تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال نوزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ویژه‌نامه تخصصی: دریاچه ارومیه
Volume 19, No. 2, Summer 2023 (IR-WRR), Special Issue: Urmia Lake
۸۷-۱۰۵

بررسی وضعیت منابع-مصارف و اقتصاد کشاورزی در حوضه آبریز مهاباد (واقع در بخش جنوبی دریاچه ارومیه) به کمک توسعه مدل هیدرو-اقتصادی

محمد دانش یزدی [۱*] و سید مرتضی ملائکه [۲]

چکیده

انجام هرگونه برنامه‌ریزی مدیریتی برای کنترل مصارف آب در بخش کشاورزی نیازمند درک صحیح از تأثیرپذیری متغیرهای کنترل‌کننده منابع آب، مصارف آب و اقتصاد کشاورزی از یکدیگر به منظور حصول اطمینان از تأمین نیازهای آبی کشاورزی به صورت بهینه و همچنین تضمین بهبود وضعیت اقتصادی کشاورزان است. هدف اصلی این مطالعه، توسعه دو مدل هیدرولوژیکی و اقتصاد کشاورزی در محدوده مطالعاتی مهاباد (واقع در بخش جنوبی دریاچه ارومیه) با هدف بررسی اثرات تغییر اقلیم بر حجم آب ورودی به سد مهاباد، بررسی تغییرات بلندمدت نیاز ناخالص آبیاری، و تأثیر تغییر الگوی کشت بر نیاز ناخالص آبیاری و اقتصاد کشاورزی منطقه بوده است. نتایج نشان دادند که در صورت کنترل مصارف تا سال ۱۴۱۹، افزایش حجم آب ورودی به سد مهاباد تحت سناریوهای تغییر اقلیم A1B و B1 می‌تواند متضمن کاهش نیاز کنونی به برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی و امکان انجام رهاسازی از سد مهاباد برای تأمین بیشتر نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه باشد. از طرفی، ارزش خالص تولید گندم و جو آبی در سال‌های گذشته بسیار کمتر از مقدار مشابه برای سایر محصولات زراعی در منطقه مطالعه بوده است که عدم توجیه اقتصادی کشت این محصولات را تبیین می‌سازد. میزان تولید و ارزش خالص تولید چغندرقند روند رو به رشد قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد که این روند در مغایرت آشکار با سیاست‌های کاهش ۴۰ درصد مصرف آب در بخش کشاورزی است. در صورت افزایش سطح زیر کشت محصولات پر آب‌بر در منطقه، بیشترین تنش وارده بر منابع آب زیرزمینی تحت سناریوی A2 خواهد بود.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی هیدرولوژیکی و اقتصاد کشاورزی، تغییر اقلیم، الگوی کشت، دریاچه ارومیه، مدیریت یکپارچه منابع آب.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۸/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶

۱- عضو هیأت علمی گروه مهندسی آب و محیطزیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران-گرایش مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب و محیطزیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۲ امکانپذیر است.

Investigating Water Resources and Agricultural Economy by Hydro-Economic Modeling in the Mahabad Basin Located in the South of the Lake Urmia

M. Danesh-Yazdi [1] and S.M. Malaekeh [2]

Abstract

Controlling water consumption in agricultural sector requires an appropriate understanding of the interplay between water resources, water consumption and agricultural economy. This study aimed to develop two hydrological and agro-economic models in the Mahabad study area (located in south of the Lake Urmia) in order to investigate the effects of climate change on the volume of water entering the Mahabad dam, explore long-term changes in gross irrigation needs, and study the impact of the crop pattern change on the gross irrigation need and the agricultural economy of the region. The results showed that if the agricultural water consumptions are controlled up to the year 1419 (Persian Calendar), the increase in the volume of water entering the Mahabad Dam under the climate change scenarios A1B and B1 can reduce the current withdrawal from surface and groundwater sources. It would also promote the possibility of release from the Mahabad Dam to partially provide the environmental flow of Lake Urmia. We further found that the net value of the crop production in the past years was much lower for wheat and barley compared to other crops, which explains the lack of economic justification for the cultivation of these two crops. The amount of production and the net value of sugar beet production showed a significant growing trend, which is in a clear contradiction to the policies of reducing agricultural water consumption by 40%. In case of increasing the cultivated area of water-rich crops in the region, the greatest stress on groundwater resources will be under the climate change scenario A2.

***Keywords*:** Hydrologic and Agro-Economic Modeling, Climate Change, Crop Pattern, Lake Urmia, Integrated Water Resources Management.

Received: November 3, 2022
Accepted: March 7, 2023

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. Email: danesh@sharif.edu

2- M.Sc. in Water Resources Management, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

Dor: 20.1001.1.17352347.1402.19.2.6.3

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

۱- مقدمه

در حوضه دریاچه ارومیه، نادیده گرفتن یا در اولویت قرار ندادن نیاز زیست محیطی پهنه‌های آبی نسبت به نیاز سایر بخش‌های مصرف منابع آب مانند کشاورزی و همچنین دست کم شمردن میزان تأثیرات اقدامات انسانی در مقابل تغییرات اقلیمی دست به دست یکدیگر داده تا در طی بیش از دو دهه، شاهد کاهش تراز دریاچه ارومیه باشیم. به طور مشخص، توسعه بی رویه‌ی کشاورزی، الگوی کشت پرمصرف، بهره برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی و عدم بهره‌برداری بهینه از منابع آبی به عنوان مهم‌ترین عوامل خشک شدن دریاچه ارومیه شناخته می‌شوند (Alizade Govarchin Ghale et al., 2018; Alizadeh-Choobari and Najafi, 2018; Danesh-Yazdi and Ataie-Ashtiani, 2019; Jalili et al., 2016; Khazaei et al., 2019; Schulz et al., 2020). کارگروه نجات دریاچه ارومیه ۲۶ طرح اولویت‌دار را جهت احیای دریاچه ارومیه به تصویب رساند که طرح کاهش ۴۰ درصدی مصرف آب در بخش کشاورزی از مهم ترین آنها است. طبق گزارشات موجود (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2021; Japan International Cooperation Agency, 2020)، تغییر الگوی کشت و روی آوردن به الگوی کشت کم مصرف متناسب با هر منطقه، کاهش سطح زیر کشت، جلوگیری از اضافه برداشت آب زیرزمینی و سطحی و ارتقای بهره‌وری مصرف آب در بخش کشاورزی، از جمله مهمترین راهکارهای پیشنهاد شده برای کاهش مصرف در بخش کشاورزی آب بوده‌اند. طبق تجارب أخذ شده در طی سالیان اخیر، اکنون بر کسی پوشیده نیست که نجات دریاچه ارومیه نه صرفاً در گروِ به کارگیری به‌روزترین دانش تخصصی و اراده نهادهای اجرایی بخش آب و کشاورزی بوده، بلکه منوط به مشارکت و همکاری ذینفعان و ذیمدخلان این حوضه نیز می‌باشد که این موفقیت بدون درنظر گرفتن همزمان مؤلفه‌های‌های مؤثر بر منابع و مصارف آب و همچنین وضعیت اقتصاد کشاورزی یک منطقه امکان‌پذیر نیست. در این پژوهش تلاش بر آن بوده تا از طریق توسعه دو مدل هیدرولوژیکی و اقتصاد کشاورزی، اثرات تغییر اقلیم بر حجم آب ورودی به سد مهاباد، بررسی تغییرات بلندمدت نیاز ناخالص آبیاری، و تأثیر تغییر الگوی کشت بر نیاز ناخالص آبیاری و اقتصاد کشاورزی منطقه بررسی شود. بدیهی است که نتایج رویکرد اتخاذ شده محدوده به منابع–مصارف آب و اقتصاد کشاورزی است و سایر مسائل مرتبط با آب مانند وضعیت اجتماعی و تعامل ذینفعان را درنظر نمی‌گیرد.

