پژوهش، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی و تصاویر ماهواره‌ای MODIS مورد توجه قرار گرفت. Joshi *et al*. (2018) در پژوهش خود با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن به بررسی الگوی مکانی منابع تغذیه آب زیرزمینی در آبخوان آبرفتی شمال‌غربی هند پرداخته‌اند. این مطالعه نشان داد که منابع تغذیه آب زیرزمینی در این آبخوان به‌طور عمده از بارش و جریان‌های برگشتی آبیاری است. در این راستا، در Singh *et al*. (2019) شرح مختصری از روش‌های برآورد جزء تغذیه و مقایسه آن‌ها با یکدیگر ارائه شده است.

علاوه بر نرخ تغذیه منابع آب زیرزمینی، دیگر اجزای مهم بیلان آب نیز کانون توجه برخی مطالعات بوده است. به‌عنوان‌مثال، Mohie El Din and Moussa (2016) به برآورد منابع آب موجود جهت مواجهه با چالش‌های آبی آتی جهت برآورد جزء تغذیه و تخلیه در دلتای رود نیل پرداختند. هم‌چنین جزء ذخیره در این مطالعه با استفاده از مطالعات پیشین برآورد گردید. در مطالعه دیگری، Soltani *et al*. (2020) در مطالعه خود یک چارچوب احتمالاتی برای تخمین بیلان آب در مناطق

مرکزی ایران ارائه نمودند. آن‌ها در مطالعه خود با استفاده از محصولات ماهواره‌ای بارش (TRMM)، تبخیر و تعرق (WaPOR) و تغییرات ذخیره آب زیرزمینی ماهواره GRACE علاوه بر محاسبه بیلان آبی، برآوردی از عدم‌قطعیت اجزا را با به‌کارگیری روش محاسباتی و عددی مبتنی بر معادلات قابلیت اطمینان مرتبه اول به‌دست آوردند.

مطالعات فوق نشان می‌دهد که در بررسی اجزای بیلان، برخی از این اجزا مانند مقدار بارش به‌راحتی قابل‌اندازه‌گیری است، اما برای سایر اجزای چرخه هیدرولوژیکی، اندازه‌گیری مستقیم و دقیق دشوار است (به‌عنوان‌مثال مقدار رطوبت خاک و یا تبخیر و تعرق). هم‌چنین در برآورد جزء تغذیه، عموماً از روش‌های مبتنی بر بیلان ناحیه غیراشباع خاک استفاده شده است. در این روش‌ها با برآورد میزان آب نفوذیافته، ویژگی‌های خاک و آب زهکش‌شده از منطقه غیراشباع، میزان آب نفوذیافته به منطقه اشباع برآورد می‌گردد. هم‌چنین یک مشکل اساسی در ارزیابی بیلان آب، به‌عنوان بخشی از توسعه مدل مفهومی، تخمین تبخیر و تعرق حقیقی است. از سویی دیگر، ترکیبی از عوامل مانند دقت داده‌های ورودی و اندازه‌گیری‌شده برای برآورد اجزای کلیدی بیلان آب با استفاده از روش‌های تخمین منجر به عدم‌قطعیت در مقادیر اجزا می‌شود. بنابراین حذف عدم‌قطعیت غیرممکن خواهد بود، درک عدم‌قطعیت موجود برای تفسیر صحیح محاسبات بیلان آب از اهمیت اساسی برخوردار است.

در سطح ملی، مطالعات مرتبط با تحلیل بیلان آب مطابق با دستورالعمل تدوین‌شده شرکت مدیریت منابع آب ایران صورت می‌گیرد. آبخوان هشتگرد در استان البرز در سال ۱۳۹۹ (اولین بار در سال ۱۳۴۵-۱۳۴۴) به‌مدت پنج سال به‌عنوان دشت ممنوعه کشور از منظر اضافه برداشت منابع آب زیرزمینی معرفی شده است. منابع آب محدوده مطالعاتی هشتگرد در سال‌های اخیر با کاهش ذخیره بسیار شدیدی همراه بوده است. مطابق با RIWEM (2022)، هیدروگراف آبخوان هشتگرد طی دوره زمانی ۱۳۹۸-۱۳۷۹، به‌طور متوسط افت سالانه ۰/۹۲ متر تراز آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. مطالعات متعددی مرتبط با برآورد اجزای بیلان در این محدوده انجام شده است. از جمله آن‌ها می‌توان به Babaei *et al.* (2022) اشاره نمود. در این مطالعه، جهت برآورد بیلان از رویکرد مدل‌سازی (WetSpass-M) و سنجش‌ازدور (جهت برآورد جزء تبخیر و تعرق) استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد جزء آبیاری، تبخیر و تعرق، تغذیه، بارندگی و رواناب بیش‌ترین محدوده تغییرات را دارند. عدم‌قطعیت هر کدام از اجزا نیز با توجه انحراف معیار برآوردشده برای اجزای ورودی و خروجی، موردبررسی قرار گرفته است. مطالعه دیگری توسط Rajaeian *et al.* (2022) انجام شد که در آن منابع آب محدوده مطالعاتی هشتگرد مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش، سیستم حسابداری زیست‌محیطی و اقتصادی برای آب که یکی از چارچوب‌های نوین جهت استفاده در ارزیابی‌های کلان منابع آبی است مورداستفاده قرار گرفت. در این راستا، اجزای مختلف بیلان آب در این محدوده برای سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ موردبررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه حاکی از افزایش مصرف آب در بخش کشاورزی همراه با کاهش بهره‌وری آن در این بخش است. از سویی دیگر، در Rajaeian *et al.* (2023) تغییرات اجزای بیلان آب زیرزمینی آبخوان هشتگرد در دوره زمانی ۲۰ ساله مطابق با برنامه‌های طرح احیا و تعادل‌بخشی (MOE, 2014) موردبررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه که با رویکرد مدل‌سازی انجام شده است، حاکی از کسری سالانه بیش از چهار میلیون مترمکعب ذخیره آبخوان طی بازه زمانی ۲۰۱۶-۲۰۱۲ و کاهش کیفیت آن می‌باشد. مطابق با پیشنهاد این مطالعه، مسدودنمودن چاه‌های کشاورزی غیرمجاز می‌تواند ذخیره آبخوان را به‌طور متوسط تا بیش از هفت میلیون مترمکعب در سال افزایش دهد. هم‌چنین در Hanifehlou *et al.* (2023) تغذیه آب زیرزمینی هشتگرد همراه با سایر اجزای بیلان (رواناب، تبخیر و تعرق و برگاب) با استفاده از مدل WetSpass-M و تصاویر ماهواره‌ای برای دوره تغییر اقلیم برآورد شده است. نتایج این مطالعه حاکی از کاهش میزان تغذیه و افزایش سهم تبخیر و تعرق است.

مطابق با بررسی‌های انجام‌شده در فوق، محدوده مطالعاتی هشتگرد چه به لحاظ تاریخی و چه دوره‌های آتی، همواره شاهد تغییرات اجزای بیلان آب زیرزمینی بوده است. به‌عبارت بهتر، این مطالعات با ایجاد سناریوهای متفاوت مدیریتی

که به‌طور عمده برخاسته از طرح احیا و تعادل‌بخشی (Ghadimi and Ketabchi, 2019; MOE, 2014) است، برآوردهای متفاوتی را از اجزای بیلان ارائه داده‌اند. از سویی دیگر، با حجم آب برداشتی سالانه بالغ بر ۳۳۰ میلیون مترمکعب (در بازه زمانی ۹۸-۱۳۹۷)، چشم‌انداز روشنی با توجه به منابع آب در دسترس آن، در اختیار تصمیم‌گیرندگان این حوضه قرار نمی‌گیرد. در این راستا، اهمیت تهیه بیلان و جایگاه آن به یکی از ارکان مهم در توسعه پایدار جهت برنامه‌ریزی تبدیل شده است (RIWEM, 2022).

این مطالعه با هدف شناسایی چالش‌های موجود در برآورد بیلان آب زیرزمینی و ارائه راه‌کارهایی برای افزایش دقت آن، با رویکرد مطالعات هم‌سنجی براساس تجربیات ملی و بین‌المللی انجام شده است. محدوده مطالعاتی این پژوهش، هشتگرد بوده که طی گذر زمان شاهد تغییرات قابل‌توجهی در اجزای بیلان آبی آن بوده است. در این راستا، مطالعه حاضر در وهله اول با مرور مطالعات بین‌المللی انجام‌شده در زمینه روش‌های برآورد اجزای بیلان آبی، چالش‌ها و رویکردهای این زمینه را شناسایی خواهد نمود. به‌عبارت بهتر، با توجه به عدم‌قطعیت‌هایی که در تخمین برخی از اجزای بیلان وجود دارد، روش‌های نوین برآورد بیلان آب با استفاده از داده‌های موجود و با هدف کاهش خطا و عدم‌قطعیت‌ها موردبررسی قرار گرفته‌اند. در وهله دوم با واکاوی مطالعات انجام‌شده در محدوده مطالعاتی هشتگرد در زمینه برآورد اجزای بیلان، نتایج بررسی‌ها از سال ۱۳۶۶ تا ۱۴۰۱ مورد مقایسه قرار گرفته است که می‌تواند راهنمای مفیدی برای توسعه پایدار منابع آب زیرزمینی و مدیریت صحیح آن در این محدوده باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده موردمطالعه

محدوده مطالعاتی هشتگرد در نیمه شمالی حوضه آبریز دریاچه نمک واقع شده است. در شکل (۱) موقعیت محدوده مطالعاتی هشتگرد مشاهده می‌شود. این محدوده مطالعاتی از شمال به محدوده طالقان- الموت، از جنوب به اشتهارد، از غرب به محدوده قزوین و از شرق به محدوده تهران- کرج محدود شده است. محدوده مطالعاتی هشتگرد بین طول‌های جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۷ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه و ۳۶ درجه و ۷ دقیقه شمالی واقع شده است. مساحت ارتفاعات و دشت در این محدوده به‌ترتیب ۵۷۹ و ۵۹۱/۶ کیلومترمربع و حداقل و حداکثر ارتفاع به‌ترتیب ۱۱۳۳ متر و ۴۰۵۸ متر است (RIWEM, 2022).

