Vol 16, No. 3, Autumn 2026

University of Tehran Press

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

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

A hybrid Water Accounting-SWAT Model for Evaluating Water Consumption Reduction in the Godar-Chai River Basin

Omid Ahari[1] | Farhad Hooshyaripor[2]✉ | Hamid Kardan-Moghaddam[3]

1. Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: omidahari3752@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: Hooshyarypor@srbiau.ac.ir
3. Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran. E-mail: h.kardan@wri.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 3 May 2026
Received in revised form
4 July 2026
Accepted 29 July 2026
Published online 26 October 2026

Keywords:
Water accounting
Godar-Chai
SWAT
SUFI-2

ABSTRACT

The compilation of water balance at the basin level requires processing a large amount of information based on the use of GIS tools and an appropriate conceptual model. The aim of this study is to explain the framework provided by the United Nations for water accounting in the Godar-Chai River basin. The SWAT model for hydrological simulation of the basin and the SUFI-2 algorithm for sensitivity analysis using the Nash-Sutcliffe criterion as the objective function were calibrated and validated monthly at 5 hydrometric stations. The results showed that the calibrated model for the Godar-Chai basin has a desirable performance. One of the approaches to achieve a comprehensive understanding of the conditions of the basin, which is also evaluated in this study, is the SEEA_W environmental-economic accounting for water introduced by the United Nations. The tables for each user show a water cycle and the equation of balance and exchange of water between the field of activities and the environment. In order to complete the tables of consumption and physical supply in the agricultural sector, the necessary information to complete it has been taken from the outputs of the SWAT software. Finally, in order to increase the agricultural and economic productivity of crops in the basin, the optimal crop area change scenario was applied to the model, according to which the amount of irrigation in the basin was reduced by 55 percent, and water accounting tables for the optimal agricultural development scenario were also prepared and presented.

Cite this article: Ahari, O., Hooshyaripor, F., & Kardan-Moghaddam, H. (2026). A hybrid Water Accounting-SWAT Model for Evaluating Water Consumption Reduction in the Godar-Chai River Basin. *Journal of Water and Irrigation Management*, 16 (3), 521-537. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2026.413205.1298

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2026.413205.1298

دوره شانزدهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۵

انتشارات دانشگاه تهران

مدیریت آب و آبیاری

شاپا الکترونیکی: ۹۹۳۱-۲۳۸۲

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

مدل ترکیبی حسابداری آب–SWAT برای ارزیابی سناریوهای کاهش مصرف آب در حوضه آبریز گدارچای

امید اهری[۱] | فرهاد هوشیاری‌پور[۲]✉ | حمید کاردان مقدم[۳]

۱. گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: omidahari3752@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: Hooshyarypor@srbiau.ac.ir

۳. مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران. رایانامه: h.kardan@wri.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۰۴

کلیدواژه‌ها:

حسابداری آب

گدارچای

SWAT

SUFI-2

چکیده

تدوین بیلان آب در سطح حوضه آبریز نیاز به پردازش حجم زیادی از اطلاعات مبتنی بر استفاده از ابزار GIS و مدل مفهومی مناسب دارد. هدف این پژوهش تبیین چارچوب ارائه شده توسط سازمان ملل برای حسابداری آب در حوضه آبریز رودخانه گدار است. مدل SWAT برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه و از الگوریتم SUFI-2 برای تحلیل حساسیت با استفاده از معیار نش–ساتکلیف به‌عنوان تابع هدف در پنج ایستگاه هیدرومتری به‌صورت ماهانه واسنجی و اعتبارسنجی گردید. نتایج نشان داد که مدل واسنجی‌شده برای حوضه آبریز گدارچای از عملکرد مطلوبی برخوردار است. یکی از رویکردها جهت دست‌یابی به درک جامع از شرایط حوضه که در این مطالعه نیز موردارزیابی قرار گرفته است، حسابداری زیست‌محیطی–اقتصادی SEEA_W معرفی‌شده توسط سازمان ملل است. جداول هر کاربری یک چرخه آب و معادله تعادل و تبادل آب بین رشته فعالیت‌ها و محیط زیست را نشان می‌دهد. به‌منظور تکمیل جداول مصرف و عرضه فیزیکی در بخش کشاورزی اطلاعات لازم جهت تکمیل آن از خروجی‌های نرم‌افزار SWAT گرفته شده است. در نهایت به‌منظور افزایش بهره‌وری کشاورزی و اقتصادی محصولات در حوضه، سناریو تغییر سطح کشت بهینه به مدل اعمال شد که با توجه با آن مقدار آبیاری در حوضه ۵۵ درصد کاهش یافته است و جداول حسابداری آب برای سناریو بهینه توسعه کشاورزی نیز تهیه و ارائه می‌شود.

استناد: اهری، امید؛ هوشیاری‌پور، فرهاد و کاردان‌مقدم، حمید (۱۴۰۵). مدل ترکیبی حسابداری آب–SWAT برای ارزیابی سناریوهای کاهش مصرف آب در حوضه آبریز گدارچای. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۶ (۳)، ۵۲۱-۵۳۷. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2026.413205.1298

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

۱. مقدمه

بحران آب در بسیاری از حوضه‌های آبریز سبب شده تا جمعیت زیادی با سطح نامتناسب دسترسی به آب زندگی در شرایط چالش را تجربه کنند. بحران‌های بی‌رویه آب می‌تواند پیشرفت‌های توسعه‌ای را به چالش کشیده و سرمایه‌گذاری در بخش‌های اقتصادی و اجتماعی را به خطر اندازد (Ebrahimivand *et al.*, 2023). با توجه به محدودیت‌های منابع آب، افزایش مصرف آب و وقوع خشک‌سالی‌های متناوب، صرفه‌جویی در مصرف آب و استفاده معقول و کارامد از منابع آب موجود امری ضروری است (Moghaddam *et al.*, 2025). افزایش جمعیت باعث شده است که مصرف آب در بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی افزایش یابد. دریاچه ارومیه به‌عنوان بزرگ‌ترین دریاچه داخل ایران، در دو دهه اخیر به‌دلیل بارگذاری خارج از ظرفیت حوضه و مصرف بیش از ظرفیت منابع آب تجدیدپذیر با شرایط بحرانی مواجه شده است. حوضه رودخانه گدارچای یکی از پراهمیت‌ترین زیرحوضه‌های این منطقه است که به‌عنوان چهارمین رود مهم این حوضه بالغ بر ۸ درصد از حقآبه زیست‌محیطی دریاچه را تأمین می‌نماید. از این منظر تأمین حقابه موردنظر با تعدیل مصارف در حوضه مستلزم تعیین سناریوهای مختلف جهت کاهش مصارف بالاخص در بخش کشاورزی در حوضه است (Mirdashtvan *et al.*, 2021). رویکردهای مختلفی در جهت ارزیابی مناسب و قابل‌اتکا در برنامه‌ریزی منابع آب ارائه شده است که یکی از این رویکردها استفاده از مفهوم حسابداری آب برای تعیین ظرفیت‌ها، منابع و مصارف اب به‌صورت یکپارچه است. Mahdavi *et al.* (2019) در مطالعه‌ای با استفاده از سیستم حسابداری زیست‌محیطی-اقتصادی آب به ارزیابی یکپارچه آبخوان آذرشهر به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری در بعد امنیت آبی پرداختند. مفهوم امنیت آب، با استفاده از شاخص‌های مختلف در سه بعد منابع آب، اقتصاد و اجتماع طبقه‌بندی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که منطقه به‌شدت تحت تأثیر عدم پایداری و عدم تعادل بین منابع آب و مصرف است. در این راستا از یک مدل دینامیکی، با استفاده از پنج گزینه سیاستی مختلف را برای بهبود امنیت آب در منطقه استفاده شد. یکی از این سیاست‌های تدوین‌شده کاهش تدریجی آبیاری درمنطقه کشاورزی از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ و به‌دنبال آن کاهش دو درصدی مداوم از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ بود که منجر به کنترل شوری آب در منطقه شد (Mahdavi *et al.*, 2019). در مطالعه دیگری به‌منظور ارزیابی امنیت آبی براساس نشانگرهای استخراج‌شده در محدوده مطالعاتی رفسنجان، از چارچوب حسابداری آب به‌روش زیست‌محیطی-اقتصادی استفاده شد. این مطالعه برای یک دوره پنج ساله انجام گرفت که نتایج ارزیابی نشانگرها نشان داد که تنش آبی بسیار شدیدی در منطقه حاکم است که بخش کشاورزی بیش‌ترین تأثیر را در تشدید تنش آبی به خود اختصاص می‌دهد (Bagheri & Babaeian, 2020). مطالعه‌ای در حوضه پلاسجان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای (WaPOR) و شاخص‌های تبخیر و تعرق، با محاسبه میزان منابع ورودی، آب مفید و غیرمفید، بازگشت آب به منابع سطحی و زیرزمینی و کسری مخزن آب زیرزمینی نشان داد که چارچوب +WA می‌تواند عدم‌قطعیت محاسبات تراز آب را کاهش دهد و تصویر دقیق‌تری از وضعیت منابع آب ارائه دهد (Kivi *et al.*, 2022). معاشری و همکاران (۱۴۰۲) ابزاری برای ارزیابی استراتژی‌های مدیریتی کشاورزی در رابطه با پیوند امنیت آب، غذا و انرژی ارائه کرد. استفاده از چارچوب حسابداری آب +WA نشان داد که از میان چهار سناریوی اصلی بهبود بهره‌وری، سناریوهای تغییر رقم و تیمار آبیاری، تغییر سطح زیرکشت و کشت دیم با آبیاری تکمیلی دارای تأثیر مثبت در شاخص بهره‌وری آب، غذا و انرژی بودند (Moghaddam *et al.*, 2025).

مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که استفاده از چارچوب حسابداری آب می‌تواند نگاه کلان در ارزیابی سیستماتیک را ارائه دهد. این موضوع با درنظرگرفتن ابعاد مختلف می‌تواند در کاهش عدم‌قطعیت نتایج تأثیرگذار باشد. در این راستا در

این مطالعه سعی شده تا با درک مفهوم حقابه زیست‌محیطی متاثر از آورد رودخانه گدارچای و تلفیق مدل‌سازی هیدرولوژیکی در راستای حسابداری آب، ارزیابی سناریوهای متناسب با حوضه ارائه و مورداستفاده قرار گیرد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش، چارچوب حسابداری زیست‌محیطی برای ارزیابی منابع آب در مقیاس حوضه آبریز رودخانه گدار پیاده‌سازی می‌شود. این چارچوب که براساس استانداردهای بین‌المللی برای ارزیابی منابع آب و اثرات زیست‌محیطی آن طراحی شده است، در این مطالعه برای تحلیل دقیق‌تر وضعیت منابع آب و تعاملات آن‌ها در حوضه‌های آبریز مورداستفاده قرار می‌گیرد. برای شبیه‌سازی منابع آب و ارزیابی سناریوهای مختلف، از مدل هیدرولوژیکی SWAT[1] استفاده خواهد شد. این مدل به‌طور گسترده‌ای برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبخیز و ارزیابی اثرات مدیریت منابع آب بر کیفیت و کمیت آب در مناطق مختلف به‌کار می‌رود. داده‌های ورودی این مدل شامل اطلاعات اقلیمی، داده‌های هیدرولوژیکی، پوشش اراضی و فعالیت‌های انسانی (مانند مصرف آب کشاورزی) خواهد بود. یکی از سناریوهای ارزیابی‌شده در این پژوهش، تغییر سطح کشت محصولات است که به‌عنوان یک سناریوی بهینه برای کاهش مصرف آب در نظر گرفته می‌شود. تغییر سطح کشت می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر مصرف آب کشاورزی و در نتیجه منابع آب حوضه داشته باشد. در این پژوهش، مدل SWAT برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف تغییر الگوی کشت و تحلیل اثرات آن‌ها بر منابع آب حوضه گدار اجرا خواهد شد. در نهایت، با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها و تجزیه‌وتحلیل‌های مختلف، یک الگوی تطبیقی حسابداری آب برای حوضه آبریز رودخانه گدار پیشنهاد می‌شود. این الگو به‌طور ویژه به نیازهای زیست‌محیطی و مدیریت منابع آب در این منطقه توجه دارد و می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای بهبود مدیریت منابع آب در این حوضه استفاده شود.

۲. ۱. منطقه موردمطالعه

دشت‌های اشنویه و نقده در محدوده جنوب استان آذربایجان‌غربی در شمال‌غرب کشور ایران واقع شده است. این محدوده‌های مطالعاتی در حوضه رودخانه دائمی گدارچای از زیر حوضه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه قرار دارد (شکل ۱).

منطقه مطالعاتی در شمال‌غربی ایران در استان آذربایجان‌غربی از سمت شرق به دریاچه ارومیه و از غرب به کوه‌های لیوالربیل و نازدار داغ از شمال به کوه حاجی عبدالله و جنوب به کوه سپیلکان محدود شده، این حوضه در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۴ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۴۲ دقیقه شرقی واقع شده است. به‌طورکلی منطقه موردمطالعه کوهستانی، ارتفاع متوسط آن حدود ۲۳۸۰ متر از سطح آزاد آب دریا و مساحت آن نیز برابر ۲۲۳۰ کیلومترمربع است. یکی از زیر حوضه‌های مهم واقع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، زیر حوضه رودخانه گدارچای می‌باشد. رودخانه گدارچای با طولی بیش از ۱۰۰ کیلومتر یکی از رودخانه های مهم حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد. حوضه آبریز این رودخانه با مساحت ۲۰۹۲ کیلومترمربعی در غرب استان آذربایجان‌غربی واقع شده است و از شمال به حوضه آبریز باراندوزچای، از شرق و جنوب شرقی به حوضه آبریز مهابادچای و از جنوب به حوضه آبریز زاب محدود می‌شود. این رودخانه در ابتدا از کوه‌های دالامپر با ارتفاع ۳۴۵۱ متری واقع در ۳۰ کیلومتری شمال‌غرب شهر اشنویه سرچشمه گرفته و پس از طی مسافتی طولانی و پیوستن به شاخه‌های متعدد به آن و عبور از دو مرکز جمعیتی مهم اشنویه و نقده و هم‌چنین تأمین آب موردنیاز اراضی کشاورزی روستاهای مسیر خود، با حرکت از غرب به شرق در نهایت به قسمت جنوبی دریاچه ارومیه تخلیه می گردد.

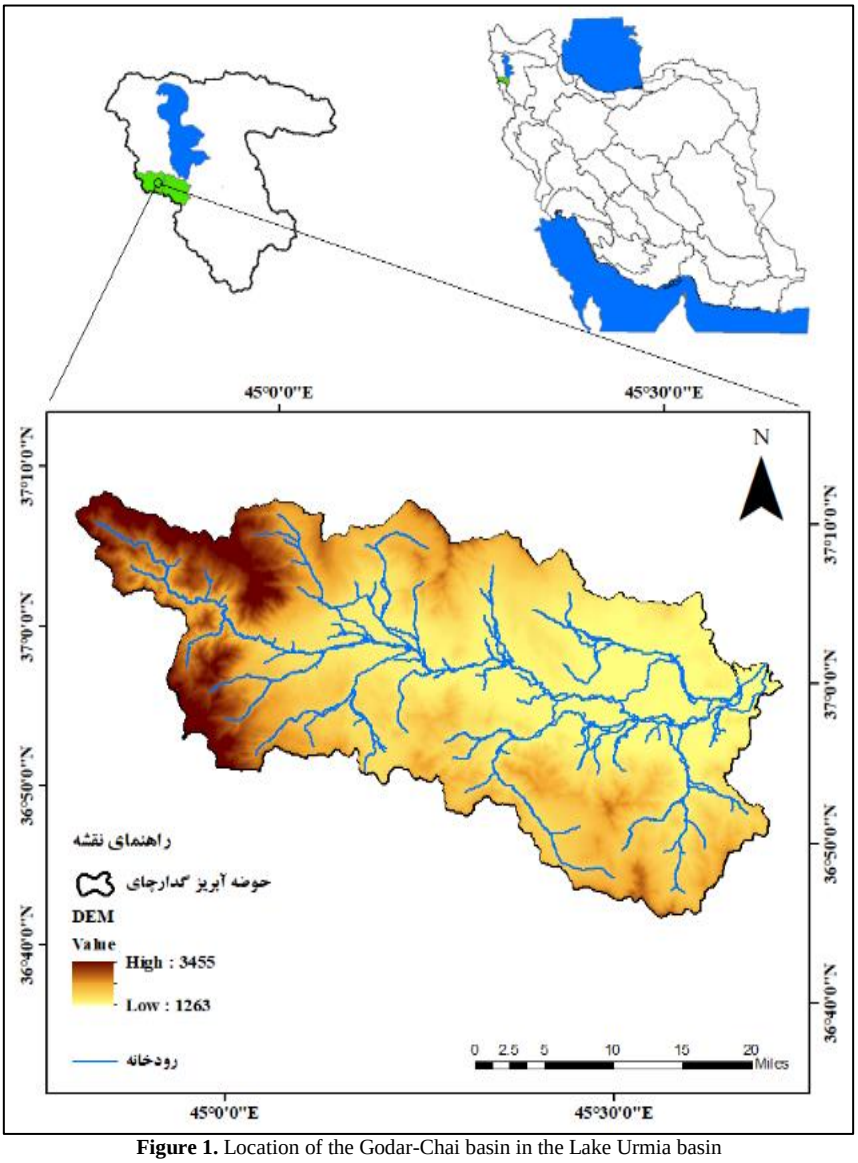


Figure 1. Location of the Godar-Chai basin in the Lake Urmia basin

۲. ۲. حسابداری آب

حسابداری آب به فرایند اندازه‌گیری، ارزیابی و گزارش‌گیری منابع آب، مصرف آن‌ها و توزیع آن‌ها در یک منطقه مشخص اطلاق می‌شود (Karimi *et al.*, 2013). این مفهوم به‌طور خاص در مدیریت منابع آب به‌کار می‌رود تا از طریق جمع‌آوری داده‌ها و تحلیل‌های کمی، وضعیت منابع آب و الگوهای مصرف آن‌ها به‌طور دقیق‌تر شبیه‌سازی و پیش‌بینی شود. حسابداری آب معمولاً شامل مقایسه داده‌های مربوط به منابع آب (آب‌های سطحی و زیرزمینی) با میزان مصرف در بخش‌های مختلف مانند کشاورزی، صنعت، و شرب است (Karimi & Bastiaanssen, 2015). این ابزار به مدیران و سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا تصمیم‌های بهینه‌ای در زمینه تخصیص منابع آب اتخاذ کنند و سیاست‌های پایدارتری برای کاهش اتلاف آب، مدیریت بحران‌ها و حفظ تعادل اکولوژیکی در منطقه اتخاذ کنند. در بسیاری از موارد، حسابداری آب به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی، تغییرات اقلیمی و توسعه پایدار در حوضه‌های آبریز استفاده می‌شود.