برای نیل به اهدف این مطالعه، محدوده مطالعاتی مهاباد به دلایل زیر به عنوان منطقه طرح انتخاب گردید. مرور مطالعات پیشین در محدوده مطالعاتی مهاباد حاکی از بررسی هیدروشمیایی کیفیت آب سد و رودخانه مهاباد از طریق اندازه‌گیری تعدادی نمونه آب از مخزن سد و سرشاخه‌ها و تحلیل چند شاخص کیفیت آب مانند pH، EC، TDS، TH، TA، دما، شوری و غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی آب و برخی از عناصر فلزی و سنگین بوده است (Mohammad Pour et al., 2016; Soleimani et al., 2017). بررسی شاخص‌های میکروبیولوژیکی آب رودخانه مهاباد شامل دیاتومه، کلروفیسه، سیانوفیسه، پرتوزوآ، روتیفر،کرستاسه، نماتد و کلر باقیمانده (Tanhaei and Rostami Koshki, 2018) و بررسی تراکم جمعیتی فیتوپلانکتونی دریاچه سد مهاباد (Asal pishe and Manaffar, 2018) از جمله مطالعات کیفی انجام شده در این محدوده است. آخرین بیلان آب سطحی، آب زیرزمینی و عمومی محدوده در سال آبی ۱۳۸۹–۱۳۹۰ (Consulting Engineers for Water and Sustainable Development, 2014) انجام شده است. از دیگر مطالعات انجام شده در این محدوده می‌توان به کاربرد روش‌های تحلیل چند معیاره جهت انتخاب بهترین برازش توزیع فراوانی دبی اوج، حجم و تداوم سیل رودخانه مهاباد (Mohammadpour et al., 2016) و تعیین مناطق با پتانسیل بالای وقوع مخاطرات دامنه‌ای به کمک تلفیق منطق فازی و اطلاعات سنجش از دور (Ghahroudi Tali and Talebpour Asl, 2017) اشاره نمود. در زمینه برنامه‌ریزی منابع آب، مهمترین مطالعات انجام شده شامل توسعه مدل RIBASIM به منظور بررسی تأثیر سناریوهای تغییر در مصارف آب شرب، صنعت، کشاورزی و زیست محیطی بر حجم منابع آب در آینده (Water Research Institute, 1383)، توسعه مدل کمی بهره‌برداری تلفیقی بهینه از منابع سطحی و زیرزمینی دشت مهاباد با استفاده از مدل GMS (Valizadegan and Yazdanpanah, 2018)، ارزیابی تأثیر عملکرد بهره‌برداری از سدهای حوضه دریاچه ارومیه از جمله سد مهاباد بر کاهش آب ورودی به دریاچه ارومیه با استفاده از رویکرد پویایی سیستم (Azizi et al., 2016) است. در حوزه‌ی مطالعات کشاورزی می‌توان به مطالعه شاخص ردپای آب برای محصولات غالب مورد کشت در حوضه دریاچه ارومیه و ارتباط آن با مدیریت آبیاری (behmanesh, 2016) و بررسی تبخیر–تعرق مرجع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه شامل محدوده مطالعاتی مهاباد (Babamiri and Dinpashoh, 2017) اشاره نمود. مطالعات پیشین در زمینه مدل‌سازی بارش–رواناب شامل ارزیابی نیاز اکوهیدرولوژیکی رودخانه مهاباد (Razaghi et al., 2019)، برآورد رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه‌های برف‌گیر حوضه سد مهاباد (Shahraki Mojahed et al., 2022)، و توسعه مدل بارش–رواناب حوضه سد

مهاباد با استفاده از مدل WMS/HEC-HMS (Ebrahimiyan and Ghaderi, 2014) بوده است. رسوب‌گذاری در مخزن سد مهاباد و کاهش عمر مفید آن، ارزیابی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و توسعهٔ پایدار آب زیرزمینی آبخوان دشت مهاباد نیز با تحلیل بیلان آب بررسی شده است (Abbas Novinpour and Sadeghi Aghdam, 2018). در نهایت، تحلیل اثرات تغییر اقلیم و استراتژی‌های مدیریت آب بر پایداری کشاورزی و محیط زیستی حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از مدل WEAP21 (Ahmadaali et al., 2018) و بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب در حوضه آبریز رودخانه مهاباد (Sanikhani et al., 2018) از جمله مهمترین مطالعات انجام شده در زمینه بررسی اثرات تغییر اقلیم در محدوده مطالعه بوده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، سوابق پژوهش‌ها در محدوده مطالعاتی مهاباد از منظر مدیریت منابع آب و اقتصاد کشاورزی حاکی از آن است که هیچ کدام از این مطالعات مباحث مربوط به اقتصاد کشاورزی و منابع–مصارف آب را به صورت همزمان مورد بررسی قرار نداده‌اند. اگرچه مطالعات زیادی در سرتاسر جهان با توسعه به هم پیوسته مدل‌های هیدرواقتصادی جهت توزیع متناسب منابع آبی صورت گرفته است (Ringer et al., 2006; Kahil et al., 2016; Escriva et al., 2018)، مطالعات کمّیِ محدودی جهت ارزیابی سیاستگذاری کلان منابع آبی در جهان صورت گرفته است. همچنین، گستردگی مدل هیدرولوژیکی مطالعه حاضر و تکمیل شدن آن توسط یک مدل اقتصادی ساده اما کاربردی در ادبیات مربوطه کمتر دیده می‌شود. به طور خلاصه، مهمترین سؤالاتی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفتند، عبارتند از: (۱) تأثیر انواع مختلف سناریوهای تغییر اقلیم بر حجم آب ورودی به سد مهاباد به چه میزان خواهد بود؟ (۲) در حال حاضر کدام محصولات کشاورزی در منطقه طرح توجیه اقتصادی برای تولید ندارند؟ (۳) تأثیر انواع مختلف سناریوهای تغییر الگوی کشت بر نیاز آبی و ارزش خالص تولید اقتصادی منطقه به چه صورت خواهد بود؟ و (۴) با توجه به شرایط اقتصادی کشور، پایداری کشت محصولات استراتژیک به صورت دیم در آینده چگونه خواهد بود؟