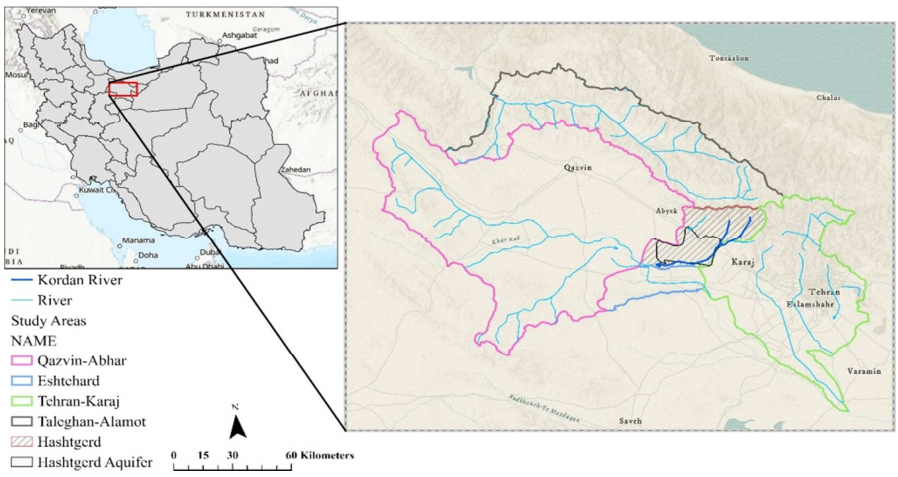

Figure 1. Hashtgerd study area in Alborz province

از سویی دیگر، برای دوره زمانی ۹۸-۱۳۹۷ جمع برداشت سالانه آب برابر ۳۳۴ میلیون مترمکعب آماربرداری شده است که ۱۶/۱ درصد آن (۵۳/۹ میلیون مترمکعب) از جریان‌های سطحی و چشمه‌های ارتفاعات تأمین می‌شود و ۸۳/۹ درصد بقیه (۲۸۰/۱ میلیون مترمکعب) از منابع آب زیرزمینی شامل چاه و قنات است. هم‌چنین بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت به‌ترتیب ۸۴/۵ ۱۰ و ۵/۴ درصد از کل برداشت سالانه آب را به خود اختصاص می‌دهند (RIWEM, 2022). آبخوان آبرفتی هشتگرد در اراضی مخروط‌افکنه‌ای از نوع آزاد بوده که به سمت جنوب محدوده کشیده شده است.

۲- ۲- رویکرد پیشبرد مطالعات واکاوی

رویکرد مورداستفاده در انجام پژوهش حاضر، با هدف انجام مطالعات هم‌سنجی مبتنی بر تجربیات بین‌المللی و ملی به جهت شناسایی منابع عدم‌قطعیت در محاسبه اجزای بیلان صورت می‌گیرد. در این راستا، با بررسی و گردآوری مطالعات علمی و اسناد بالادستی در هر دو سطح ذکرشده، منابع خطا و عدم‌قطعیت در برآورد بیلان‌های گذشته محدوده مطالعاتی شناسایی شده و روش‌شناسی مناسب براساس جمع‌بندی آموزه‌ها به جهت تخمین دقیق‌تر اجزای بیلان انتخاب می‌گردد. در شکل (۲) نحوه انجام مطالعه نشان داده شده است. بررسی تجربیات مرتبط با بیلان آب در دو گام مهم انجام شده است.

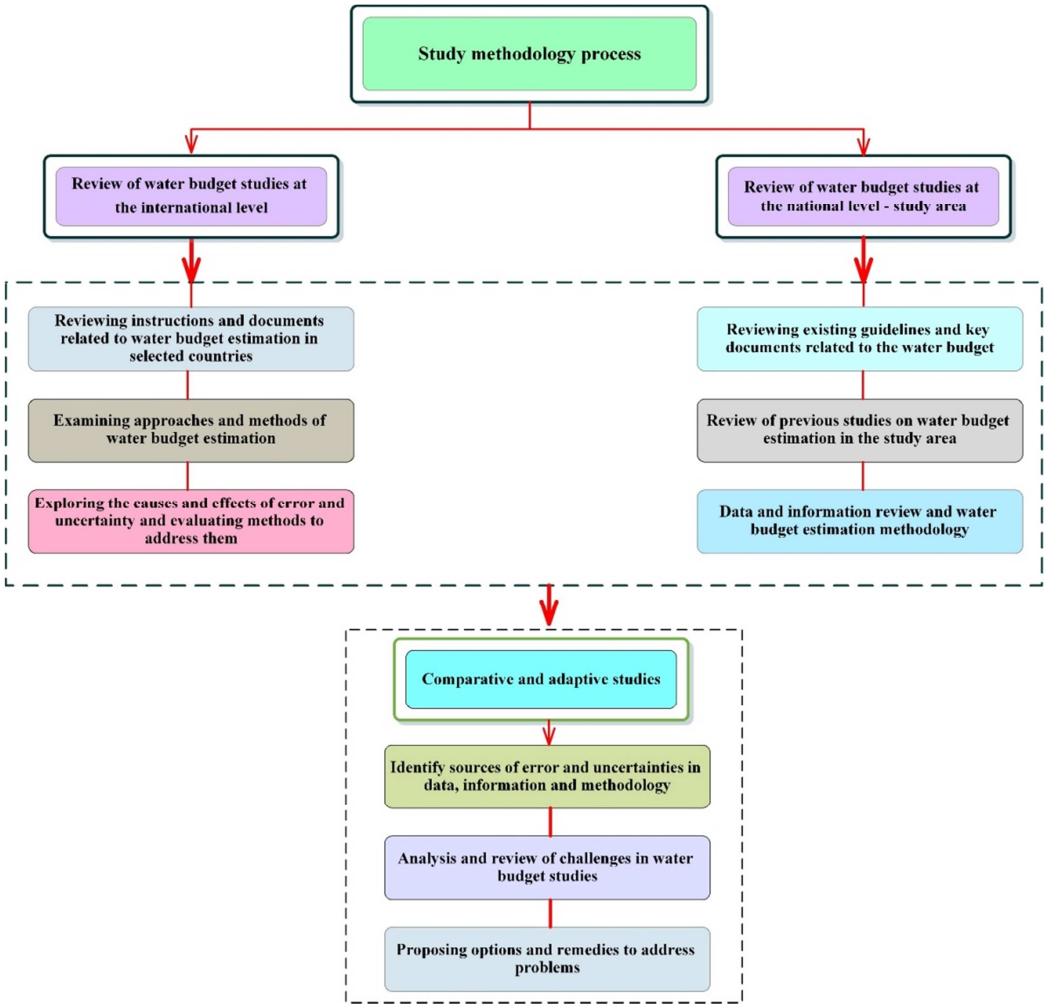

Figure 2. The process of conducting the present research methodology

گام اول بررسی تجربیات بین‌المللی در رابطه با رویکردها (روش‌ها)، برخورد با برآورد بیلان آب (روش‌شناسی) و نحوه برخورد با کاهش عدم‌قطعیت و خطا در اجزای بیلان آب است. در ادامه این بخش در گام دوم بررسی تجربیات برآورد بیلان در محدوده مطالعاتی هشتگرد انجام شده است. به‌عبارت بهتر، این مرحله شامل بررسی تجربیات و مطالعات سطح ملی با تمرکز بر محدوده مطالعاتی این پژوهش می‌باشد. این کار شامل بررسی اسناد راهبردی، دستورالعمل‌ها و قوانین ملی، ارزیابی تجربیات و ادبیات علمی پیشین و ارزیابی رویکردها/روش‌های برآورد بیلان منابع آب و شناسایی منابع خطا و عدم‌قطعیت خواهد بود. خروجی انجام مطالعات هم‌سنجی در محدوده مطالعه، مبتنی بر تجربیات ملی و بین‌المللی بوده که در پژوهش حاضر منجر به ۱- تحلیل فنی اجزای بیلان به‌همراه منابع خطا و عدم‌قطعیت‌ها، ۲- تحلیل ساختاری و نهادی، ۳- بررسی زیرساخت‌ها، امکانات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری و ۴- پیشنهاد راه‌کارها به‌منظور حل چالش‌ها خواهد شد. بدیهی است وضعیت برآورد بیلان منابع آب هشتگرد با تجربیات بین‌المللی نیز از اهم اقدامات خواهد بود.

گردآوری مراجع مرتبط با بیلان در محدوده مطالعاتی هشتگرد نشان می‌دهد که برآورد بیلان از سال ۱۳۶۶ انجام شده است. در شکل (۳) خط زمانی مطالعات انجام‌شده مرتبط با این موضوع نشان داده شده است. در بازه زمانی موردبررسی پژوهش حاضر، تعداد هشت گزارش فنی و ۱۱ مقاله پژوهشی انتخاب و رویکردها و روش‌های برآورد بیلان به‌همراه بازه زمانی آن در هر مطالعه به‌طور کامل موردتوجه قرار گرفته است. از سویی دیگر، عدم‌قطعیت‌ها و منابع خطا مرتبط با برآورد اجزای بیلان شناسایی شده که در بخش (۳-۲) موردبررسی قرار می‌گیرد.

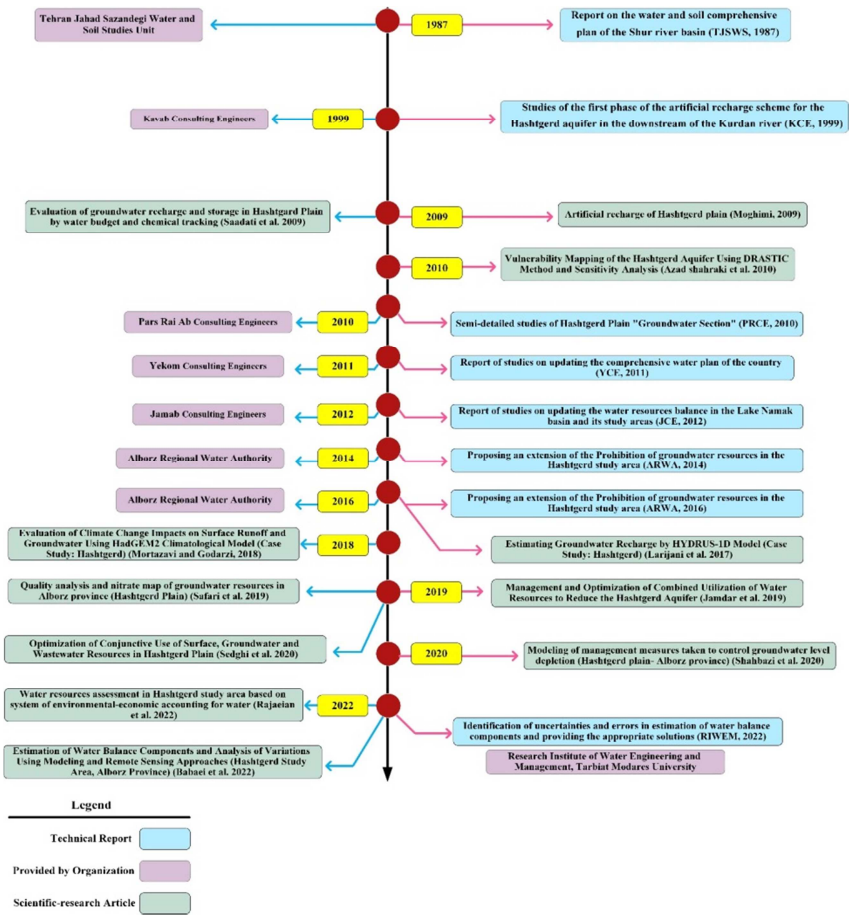

Figure 3. Studies related to water budget estimation in Hashtgerd study area from 1987 to 2022

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی مطالعات بیلان آب زیرزمینی در سطح بین‌المللی

در طرح‌ریزی معیارهای انتخاب الگوها و کشورهای منتخب، ضمن توجه به در دسترس‌بودن اسناد، مشخصات مرتبط با جغرافیا، هوا و اقلیم‌شناسی، زمین‌شناسی، خصوصیات عمومی و هیدرولیکی سیستم آب سطحی و زیرزمینی، آبخوان یا آبخوان‌های موجود در آن، منابع مصرفی و مقادیر برداشت و شرایط کیفی منابع آب موردبررسی قرار گرفت. هم‌چنین در انتخاب این مطالعات، پراکندگی مکانی کشورهای موردمطالعه در سطح جهان و تولید ناخالص ملی این کشورها موردتوجه است. در شکل (۴) نقشه جغرافیایی کشورهای منتخب نشان داده شده است.