حسابداری زیست‌محیطی به فرایند اندازه‌گیری، ارزیابی و گزارش‌گیری از تأثیرات زیست‌محیطی فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی بر منابع طبیعی و اکوسیستم‌ها اطلاق می‌شود (Bagheri & Babaeian, 2020). این سیستم اطلاعات اقتصادی و زیست‌محیطی را به‌طور یکپارچه با استفاده از چارچوب حساب‌های ملی تلفیق می‌کند تا روابط بین بخش محیط‌زیست و بخش‌های مختلف اقتصادی را بررسی کند. حسابداری زیست‌محیطی برای آب (SEEAW) نیز نسخه خاصی از این سیستم است که به‌طور ویژه به مدیریت منابع آب و تأثیرات آن بر بخش‌های مختلف اقتصاد می‌پردازد. سیستم حسابداری محیط‌زیست و اقتصاد پیرو سیستم حساب‌های ملی (SNA) است و تلاش می‌کند تا داده‌های محیطی و اقتصادی را با هم ترکیب کند. این سیستم از طریق مجموعه‌ای از تعاریف، طبقه‌بندی‌ها، حساب‌های آماری و جداول، امکان بررسی تعاملات بین بخش‌های محیط‌زیست و اقتصاد را فراهم می‌آورد (Akhtar & Cavalletti, 2025). در این راستا، SEEAW به‌طور خاص به تشریح و تحلیل تمام جنبه‌های مربوط به منابع آب پرداخته و یک چارچوب مفهومی برای سازماندهی داده‌های اقتصادی و هیدرولوژیکی ارائه می‌دهد. هدف این سیستم، استانداردسازی مفاهیم و روش‌ها در حسابداری آب است که به تحلیل پایدار توزیع آب در بخش‌های مختلف اقتصادی و تأثیر آن‌ها بر منابع آب کمک می‌کند (Hashemy Shahdany & Rejaie, 2026).

سیستم SEEAW با استفاده از داده‌ها و جداول استاندارد، تعاملات مهم زیست‌محیطی و اقتصادی را در زمینه منابع آب موردبررسی قرار می‌دهد و امکان تحلیل‌هایی نظیر مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM) را فراهم می‌آورد (Esen & Hein, 2020). این سیستم به‌ویژه بر جریان‌هایی که ممکن است منابع آب را تحت تأثیر قرار دهند و سیاست‌های زیست‌محیطی که موجودیت آب را تهدید می‌کند، تمرکز دارد. ازآنجایی‌که SEEAW به‌طور خاص بر منابع آب متمرکز است، جزئیات بیش‌تری نسبت به سیستم SEEA ۲۰۰۳- ارائه می‌دهد و ساختاری یکپارچه برای ارزیابی منابع آب در سطوح مختلف اقتصادی فراهم می‌آورد.

Table 1. Indicators used in environmental and economic accounting

ابعاد	نشانگر
منابع آب	حجم منابع آب تجدیدپذیر داخلی (میلیون مترمکعب) جریان انتقالی به خارج حوضه (میلیون مترمکعب) مجموع منابع آب تجدیدپذیر طبیعی (میلیون مترمکعب) وابستگی به منابع آب برون مرزی (درصد) وابستگی به آب زیرزمینی (درصد) شدت مصرف آب (نسبت آب مصرفی به آب تجدیدپذیر داخلی)
اقتصادی	مصرف در پخش کشاورزی به کل مصارف (درصد) بهره وری اقتصادی آب در منطقه (ریال به‌ازای هر مترمکعب) بهره وری اقتصادی آب در بخش کشاورزی (ریال به‌ازای هر مترمکعب) اهمیت نسبی کشاورزی در اقتصاد تغییرات حاشیه ای بهره وری اقتصادی آب در بخش کشاورزی (ریال به‌ازای هر مترمکعب)
اجتماعی	جمعیت (نفر) سرانه آب تجدید پذیر (مترمکعب به‌ازای هر نفر) اشتغال در بخش کشاورزی (درصد) بهره وری نیروی کار در بخش کشاورزی (ریال به‌ازای هر نفر) بهره وری اشتغال در بخش کشاورزی (نفر به‌ازای هر مترمکعب) سرانه درآمد (ریال به‌ازای هر نفر)

۲. ۳. مدل‌سازی هیدرولوژیکی SWAT

برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه آبریز رودخانه گدار، مدل SWAT از ورودی‌های مختلفی استفاده می‌کند که شامل اطلاعات فیزیوگرافی، خاک، کاربری اراضی، هیدرومتری، اقلیمی و کشاورزی است. این داده‌ها به مدل امکان می‌دهند تا پویایی‌های آب و منابع آن را در مقیاس حوضه و زیرحوضه‌ها به دقت شبیه‌سازی کند. ورودی‌های مورداستفاده به شرح زیر است:

• لایه رقومی DEM (مدل ارتفاعی دیجیتال): برای تولید اطلاعات فیزیوگرافی حوضه‌ها و زیرحوضه‌ها از لایه DEM با اندازه سلولی ۳۰ متر استفاده شده است. این لایه به مدل کمک می‌کند تا شیب زمین، جریان‌های سطحی و ویژگی‌های فیزیکی حوضه‌ها را به‌دقت شبیه‌سازی کند (شکل ۲-الف).

• نقشه خاک: مدل SWAT نیاز به داده‌های دقیق از خصوصیات خاک در حوضه دارد. این ویژگی‌هایی مانند عمق خاک، ساختمان خاک، عمق لایه‌ها و دیگر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک است. این داده‌ها به مدل کمک می‌کنند تا فرایندهای هیدرولوژیکی مانند نفوذ آب، تبخیر و تعرق و رواناب سطحی را به‌دقت شبیه‌سازی کند (شکل ۲-ب).

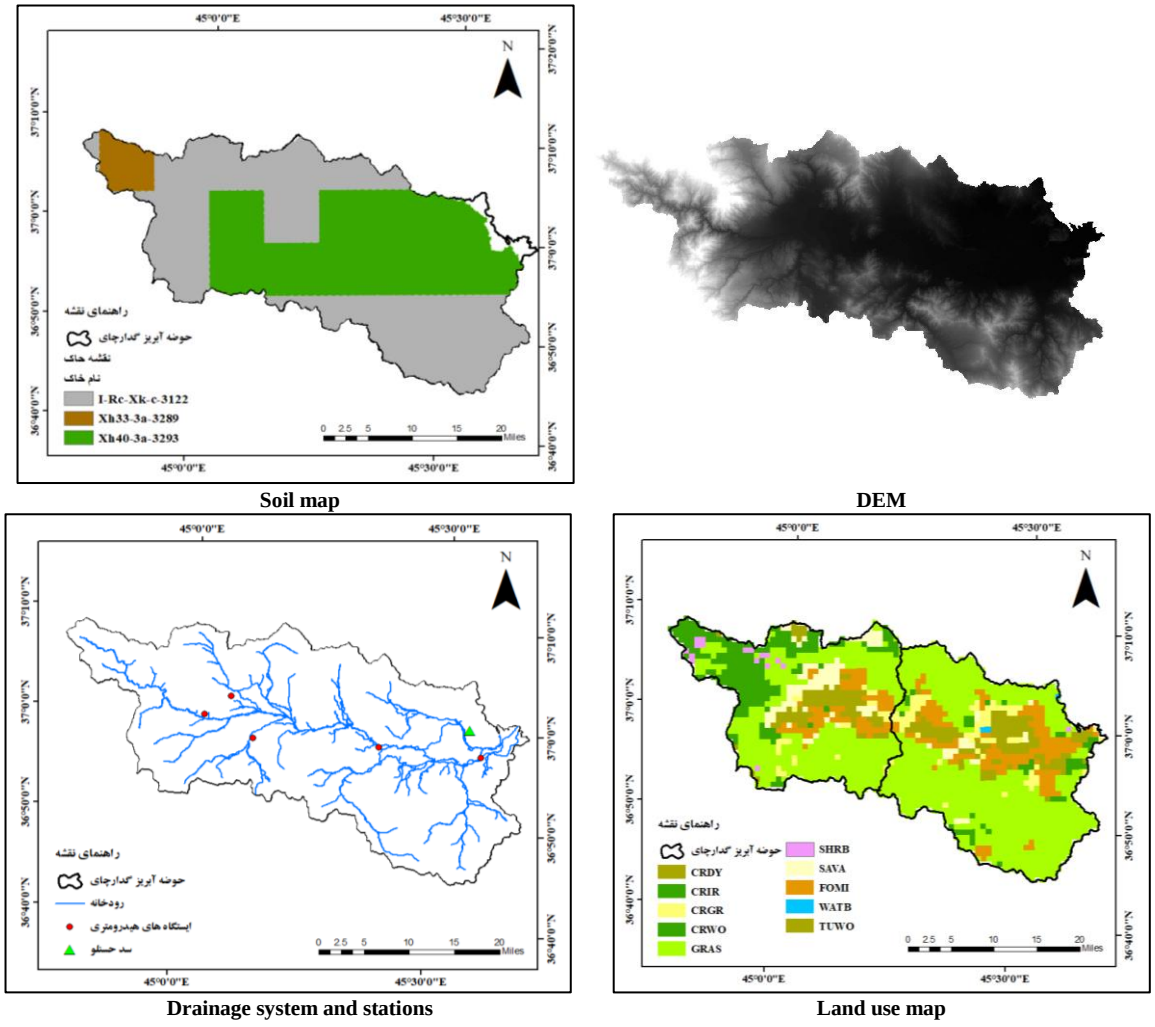


Figure 2. Data and information required for hydrological simulation with the SWAT model

• نقشه کاربری اراضی: کاربری اراضی یکی از عوامل کلیدی است که بر فرایندهای هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی تأثیرگذار است. در این پژوهش، داده‌های مربوط به کاربری اراضی از لایه‌های کاربری اراضی استفاده‌شده تا تأثیر آن بر رواناب، تبخیر و تعرق، فرسایش سطحی و انتقال عناصرغذایی شبیه‌سازی شود. مدل SWAT از این داده‌ها برای شبیه‌سازی پاسخ‌ها و فرایندهای مختلف در هر زیرحوضه استفاده می‌کند (شکل ۲–ج).