۲- منطقه مطالعه

۲-۱- موقعیت جغرافیایی و مشخصات کلی منطقه مطالعه

محدوده مطالعاتی مهاباد با کد ۳۰۰۹ زیرحوضه‌ی درجه چهار رودخانه مهاباد (با کد ۳۰۲۲) نیز محسوب می‌شود. این محدوده با مساحت ۱۵۰۸ کیلومترمربع در بخش جنوبی دریاچه ارومیه در استان آذربایجان غربی واقع شده که حدود ۲/۹ درصد از کل حوضه دریاچه ارومیه را دربر می‌گیرد. رودخانه اصلی آن، یعنی مهابادچای، از دو سرشاخه‌ی اصلی رودخانه‌های بیطاس (با مساحت زهکشی ۲۵۶ کیلومترمربع) و کوتر (با مساحت زهکشی ۴۹۸ کیلومترمربع) سرچشمه می‌گیرد که بعد از عبور از شهر و دشت مهاباد وارد دریاچه ارومیه می‌شود. شکل ۱ شماتیک موقعیت محدوده مطالعاتی مهاباد، زیرحوضه رودخانه‌های بیطاس و کوتر و همچنین محل سد مهاباد را نشان می‌دهد. حدود ۵۲ درصد این محدوده را نواحی کوهستانی تشکیل می‌دهد که عمدتاً شامل بالادست محدوده تا محل سد مهاباد به مساحت ۷۵۴ کیلومترمربع است. در پایین‌دست این محدوده، دشت مهاباد با وسعت ۲۴۹ کیلومترمربع قرار دارد. میانگین دراز مدت دمای سالانه، بارش سالانه، تبخیر از تشت، تبخیر از سطح آزاد، رطوبت نسبی و روزهای یخبندان به ترتیب ۱۰/۹۵ درجه سانتی‌گراد، ۳۷۴ میلی‌متر، ۱۷۲۱ میلی‌متر، ۱۴۴۳ میلی‌متر، ۵۳ درصد و ۸۰ روز است (Consulting Engineers for Water and Sustainable Development, 2014). بر اساس نقشه کاربری اراضی و پوشش گیاهی در محدوده مطالعاتی مهاباد برای سال ۱۳۹۴ که به کمک روش‌های طبقه‌بندی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی لندست به دست آمده است (RSRC, 2016)، عمده فعالیت‌های کشاورزی در پایین‌دست سد واقع در دشت مهاباد قرار داشته که در وسعتی به حدود ۱۸۲ کیلومترمربع انجام می‌پذیرد. متوسط حجم جریان سالانه در ایستگاه هیدرومتری گردیعقوب که در پایین‌ترین نقطه محدوده مطالعاتی مهاباد واقع است، در بازه سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۵ به میزان ۳۶ درصد نسبت به مقدار مشابه در بازه سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۹۵ کاهش یافته است. این در حالی است که میزان بارش در بازه‌های مشابه تنها به مقدار ۱/۵ درصد کاهش یافته است که این مشاهده دال بر نقش افزایش چشمگیر برداشت از منابع آب سطحی یا زیرزمینی در کاهش حجم جریان خروجی از رودخانه طی سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۵ است.

در سال ۱۳۵۰ سد مهاباد در پایین‌دست نقطه اتصال رودخانه‌های بیطاس و کوتر با حجم آب قابل تنظیم سالانه ۱۹۷/۸ میلیون متر مکعب به بهره‌برداری رسید. حداکثر گنجایش مخزن سد در زمان تأسیس آن ۲۳۰ میلیون مترمکعب و عمر مفید آن ۱۰۰ سال برآورد شده بود، اما پس از انجام عملیات عمق‌یابی و رسوب‌سنجی در خردادماه سال ۱۳۷۳، ظرفیت مخزن سد ۱۹۷/۸ میلیون مترمکعب برآورد شد. شبکه آبیاری زهکشی مهاباد یکی از پروژه‌های آبی مهم استان آذربایجان غربی است که در شهرستان مهاباد قرار گرفته است.