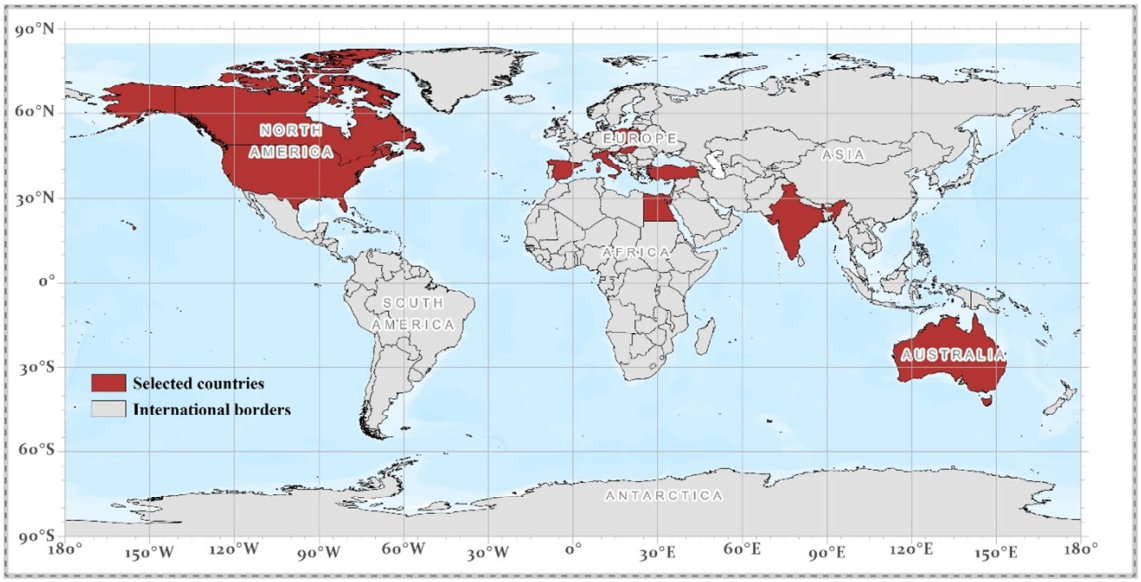

Figure 4. Spatial distribution of selected international studies from different countries in the world

از مهم‌ترین مسائل مدیریت آب در حوضه‌های آبریز که در فرایند واکاوی مطالعات بین‌المللی به‌دست آمد، شناخت پیچیدگی‌ها و اجزای بیلان آب است. این مسئله در مناطق خشک و نیمه‌خشک کـه مصارف آن به‌طور عمده متکی بر آب زیرزمینی است، اهمیت دوچندانی دارد. با توجه به وجود متولیان و گرودارن چندگانه برای بیلان منابع و مصارف آب حوضه‌ها در کشور، دیدگاه‌های متفاوتی در چگونگی ارائه آن، تدقیق اجزای آن و هم‌چنین توافق و اجماع در پذیرش نتایج آن، در طرح‌های توسعه و حفاظت منابع آب وجود دارد. عدم شناخت کامل از وضعیت منابع آب، پیش‌بینی وضع آتی منابع آب را نیز غیرممکن می‌سازد و تصمیم‌گیری در این خصوص را همواره با سعی و خطا مواجه کرده است.

براساس تجربیات مطالعات بین‌المللی، می‌توان بیلان آب را در سطوح مکانی متفاوتی تخمین زد که انتخاب این سطوح بستگی به هدف از تهیه بیلان دارد. هم‌چنین باید بیلان آب را در یک مقیاس زمانی خاص ارائه داد. در تخمین هیدروکلیماتولوژی، مقیاس زمانی بیلان ممکن است کم‌تر از یک سال باشد. اما در تخمین بیلان عمومی و بیلان آب زیرزمینی، لازم است به تأخیر پاسخ سیستم آب زیرزمینی به تغذیه و هم‌چنین جابه‌جایی بسیار آهسته آب در خاک توجه کرد. با این‌حال، برآوردهای بیلان آب زیرزمینی برای دوره‌های سالانه نیز وجود دارد. از سویی دیگر، به‌دلیل پیچیدگی و نامعلوم‌بودن برخی از ویژگی‌ها، فرض‌ها و ساده‌سازی‌هایی در محاسبات لحاظ می‌شوند که منجر به افزایش خطا و عدم‌قطعیت در تخمین بیلان می‌شود. در همه تجربیات موفق بین‌المللی در تخمین بیلان آب، پایش مناسب جامع همراه

با استفاده از رویکردهایی که باعث افزایش صحت تخمین هر یک از اجزای بیلان می‌شود، از مهم‌ترین پیشنهادها است. صحت بالاتر تخمین هرکدام از این اجزا، عدم‌قطعیت آن را نیز کاهش داده که باعث اطمینان بالاتر به برآورد حاصله در بیلان آبی محدوده مطالعاتی می‌شود.

از سویی دیگر، با نگاهی به مطالعات انجام‌شده می‌توان دریافت که در کشورهای توسعه‌یافته، با وجود امکانات مطلوب پایش و استفاده از روش‌های خلاقانه و متنوع در برآورد اجزای بیلان نظیر ارتباط انواع مدل‌های عددی و روش‌های دیگر نظیر سنجش‌ازدور، کماکان عدم‌قطعیت‌ها در سطح بالایی قرار دارند. با این‌حال، بررسی مطالعات نشان داد که باوجود کلی‌نگری‌ها، خطاها و عدم‌قطعیت‌های موجود در برآورد بیلان منابع آب، برآورد بیلان آبی چشم‌انداز مناسبی از وضعیت یک حوضه و تأثیر مسائل مختلفی همچون افزایش برداشت بر آن را به مدیران و تصمیم‌گیران بخش آب می‌دهد. هم‌چنین مطالعات نشان داد که خصوصیات اقلیمی، جغرافیایی، انسانی، هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی مناطق مختلف دنیا، استفاده از روش‌های مختلفی برای برآورد بیلان آب را نیز ایجاب می‌کند که به سطح امکانات موجود، داده‌ها و آمار و اطلاعات موجود از محدوده موردبررسی بستگی دارد. در برخی مطالعات مانند بیلان آب زیرزمینی کلونا در کانادا (Alloisio and Smith, 2016)، بیلان آبخوان‌ها نیز مدل‌سازی و تهیه شده است و در برخی دیگر همچون مطالعه بهره‌وری آبیاری و بیلان آب دلتای نیل در مصر (Molle *et al*., 2016)، بیلان برای کل محدوده و به‌صورت میانگین حجم آب مبادله‌شده در یک دوره بلندمدت است. مهم‌ترین آموزه‌های به‌دست‌آمده از مرور تجربیات بین‌المللی (Ketabchi *et al*., 2018) را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

– توجه به مقیاس زمانی مطالعات بیلان آب (سالانه و یا بزرگ‌تر)

– توجه به مقیاس مکانی مطالعات بیلان آب و برآورد بیلان در مقیاس حوضه‌ای و در سطح آبخوان‌ها و تجمیع نتایج برای مقیاس‌های بزرگ‌تر

– بهره‌گیری از رویکردها و ابزارهای فناورانه و نوین در برآورد اجزای بیلان که همانا سبب دقیق‌شدن برآوردهای بیلان می‌شود.

– شناسایی عدم‌قطعیت‌های موجود و انجام تحلیل حساسیت

– یکپارچه‌سازی فرایند داده‌برداری‌ها و بانک‌های اطلاعاتی مورداستفاده در برآورد بیلان آب

– توجه به فرایند تضمین کیفیت در برآوردهای بیلان آب توسط نهادهای مسئول این کار

– تقویت بانک اطلاعاتی مرتبط با برآورد بیلان آب از جمله مشخصات هیدرودینامیک رودخانه و آبخوان، داده‌های مشاهداتی هیدرومتری رودخانه‌ها و تراز آب زیرزمینی، میزان بارندگی، تغذیه و تبخیر و تعرق و ... .

۳– ۲– بررسی مطالعات بیلان آب زیرزمینی هشتگرد

مطالعات بیلان در محدوده مطالعاتی هشتگرد از سال ۱۳۶۶ تا ۱۴۰۱ انجام شده است (شکل ۳). مطالعات نیمه‌تفصیلی دشت هشتگرد، بخش آب‌های زیرزمینی توسط PRCE (2010) انجام شده که بیلان آبخوان هشتگرد را در یک سال و در دو دوره خشک و مرطوب برآورد نموده است. در این مطالعه جریان آب زیرزمینی ورودی براساس رابطه دارسی ۵۲ میلیون مترمکعب در سال برآورد شده است. براساس آماربرداری سال ۱۳۸۲ میزان برداشت مستقیم از رودخانه معادل ۱۹/۴ میلیون مترمکعب است. هم‌چنین در این گزارش با حل معادله بیلان به‌ترتیب ۲۰ درصد برای چاه‌های کشاورزی، ۵۰ درصد برای چاه‌های صنعت و ۷۰ درصد برای چاه‌های شرب، ضریب آب برگشتی در نظر گرفته شده است. در طی ۱۵ سال افت سطح آب زیرزمینی ۱۰/۶ متر گزارش شده است.

با توجه به سطح بیلان هشتگرد که در این مطالعه ۳۱۳ کیلومترمربع در نظر و ضریب ذخیره نیز ۶ درصد فرض شده است. میزان کاهش حجم مخزن در این مدت ۲۵۰/۷ میلیون مترمکعب بوده که به‌طور متوسط ۷ /۱۶ میلیون مترمکعب در سال یا ۰/۷۱ متر در سال است.