• اطلاعات هیدرومتری: اطلاعات مربوط به جریان آب در ایستگاه‌های هیدرومتری یکی از ورودی‌های اساسی برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل است. در این پژوهش، آمار بلندمدت رواناب ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در سطح حوضه، شامل ایستگاه‌های بهراملو، پی‌قلعه، اشنویه، چپرآباد و نقده جمع‌آوری و استفاده شده است. این داده‌ها به مدل کمک می‌کنند تا جریان‌های سطحی و میزان رواناب در سطح حوضه را به دقت شبیه‌سازی و تحلیل کند (شکل ۲–د).

• اطلاعات اقلیمی: مدل SWAT برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی به داده‌های اقلیمی روزانه نیاز دارد که شامل اطلاعاتی مانند بارش، دما، رطوبت و دیگر پارامترهای اقلیمی است. این داده‌ها برای شبیه‌سازی فرایندهای تبخیر و تعرق، رواناب سطحی و سایر متغیرهای هیدرولوژیکی در مدل SWAT به‌کار می‌روند.

• داده‌های کشاورزی و آبیاری: برای شبیه‌سازی تأثیر کشاورزی و آبیاری بر منابع آب، اطلاعات مربوط به الگوهای کشت، سطح زیر کشت و روش‌های آبیاری جمع‌آوری و به مدل وارد می‌شود. این داده‌ها به مدل SWAT کمک می‌کنند تا مصرف آب کشاورزی و تأثیر آن بر منابع آب سطحی و زیرزمینی را شبیه‌سازی کند (شکل ۳). لازم به ذکر است در این پژوهش علاوه بر شبیه‌سازی وضعیت موجود، سناریو تغییر الگوی کشت با هدف کاهش حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد مصرف آب کشاورزی در حوضه نیز شبیه‌سازی می‌شود. این میزان کاهش مصرف براساس مصوبات کارگروه ملی و ستاد احیای دریاچه ارومیه اعمال خواهد شد. الگوی کشت موردنظر در این سناریو، از نتایج پژوهش‌های پیشین (Ghorbanian, 2021) که بر مبنای اجرای مدل بهینه‌ساز برای تعیین بهترین الگوی کشت با هدف کسب بیش‌ترین منافع اجتماعی و اقتصادی در بین جامعه کشاورزان منطقه به‌دست‌آمده استخراج شده است (شکل ۳).

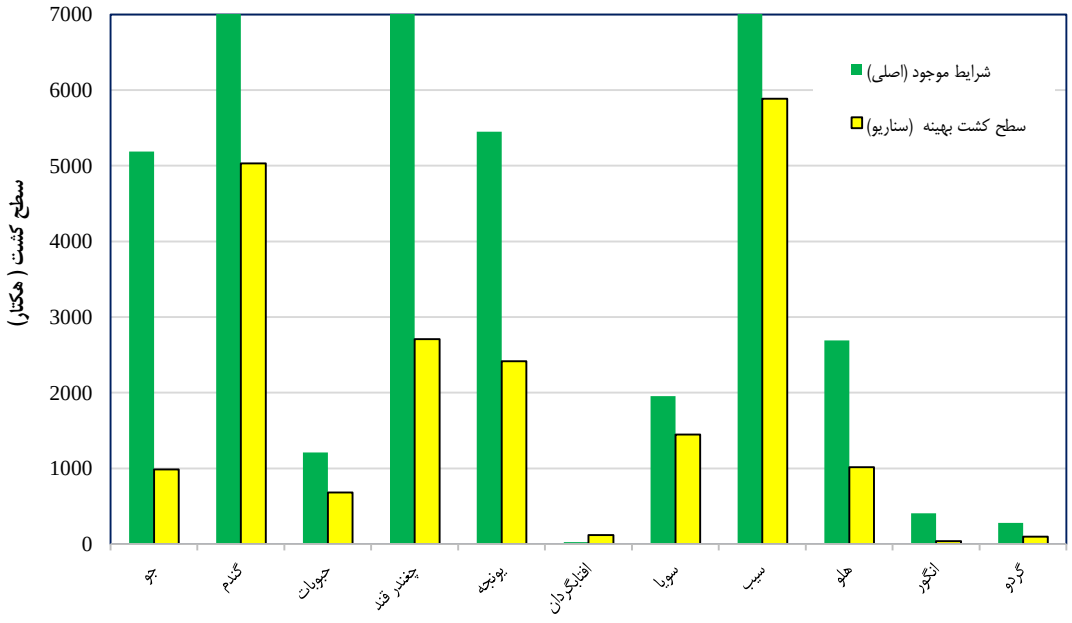


Figure 3. Cultivation pattern of agricultural and horticultural crops under current and optimal conditions (40% reduction in water consumption)

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳. ۱. شبیه‌سازی هیدرولوژیکی

ابتدا پیکره‌بندی مدل جهت استخراج شبکه آبراه‌ها و زیرحوضه‌های حوضه آبریز گدارچای با استفاده از نقشه DEM منطقه انجام گرفت. با واردکردن ایستگاه های هیدرومتری و خروجی‌های زیرحوضه‌ها در نهایت ۲۰ زیرحوضه برای منطقه مطالعه به‌دست آمد. سد موجود در منطقه مطالعاتی با توجه به موقعیت مکانی آن بر روی شبکه جریان قرار داده شد. HRUها براساس ترکیب انواع خاک، شیب‌بندی و کاربری اراضی تعیین می‌گردد که در این مطالعه تعداد این HRUها ۲۶۱ عدد حاصل شد. محصولات غالب منطقه براساس سطوح زیر کشت به مدل معرفی شده و نوع منبع آبیاری محصولات هم با توجه به اطلاعات موجود منطقه در دو دسته آب زیرزمینی و سطحی به مدل وارد شده است.

رواناب شبیه‌سازی شده براساس نتایج پنج ایستگاه هیدرومتری برای دوره زمانی ۱۱ ساله مورد واسنجی و اعتبار سنجی قرار گرفت. دوره واسنجی در سه سال اول شبیه‌سازی تعریف شده (از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ میلادی) و پس از آن ۹ سال آتی به‌عنوان دوره اعتبارسنجی درنظر گرفته شد. نتایج شاخص های عملکرد مدل شامل نش ساتکلیف (NS)، ضریب تعیین (R^2)، شاخص های باند عدم قطعیت p-factor و r-factor در جدول (۲) آمده است. نتایج شاخص‌های عملکردی، تا حد قابل‌قبولی نشان‌دهنده دقت کافی مدل در حیطه مطالعات پیچیده منابع آب است. به‌عنوان مثال، شاخص ضریب تعیین بیش از ۰/۶۵ و شاخص نش بیش از ۰/۶۱ نشان از عملکرد قابل‌قبول مدل است. هم‌چنین شاخص‌های باند عدم قطعیت مدل‌سازی یعنی r-factor کم‌تر از ۱/۰۷ و p-factor بیش از ۰/۵۳ بیانگر حد اطمینان نتایج به‌دست‌آمده است.

Table 2. Model performance indicators for simulating flow at basin hydrometric stations

ایستگاه	NS	R^2	p-factor	r-factor
اشنویه	۰.۶۷	۰.۶۵	۰.۶۴	۰.۹۵
پی‌قلعه	۰.۶۱	۰.۷۷	۰.۶۵	۱
نقده	۰.۷۷	۰.۸	۰.۵۳	۰.۷۵
چپرآباد	۰.۶۶	۰.۷۳	۰.۸۷	۱.۰۷
پل بهراملو	۰.۷۶	۰.۸۱	۰.۷۲	۰.۹۸

هم‌چنین در شکل (۴)، نتایج آبدهی شبیه‌سازی‌شده در مقایسه با مشاهداتی برای بخشی از دوره شبیه‌سازی در ایستگاه‌های هیدرومتری ارائه شده است.

دوره سه ساله به‌منظور شناسایی بهتر مشخصات حوضه توسط مدل و کسب نتایج دقیق تر در نظر گرفته می‌شود. در فرایند شبیه‌سازی، از مدل SWAT-CUP و الگوریتم SUFI-2 برای واسنجی و اعتبارسنجی جریان رودخانه، تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات غالب حوضه موردمطالعه استفاده شد. در جدول (۳) میزان متوسط عملکرد مشاهداتی در حوضه و شبیه‌سازی‌شده در مدل را نشان می‌دهد.