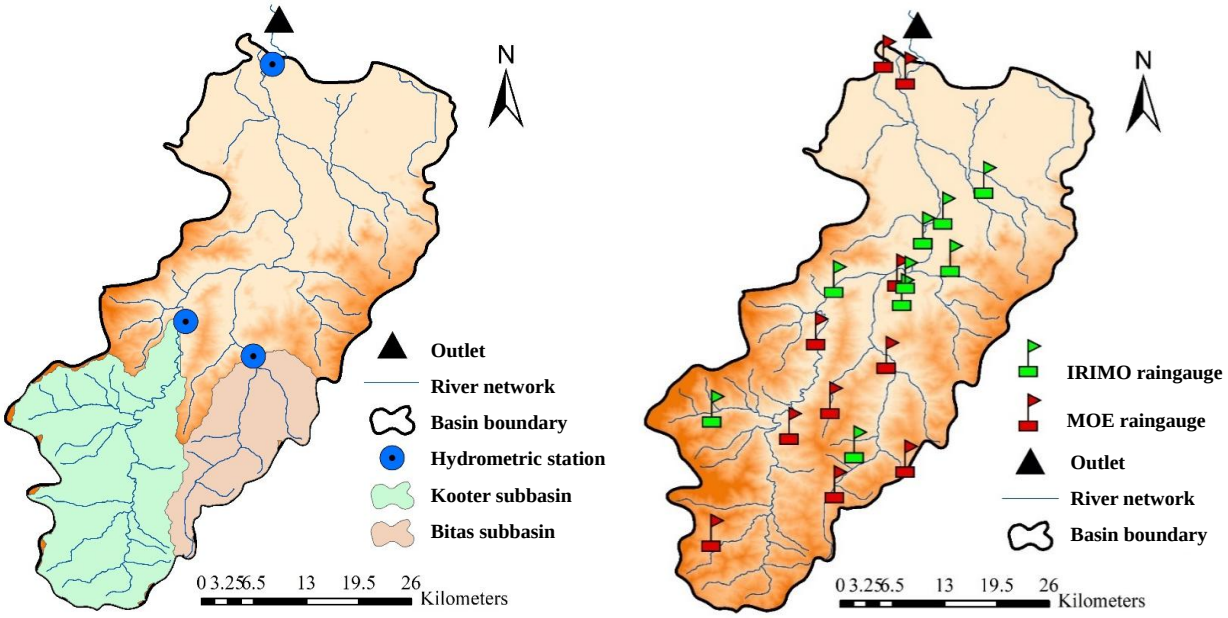

Fig. 1- The geographic location of the Mahabad study area, Kooter and Bitas subbasins, and the meteorological and hydrometric stations. The background color shows elevation gradient

شکل ۱- شماتیک موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی مهاباد، زیرحوضه رودخانه‌های بیطاس و کوتر، و ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری، رنگ پس‌زمینه نمایشگر تغییرات ارتفاع است

این شبکه از جنوب به شهر مهاباد و از غرب و شرق به ارتفاعات منطقه و از شمال به دریاچه ارومیه محدود می‌شود (West Azerbaijan Regional Water Company, 2017). تخصیص آب در شبکه آبیاری زهکشی مهاباد به صورت تحویل حجمی انجام می‌پذیرد.

۳- روش‌شناسی

۳-۱- انتخاب محدوده مدل‌سازی هیدرولوژیکی

محدوده مطالعاتی مهاباد را می‌توان به چهار ناحیه برای مدل‌سازی تقسیم نمود: (۱) بخشی از محدوده که توسط رودخانه بیطاس زهکشی می‌شود؛ (۲) بخشی از محدوده که توسط رودخانه کوتر زهکشی می‌شود؛ (۳) محدوده حد فاصل سد مهاباد تا خروجی محدوده؛ و (۴) کل محدوده مطالعاتی مهاباد. از منظر مدل‌سازی، این چهار محدوده از جوانب مختلف با یکدیگر متفاوت و در نتیجه منحصر به فرد هستند. محدوده رودخانه بیطاس و کوتر هر دو در نواحی کوهستانی محدوده مطالعاتی مهاباد قرار دارند که علی‌رغم تمرکز برداشت از انهار در این مناطق، فعالیت‌های کشاورزی و برداشت از چاه‌ها در آنها در مقایسه با دشت مهاباد بسیار محدودتر است و بنابراین هر دو محدوده را می‌توان طبیعی‌تر (یا دست نخورده‌تر) از محدوده پایین‌تر از سد مهاباد دانست. از طرف دیگر، محدوده بین سد مهاباد تا خروجی محدوده یعنی دشت مهاباد متأثر از فعالیت‌های کشاورزی گسترده و برداشت از آب‌های زیرزمینی بوده است. همچنین، شبکه گسترده‌ی آبیاری و زهکشی در آن قرار داشته و رودخانه مهاباد به واسطه سد مهاباد دارای جریان تنظیم شده است. بنابراین، این محدوده بسیار دستخوش فعالیت‌های انسانی بوده و مدل‌سازی هیدرولوژیکی آن با پیچیدگی‌های بسیاری همراه خواهد بود. به عبارت دیگر، این محدوده با توجه به ویژگی‌های بالا عملاً از فیزیک مربوط به فرایندهای حاکم بر جریان آب سطحی و زیرمینی در سیستم‌های طبیعی پیروی نمی‌کند. مضاف از این، چنانچه داده‌های مورد نیاز برای توسعه و واسنجی مدل نیز از دقت یا فراوانی (مکانی و زمانی) کافی برخوردار نباشند، به پیچیدگی‌های مسأله اضافه خواهد شد.

علاوه بر این، بررسی داده هیدرومتری ثبت شده در ایستگاه گرد یعقوب حاکی از غیر قابل اعتماد بودن آن بودند که این امر مانعی برای توسعه یک مدل هیدرولوژیکی برای کل محدوده مطالعاتی مهاباد محسوب می‌شود. با این وجود، از آنجا که دبی ثبت شده در ایستگاه گردیعقوب در اکثر زمان‌های سال از جریان زیست‌محیطی روخانه (یعنی تفاضل حجم آب رهاسازی شده از سد مهاباد و حجم تخصیص یافته به مصارف) پیروی می‌کند، مدل‌سازی هیدرولوژیکی محدوده مطالعاتی

مهاباد را می‌توان به مدل‌سازی محدوده بالادست سد مهاباد محدود کرد. مزیت این رویکرد در این است که مدل مفهومی مورد نظر برای یک محدوده "طبیعی" (و نه تحت تأثیر شدید اقدامات انسانی) توسعه داده می‌شود و پارامترهای واسنجی‌شده آن، توصیف درستی از فیزیک فرایندهای هیدرولوژکی حاکم بر محدوده مطالعاتی مهاباد که جریان تولید شونده از آن را کنترل می‌کنند، به دست می‌دهد. بنابراین، بعد از واسنجی مدل هیدرولوژیکی برای محدوده بیطاس و کوتر، می‌توان جریان ورودی به سد مهاباد را شبیه‌سازی نمود. در نهایت با در دست داشتن (۱) جریان ورودی به سد مهاباد، (۲) منحنی فرمان سد و (۳) میزان تحویل حجمی آب به مصارف مختلف، می‌توان میزان دبی خروجی از رودخانه‌ی مهاباد را تحت سناریوهای مختلف اقلیمی و نیز مصارف آب شبیه‌سازی نمود. با توجه به دلایل مذکور، در این مطالعه مدل هیدرولوژیکی برای محدوده بالادست سد مهاباد (یعنی مجموع حوضه رودخانه‌های بیطاس و کوتر) توسعه داده شد.