مطالعات به‌هنگام‌سازی بیلان منابع آب در محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز دریاچه نمک توسط JCE (2012) صورت گرفت. مساحت محدوده مطالعاتی در این مطالعه ۱۱۷۰/۶ کیلومترمربع گزارش شده است. هم‌چنین منابع بهره‌برداری‌کننده از آب‌های زیرزمینی در این محدوده مطالعاتی شامل ۶۶۶۱ حلقه چاه، ۲۰۴ دهنه چشمه و ۱۸ رشته قنات حدود ۳۲۷/۹ میلیون مترمکعب برآورد شده است. در رابطه با بیلان هیدروکلیماتولوژی، در این گزارش از بیلان آبی ماهانه به‌روش تورنث‌وایت استفاده شده است. حجم بارش در ارتفاعات محدوده مطالعاتی برابر با ۲۵۵/۸ میلیون مترمکعب و در دشت هشتگرد برابر با ۱۶۷/۵ میلیون مترمکعب برآورد شده است. هم‌چنین بر این اساس مقدار تبخیر و تعرق حقیقی در دشت و ارتفاعات به‌ترتیب ۱۹۴/۳ میلی‌متر و ۲۱۳/۷ میلی‌متر برآورد شده است. هم‌چنین برای تعیین مقدار نفوذ و رواناب به‌ترتیب ضرایب ۷۵ و ۲۵ فرض شده است. مقدار تغذیه نیز حدود ۵۶/۲ میلیون مترمکعب در سال است. از سویی دیگر، ضریب ذخیره آبخوان در این مطالعه ۶ درصد و ضریب انتقال برای مقاطع ورودی و خروجی آبخوان حداقل ۲۰۰ و حداکثر ۱۰۰۰ مترمربع بر روز در نظر گرفته شده است. متوسط سالانه افت آبخوان نیز برابر با ۰/۷ متر محاسبه گردید.

گزارش توجیهی مبنی بر پیشنهاد ادامه ممنوعیت توسعه بهره‌برداری از منابع آب محدوده مطالعاتی هشتگرد در دو سال با روش‌شناسی یکسان تهیه شده است (ARWA, 2014, 2016). در این مطالعه ارزیابی و نتایج متوسط تخلیه و مصارف از منابع آب زیرزمینی از سال آبی ۴۶-۱۳۴۵ تا سال آبی ۹۶-۱۳۹۵ نشان می‌دهد که حجم آب بهره‌برداری‌کننده از آب‌های زیرزمینی با ۶۴۰۱ حلقه چاه، ۱۸۲ دهنه چشمه و ۱۷ رشته قنات حدود ۳۲۱/۱ میلیون مترمکعب تخمین زده شده است. هم‌چنین حجم آب مصرفی به‌ترتیب ۳۲۸/۰ میلیون مترمکعب به مصرف کشاورزی، ۲۲/۵ میلیون مترمکعب مصرف شرب و ۱۱/۴ میلیون مترمکعب به مصرف صنعت می‌رسد. هم‌چنین مطابق نتایج بیلان آب زیرزمینی، مقدار جریان ورودی جانبی برابر ۱۰۲/۳ میلیون مترمکعب در سال و جریان خروجی برابر با ۲۳/۹ میلیون مترمکعب محاسبه شده است.

در مطالعه Jamdar *et al.* (2019) نیز مدیریت و بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب در راستای کاهش افت آبخوان هشتگرد موردبررسی قرار گرفت. به جهت تحقق اهداف مدنظر در این مطالعه، بیلان هیدروکلیماتولوژی و بیلان آبخوان با روش تورنث‌وایت و پارامترهای نشریه فائو برآورد شده است. ازاین‌رو، با توجه به بافت خاک، ضریب ۳۷ درصد برای نفوذ از مصرف کشاورزی در نظر گرفته شده است. هم‌چنین حجم آب نفوذیافته از مصارف شرب و صنعت بین ۶۰ تا ۷۵ درصد آب مصرفی در نظر گرفته شده است. در این مطالعه تبخیر از آب زیرزمینی (منحنی وایت) صفر گزارش شده است.

هم‌چنین در پژوهش Shahbazi *et al.* (2020) مدل‌سازی اقدامات مدیریتی در کنترل افت سطح تراز آب زیرزمینی دشت هشتگرد موردتوجه قرار گرفت. در این مطالعه MODFLOW برای دوره سه‌ساله (۱۳۹۱ تا ۱۳۹۳)، واسنجی و برای یک دوره یک‌ساله (۱۳۹۴) صحت‌سنجی، جهت شبیه‌سازی منابع آب زیرزمینی هشتگرد استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که درصورتی‌که وضع موجود ادامه یابد، ذخیره آبخوان به‌طور متوسط ۱ میلیون مترمکعب در سال کاهش پیدا می‌کند. طی بررسی نُه سناریوی تعریف‌شده حجم آب ورودی به آبخوان بین ۷۳ تا ۸۲/۳ میلیون مترمکعب بر سال برآورد شده که تغییرات حجم مخزن حدود ۶/۸+ تا ۰/۹۹- میلیون مترمکعب گزارش شده است. هم‌چنین ضریب آب نفوذیافته از بارش و آب استحصال‌شده به‌ترتیب در بازه ۱۱ تا ۱۵ درصد و ۲۵ تا ۶۵ درصد تنظیم گردید.

از سویی دیگر، در RIWEM (2022) برآورد بیلان منابع آب به‌همراه رویکرد شناسایی منابع خطا و عدم‌قطعیت با به‌کارگیری رویکردهای نوین سنجش‌ازدور، مدل‌سازی توزیعی، برآورد سالانه و متوسط بیلان، در بازه زمانی ۱۳۹۸-۱۳۷۹ تشریح شده است. در بازه زمانی برآورد بیلان، مقدار تغییرات منفی ذخیره آب زیرزمینی در حدود ۱۸ میلیون مترمکعب در سال برآورد شد که موجب افت بیش از ۹۰ سانتی‌متری تراز آب زیرزمینی در هر سال را شده است. براساس مقادیر مشاهداتی در چاه‌های مشاهده‌ای و با بهره‌گیری از ضریب ذخیره ۴/۶ درصد، این تغییرات معادل کسری حدود ۱۶ میلیون مترمکعب محاسبه گردیده است.

۳- ۳- منابع خطا و عدم‌قطعیت مبتنی بر بیلان‌های گذشته

بررسی نقادانه رویکرد و روش برآورد بیلان آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی هشتگرد در این بخش با نگاهی بر مسائل، چالش‌ها و شناسایی منابع عدم‌قطعیت ارائه شده است. در ابتدا، تحلیل‌های فنی از منظر نحوه برآورد رویکرد و روش‌های برآورد بیلان مبتنی بر تجربیات گذشته بیان شده سپس تحلیل‌های نهادی و ساختاری و در نهایت تحلیل زیرساخت‌ها، امکانات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری، برای محدوده مطالعاتی هشتگرد تبیین می‌شود.

۳- ۳- ۱- تحلیل فنی اجزای بیلان در محدوده مطالعاتی هشتگرد

مقادیر اجزای بیلان هیدروکلیماتولوژی، آبخوان هشتگرد و محدوده مطالعاتی براساس اطلاعات موجود و در دسترس از سال ۱۳۶۶ تا سال ۱۴۰۱، موردبررسی قرار گرفته است. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که به‌جهت برآورد اجزای بیلان، ضرایبی در نظر گرفته شده که در سال‌های مختلف این ضرایب متفاوت بوده است. در این راستا، در جدول‌های (۱) تا (۳) به‌ترتیب مقادیر ضرایب مورداستفاده در مطالعات بیلان گذشته، اجزای ورودی، اجزای خروجی و تغییرات ذخیره زیرزمینی ارائه شده است.

مساحت محدوده بیلان: در مطالعات مختلف، برای بیلان آبخوان یا دشت، مساحت‌های گوناگونی در محدوده پژوهش گزارش شده است. در رابطه با سطح محدوده بیلان آبخوان هشتگرد، در سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۸، مساحت ۴۱۰/۷ کیلومترمربع در نظر گرفته شده است، اما قبل از این سال‌ها، مساحت‌های ارائه‌شده تفاوت‌هایی دارند. به‌طورکلی، این تفاوت، ضربه‌ای به برآورد بیلان وارد نمی‌کند. به‌عبارت بهتر، مرز تعیین شده و مساحت به‌دست‌آمده از آن، باید اطلاعات مرزی ورودی و خروجی به محدوده را با دقت کافی در نظر بگیرد.

Table 1. Coefficients applied in previous water budget studies of Hashtgerd study area

Study	Water budget year	Area (km^2)	Infiltration coefficient (Percent)		Return flow coefficient (Percent)			Storage coefficient
			Precipitation	Surface	Agriculture	Domestic	Industry	Average
Saadati *et al*. (2009)	1992-1993	752	15	40	?	?	?	0.053
Moghimi (2009)	1993-1994	538.4	?	?	?	?	?	0.045
PRCE (2010)	2006-2007*	393	5	30-35	20	70	50	0.06
YCE (2011)	1968-2007	527.28	15	29	45	65		0.06
JCE (2012)	1966-2011	410.7	23.5	~57		~50		0.06
ARWA (2014)	1966-2014	410.7	23.5	?	?	?	?	0.06
ARWA (2016)	1966-2017	410.7	20	?	?	?	?	0.06
Jamdar *et al*. (2019)	2016-2017	410.7	~20	?	?	?	?	0.06
Sedghi *et al*. (2020)	2011-2012	871	?	?	?	?	?	0.02-0.08
Shahbazi *et al*. (2020)	2016-2032	410.7	11-65		?	?	?	0.0003-0.12
RIWEM (2022)	2000-2019	381.7	22.5	Variant		56 (Average)		0.046

? Unknown, * Adjusted for 37 years.

ضریب نفوذ از بارش و جریان‌های سطحی: از سال ۱۳۸۸، ضریب نفوذ از بارش از پنج درصد تا ۲۳/۵ درصد و نفوذ از جریان‌های سطحی از ۳۰ درصد تا ۵۷ درصد در محاسبات در نظر گرفته شده است. مطابق با جدول (۲) برخی از گزارش‌های بیلان مانند گزارش مطالعات به‌هنگام‌سازی بیلان منابع آب محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز دریاچه نمک (JCE, 2012) و گزارش توجیهی پیشنهاد ادامه ممنوعیت توسعه بهره‌برداری از منابع آب محدوده مطالعاتی هشتگرد (ARWA, 2016)، اشاره شده که به‌دلیل عدم استفاده از روابط تجربی که نیازمند برخی اندازه‌گیری‌های صحرایی و هم‌چنین مطالعات تکمیلی است، جزء نفوذ/زهکش از جریان‌های سطحی (به‌عنوان تغذیه به آب زیرزمینی و یا زهکش از آن) دارای عدم‌قطعیت بوده است. در این گزارش‌ها از مشاهدات انجام‌شده و تجربیات کارشناسی این جزء با خطا گزارش شده است. نبود یک رویکرد دقیق علمی به‌جهت برآورد این ضریب برای استفاده در محاسبات یکی از نقدهای مهم و منابع عدم‌قطعیت است که می‌توان به مطالعات بیلان آب محدوده مطالعاتی وارد نمود.