Table 3. Yield of Godar-Chai Basin crops (tons per hectare)

محصولات	گندم	آفتابگردان	هلو	سویا	چغندرقند	حبوبات	گردو	انگور	جو	سیب	یونجه
شبیه‌سازی	۴.۸۷	۱.۶۹	۱۵.۸	۳.۰۳	۴۹.۱۲	۱.۳	۲.۰	۱۰.۹۲	۳.۲	۱۷.۲۷	۷.۸
مشاهداتی	۴۶	۱.۵۴	۱۵.۲	۳۶۷	۴۶۶	۱.۲	۱.۹	۱۰.۱	۳.۰	۱۷.۴	۷.۴۵

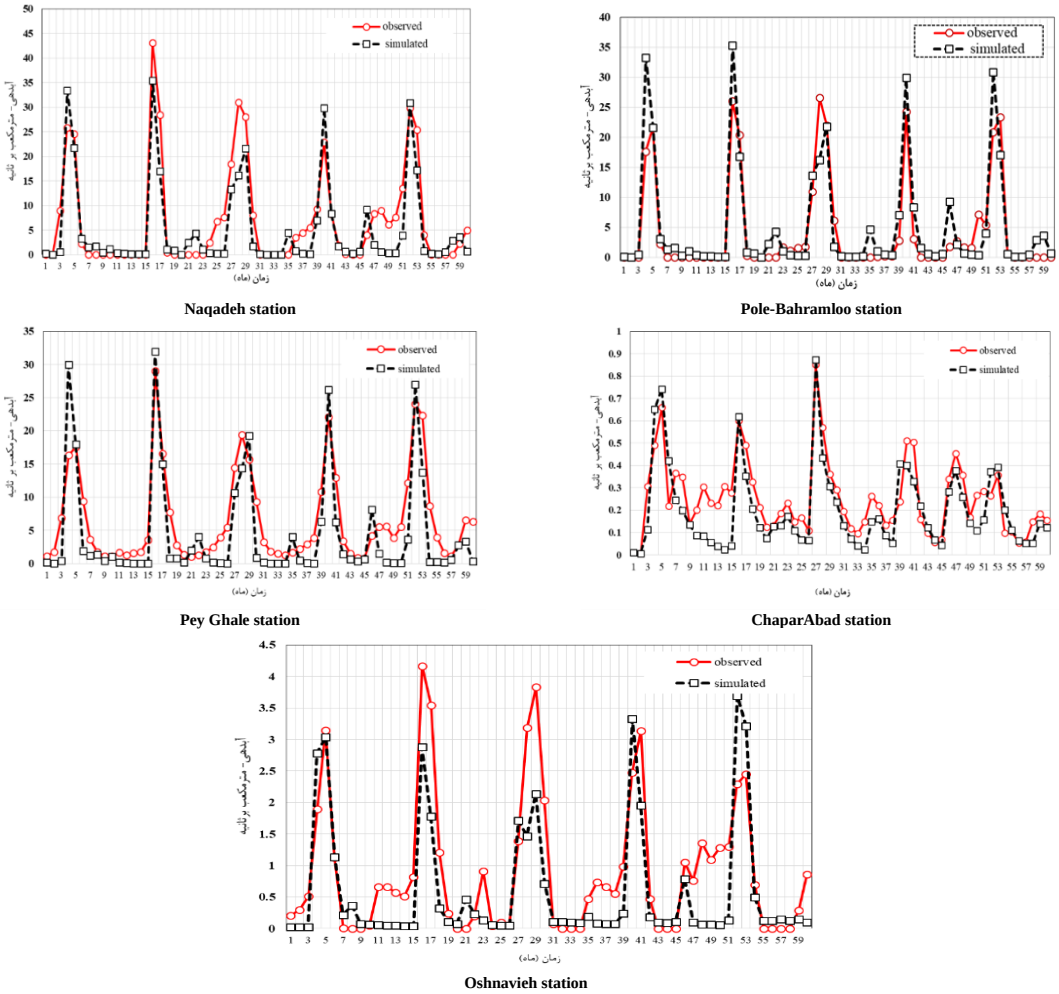


Figure 4. Runoff variation at the hydrometric stations

۳. ۲. تدوین سیستم حسابداری آب

با توجه به هدف تدوین سیستم حسابداری آب، تکمیل جداول (حساب‌های) عرضه و مصرف فیزیکی و هیبریدی و هم‌چنین جدول دارایی‌های آب، مبتنی بر آمار و اطلاعات و نتایج شبیه‌سازی هیدرولوژیکی انجام گرفت.

الف) جدول دارایی آب: براساس تغییرات صورت‌گرفته در مقادیر فیزیکی و حجمی ذخایر آبی موجود در منطقه مطالعاتی در ابتدا و انتهای دوره حسابداری تکمیل می‌شود. مطابق جدول (۴)، ردیف اول نشان‌دهنده ذخایر آبی موجود در منطقه در ابتدای دوره به شکل آب‌های سطحی و زیرزمینی و رطوبت خاک می‌باشد. منابع آب سطحی خود متشکل از آب موجود در دریاچه‌ها، سدها، رودخانه‌ها و یا به‌صورت یخ و برف می‌باشند. ذخایر آب سطحی شامل ذخیره سدها و دریاچه‌ها براساس آخرین آمار ثبت‌شده و رطوبت خاک ابتدای دوره از خروجی نرم‌افزار SWAT گرفته شده است. بخش دوم جدول (۴)، جریانات ورودی به محدوده موردمطالعه را نشان می‌دهد، این جریان‌ها شامل جریان‌های بازگشتی، بارندگی، جریانات ورودی که مجموعی از جریان‌های موجود در محدوده می‌باشد. جریانات بازگشتی در این جدول همان مقادیر فیزیکی آب عرضه‌شده توسط رشته فعالیت‌ها به منابع حوضه می‌باشد. بخش سوم جدول (۴)، جریانات خروجی از محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد، این جریان‌ها شامل برداشت‌ها، تبخیر و تعرق و جریانات خروجی از حوضه می‌باشد. برداشت از منابع در رشته فعالیت‌های مختلف با توجه به

آنچه که در جدول مصرف فیزیکی ارائه شد، ثبت گردیده است. تبخیر و تعرق واقعی حوضه با توجه به مدل SWAT برآورد شد. جریانات خروجی ازحوضه نیز مانند جریانات ورودی به دو دسته تقسیم می‌شوند، دسته اول انتقال آب به خارج از محدوده مطالعاتی، دسته دوم برداشت آب از دیگر منابع موجود در حوضه که همان پساب و زه‌آب می‌باشد. واضح است که این روش از حسابداری آب نیاز به اطلاعات متنوعی از بخش‌های مختلف مصرف‌کننده‌های آب دارد.

اطلاعات کشاورزی، دامپروری، زه‌آب خروجی از فاضلاب، قیمت فروش محصولات، هزینه تولید محصولات، جداول داده–ستانده و ارزش افزوده در مقیاس شهرستانی موجود بود و به‌منظور تکمیل جداول مربوطه از تبدیل مقیاس استفاده شد. هم‌چنین موجودنبودن ارزش آب، زه‌آب و پساب استفاده شده در کلیه رشته فعالیت‌ها منجر به خالی‌گذاشتن این بخش از جداول شده است. میزان دقیق آب بازگشتی در بخش‌های مختلف شرب و هم‌چنین جزئیات میزان پساب فروخته شده به فعالیت‌های مختلف ثبت نشده که منجر به خالی‌گذاشتن و نپرداختن به جزئیات در بخش‌های مختلفی از جدول (۴) شده است.

Table 4. Total basin water assets (mcm)

	منابع آب سطحی		آب زیرزمینی	رطوبت خاک	کل
	سد حسنلو	رودخانه			
شروع دوره	۶۱.۳۸	۳۸۰	۱۶۱	۷.۷۳	۶۱۰.۱۱
ورودی۱					
جریان بازگشتی۱–الف	۰	۱.۳۸۶	۳.۱۴	۰.۰۹	۴.۶۲
بارندگی۱–ب	۰.۸۴	۶۰.۳	۰	۱۴۲.۶۶	۲۰۳.۸
خروجی۲					
برداشت آب۲–الف	۵۷.۱	۳.۷۳	۱۸.۹	۰.۰۹	۷۹.۸
تبخیر/تبخیر تعرق واقعی۲–ب	۱.۳۶	۱۴	۰	۶۱.۴	۷۶.۸
پایان دوره			۱۴۲.۱	۵.۹۴	

ب) جدول مصرف فیزیکی آب: جدول مصرف فیزیکی، منبع مصرف آب را در دو بخش آبی که هر رشته فعالیت از محیط زیست می‌گیرد و استفاده می‌کند (تحت عنوان جریان از محیط زیست به اقتصاد) و آبی که هر رشته فعالیت از سایر واحدهای اقتصادی گرفته و به مصرف می‌رساند (تحت عنوان جریان در اقتصاد) موردبررسی قرار می‌دهد. در جدول مصرف فیزیکی برداشت آب به‌عنوان آبی است که از هر منبع به‌طور دائم یا موقت (آب‌های موجود در محدوده مطالعاتی که در حوضه شامل آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی، رطوبت خاک و آب‌های واردشده به محدوده مطالعاتی مثل انتقال آب) در یک زمان معین برای مصرف در هر یک از رشته فعالیت‌ها حذف می‌شود. در بخش کشاورزی با توجه به اهمیت کاربری‌ها در مصرف آب، به بررسی آب مصرفی محصولات غالب حوضه با توجه به بیش‌ترین سطوح زیرکشت پرداخته شده است. مقدار آب برداشت‌شده از محیط زیست برای هر محصول به تفکیک منبع (آب سطحی، آب زیرزمینی، آب خاک) در جدول (۵)، از خروجی‌های مدل SWAT گرفته شده است.