۳-۲- توسعه مدل شبیه‌ساز منابع و مصارف آب

مدل هیدرلوژیکی توسعه داده شده در این مطالعه از نوع مدل مفهومی است که از دو مخزن تشکیل می‌شود (Benettin et al., 2015). مخزن بالایی شبیه‌ساز جریان کم عمق زیرسطحی یا میانی و مخزن پایینی شبیه‌ساز جریان آب زیرزمینی است. لایه کم عمق زیرسطحی شامل آن بخش از لایه زیر سطح زمین است که دارای پاسخ هیدرولوژیکی سریعی بوده و جریان خروجی از این بخش (بر خلاف جریان آب زیرزمینی) به سرعت وارد جریان رودخانه می‌شود. عمق متناظر با این قسمت از خاک معمولاً برابر با عمق ناحیه‌ی ریشه (بسته به نوع پوشش گیاهی منطقه تحت مدل‌سازی) درنظر گرفته می‌شود. معادله بیلان آب برای این لایه را می‌توان به صورت کلیِ زیر نوشت:

$$\begin{aligned}\frac{dS_{sw}}{dt} = {} & I_{sw}(t) + T_{sw}(t) + P(t) - ET_{sw}(t) \\ & - L_{sw}(t) - W_{sw}(t) \\ & + \alpha\left(W_{sw}(t) + W_{gw}(t)\right) \\ & + O_{sw}(t)\end{aligned} \qquad (۱)$$

که در آن S_{sw} حجم آب در لایه کم عمق زیرسطحی (مترمکعب)، I_{sw} حجم آب ورودی از خارج از محدوده (مترمکعب)، T_{sw} حجم آب انتقالی به محدوده (مترمکعب)، P حجم آب ورودی از بارش (مترمکعب)، ET_{sw} حجم تبخیر–تعرق از محدوده (مترمکعب)، L_{sw} حجم آب خروجی از لایه کم‌عمق زیرسطحی (مترمکعب)، W_{sw} حجم آب برداشتی از منابع آب سطحی (مترمکعب) و W_{gw} حجم آب برداشتی از منابع آب زیرزمینی (مترمکعب) است. O_{sw} مؤلفه شامل سایر ورودی و خروجی‌های ممکن به لایه کم‌عمق زیرسطحی است که به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$O_{sw}(t) = G_{sw}(t) + D_{sw}(t) - Inf(t) - F_{sw}(t) \qquad (۲)$$

که در آن G_{sw} حجم آب ورودی به لایه کم عمق زیرسطحی به واسطه تخلیه نابهنگام چشمه‌ها و قنوات (مترمکعب)، D_{sw} حجم آب ورودی به لایه کم عمق زیرسطحی ناشی از زهکشی از آب زیرزمینی (مترمکعب)، Inf_{sw} حجم آب خروجی از لایه کم عمق زیرسطحی به واسطه نفوذ عمقی آب سطحی از کانال‌ها و مزارع (مترمکعب) و F_{sw} حجم آب خروجی از لایه کم عمق زیرسطحی به واسطه نفوذ از جریانات سطحی و سیلاب (مترمکعب) است.

با توجه به اینکه داده‌های مربوط به مؤلفه‌های I_{sw}، T_{sw}، P،ET_{sw} و مصارف را می‌توان از منابع اطلاعاتی موجود استخراج کرد، مؤلفه‌های S_{sw} و L_{sw} تنها مجهولات رابطه (۱) هستند. بنابراین برای حل این معادله نیاز به یک رابطه مستقل دیگر بین S_{sw} و L_{sw} است که می‌توان آن را به صورت یک تابع توانی به صورت زیر نوشت [26]:

$$L_{sw}(t) = k_{sw}S_{sw}(t)^{b_{sw}} \qquad (۳)$$

که در آن k_{sw} و b_{sw} به ترتیب برابر با ضریب و توان رابطه توانی برای لایه کم عمق زیرسطحی است. درنظر گرفتن ضریب زهکشی k_{sw} به عنوان یک پارامتر مدل به دلیل وابستگی زیاد مقدار و واحد آن به توان b_{sw}، عموماً چالش برانگیز است. بنابراین، در این مطالعه مدل را بر حسب توان b_{sw} و مقدار "ذخیره‌ی مرجع" ($S_{sw,\,ref}$) توسعه می‌دهیم. به لحاظ فیزیکی، مفهوم ذخیره مرجع عبارت از مقداری از حجم ذخیره آب است که در آن نرخ جریان زهکشی شونده از لایه در درازمدت برابر با متوسط نرخ ورودی‌های به لایه است. بنابراین، ارتباط بین مقدار ذخیره مرجع، ورودی و خروجی‌های لایه کم عمق زیرسطحی را می‌توان به صورت رابطه زیر نوشت:

$$P - ET_{sw} + \alpha\left(W_{sw}(t) + W_{gw}(t)\right) + O_{sw} = k_{sw}S_{sw.ref}{}^{b_{sw}} \qquad (۴)$$

لایه آب زیرزمینی شامل آن بخش از لایه زیر سطح زمین است که بین سنگ بستر و ناحیه ریشه قرار دارد و دارای پاسخ هیدرولوژیکی کندی است. این لایه توسط بخشی از جریان زهکش شونده از لایه اول تغذیه شده و جریان خروجی آن شامل تبخیر–تعرق، جریان خروجی به رودخانه و جریان خروجی به خارج محدوده از طریق آبخوان است. معادله بیلان آب برای این لایه را می‌توان به صورت کلیِ زیر نوشت:

(۵)

$$\frac{dS_{gw}}{dt} = I_{gw.in}(t) - I_{gw.out}(t) + \big(1-\beta(t)\big)L(t) - ET_{gw}(t) - Q_{gw}(t) - W_{gw}(t) - O_{gw}(t)$$

که در آن S_{gw} حجم آب در لایه آب زیرزمینی (مترمکعب)، $I_{gw,in}$ حجم آب ورودی از آبخوان‌های خارج از محدوده (مترمکعب)، $I_{gw,out}$ حجم آب خروجی از آبخوان (مترمکعب)، ET_{gw} حجم تبخیر–تعرق از لایه آب زیرزمینی (مترمکعب)، $(1-\beta)L_{gw}$ حجم آب خروجی از لایه آب زیرزمینی (مترمکعب)، W_{gw} حجم آب برداشت شده از لایه آب زیرزمینی (مترمکعب) است. O_{gw} مؤلفه شامل سایر ورودی و خروجی‌های ممکن به لایه آب زیرزمینی است که همانند رابطه (۲) اما با علامت منفی نوشته می‌شود. ضریب β، ثابت تقسیم آب زهکشی شده از لایه اول بین آب خروجی به رودخانه و آب زیرزمینی است که تابعی از زمان بوده و به صورت زیر نوشته می‌شود (Benettin et al., 2015):

$$\beta(t) = \beta_0 \frac{S_{sw}(t)}{nZ_r} \quad (۶)$$

در این رابطه، n ضریب تخلخل خاک در ناحیه ریشه و Z_r برابر با عمق ناحیه ریشه است. با در دست داشتن β، دبی جریان خروجی از لایه کم عمق زیرسطحی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_{sw}(t) = \beta(t)L(t) \quad (۷)$$