ضریب ذخیره: استخراج ضرایب ذخیره از گزارش‌های بیلان محدوده در گذشته نشان می‌دهد که تفاوت قابل‌توجهی در این گزارش‌ها وجود دارد. محدوده تغییرات این ضریب در جدول (۱) آمده است و در گزارش‌ها و مستندات علمی بیلان به نحوه تعیین این ضریب تا حدودی اشاره شده و دلایل درنظرگرفتن آن نیز ذکر شده است، در آخرین گزارش رسمی بیلان منابع آب این محدوده که زیر نظر شرکت آب منطقه‌ای البرز و شرکت مدیریت منابع آب ایران بوده (ARWA, 2014) یک عدد به استناد مراجع گذشته در نظر گرفته شده که در حدود شش درصد گزارش شده و از اطلاعات دو چاه اکتشافی حفرشده تعیین شده است. یکی از اثرات درنظرگرفتن ضریب ذخیره متفاوت، محاسبه کسری مخزن مختلف به‌ازای افت سطح آب یکسان است. این مهم یکی از نقدها و منابع عدم‌قطعیت در بیلان‌های گذشته است. دلیل آن را می‌توان عدم اندازه‌گیری ضریب ذخیره در سال‌های اخیر دانست.

Table 2. The values of water budget's inflow components in previous studies of Hashtgerd study area

Study	Water budget year	Area (km^2)	Inflow Components (MCM)					
			Groundwater inflow	Surface flow infiltration	Infiltration from precipitation	Infiltration from irrigation	Infiltration from domestic and industry	Total inflow
TJSWS (1987)	1985-1986	412	7.36	114.19	147.8	109.36	0.0	378.72
KCE (1999)	1996-1997	468.45	37.12	34.31	16.81	77.79	21.98	187.99
Saadati *et al*. (2009)	1992-1993*	752	41.46	97.11	25.06	71.57	0.0	240.17
Moghimi (2009)	1993-1994	538.4	?	?	?	?	?	276.8
Azad Shahraki *et al*. (2010)	?	580	51.32	32.78	24.88	65.42	23.6	201
PRCE (2010)	2006-2007	393	51.95	78.86	7.74	53.27	0.0	191.82
	1991-2007		51.95	62.15	6.27	65.09	0.0	185.47
YCE (2011)	1968-2007	527.28	30.71	40.34	39.83	105.96	41.75	258.59
JCE (2012)	1966-2011	410.7	93.65	56.87	27.38	106.29	18.2	302.39
ARWA (2014)	1966-2014	410.7	96.61	58.87	27.38	106.64	18.34	307.77
ARWA (2016)	1966-2017	410.7	102.3	48.8	28.8	106.6	18.7	305.3
Jamdar *et al*. (2019)	2016-2017	410.7	102.3	48.8	28.8	106.6	18.7	305.3
Shahbazi *et al*. (2020)	2016-2032	410.7	1.8			80.5		82.3
Sedghi *et al*. (2020)	2011-2012	871	10.79#	90.37#		203	?	304.34
Rajaeian *et al*. (2022)	2015-2016	591.6	102.3	48.8	28.8	106.6	18.7	305.3
Babaei *et al*. (2022)	2000-2019	?	?			197		?
RIWEM (2022)	2000-2019	381.7	106.5	11		187.5		305

? Unknown, * Adjusted for 37 years, # Suspicious.

ضرایب آب برگشتی: این ضریب ۲۰ درصد تا ۷۰ درصد در مطالعات قبلی در نظر گرفته شده است. بررسی گزارش‌ها و مستندات علمی جمع‌آوری‌شده نشان می‌دهد که مقادیر ارائه‌شده به‌عنوان آب برگشتی در گزارش‌های قبلی دارای روش‌شناسی یکسان نبوده و در برخی از گزارش‌ها مشخص نیست که چه ضریبی برای هر بخش (کشاورزی، شرب و صنعت) در نظر گرفته شده است. در گزارش مطالعات نیمه‌تفصیلی دشت هشتگرد، بخش آب‌های زیرزمینی (PRCE, 2010) این ضریب برای بخش شرب و صنعت به‌ترتیب ۷۰ درصد (به‌دلیل استفاده از چاه‌های جذبی) و ۵۰ درصد در نظر گرفته شده است. ازاین‌رو، عدم به‌کارگیری رویکرد مشخص و استفاده از روش‌شناسی یکسانی برای تعیین ضرایب، یکی از نقدهای بیلان گذشته می‌باشد که از عدم‌قطعیت بالایی نیز برخوردار بوده است. انتشار این عدم‌قطعیت می‌تواند بر روی جزء نفوذ نیز تأثیرگذار باشد. هم‌چنین در هیچ‌کدام از این مطالعات، رویکرد روشنی برای تخمین مقدار تغذیه به آب زیرزمینی محقق‌شده از حجم نفوذ گفته نشده است. در مطالعات اخیر RIWEM (2022)، ضریب آب برگشتی برای کل مصارف کشاورزی، شرب و صنعت، معادل ۵۶ درصد حاصل شده است که به‌دلیل تخمین مقدار تبخیر و تعرق از روش‌های سنجش‌ازدور، ضریب فرض نشده و به‌عنوان مجهول در معادله بیلان به‌دست آمده است.

ضریب قابلیت انتقال: برای ضریب قابلیت انتقال نیز به‌دلیل عدم به‌روزرسانی داده و اطلاعات از چاه‌های اکتشافی، اعداد در نظرگرفته‌شده دارای عدم‌قطعیت و خطاهایی بوده است. با توجه به محدوده تغییرات این ضریب و هم‌چنین محدوده تغییرات در نظر گرفته‌شده در سال‌های اخیر، می‌توان به این مهم اشاره نمود که به‌ویژه در سال‌های اخیر نحوه اصلاح این ضریب چگونه انجام شده است و هم‌چنین میزان خطایی که می‌تواند به محاسبات بیلان و کسری مخزن منتشر شود به چه میزان است. این ضریب در برآورد اجزای ورودی آب زیرزمینی و خروجی از آبخوان تأثیرگذار است. بررسی نقشه‌های هم قابلیت انتقال ارائه‌شده در برخی گزارش‌ها نشان می‌دهد که فقط درون‌یابی بین اندک داده‌های نقطه‌ای موجود از این مشخصه انجام شده و توجهی به اصلاح آن در نقشه‌ها براساس ضخامت آبرفت صورت نگرفته است که می‌تواند منبع عدم‌قطعیت و خطای بزرگی را در برآوردهای مرتبط سبب شود.

برداشت از منابع آب زیرزمینی: براساس اطلاعات استخراج‌شده (جدول ۳)، حجم آب زیرزمینی برداشت‌شده از طریق چاه‌ها و قنوات در سال‌های اخیر (از سال ۱۳۹۰ به بعد) روند کاهشی را نشان می‌دهد. در دوره برآورد بیلان ۹۷-۱۳۹۶، حجم برداشت از آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی نسبت به متوسط سال‌های قبل حدود ۳ درصد کاهش داشته است. اندازه‌گیری این عامل نیز در صورت نبودن کنتور حجمی بر روی چاه‌های بهره‌برداری و نداشتن آمار دقیق از تعداد چاه‌ها می‌تواند دارای عدم‌قطعیت و خطا داشته باشد.

تبخیر از بارش و نفوذ: به‌جهت برآورد تبخیر از بارش، براساس توصیه‌های دستورالعمل برآورد بیلان (۱۳۹۰)، لازم است از روش بیلان آبی ماهانه یا دوره‌ای تورنث‌وایت استفاده شود. هم‌چنین اشاره شده است که در نواحی خشک (اکثر مناطق ایران) استفاده از آمار بارندگی ماهانه به‌علت پراکندگی زمان بارندگی و فاصله زیاد بین دوره‌های بارندگی جواب‌گو نبوده و پیشنهاد شده که از روش بیلان آبی دوره‌ای تورنث‌وایت استفاده شود. بررسی گزارش‌های جمع‌آوری‌شده نشان می‌دهد که از روش بیلان آبی ماهانه تورنث‌وایت استفاده شده که می‌تواند خطا و عدم‌قطعیت را وارد محاسبات بیلان محدوده نماید. هم‌چنین در این محدوده، برای برآورد میزان نفوذ در دشت نیاز نصب لایسیمتر بوده که با توجه به این‌که در محدوده مطالعاتی موجود نبوده است میزان نفوذ براساس تجربیات کارشناسی و شرایط آبرفت در دشت محاسبه شده که از منابع خطا و عدم‌قطعیت به‌شمار می‌رود.

ورود و خروج آب زیرزمینی: در مطالعات بیلان گذشته براساس تراز آب زیرزمینی جبهه‌های ورودی و خروجی ترسیم شده و براساس آن حجم جریان ورودی و خروجی برآورد می‌گردد. این موارد در جدول‌های (۲) و (۳) ارائه شده است.

بررسی گزارش‌ها نشان می‌دهد که جریان زیرزمینی ورودی از طریق سازند سخت ارتفاعات محدوده مطالعاتی قزوین وارد می‌شود. هم‌چنین جریان زیرزمینی خروجی به محدوده‌های مطالعاتی تهران- کرج و اشتهارد است که البته این مشاهدات نیز در همه سال‌ها یکسان نیست. در تعیین تعداد جبهه‌های ورود و خروج و هم‌چنین استفاده از ضریب انتقال در برآورد حجم آب ورودی و خروجی از آبخوان متفاوت عمل شده که عدم‌قطعیت و خطای موجود در برآورد ضریب انتقال به این اجزا نیز منتشر می‌گردد.

Table 3. The values of water budget's outflow components in previous studies of Hashtgerd study area

Study	Water budget year	Area (km^2)	Outflow Components (MCM)							
			Discharge from wells, Qanats and springs	Groundwater outflow	Drain	Infiltration from aquifer to the bed rock	Groundwater evaporation	Transpiration	Total outflow	Changes in storage
TJSWS (1987)	1985-1986	412	364.53	6.82	0.0	0.0	6.45	0.0	377.82	+0.901
KCE (1999)	1996-1997	468.45	213.79	8.16	0.0	0.0	1.88	0.0	223.83	-35.84
Saadati *et al*. (2009)	1992-1993*	752	230.2	5.45	0.0	0.0	5.22	0.0	245.98	-5.81
Moghimi (2009)	1993-1994	538.4	?	?	?	?	?	?	259	+17.8#
Azad Shahraki *et al*. (2010)	?	580	204.68	20.27	0.0	0.0	0.0	0.0	224.95	-23.95
PRCE (2010)	2006-2007	393	201.47	33.74	0.0	0.0	0.0	0.0	235.21	-43.39
	1991-2007		168.44	33.74	0.0	0.0	0.0	0.0	202.18	-16.71
YCE (2011)	1968-2007	527.28	283.31	0.0	0.0	0.0	5.43	0.0	288.74	-30.15
JCE (2012)	1966-2011	410.7	306.84	11.07	0.5	0.0	0.0	0.0	318.41	-16.02
ARWA (2014)	1966-2014	410.7	306.84	20.47	0.0	0.0	0.0	0.0	327.31	-19.47
ARWA (2016)	1966-2017	410.7	300.3	23.9	0.0	0.0	0.0	0.0	324.2	-18.9
Jamdar *et al*. (2019)	2016-2017	410.7	300.3	23.9	0.0	0.0	0.0	0.0	324.2	-18.9
Shahbazi *et al*. (2020)	2016-2032	410.7	75.3	8	0.0	0.0	0.0	0.0	83.3	+0.99
Sedghi *et al*. (2020)	2011-2012	871	308.3	11.99	0.0	0.0	0.0	0.0	320.29	-16.62
Rajaeian *et al*. (2022)	2015-2016	591.6	300.3	23.9	0.0	0.0	0.0	0.0	324.2	-18.9
RIWEM (2022)	2000-2019	381.7	283.9	39.2	0.0	0.0	0.0	0.0	323.1	-18.1

? Unknown, * Adjusted for 37 years, # Suspicious.