Table 5. Physical water consumption of the entire basin in the agricultural sector (mcm)

	پارامتر	گندم	جو	یونجه	افتابگردان	حبوبات	چغندرقند	سویا	هلو	گردو	انگور	سیب	کل مصرف
برداشت	برداشت	۰.۲۰۰	۰.۰۱۱	۰.۲۰	۰.۰۷	۰.۱۳	۰.۲۴	۰.۰۳	۲.۳۶	۱.۵۴	۱.۳۶	۳.۸۰	۹.۹۴
	از آب زیرزمینی	۰.۱۲۶	۰.۰۰۷	۰.۱۲۶	۰.۰۴۴	۰.۰۸۲	۰.۱۵۱	۰.۰۱۹	۱.۴۸۷	۰.۹۷۰	۰.۸۵۷	۲.۳۹۴	۶.۲۶
	از منابع سطحی	۰.۰۷۲	۰.۰۰۴	۰.۰۷۲	۰.۰۲۵	۰.۰۴۷	۰.۰۸۶	۰.۰۱۱	۰.۸۵۰	۰.۵۵۴	۰.۴۹۰	۱.۳۶۸	۳.۵۸
	از رطوبت خاک	۰.۰۰۲	۰.۰۰۰	۰.۰۰۲	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۰۲	۰.۰۰۰	۰.۰۲۴	۰.۰۱۵	۰.۰۱۴	۰.۰۳۸	۰.۱۰
	کل برداشت آب	۰.۲۰۰	۰.۰۱۱	۰.۲۰۰	۰.۰۷۰	۰.۱۳۰	۰.۲۴۰	۰.۰۳۰	۲.۳۶۰	۱.۵۴۰	۱.۳۶۰	۳.۸۰۰	۹.۹۴

در حوضه مصارف آب شهری تماماً از آب زیرزمینی تأمین می‌شود. این منابع آب شامل مصارف شرب، بهداشت و خدمات است. در جدول (۶) تقسیم‌بندی مصارف در این بخش در دو منطقه نقده و اشنویه ارائه شده است.

Table 6. Water consumption in the drinking and sanitation and service sectors for Oshnavieh and Naqadeh (mcm)

برداشت	اشنویه	نقده	کل مصرف
برداشت برای مصرف	۴.۵	۸.۸	۱۳.۳۰
از آب زیرزمینی	۴.۵	۸.۸	۱۳.۳
از منابع سطحی	۰.۰	۰.۰	۰.۰
از رطوبت خاک	۰.۰	۰.۰	۰.۰

ج) جدول عرضه فیزیکی: جدول عرضه فیزیکی در مقابل جدول مصرف فیزیکی قرار داشته به‌طوری‌که این جدول، آبی را که هر یک از فعالیت‌های بیان‌شده در جدول مصرف فیزیکی به سایر واحدهای اقتصادی (جریان در اقتصاد) و یا محیط زیست (تحت عنوان آب برگشتی و یا جریان از اقتصاد به محیط زیست) عرضه می‌شود را بررسی می‌کند. ردیف اول این جدول نمایانگر رشته فعالیت‌هایی است که در جدول استفاده فیزیکی آورده شده بود. در جدول عرضه فیزیکی، کل آب عرضه‌شده، از مجموع آب عرضه‌شده به واحدهای اقتصادی (ردیف چهار جدول **Error! Reference source not found.**۷) و آب بازگشتی به محیط زیست (ردیف پنج جدول **Error! Reference source not found.**۷) دست می‌آید. هم‌چنین آب مصرف‌شده در هر رشته فعالیت از تفاضل آب استفاده‌شده در جدول مصرف فیزیکی و کل آب عرضه‌شده در این جدول حاصل می‌گردد. یکی دیگر از تمایزهای روش حسابداری زیست‌محیطی–اقتصادی با بیلان درنظرگرفتن آب مصرف‌شده و جداکردن مقدار آب بازگشتی و یا عرضه‌شده به سایر واحدهای اقتصادی در این بخش از جداول خود است. مقدار آب برگشتی به آبخوان عمیق و آب‌های سطحی از خروجی نرم‌افزار SWAT پس از واسنجی حاصل شده است. به‌دلیل این‌که آب برگشتی به رطوبت خاک به‌علت تبخیر بالای حوضه ناچیز است، آب نفوذیافته از ریشه گیاه به آبخوان سطحی به‌عنوان آب بازگشتی از محصولات کشاورزی به رطوبت خاک ثبت گردید.

Table 7. Physical water supply of the entire basin in the agricultural sector (mcm)

		گندم	جو	یونجه	افتابگردان	حبوبات	چغندرقند	سویا	هلو	گردو	انگور	سیب	مجموع
به محیط زیست	کل آب بازگشتی	۰.۲	۰.۱۴	۰.۰۸	۰.۰۲	۰.۰۴	۰.۱۴	۰.۰۲	۱.۴	۱.۳۸	۰.۴۴	۰.۷۶	۴۶۲
	به منابع آب سطحی	۰.۰۶	۰.۰۴۲	۰.۰۲۴	۰.۰۰۶	۰.۰۱۲	۰.۰۴۲	۰.۰۰۶	۰.۴۲	۰.۴۱۴	۰.۱۳۲	۰.۲۲۸	۱.۳۸۶
	به منابع آب زیرزمنی	۰.۱	۰.۰۷	۰.۰۴	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۷	۰.۰۱	۰.۷	۰.۶۹	۰.۲۲	۰.۳۸	۲.۳۱
	به رطوبت خاک	۰.۰۴	۰.۰۲۸	۰.۰۱۶	۰.۰۰۴	۰.۰۰۸	۰.۰۲۸	۰.۰۰۴	۰.۲۸	۰.۲۷۶	۰.۰۸۸	۰.۱۵۲	۰.۹۲۴

بررسی وضعیت منابع آب در حوضه مبتنی بر شاخص‌های سیستم حسابداری زیست‌محیطی–اقتصادی برای آب در جدول (۸) محاسبه شده است. این شاخص‌ها با استفاده از اطلاعات پیچیده منابع آب به ساده‌سازی و کمّی‌سازی اطلاعات مربوطه می‌پردازند. در واقع استفاده از شاخص‌ها کمک به فهم شرایط حوضه از منظرهای مختلف کرده و تصمیم‌گیری برای مدیران و عموم استفاده‌کنندگان از آب را آسان می‌کند.

۳. ۳. تحلیل بهره‌وری اقتصادی آب

با تعریف سناریوی تغییر الگوی کشت محصولات در حوضه مطابق الگوی بهینه (Ghorbanian, 2021)، شبیه‌سازی برای

تعیین ابعاد مختلف بهره‌وری در بخش کشاورزی و اقتصادی انجام گرفت. همانطورکه قبلاً توضیح داده شد، مبنای این الگوی بهینه که با هدف کاهش مصرف آب کشاورزی در حوضه دریاچه ارومیه، ارائه شده است، مصوبات ستاد احیای دریاچه ارومیه بوده است که مطابق بررسی‌ها لازم است برای رسیدن به این هدف سطح زیرکشت کاهش یابد. بعد از اعمال سناریو در نرم‌افزار SWAT، مقدار آبیاری موردنیاز محصولات در حوضه به‌دست آمد. شکل (۵) تحلیل مقدار مصرف آب در سطح حوضه را در الگوی کشت منطقه نشان می‌دهد (متوسط دوره شبیه‌سازی). در شکل (۶) نیز نتایج در دوره نُه ساله ارائه شده است.

Table 8. Environmental-economic accounting indicators for Naqadeh and Oshnavieh[2]

	شاخص های حسابداری آب	اشنویه	نقده
منابع آب	حجم منابع آب تجدیدپذیر داخلی (میلیون مترمکعب)	۶۳	۹۸
	وابستگی به آب زیرزمینی (درصد)	۶۳٪	۶۵٪
	مصرف در پخش کشاورزی به کل مصارف (درصد)	۶۶٪	۶۶٪
اقتصادی	بهره‌وری اقتصادی آب در بخش کشاورزی (ریال به‌ازای هر مترمکعب)	۱۶۲۰۳	۱۷۹۳۰
	اهمیت نسبی کشاورزی در اقتصاد	۱۰۰	۱۰۰
	میانگین درآمد حاصل از مصرف یک میلیون مترمکعب آب (میلیون ریال)	۴۶۰۴۳.۵	۴۶۰۴۳.۵
اجتماعی	جمعیت سال ۱۳۹۰ (نفر)	۷۰۰۰۰	۱۲۵۵۰۰
	اشتغال در بخش کشاورزی (درصد)	۱۲	۷.۸
	بهره‌وری نیروی کار در بخش کشاورزی (میلیارد ریال به‌ازای هر نفر)	۰.۳	۰.۵
	بهره‌وری اشتغال در بخش کشاورزی (نفر به‌ازای هر میلیون مترمکعب)	۸۱	۷۹
	سرانه درآمد (میلیارد ریال به‌ازای هر نفر)	۰.۲	۰.۲۶
	اشتغال در بخش باغی	۸۰۶۶	۷۱۰۶
	اشتغال در بخش زراعی	۳۰۶۶	۶۰۰۱