مزیت درنظر گرفتن β به صورت متغیر با زمان در آن است که در دوره‌های زمانی با بارندگی زیاد که درجه رطوبت خاک بالا است، آب بیشتری به طور مستقیم به رودخانه وارد می‌شود. با توجه به اینکه داده‌های مربوط به مؤلفه‌های $I_{gw,in}$، $I_{gw,out}$، ET_{gw} و W_{gw} در رابطه (۶) را می‌توان از منابع اطلاعاتی موجود استخراج کرد، مؤلفه‌های S_{gw} و L_{gw} تنها مجهولات باقیمانده هستند. بنابراین، برای حل این معادله نیاز به یک رابطه مستقل دیگر بین S_{gw} و L_{gw} است که می‌توان آن را به صورت یک تابع توانی به صورت زیر نوشت (Brutsaert and Nieber, 1977):

$$L_{gw}(t) = k_{gw}S_{gw}(t)^{b_{gw}} \quad (۸)$$

که در آن k_{gw} و b_{gw} به ترتیب برابر با ضریب و توان رابطه توانی برای لایه آب زیرزمینی است. مقدار ذخیره مرجع برای لایه آب زیرزمینی ($S_{gw,\,ref}$) را می‌توان به صورت رابطه زیر نوشت:

(۹)

$$\frac{}{I_{gw.in} - I_{gw.out} + (1-\beta)L - ET_{gw} - W_{gw} - O_{gw}} = k_{gw}S_{gw,ref}{}^{b_{gw}}$$

با توجه به مجموعه معادلات فوق β، b_{sw}، b_{gw}، $S_{gw,\,ref}$ و $S_{gw,\,ref}$ پنج پارامتر مدل هستند که می‌بایست واسنجی گردند. در نهایت، مقدار دبی رودخانه از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود که در آن W_{sw} برابر حجم آب برداشت شده به طور مستقیم از رودخانه (مترمکعب) است.

$$Q(t) = \beta(t)L(t) + Q_{gw(t)} - W_{sw}(t) \quad (۱۰)$$

۳-۳- توسعه مدل اقتصاد کشاورزی

برآورد سود خالص حاصل از یک فعالیت کشاورزی به عوامل متعددی بستگی دارد که روی قیمت محصول از زمان تولید تا مصرف نهایی تأثیر می‌گذارند (Naraghi et al., 2015; Vafabakhsh et al., 2019). مدل اقتصاد کشاورزی در این مطالعه از سه بخش کلی به صورت زیر تشکیل می‌شود: (۱) بخش برآورد ارزش ناخالص تولید کشاورزی حاصل از فروش محصولات کشاورزی؛ (۲) بخش برآورد هزینه تولید شامل خدمات ماشینی، خدمات نیروی انسانی و هزینه‌های مصرفی در بخش کشاورزی؛ و (۳) بخش برآورد ارزش خالص تولید در بخش کشاورزی. در ادامه به تشریح چارچوب و جزییات مربوط به مؤلفه‌های هر یک از بخش‌های مدل اقتصاد کشاورزی پرداخته می‌شود.

۳-۳-۱- برآورد ارزش ناخالص تولید کشاورزی

ارزش ناخالص تولید کشاورزی حاصل از فروش محصولات زراعی و باغی کشاورزی از مجموع حاصل ضرب سطح زیر کشت در عملکرد در قیمت هر محصول طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

(۱۱)

$$GI(t) = \sum_{a=1}^{n_{agr}} A_a(t)P_a(t)F_a(t) + \sum_{g=1}^{m_{gar}} A_g(t)P_g(t)F_g(t)$$

که در آن، GI درآمد ناخالص (ریال)، A سطح زیر کشت (هکتار)، P عملکرد محصول (تن بر هکتار)، F قیمت فروش محصول (ریال بر تن)، n_{agr} تعداد کل محصولات زراعی، m_{gar} تعداد کل محصولات باغی، a معرف یک محصول زراعی، g معرف یک محصول باغی و t زمان (سال) است. همانطور که ملاحظه می‌شود، سطح زیر کشت، عملکرد محصول و قیمت فروش محصول همگی به صورت متغیر با زمان و به کمک اطلاعات اخذ شده از سازمان جهاد کشاورزی استان‌ها و همچنین اطلاعات موجود در آمارنامه‌ها برای محاسبه درآمد ناخالص کشاورزان مورد استفاده قرار می‌گیرند.

- برآورد هزینه تولید کشاورزی

هزینه تولید کشاورزی برابر با مجموع کلیه هزینه‌های مربوط به خدمات ماشینی، خدمات نیروی انسانی و هزینه‌های مصرفی است. در

واقع، هزینه‌های بالا متعلق به هزینه کلیه عملیات مربوط به آماده‌سازی زمین، کاشت، داشت و برداشت و هزینه آب و زمین می‌باشد.

- برآورد ارزش خالص تولید کشاورزی

با در اختیار داشتن ارزش ناخالص تولید و مجموع هزینه‌های تولید (PC)، ارزش خالص تولید کشاورزی (NB) طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$NB(t) = GI(t) - PC(t) \quad (۱۲)$$

شایان ذکر است که چنانچه بتوان هزینه مربوط به خدمات نیروی انسانی را به صورت جداگانه برآورد کرد، ارزش افزوده تولید کشاورزی را نیز می‌توان از کسر هزینه‌های مصرفی و خدمات ماشینی از ارزش ناخالص تولید محاسبه نمود.