هم‌چنین در شکل (۵)، به‌عنوان جمع‌بندی تحلیل فنی اجزای بیلان، به مقایسه برآورد مجموع ورودی و خروج آب زیرزمینی و کسری مخزن آب زیرزمینی پرداخته شده است. این مقایسه شامل همه مطالعات بیلان موردبررسی در مطالعه حاضر بوده و همان‌طورکه در این شکل مشاهده می‌شود، در دوره‌های بیلان اخیر مجموع خروجی آب زیرزمینی روند افزایشی داشته است که متوسط آن ۲۵۷ میلیون مترمکعب بوده است. هم‌چنین متوسط مجموع ورودی آب زیرزمینی نیز ۲۴۵ میلیون مترمکعب بوده و روند آن به‌صورت کاهشی است. متوسط کسری مخزن در دوره‌های بررسی بیلان در مطالعه حاضر ۱۸ میلیون مترمکعب برآورد شده است که در بیلان‌های اخیر این میزان کسری روند افزایشی داشته است. هم‌چنین در این شکل مقایسه مقادیر برآوردشده اجزای اشاره‌شده، قابل مشاهده است. برای نمونه در مطالعه Shahbazi *et al*. (2020) مجموع متوسط ورودی در مقایسه با سایر مطالعات به‌دلیل انتخاب محدوده متفاوت مدل‌سازی، بسیار کم محاسبه/برآورد شده است. این مشاهده برای متوسط مجموع خروجی نیز صادق است و از این‌رو تغییرات ذخیره آب زیرزمینی این محدوده در آن مطالعه حدود ۰/۹+ میلیون مترمکعب برآورد شده است. تحلیل مشابهی برای مطالعه Saadati *et al*. (2009) و Moghimi (2009) نیز قابل انجام است که تغییرات ذخیره آب زیرزمینی به‌ترتیب ۵/۸- و ۱۷/۸+ میلیون مترمکعب برآورد شده است. هم‌چنین از دیگر علل نتایج مختلف در جدول‌های (۲) و (۳) که در شکل (۵)

نیز نمایان است، می‌توان به تفاوت در انتخاب روش‌شناسی‌ها و رویکردهای برآورد بیلان و هم‌چنین اجزای مؤثر در برآورد آن اشاره نمود. به‌عنوان مثال، در Moghimi (2009) عدم اشاره به روش‌شناسی برآوردهای صورت‌گرفته سبب عدم اعتماد به اعداد گزارش شده می‌گردد. هم‌چنین در مطالعه Sedghi *et al.* (2020) انتخاب محدوده، روش‌شناسی و بازه زمانی متفاوت با سایر مطالعات از جمله Shahbazi *et al.* (2020) سبب ارائه نتایج مختلف شده است. ضمن آنکه در توضیحات ارائه‌شده این بخش (۳-۳-۱)، به عدم‌قطعیت هر کدام از روش‌های برآورد اجزای بیلان اشاره شد که می‌تواند منجر به تولید بازه‌ای از نتایج متفاوت گردد.

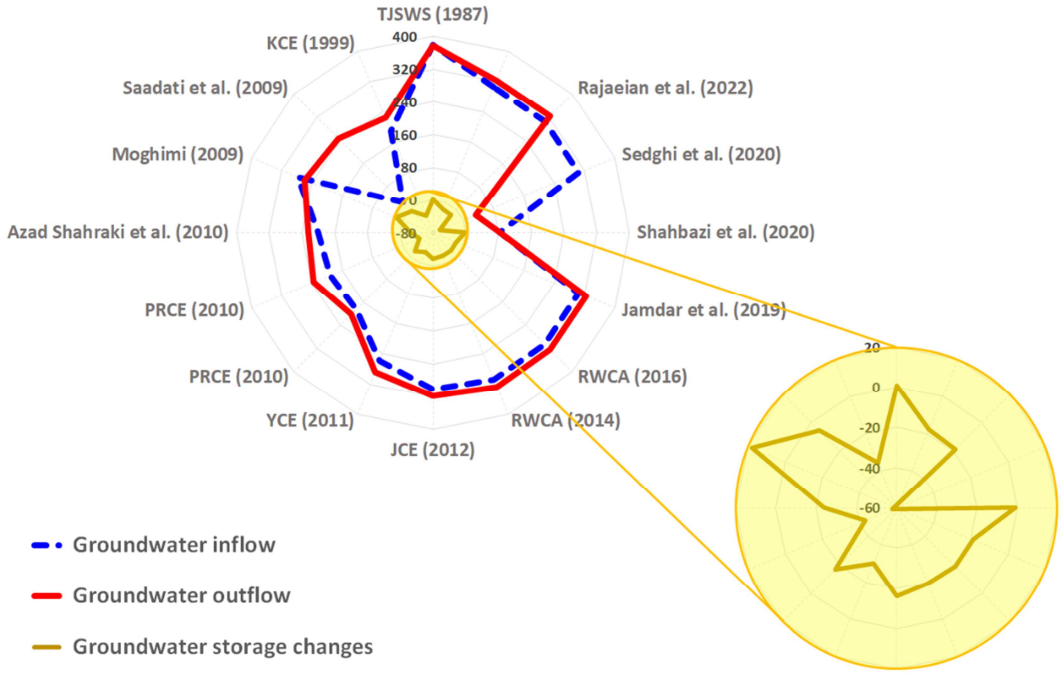

Figure 5. Comparison of the estimation in groundwater inflow and outflow along with storage changes in different periods of the water budget

۳-۳-۲- تحلیل ساختاری و نهادی

بررسی مستندات علمی جمع‌آوری‌شده نشان می‌دهد که مهم‌ترین مطالعات بیلان انجام‌شده توسط مهندسین مشاور و دفتر مطالعات پایه آب منطقه‌ای (به استناد بر گزارش‌های قبلی مشاور) زیر نظر وزارت نیرو در قالب گزارش مطالعات نیمه‌تفصیلی دشت هشتگرد، بخش آب‌های زیرزمینی (PRCE, 2010)، گزارش مطالعات به‌هنگام‌سازی بیلان منابع آب محدوده‌های مطالعاتی حوزه آبریز دریاچه نمک (JCE, 2012) و گزارش توجیهی پیشنهاد ادامه ممنوعیت توسعه بهره‌برداری از منابع آب محدوده مطالعاتی هشتگرد (ARWA, 2016) انجام شده است. براساس گزارش‌های مطالعات بیلان آب زیرزمینی محدوده پژوهش، نظر به آنکه این کار توسط شرکت‌های مختلف و در قالب گزارش‌های متنوع تهیه شده است، ضرایب متفاوت و دیدگاه‌های گوناگون در محاسبه بیلان در نظر گرفته شده که ممکن است در تصمیم‌گیری‌هایی که براساس آب قابل‌برنامه‌ریزی انجام می‌شود، اثر داشته باشد. در این راستا، تهیه بیلان به‌عهده گروه تلفیق و بیلان در دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت مدیریت منابع آب کشور است که در این زمینه دستورالعمل‌های نحوه برآورد بیلان ارائه شده است. نظارت و کنترل کیفیت برآورد بیلان به شکل صریحی در این ساختار در نظر گرفته

نشده و این موضوع می‌تواند در اصلاح روش برآورد بیلان نقش مؤثری ایفا نماید (IPRC, 2018; Mahmoodzadeh and Ketabchi, 2021).

به‌طور تاریخی، سوابق مطالعات پیشین ملی موردبررسی از عدم انسجام میان ظرفیت برد منابع آب سطحی و زیرزمینی، بارگذاری‌ها و ارزیابی آن‌ها در بستر برآوردهای بیلان منابع آب حکایت دارد. از سویی دیگر، اتفاقاتی که در تشکیل وزارت نیرو و تدوین اساسنامه آن رخ داد، باعث شد وزارت نیرو به شکلی از حضور سازمانی‌اش در فرایندهای آبی در مقیاس مزرعه و تبعات آن بر مقیاس حوضه فاصله بگیرد. هم‌چنین توسعه اسناد بالادستی کشور در حوزه امنیت غذایی، اقدامات مدیریتی را به‌دنبال دارد که به‌شدت بر فرایند بیلان منابع آب سطحی و زیرزمینی اثرگذار هستند. مانند یارانه‌ها برای توسعه سامانه‌های آبیاری نوین، توسعه باغات دیم در آبخیزها و تبدیل زمین‌های دیم به آبی. در این راستا، حکمرانی آب کشور باید در مدیریت منابع آب، مدیریت یکپارچه آن‌ها را در دستور کار قرار دهد و تأثیر هرگونه سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی و بارگذاری جدید را در چنین بستری بررسی کند.

۳– ۳– ۳– بررسی زیرساخت‌ها، امکانات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری

مشابه با سایر محدوده‌های مطالعاتی در ایران، یکی از ضعف‌های موجود در این زمینه، تجهیزات و امکانات سخت‌افزاری است که از جمله آن‌ها می‌توان به نبود لایسیمترها اشاره نمود (برای نمونه Mahmoodzadeh and Ketabchi, 2021). استفاده از لایسیمتر برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق و نفوذ می‌تواند در برآورد اجزای بیلان آبخوان هشتگرد استفاده و نقش مهمی در تدقیق آن دارند. اندازه‌گیری‌های انجام‌شده به جهت تعیین ضرایب قابلیت انتقال و ضریب ذخیره مربوط به تعداد محدودی چاه اکتشافی (دو حلقه چاه) برآورد شده‌اند و مطالعات بیلان آبخوان هشتگرد با استناد این ضرایب انجام شده است. ازاین‌رو، هدایت انجام اندازه‌گیری‌ها و کارهای میدانی دوره‌ای در آبخوان‌ها به‌سوی تدقیق پارامترهایی مانند ضرایب قابلیت انتقال و ضریب ذخیره براساس داده‌های حاصل از چاه‌های اکتشافی، آزمون پمپاژ به‌روز و حجم تخلیه از منابع آب زیرزمینی (استفاده از کنتورهای حجمی در چاه‌های بهره‌برداری)، می‌تواند نتایج را بادقت مناسبی ارائه نماید. در این راستا، استفاده از فناوری‌ها و رویکردهای نو در به‌روزرسانی اطلاعات پایه‌ای استان می‌تواند در افزایش دقت تخمین بیلان آب زیرزمینی به‌طور مؤثری، ایفای نقش نماید.