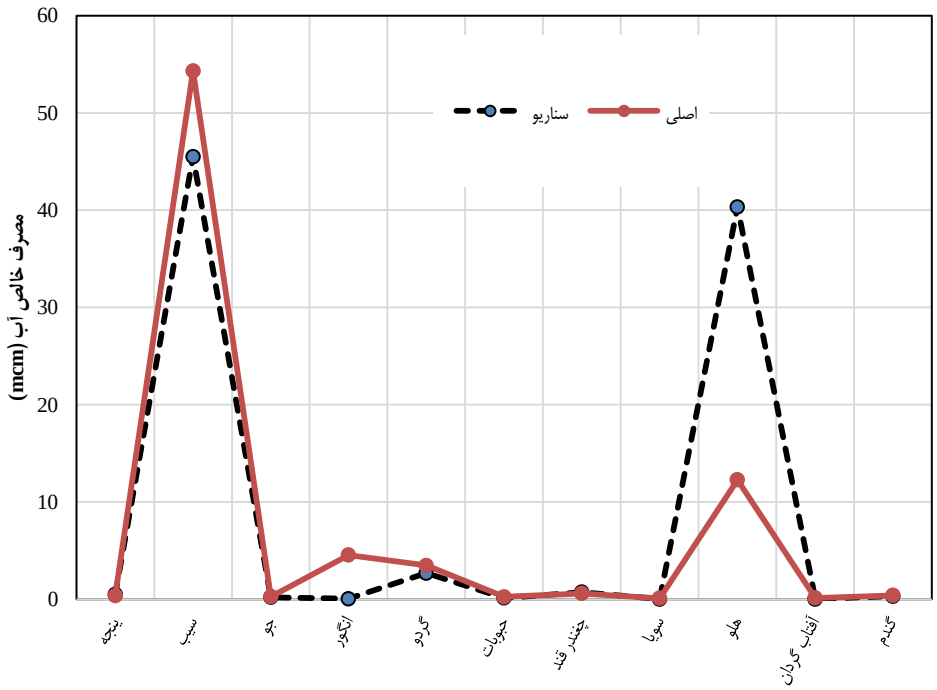
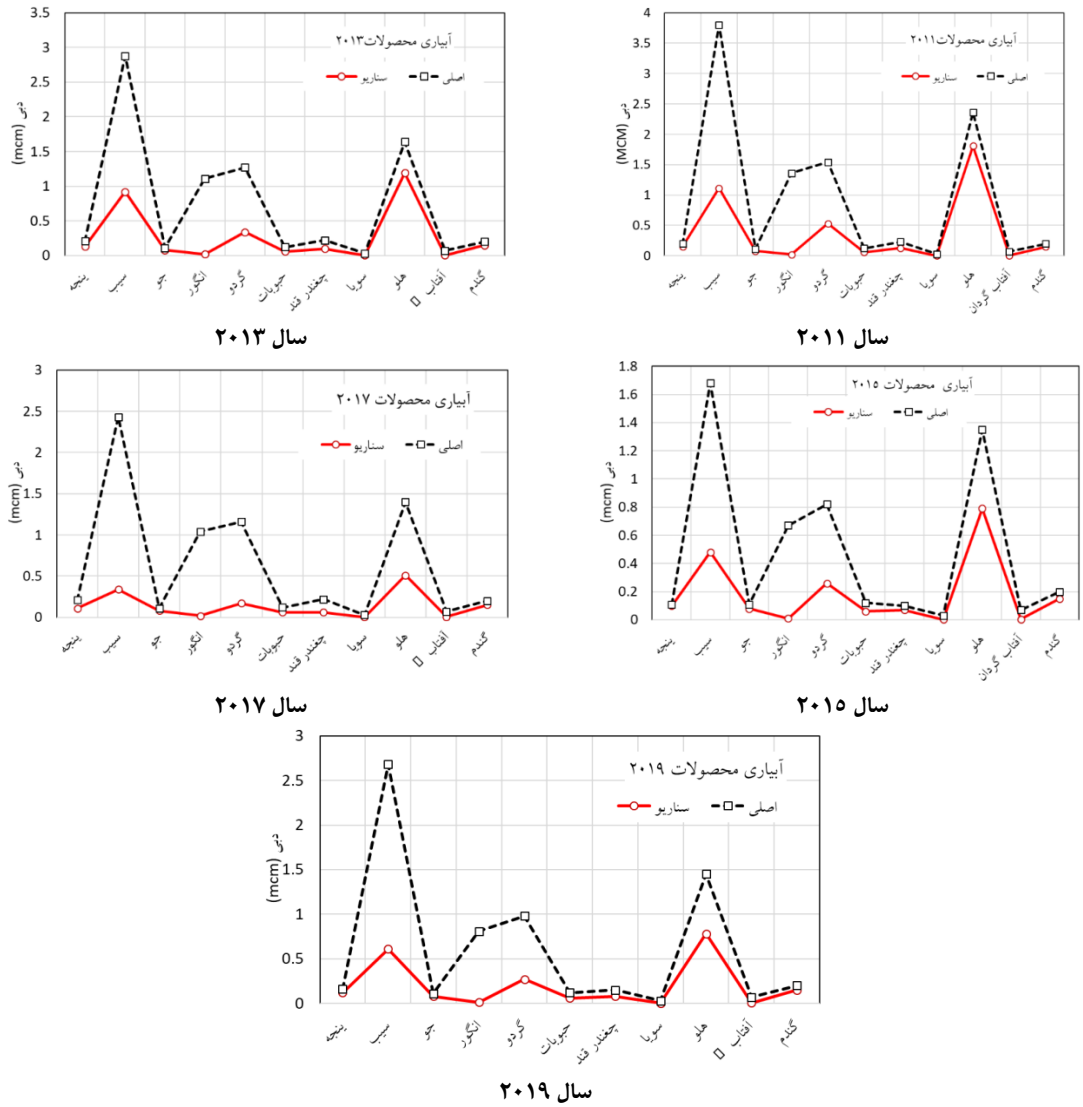


Figure 5. Net water consumption in the Godar-chai basin



سال ۲۰۱۳ سال ۲۰۱۱

سال ۲۰۱۷ سال ۲۰۱۵

سال ۲۰۱۹

Figure 6. Crop irrigation diagram under the baseline and consumption reduction scenarios

باتوجه به نتایج سناریوی الگوی کشت منطقه، مصرف فیزیکی آب و مصرف هیبریدی در بخش کشاورزی در جدول‌های (۹) و (۱۰) ارائه شده است. براساس این نتایج جدول (۱۱) تحلیل دارایی آبی را نشان می‌دهد.

Table 9. The basin physical consumption for consumption reductio scenario in the agricultural sector (mcm)

	پارامتر	گندم	جو	بونجه	آفتابگردان	حبوبات	چغندرقند	سویا	هلو	گردو	انگور	سیب	کل مصرف
برداشت	برداشت برای مصرف شخصی	۰.۱۵۰	۰.۰۸۰	۰.۱۵	۰.۰۵	۰.۰۶	۰.۱۳	۰.۰۰	۱.۸۱	۰.۵۳	۰.۰۲	۱.۱۱	۴.۰۹
	از آب زیرزمینی	۰.۰۹۵	۰.۰۵۰	۰.۰۹۶	۰.۰۳۲	۰.۰۳۸	۰.۰۸۲	۰.۰۰۱	۱.۱۴۰	۰.۳۳۴	۰.۰۱۳	۰.۶۹۹	۲.۵۸
	از منابع سطحی	۰.۰۵۴	۰.۰۲۹	۰.۰۵۵	۰.۰۱۸	۰.۰۲۲	۰.۰۴۷	۰.۰۰۱	۰.۶۵۲	۰.۱۹۱	۰.۰۰۷	۰.۴۰۰	۱.۴۷
	از رطوبت خاک	۰.۰۰۲	۰.۰۰۱	۰.۰۰۲	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۱۸	۰.۰۰۵	۰.۰۰۰	۰.۰۱۱	۰.۰۴
کل برداشت آب		۰.۱۵۰	۰.۰۸۰	۰.۱۵۲	۰.۰۵۰	۰.۰۶۰	۰.۱۳۰	۰.۰۰۲	۱.۸۱۰	۰.۵۳۰	۰.۰۲۰	۱.۱۱۰	۴.۰۹

Table 10. Hybrid consumption in the agricultural sector of the entire basin

	گندم	جو	یونجه	آفتابگردان	حبوبات	چغندرقند	سویا	هلو	گردو	انگور	سیب	مجموع
کل مصرف نهاده‌ای (میلیون ریال)	۲۶۳۰	۱۰۵۳	۱۱۲۱	۲۹۷	۳۷۶	۱۸۴۸	۱۲	۲۵۱۳۸	۱۶۴۴۴۱	۱۹۹	۱۱۲۶۹۰	۳۰۹۸۱۱
کل مصرف آب	۰.۱۵۰	۰.۰۸۰	۰.۱۵۲	۰.۰۵۰	۰.۰۶۰	۰.۱۳۰	۰.۰۰۲	۱.۸۱۰	۰.۵۳۰	۰.۰۲۰	۱.۱۱	
کل برداشت از محیط زیست	۰.۱۵۰	۰.۰۸۰	۰.۱۵۲	۰.۰۵۰	۰.۰۶۰	۰.۱۳۰	۰.۰۰۲	۱.۸۱۰	۰.۵۳۰	۰.۰۲۰	۱.۱۱	

Table 11. Assets after applying the optimal scenario

کل حوضه (میلیون مترمکعب)					
	منابع اب سطحی		آب زیر زمینی	رطوبت خاک	کل
	سد حسنلو	رودخانه			
شروع دوره	۶۱.۳۸	۳۸۰	۱۶۱	۷.۷۳	۶۱۰.۱۱
ورودی ۱					
جریان بازگشتی۱-الف	۰	۱.۳	۴.۲۴	۰.۸۳	۶.۲۳
بارندگی۱-ب	۰.۸۴	۶۰.۳	۰	۱۴۲۶	۲۰۳.۸
خروجی۲					
برداشت آب۲-الف	۵۷.۱	۱.۴۷	۱۵.۸۸	۰.۰۴	۷۴
تبخیر/تبخیر تعرق واقعی۲-ب	۱.۳۶	۱۶	۰	۵۹.۳	۷۶۶
پایان دوره			۱۴۵.۱۲	۰	