۳-۴- محاسبه تبخیر-تعرق مرجع، تبخیر-تعرق پتانسیل، بارش مؤثر و نیاز خالص آبیاری

تبخیر-تعرق مرجع (ET_{ref}) از روش پنمن-مانتیث بر مبنای گیاه مرجع چمن و به کمک داده‌های ایستگاه سینوپتیک مهاباد محاسبه شد. به منظور تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل (ET_p) به صورت حاصل ضرب تبخیر-تعرق مرجع در ضریب گیاه (K_c)، منحنی تغییرات ضریب گیاهی از ابتدای زمان رشد تا مرحله برداشت آن برای هر یک از محصولات غالب محدوده مطالعاتی از روش پیشنهادی فائو با استفاده از ضرایب گیاهی در طول دوره رشد گیاه، تقویم زراعی محصولات و حداکثر ارتفاع گیاه به دست آمد. در این پژوهش، ضرایب گیاهی برای تمامی محصولات غالب زراعی و پنج محصول غالب باغی (که تشکیل دهنده ۹۰ درصد کل سطح زیر کشت سالانه در محدوده مطالعاتی مهاباد هستند) تعیین شد. با در دست داشتن منحنی ضریب گیاهی برای هر محصول مورد نظر، تبخیر-تعرق پتانسیل در محدوده مطالعاتی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$ET_p = \sum_{c=1}^{N} ET_{ref} K_{c,i} w_i \quad (۱۳)$$

که در آن w_i درصدی از کل سطح کشت است که به محصول i تعلق دارد، N برابر با تعداد کل محصولات، $K_{c,i}$ ضریب گیاهی متناظر با آن محصول و ET_p تبخیر-تعرق پتانسیل کل منطقه است. در گام بعدی، بارش مؤثر با استفاده از روش پیشنهادی فائو محاسبه شد و سپس از تفاضل تبخیر-تعرق پتانسیل و بارش مؤثر، نیاز خالص آبیاری تخمین زده شد. در نهایت، با تقسیم نیاز خالص آبیاری بر راندمان آبیاری، نیاز ناخالص آبیاری به دست می‌آید.

۳-۵- شبیه سازی سناریوهای تغییر اقلیم

تاکنون مطالعات متعددی در حوضه دریاچه ارومیه به منظور شبیه‌سازی تغییر اقلیم و بررسی اثرات آن روی منابع آب حوضه انجام شده است (Ahmadaali et al., 2018). در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی سناریوهای تغییر اقلیم، از نتایج مطالعه (Ahmadaali et al., 2018) که برای ایستگاه سینوپتیک مهاباد انجام شده است، استفاده شد. این نتایج، خروجی مدل اقلیمی جهانی HadCM3 GCM (Pope et al., 2000) تحت سه سناریوی تغییر اقلیم A2، A1B و B1 است که روند تغییرات میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و دمای کره زمین در این سه سناریو همانند سناریوهای RCP8.5، RCP6.0 و RCP4.5 در گزارش پنجم IPCC است. علت انتخاب این سه سناریو، نزدیکتر بودن شرایط آنها نسبت به سایر سناریوها برای کشور ایران است. از آنجا که قدرت تفکیک مکانی خروجی این مدل‌های اقلیمی (یعنی ۴۱۷ کیلومتر در ۲۸۷ کیلومتر) دارای دقت مناسب در مقیاس یک محدوده مطالعاتی نیست، ریزمقیاس کردن آنها امری اجتناب‌ناپذیر است که این عملیات در مطالعه (Ahmadaali et al., 2018) با استفاده از مدل LARS-WG انجام شده است که ورودی آن دمای روزانه حداکثر، دمای روزانه حداقل، بارش روزانه و ساعات آفتابی روزانه می‌باشد. بعد از واسنجی مدل اقلیمی محلی و سپس اعتبارسنجی آن برای داده‌های ایستگاه سینوپتیک مهاباد برای بازه زمانی پایه سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۸۹، از آن برای تولید سری زمانی بارش و دما برای بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۴۱۹ استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که متوسط بارش در محدوده مطالعاتی مهاباد در دوره پیش‌بینی نسبت به دوره‌ی پایه تحت سناریوهای A2، A1B و B1 به ترتیب ٪۲/۴۶، ٪۳/۲۱ و ٪۶/۶۷ افزایش خواهد یافت. همچنین، متوسط دما در این محدوده در دوره پیش‌بینی نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای A2، A1B و B1 به ترتیب افزایش ٪۶/۵۹، ٪۴/۴۴ و ٪۵/۸۱ را تجربه خواهد کرد. این تغییرات، مبنای پیش‌بینی تغییرات تبخیر-تعرق مرجع و بارش برای استفاده در مدل هیدرولوژیکی توسعه داده شده در این مطالعه قرار گرفتند. نکته قابل توجه در این نتایج، افزایش میزان بارش تحت هر سه سناریوی اقلیمی است که به منظور کسب اطمینان از صحت آن، این نتایج با نتایج مطالعه (Sanikhani et al., 2018) مقایسه شد که این مشاهده را تأیید می‌کنند.

برای شبیه‌سازی سناریوی این بخش فرض بر این بود که روند معناداری در سری زمانی سطح زیر کشت محصولات کشاورزی در محدوده بالادست سد مهاباد طی ۲۰ سال آینده مشاهده نخواهد شد. علت درنظر گرفتن این فرض، برقراری نظام تحویل حجمی آب به دشت مهاباد است که به صورت کنترل‌شده انجام می‌شود. بنابراین، در صورت ادامه این شرایط، انتظار می‌رود افزایش سطح زیرکشت با توجه به منابع محدود در دسترس انجام نپذیرد. به منظور محاسبه تبخیر–تعرق پتانسیل ماهانه تحت هر کدام از سه سناریو، ابتدا میانگین درازمدت دمای ماهانه در بازه زمانی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۵ به عنوان دمای پایه محاسبه و سپس این مقادیر به میزان ضریب متوسط افزایش طی ۲۰ سال آینده افزایش داده شدند. در گام بعدی، مقادیر دمای ماهانه برای ۲۰ سال آینده در رابطه تورنت وایت اعمال شد تا در نهایت میزان ارتفاع تبخیر–تعرق واقعی سالانه با لحاظ اثر رطوبت خاک بدست آید. نحوه تأثیر رطوبت خاک به این صورت است که اگر در یک گام زمانی، مقدار بارش از مقدار تبخیر–تعرق پتانسیل بیشتر باشد، مقدار تبخیر–تعرق واقعی برابر با تبخیر–تعرق پتانسیل درنظر گرفته می‌شود و آب مازاد به رطوبت ذخیره در خاک اضافه می‌شود، با این شرط که مقدار رطوبت ذخیره در خاک از ۷۵ میلی‌متر بیشتر نشود. چنانچه مقدار بارش از مقدار تبخیر–تعرق پتانسیل کمتر باشد، دو حالت ممکن بررسی می‌شوند: اگر مجموع میزان بارش و رطوبت ذخیره شده در خاک از تبخیر–تعرق پتانسیل بیشتر باشد، مقدار تبخیر–تعرق واقعی برابر با تبخیر–تعرق پتانسیل درنظر گرفته می‌شود و تفاوت بین مقدار بارش تبخیر–تعرق پتانسیل از میزان رطوبت ذخیره شده در خاک کسر می‌شود؛ و اگر مجموع میزان بارش و رطوبت ذخیره شده در خاک از تبخیر–تعرق پتانسیل کمتر باشد، مقدار تبخیر–تعرق واقعی برابر با مجموع مقدار بارش و رطوبت ذخیره شده در خاک درنظر گرفته می‌شود که در این صورت کل میزان رطوبت ذخیره شده در خاک مصرف گردیده و برابر با صفر می‌شود. به منظور شبیه‌سازی سری زمانی بارش از سال ۱۳۹۵ تا ۱۴۱۵، فرض شد که الگوی بارش از نحوه جهت تغییرات ماهانه و نیز زمان بین رویدادهای بارندگی همانند سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۵ باشد. در این صورت، سری زمانی بارش در سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۵ به عنوان سری زمانی بارش پایه درنظر گرفته شد و سپس بارش هر سال در بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۱۵ به میزان ضریب متوسط افزایش بارش طی ۲۰ سال آینده مطابق با سناریوهای تغییر اقلیم افزایش داده شد.