۳– ۴– مقایسه وضعیت برآورد بیلان منابع آب هشتگرد با تجربیات بین‌المللی

دستورالعمل اولیه تهیه گزارش آب (IWRMC, 1991) و دستورالعمل تهیه بیلان آب (IWRMC, 2010)، اساس تهیه گزارش‌های رسمی بیلان آب کشور از جمله محدوده مطالعاتی هشتگرد بوده‌اند. این دستورالعمل‌ها، عدم به‌کارگیری روش‌هایی با اطلاعات فراوان یا فرمول‌های دقیق را توصیه می‌کنند. در مقایسه با دستورالعمل‌های ارائه‌شده در سطح بین‌المللی، از نظر مقیاس زمانی، برآورد بیلان برای دوره‌های سالانه و بیش‌تر توصیه شده است. واضح است که این پیشنهاد به‌دلیل پاسخ آبخوان نسبت به تغذیه از سطح و هم‌چنین سرعت کم جریان در آبخوان می‌باشد.

عدم دقت در اطلاعات ضرایب ذخیره و انتقال باعث شده است که بیلان آبخوان در محدوده مطالعاتی هشتگرد دارای عدم‌قطعیت باشد. به‌عنوان مثال، استفاده از رویکردهایی مانند کسر تبخیر و تعرق و رواناب از میزان بارش جهت برآورد جزء تغذیه، به‌دلیل آنکه میزان آن باتوجه به بافت خاک و سایر پارامترهای زمین‌شناسی می‌تواند متفاوت باشد، سبب انتشار خطا در محاسبات خواهد شد. بنابراین برآورد مقادیر منطقی و نزدیک به واقعیت در هر بخش از سطح آبخوان باید به‌صورت عملی و مستقیم موردارزیابی قرار گیرد. مطابق با مطالعات انجام‌شده در سطح بین‌المللی، سنجش‌ازدور راه‌کار

جدیدی برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق کل و تغذیه آبخوان است. به‌عبارت بهتر، تغذیه آبخوان را باید با درنظرگرفتن ویژگی‌های مکانی، زمانی و منبع تغذیه برآورد کرد. هم‌چنین فاصله زمانی مابین نفوذ آب به خاک و رسیدن آن به آبخوان نیز مؤثر است.

در این راستا، جهت برآورد و تدقیق بیلان آب محدوده مطالعاتی هشتگرد و هم‌چنین شناخت به‌دست‌آمده از محدوده و نحوه برآورد بیلان آب زیرزمینی، با توجه به داده و اطلاعات در دسترس و هم‌چنین محدودیت‌های زمانی موجود، از رویکرد سنجش‌ازدور در برآورد جزء تبخیر و تعرق بیلان به‌عنوان یکی از اجزای مهم بیلان و تغییرات کاربری اراضی با امکان کنترل و واسنجی نتایج کسب‌شده با داده‌های مشاهداتی زمینی استفاده شده است. هم‌چنین از نقشه‌های رطوبت خاک و از مقادیر بروز اندازه‌گیری‌های انجام‌شده برای تعیین ضرایب هیدرودینامیک آبخوان (ضریب انتقال و ضریب ذخیره) در سطح محدوده بیلان آبخوان استفاده شده است. در دسترس‌بودن تصاویر از محدوده مطالعاتی در کنار دسترسی به مهارت‌های تخصصی لازم برای بهره‌گیری از آن در این مطالعات را فراهم نموده است. ترکیب اطلاعات فوق در مورد تبخیر و تعرق و کاربری اراضی با اطلاعات بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و بارش در محدوده مطالعاتی، منجر به کاهش خطا و عدم‌قطعیت‌های موجود در جزء اشاره‌شده و هم‌چنین تغذیه آبخوان در مقیاس زمانی و مکانی می‌شود.

۳ – ۵ – پیشنهاد راه‌کارهای حل چالش‌ها

در سطح اول، تجهیزنمودن محدوده مطالعاتی به امکانات سخت‌افزاری است که در بخش‌های مختلف این مطالعه نیز به آن‌ها اشاره شد. از جمله این تجهیزات می‌توان به نصب لایسیمتر و دیتالاگر و بهره‌برداری و نگهداری مناسب از آن‌ها اشاره نمود که در اندازه‌گیری برخی از اجزای بیلان شامل تبخیر و تعرق و نفوذ می‌تواند بسیار کمک‌کننده باشد. هم‌چنین به‌کارگیری روش سنجش‌ازدور به جهت تخمین بارش و استفاده از داده‌های زمینی برای صحت‌سنجی آن‌ها می‌تواند به برآورد بهتر جزء تغذیه کمک کند و خطای رویکردهای تهیه منحنی‌های هم‌باران را بکاهد. از دیگر پیشنهادها می‌توان به بازنگری و به‌روزرسانی شبکه پایش چاه‌های مشاهده‌ای منطقه به‌دلیل کمبود داده‌های اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی به‌ویژه در نزدیکی مرزهای آبخوان که منجر به دقت کم برآوردهای ورود و خروج آبخوان می‌گردد، اشاره نمود. هم‌چنین تهیه نقشه‌های ضخامت آبرفت و سنگ بستر از محدوده آبخوان هشتگرد (با حفر گمانه و یا انجام روش‌های ژئوفیزیکی) و بررسی احتمال وجود درز و شکاف یا گسل عامل خروج آب زیرزمینی از آبخوان پیشنهاد می‌شود. از سویی دیگر، اندازه‌گیری مقدار برداشت از منابع آب سطحی چاه‌های بهره‌برداری و قنوات هم در تواتر کم‌تر از پنج سال (حداقل سالانه) و هم با روشی دقیق‌تر به‌طوری‌که عدد حاصل، قابل‌اعتمادتر باشد. یکی دیگر از مواردی که در این سطح لازم است به آن توجه شود، نظارت و کنترل کیفیت برآورد بیلان به شکل مشخص در ساختار مستندات و دستورالعمل‌های مربوط به این حوزه می‌باشد، که می‌تواند از طریق به‌روزرسانی دستورالعمل‌ها منطبق بر ویژگی‌های ساختاری و نهادی کشور موردتوجه واقع گردد. واضح است که این ساختار می‌تواند در اصلاح روش برآورد بیلان نقش مؤثری ایفا نماید.

در سطح دوم، پیشنهاد برقراری امکانات ثبت و نمایش برخط اجزای بیلان در محدوده مطالعاتی هشتگرد در مقیاس‌های مختلف بوده که امکان تکمیل و نیز خطاگیری داده‌ها از سوی کاربران مختلف را برقرار می‌کند. براساس بررسی‌های صورت‌گرفته و داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری‌شده از محدوده می‌توان گفت که مدل‌سازی ریاضی براساس داده‌ها و اطلاعات جدید و هم‌چنین مسائل و چالش‌های موجود در محدوده لازم و ضروری به‌نظر می‌رسد. استفاده از مدل به جهت شناخت و ارزیابی وضعیت موجود و هم‌چنین تدقیق ضرایبی که به‌طور عمده به‌صورت تجربی یا کارشناسی در نظر گرفته می‌شود، می‌تواند کمک به‌سزایی نماید. لحاظ نمودن مسائل محیط‌زیستی و اکوسیستمی مرتبط با منابع آب

در فرایند پایش و داده‌برداری، مدل‌سازی و کلیه روندهای طی‌شده ضروری است و باید در نهایت به برآوردهای بیلان کیفی منابع آب در کنار بیلان معمول حجم منابع آب منجر شود. هم‌چنین لازم است با برگزاری جلسات و کارگاه‌های انتقال دانش، آگاهی‌سازی عمومی، تخصصی و نیز ظرفیت‌سازی انجام‌شده تا تمامی گرودارن از چالش‌ها، یافته‌ها و پیشنهادی این مطالعات اطلاع یابند و هر کدام به نوبه خود به ایفای مسئولیت خود در این راستا همت گمارند.

۴- نتیجه‌گیری

براساس بررسی منابع و مراجع مختلف می‌توان جمع‌بندی نمود که بیلان منابع آب در مقیاس‌های مکانی مختلفی نظیر مقیاس‌های قاره‌ای، کشوری، منطقه‌ای، حوضه‌ای، محدوده مطالعاتی و آبخوان قابل برآورد است که انتخاب نوع این مقیاس‌ها براساس هدف از تهیه بیلان تعیین می‌شود. هم‌چنین بیلان آب باید در مقیاس زمانی مشخصی تهیه شود. با توجه به تأخیر سیستم آب زیرزمینی در پاسخ به تغییرات تغذیه و هم‌چنین سرعت بسیار کم آب در محیط خاک، بهتر است بیلان آب زیرزمینی برای دوره‌های سالانه و به بالا (۱۰ الی ۲۰ ساله) تهیه شود. بیلان آب زیرزمینی دارای اجزای مختلف ورودی و خروجی آب زیرزمینی است که برخی از این اجزا، 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 تهیه بیلان امر بسیار مهمی است که به لزوم آن در مطالعات مختلف بین‌المللی اشاره شده است. بدین منظور مقادیر اجزای بیلان هیدروکلیماتولوژی، آبخوان هشتگرد و محدوده مطالعاتی براساس اطلاعات موجود و در دسترس از سال ۱۳۶۶ تا سال ۱۴۰۱، موردبررسی قرار گرفت. نتایج تجزیه و تحلیل فنی اجزای بیلان آبی نشان می‌دهد کل خروجی آب زیرزمینی در دوره‌های اخیر به مقدار متوسط ۲۵۷ میلیون متر مکعب افزایش یافته، درحالی‌که کل ورودی آب زیرزمینی به مقدار متوسط ۲۴۵ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. بنابراین میانگین کسری مخزن برای دوره‌های بیلان آب در نظر گرفته شده ۱۸ میلیون مترمکعب محاسبه شد که در دوره‌های اخیر روندی صعودی را نشان داده است. در این راستا، رئوس نکات و نتایج کسب‌شده از این پژوهش را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود؛ ۱- استفاده از تکنیک‌های جدید نظیر سنجش‌ازدور و ماهواره‌ای در تعیین اجزای مختلف بیلان آب کشور بسیار راه‌گشا بوده و استفاده از رویکرد مدل‌سازی همراه با تحلیل عدم‌قطعیت می‌تواند به تدقیق اجزای بیلان کمک‌کننده باشد، ۲- وجود داده‌های زمینی نظیر اطلاعات دستگاه‌های لایسیمتر و نیز داده‌های ثبت آنلاین در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر (مثلاً روزانه) در چاه‌های مشاهداتی بسیار راه‌گشا است. بومی‌سازی نحوه کاربری و واسنجی تصاویر ماهواره‌ای و تشکیل بانک‌های اطلاعاتی مربوطه از سایر توصیه‌ها در این زمینه است. هم‌چنین تدقیق نقشه‌های کاربری اراضی و الگوی کشت، تدقیق تبخیر و تعرق حقیقی و مصارف و در دسترس بودن آن‌ها در طول زمان با تواترهای قابل قبول نیز از توصیه‌های دیگر در این راستا است، ۳- باتوجه به رویکردهای مدیریتی و در نظرگیری ابعاد اجتماعی، اقتصادی و سیاسی منابع آب در چارچوب حسابداری آب، توسعه و استفاده از این چارچوب در برآورد بیلان منابع آب و به‌طور جزئی‌تر، منابع آب زیرزمینی، پیشنهاد می‌شود، ۴- ارائه بیلان آب زیرزمینی معتبر در هر کشور، تصویری واضح از میزان منابع آب در دسترس و قابل برنامه‌ریزی در اختیار تصمیم‌گیرندگان اصلی قرار می‌دهد. بدین‌منظور، لازم است مواردی همچون ایجاد بانک‌های اطلاعاتی برخط، یکنواخت‌سازی داده‌ها و اطلاعات و بهره‌گیری از تجربیات جهانی، موردتوجه قرار گیرد. بدیهی است این مهم پس از درنظرگیری شرایط داخل کشور و بومی‌سازی آن توسط متخصصان این حوزه، می‌تواند انجام پذیرد.