تحلیل جداول حسابداری آب نشان می‌دهد که اعمال سناریوی بهینه‌سازی و کاهش تقاضای کشاورزی، کل برداشت آب در این بخش با کاهش از به ۴,۰۹ میلیون مترمکعب، می‌تواند به توسعه پایدار و مدیریت منابع آب حوضه آبریز دریاچه ارومیه کمک نماید. مطابق سناریو بهینه کاهش سطح زیر کشت، مصارف آب زیرزمینی با کاهش ۳,۶۸ میلیون مترمکعبی به ۲,۵۸ و مصارف سطحی به ۱,۴۷ میلیون مترمکعب تقلیل یافته‌اند. این مدیریت تقاضا به‌ویژه در کاهش برداشت محصولاتی نظیر سیب (از ۳,۸۰ به ۱,۱۱) و انگور (از ۱,۳۶ به ۰,۰۲) مشهود است. در نتیجه این صرفه‌جویی، جریان بازگشتی به حوضه از ۴,۶۲ به ۶,۲۳ میلیون مترمکعب افزایش یافته و مهم‌تر از همه، بیلان آب زیرزمینی در پایان دوره بهبود معناداری نشان می‌دهد، به‌طوری‌که حجم ذخیره آبخوان در پایان دوره از ۱۴۲,۱ میلیون مترمکعب در سناریوی پایه، با افزایش ۳,۰۲ میلیون مترمکعبی به ۱۴۵,۱۲ میلیون مترمکعب در سناریوی بهینه ارتقا یافته است که نشان‌دهنده مهار نسبی افت تراز آبخوان باوجود برداشت پایدار شرب و خدمات (۱۳,۳۰ میلیون مترمکعب) است. لذا می‌توان ادعا کرد، سناریو بهینه الگوی کشت در حوضه، نه‌تنها به احیای دریاچه ارومیه و حفظ محیط زیست با اهمیت دریاچه کمک می‌نماید، بلکه می‌تواند به احیای تدریجی آبخوان وتعادل بخشی آن منتج شود؛ اگرچه معیشت مردم منطقه تا حدی تحت تأثیر قرار می‌گیرد که نیازمند برنامه‌ریزی اشتغال جایگزین در حوضه است. یافته‌های این پژوهش در خصوص بهبود شاخص‌های بیلان آب و احیای جریان‌های سطحی حوضه گدار در سناریوی دوم، همسو با مطالعات مدل‌سازی SWAT و حسابداری آب (WA+) انجام‌شده در حوضه آبریز دریاچه ارومیه (Moasheri *et al.*, 2023; Amani *et al.*, 2024) است. این پژوهش‌ها نیز تأیید می‌کنند که پتانسیل صرفه‌جویی حاصل از اصلاح الگوی کشت و کاهش فیزیکی مصارف در بخش کشاورزی جنوب حوضه، مؤثرترین راه‌کار برای تثبیت تراز آبخوان‌های بحرانی و هم‌زمان آزادسازی

حقابه‌های زیست‌محیطی است. تفاوت جزئی نتایج این پژوهش با برخی پژوهش‌های گذشته در میزان دقیق ذخیره نهایی آبخوان، به‌دلیل پیاده‌سازی مصرف هیبریدی (ترکیب داده‌های فیزیکی و ارزش اقتصادی نهاده‌ها معادل ۳۰۹،۸۱۱ میلیون ریال) است که نشان می‌دهد بهینه‌سازی هم‌زمان ارزش اقتصادی آب و حجم برداشت فیزیکی، بدون آسیب شدید به معیشت کشاورزان، می‌تواند اهداف احیای هیدرولوژیکی حوضه را محقق سازد.

۴. نتیجه‌گیری

گدارچای به‌عنوان سومین رود مهم حوضه دریاچه ارومیه بالغ بر ۸ درصد از حقابه زیست‌محیطی دریاچه ارومیه را تأمین می‌نماید. تأمین حقابه دریاچه ارومیه از این رودخانه، منوط به تعدیل مصارف بالاخص در بخش کشاورزی و با حفظ تعادل و پایداری در حوضه مذکور می‌باشد. برای درک واقعیت منابع و مصارف در حوضه گدارچای که بتواند در تصمیم‌گیری برنامه‌ریزی کلان منابع آب حوضه دریاچه ارومیه مفید باشد، نیاز به یک رویکرد مدیریتی–علمی است. حسابداری آب می‌تواند به درک منابع و مصارف حوضه در جهت نیل به هدف احیای دریاچه ارومیه بسیار مفید باشد. لذا در این مقاله از یک ایده ترکیبی حسابداری آب–مدل‌سازی کمّی منابع و مصارف برای نیل به این هدف استفاده گردید. برای شبیه‌سازی حوضه از نرم‌افزار SWAT در دوره آماری ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۹ استفاده گردید. اطلاعات اقلیمی حوضه از پنج ایستگاه پی‌قلعه، اشنویه، چپرآباد، نقده و پل بهراملو استخراج شد. در بخش مدل‌سازی، رواناب، تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات با استفاده از کالیبراسون الگوریتم SUFI 2 محاسبه شد و در نهایت برای تکمیل جداول حسابداری در بخش کشاورزی اطلاعات مصرف آب توسط محصولات مختلف از خروجی‌های SWAT برداشت و جدول مصارف و عرضه فیزیکی آب تکمیل گردید.

در حوضه مطالعاتی دو شهر بزرگ نقده و اشنویه قرار دارند که آب شرب آن‌ها تماماً از منابع آب زیر زمینی تأمین می‌شود (شهرستان نقده حدود ۸،۸ میلیون مترمکعب در سال و در شهرستان اشنویه حدود ۴،۵ میلیون مترمکعب در سال). باتوجه به اعمال کاهش سالانه مصرف در حوضه طبق مصوبات ستاد احیای دریاچه ارومیه، کاهش برداشت از ۹۲،۶ به ۴۷،۶ میلیون مترمکعب موردنظر است. بعد از اعمال سناریوی کاهش مصرف، نتایج در قالب جداول حسابداری آب ارائه گردید. نتایج نشان داد که با تغییر الگوی کشت ناشی از کاهش مصرف آب، در آمد بخش کشاورزی نیز در حوضه کاهش پیدا می‌کند. برای آنکه نگرانی‌های زیست‌محیطی در منطقه کاهش یافته و حقابه دریاچه ارومیه از حوضه گدارچای تأمین گردد، تنها راه ممکن کاهش انتظارات اقتصادی است. بهترین راه جهت حفظ اشتغال در منطقه، توجه به اشتغال جایگزین می‌باشد که دولت باید فرصت‌های شغلی در بخش صنعت در حوضه گدارچای را فراهم سازد. این کار باعث می‌شود اقتصاد حوضه از بخش کشاورزی به صنایع کم آب بر منتقل گردیده و در کنار حفظ و بهبود مسائل محیط زیستی، شرایط اجتماعی و اقتصادی منطقه نیز دچار تنزل نگردد.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Soil and Water Assessment Tool

۲. قیمت‌ها و هزینه‌ها با ارزش ریال سال ۱۴۰۰ محاسبه شده است.

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

Akhtar, A., & Cavalletti, B. (2025). Operationalising SEEA-EA for water-related ecosystem services assessment. *Journal of Environmental Management*, *395*, 127994. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2025.127994

Amani, E, Shorian, M., & Kardan Moghadam, H. (2024). Water resources planning and management in Lake Urmia basin using the water accounting approach. I*ranian Journal of Soil and Water Research*, 55(7), 1217-1236. doi: 10.22059/ijswr.2024.370616.669638

Bagheri, A., & Babaeian, F. (2020). Assessing water security of Rafsanjan Plain, Iran – Adopting the SEEA framework of water accounting. *Ecological Indicators*, *111*, 105959. https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2019.105959

Ebrahimivand, A., Hooshyaripor, F., Rezaei-Gharehaghaj, S., Razi, S., … (2023). Satellite-based monitoring of growing agricultural water consumption in hyper-arid regions, *Water*, 15(22), 3880. https://doi.org/10.3390/w15223880

Esen, S. E., & Hein, L. (2020). Development of SEEA water accounts with a hydrological model. *Science of The Total Environment*, *737*, 140168. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.140168

Ghorbani, H. (2021). *Optimal Water Resource Planning in the Godar Basin with an Urmia Lake Restoration Approach*, Master's thesis, Islamic Azad University, Science and Research Branch. Department of Civil Engineering, Tehran, Spring 2021.

Hashemy Shahdany, S. M., & Rejaie, R. (2026). Integrating SEEA-water accounting and machine learning for transparent SOP reform under non-cooperative groundwater use in irrigation districts. *Environmental Impact Assessment Review*, *118*, 108316. https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2025.108316

Karimi, P., & Bastiaanssen, W. G. M. (2015). Spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting - Part 1: Review of the accuracy of the remote sensing data. *Hydrology and Earth System Sciences*, *19*(1), 507–532. https://doi.org/10.5194/HESS-19-507-2015

Karimi, P., Bastiaanssen, W. G. M., & Molden, D. (2013). Water Accounting Plus (WA+) - A water accounting procedure for complex river basins based on satellite measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, *17*(7), 2459–2472. https://doi.org/10.5194/HESS-17-2459-2013

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), 1–19. https://doi.org/10.1007/S10661-022-10193-7/METRICS

Mahdavi, T., Bagheri, A., & Hosseini, S. A. (2019). Applying the System of Environmental and Economic Accounts for Water (SEEA-Water) for integrated assessment of water security in an aquifer scale - Case study: Azarshahr aquifer, Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, *9*, 100261. https://doi.org/10.1016/J.GSD.2019.100261

Mirdashtvan, M., Najafinejad, A., Malekian, A., & Sa'doddin, A. (2021). Sustainable Water Supply and Demand Management in Semi-arid Regions: Optimizing Water Resources Allocation Based on RCPs Scenarios. *Water Resources Management*, *35*(15), 5307–5324. https://doi.org/10.1007/S11269-021-03004-0/METRICS

Moasheri, S.A., Javadi, S., Mashal, M., Kardan Moghadam, H., & Azadegan, B. (2023). Assessment of Water, Food, and Energy Productivity Indices Using the WA+ Water Accounting Framework and a Nexus Approach. *Water and Irrigation Management*, 13(3), 715-733. doi: 10.22059/jwim.2023.357988.1069

Moghaddam, H. K., Rahimzadeh kivi, Z., Abtahizadeh, E., & Abolfathi, S. (2025). Sustainable water allocation under climate change: Deep learning approaches to predict drinking water shortages. *Journal of Environmental Management*, *385*, 125600. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2025.125600