۵- تشکر و قدردانی

مقاله حاضر به‌عنوان بخشی از دستاوردهای حاصل در قرارداد پژوهشی منعقد میان پژوهشکده مهندسی و مدیریت آب دانشگاه تربیت مدرس با شرکت آب منطقه‌ای البرز با شماره ۰۵/۹۸/۴۷۴۸/۱۰۱ است. از پژوهشکده مهندسی و مدیریت آب دانشگاه تربیت مدرس، شرکت آب منطقه‌ای البرز و شرکت مدیریت منابع آب ایران به‌جهت قراردادن بخشی از مراجع، داده‌ها و اطلاعات مورداستفاده در این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافعی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷- منابع

Alloisio, S., & Smith, H. R. (2016). Monthly groundwater budget for the aquifers in the Kelowna BC Area. Prov. BC Ministry of Environment, *Water Science Series WSS2016-10*.

ARWA (Alborz Regional Water Authority). (2014). Proposing an extension of the Prohibition of groundwater resources in the Hashtgerd study area. *Research report.* (In Persian).

ARWA (Alborz Regional Water Authority). (2016). Proposing an extension of the Prohibition of groundwater resources in the Hashtgerd study area. *Research report*. (In Persian).

Azad Shahraki, F., Aghasi, A., Azad Shahraki, F., & Zarei, A. (2010). Vulnerability Mapping of the Hashtgerd Aquifer Using DRASTIC Method and Sensitivity Analysis. *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab*, *21*(2), 61-70. (In Persian).

Babaei, M., Mahmoodzadeh, D., Ketabchi, H., & Saadi, T. (2022). Estimation of Water Balance Components and Analysis of Variations Using Modeling and Remote Sensing Approaches (Hashtgerd Study Area, Alborz Province). *Iran-Water Resources Research Research, 18.* (1). (In Persian*).*

Beigi, E., & Tsai, F. T.-C. (2014). GIS-based water budget framework for high-resolution groundwater recharge estimation of large-scale humid regions. *Journal of Hydrologic Engineering, 19(8)*, 5014004. https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000993.

Crosbie, R. S., Peeters, L. J. M., Herron, N., McVicar, T. R., & Herr, A. (2018). Estimating groundwater recharge and its associated uncertainty: use of regression kriging and the chloride mass balance method. *Journal of Hydrology, 561*, 1063–1080. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.003.

Garcia, C. A., Corson-Dosch, N. T., Beamer, J. P., Gingerich, S. B., Grondin, G. H., Overstreet, B. T., Haynes, J. V, & Hoskinson, M. D. (2022). Hydrologic budget of the Harney Basin groundwater system, southeastern Oregon. *US Geological Survey*. https://doi.org/https://doi.org/10.3133/sir20215128.

Ghadimi, S., & Ketabchi, H. (2019). Impact assessment of different management strategies implementation on the aquifer using numerical simulation (Case study: Namdan aquifer, Fars province, Iran). *Journal of Water and Soil Conservation*, *25*(6), 1-23. (In Persian*).*

Han, J., Yang, Y., Roderick, M. L., McVicar, T. R., Yang, D., Zhang, S., & Beck, H. E. (2020). Assessing the steady state assumption in water balance calculation across global catchments. *Water Resources Research, 56(7)*, e2020WR027392. https://doi.org/10.1029/2020wr027392.

Hanifehlou, A., Hoseini, S. A., Javadi, S., & Sharafati, A. (2023). Prediction of climate and land use changes effects on temporal and spatial fluctuation of groundwater recharge using WetSpass-M distributed model (Case study: Hashtgerd Aquifer, Iran). *Water and Irrigation Management*. (In Persian*).*

IPRC (Islamic Parliament Research Center). (2018). A critique of groundwater resources budget estimation in Iran: solutions and proposals. *Research report*. (In Persian).

IWRMC (Iran Water Resources Management Company). (1991). Instruction for preparation of water resources balance report. *Research report.* (In Persian).

IWRMC (Iran Water Resources Management Company). (2010). Instruction for preparation of water resources balance report. *Research report*. (In Persian).

Jamdar, M, Sarai Tabrizi, M, & Saremi, A. (2019). Management and Optimization of Combined Utilization of Water Resources to Reduce the Hashtgerd Aquifer. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 8(3), 85-101. (In Persian).

JCE (Jamab Consulting Engineers). (2012). Report of studies on updating the water resources balance in the Lake Namak basin and its study areas. *Research report*. (In Persian).

Joshi, S. K., Rai, S. P., Sinha, R., Gupta, S., Densmore, A. L., Rawat, Y. S., & Shekhar, S. (2018). Tracing groundwater recharge sources in the northwestern Indian alluvial aquifer using water isotopes (18O, 2H and 3H). *Journal of Hydrology, 559*, 835–847. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.056.

KCE (Kavab Consulting Engineers). (1999). Studies of the first phase of the artificial recharge scheme for the Hashtgerd aquifer in the downstream of the Kurdan river. *Research report*. (In Persian).

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. Research report*. (In Persian).

Larijani, S., Noori, H., & Ebrahimian, H. (2017). Estimating Groundwater Recharge by HYDRUS-1D Model (Case Study: Hashtgerd). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 11(4), 572-585. (In Persian).

Lee, C.-H., Yeh, H.-F., & Chen, J.-F. (2008). Estimation of groundwater recharge using the soil moisture budget method and the base-flow model. *Environmental Geology*, 54, 1787–1797. https://doi.org/10.1007/s00254-007-0956-7.

Mahmoodzadeh, D., and Ketabchi, H. (2021). Groundwater Budget Estimation of an Over-exploited Aquifer Located in the Arid Climate of Iran (Part one: Comparative and Adaptive Analysis Between 1972 and 2019). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(6), 1527-1542. *(*In Persian).

MOE (Ministry of Energy). (2014). Aquifer restoration plan. *Research report. (*In Persian).

Moghimi, H. (2009). Artificial recharge of Hashtgerd plain. *Peik Noor Science Quarterly.* 1(2). (In Persian).

Mohie El Din, M. O., & Moussa, A. M. A. (2016). Water management in Egypt for facing the future challenges. *Journal of Advanced Research*, *7(3)*, 403–412. https://doi.org/10.1016/j.jare.2016.02.005.

Molle, F., Gaafar, I., El-Agha, D. E., & Rap, E. (2016). Irrigation efficiency and the Nile Delta water balance. *Water and Salt Management in the Nile Delta: Report, 9, 7*. http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.24418.43208.

Mortazavi Zadeh, F, S., Godarzi, M. (2018). Evaluation of Climate Change Impacts on Surface Runoff and Groundwater Using HadGEM2 Climatological Model (Case Study: Hashtgerd). *Journal of soil and water*, 433-446. (In Persian).

PRCE (Pars Rai Ab Consulting Engineers). (2010). Semi-detailed studies of Hashtgerd Plain "Groundwater Section". *Research report*. (In Persian).

Rajaeian, S., Ketabchi, H., & Ebadi, T. (2022). Water resources assessment in Hashtgerd study area based on system of environmental-economic accounting for water. *Amirkabir Journal of Civil Engineering, 54(9)*, 3313-3332. (In Persian).

Rajaeian, S., Ketabchi, H., & Ebadi, T. (2023). Investigation on quantitative and qualitative changes of groundwater resources using MODFLOW and MT3DMS: a case study of Hashtgerd aquifer, Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 1-26. https://doi.org/10.1007/s10668-022-02904-4.

RIWEM (Research Institute of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University). (2022). Identification of uncertainties and errors in estimation of water balance components and providing the appropriate solutions. *Research report.* Alborz Regional Water Authority. (In Persian).

Saadati, H., Ismaili, A., Sharifi, F., Mahdavi, M. (2009). Evaluation of groundwater recharge and storage in Hashtgard Plain by water budget and chemical tracking. In: Proceeding of *the 5th National Conference of Iran Watershed Sciences and Engineering*, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. (In Persian).

Safari, F., Shahbazi, A., & Ketabchi, H. (2019). Quality analysis and nitrate map of groundwater resources in Alborz province (Hashtgerd Plain). *Journal of Water and Soil Conservation*, *26*(5), 113-130. (In Persian).

Sedghi, H., Alaviany, F., Asghari moghaddam, A., Babazadeh, H. (2020). Optimization of Conjunctive Use of Surface Water, Groundwater and Wastewater Resources in Hashtgerd Plain. *Hydrogeology*, 4(2), 48-62. (In Persian).

Shahbazi, A., Safari, F., & Ketabchi, H. (2020). Modeling of management measures taken to control groundwater level depletion (Hashtgerd plain- Alborz province). *Iran-Water Resources Research*, *16*(1), 116-134. (In Persian).

Singh, A., Panda, S. N., Uzokwe, V. N. E., & Krause, P. (2019). An assessment of groundwater recharge estimation techniques for sustainable resource management. *Groundwater for Sustainable Development, 9,* 100218. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100218.

Soltani, S. S., Ataie-Ashtiani, B., Danesh-Yazdi, M., & Simmons, C. T. (2020). A probabilistic framework for water budget estimation in low runoff regions: A case study of the central Basin of Iran. *Journal of Hydrology, 586,* 124898. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124898.

TJSWS (Tehran Jahad Sazandegi Water and Soil Studies Unit). (1987). Report on the water and soil comprehensive plan of the Shur river basin. *Research report*. (In Persian).

YCE (Yekom Consulting Engineers). (2011). Report of studies on updating the comprehensive water plan of the country. *Research report*. (In Persian).