– شبیه‌سازی سناریوهای تغییر الگوی کشت

مدل اقتصاد کشاورزی توصیف شده این امکان را فراهم می‌آورد تا محصولات کشاورزی با بیشترین و کمترین ارزش خالص تولید شناسایی شوند. همزمان، به کمک تحلیل نیاز آبی این محصولات در کنار ارزش خالص تولید آنها می‌توان به طراحی سناریوهای مختلف تغییر الگوی کشت با هدف کم کردن نیاز آبی و بالا بردن سود اقتصادی در منطقه طرح پرداخت. در این سناریوها، میزان افزایش ارزش خالص تولید و کاهش نیاز آبی کشاورزی منطقه طرح به ازای درصدهای مشخصی از تغییر الگوی کشت از یک محصول مشخص به محصول جایگزین تعیین خواهد شد. همچنین، این مقادیر برای سناریوی تغییر الگوی کشت ترکیبی به صورت تبدیل درصدهای متفاوتی از سطوح زیر کشت چند محصول مختلف به کشت جایگزین نیز مورد تحلیل قرار می‌گیرند. کشت جایگزین بررسی شده بر مبنای امکان‌سنجی تغییر الگوی کشت و مزایای اقتصادی آن با توجه به شرایط اقلیمی و خاک در حوزه دریاچه ارومیه در قالب تحلیل زنجیره ارزش است که پیشتر انجام شده است (STPRI, 2016). تحلیل پایداری کشت گندم، که دارای بالاترین سطح زیرکشت در منطقه طرح است و یک کالای استراتژیک محسوب می‌شود، نیز با توجه به شرایط اقتصادی کشور و ارزش خالص تولید این محصول مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴- داده تحقیق

۴-۱- داده‌های هواشناسی و هیدرومتری

در محدوده مطالعاتی مهاباد، ۱۴ ایستگاه باران‌سنجی، دو ایستگاه تبخیرسنجی، دو ایستگاه کلیماتولوژی و یک ایستگاه سینوپتیک وجود دارد که از این تعداد، ۹تای آن متعلق به سازمان هواشناسی و بقیه متعلق به وزارت نیرو هستند. شکل ۱ موقعیت این ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. در محدوده مطالعاتی مهاباد، ایستگاه سینوپتیک مهاباد با ارتفاع ۱۳۵۲ متر در عرض جغرافیایی ۳۶،۷۵،۳۳،۳ شمالی و طول جغرافیایی ۴۵،۷۱،۵۲،۷ شرقی در سال ۱۳۶۲ تأسیس شده است که داده‌های ساعتی دمای کمینه، دمای بیشینه، دمای متوسط، سرعت باد، تعداد ساعات آفتابی و رطوبت نسبی اندازه‌گیری شده توسط آن به صورت ساعتی در بازه زمانی ۱۳۶۹/۰۷/۰۱ تا ۱۳۹۵/۰۶/۳۱ از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. در این محدوده مطالعاتی، شش ایستگاه آبسنجی وجود داشته است که سه ایستگاه دهبکر، پلی سرخ مهاباد و برغو تعطیل و ایستگاه‌های بیطاس، کوتر و گردیعقوب از نوع درجه یک بوده و موقعیت آنها در شکل ۱ نشان داده شده است. ایستگاه‌های

بیطاس و کوتر به ترتیب روی رودخانه‌های بیطاس و کوتر واقع در سمت شرقی و غربی بالادست محدوده، قبل از سد مهاباد، قرار داشته و مساحتی برابر با ۱۸۰ و ۴۰۴ کیلومترمربع را زهکشی می‌کنند. ایستگاه گردیعقوب که در انتهای محدوده روی رودخانه مهاباد قرار دارد، مساحت معادل این محدوده مطالعاتی که برابر با ۱۵۰۸ کیلومترمربع است را زهکشی می‌کند.

- داده‌های کشاورزی و اقتصادی

اطلاعات مربوط به الگوی کشت، سطح زیر کشت (به تفکیک آبی و دیم) و میزان تولید (به تفکیک آبی و دیم) محصولات زراعی و باغی در شهرستان مهاباد (با کد ۴۰۷ در تقسیمات کشوری) از سال زراعی ۱۳۷۰-۱۳۶۹ تا ۱۳۹۷-۱۳۹۶ از سازمان جهاد کشاورزی استانی دریافت شد. متوسط قیمت یک کیلوگرم از محصولات غالب زراعی برای سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۶ از نشریات "قیمت فروش محصولات و هزینه خدمات کشاورزی در مناطق روستایی کشور" استخراج شد. اطلاعات مربوط به بخش‌های مختلف هزینه تولید محصولات کشاورزی شامل هزینه‌های مصرفی، هزینه خدمات ماشینی و هزینه خدمات انسانی برای محصولات زراعی آبی در استان آذربایجان غربی از سال زراعی ۱۳۷۹-۱۳۷۸ تا ۱۳۹۴-۱۳۹۳ از پایگاه اطلاعات هزینه تولید متعلق به وزارت جهاد کشاورزی (معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات) دریافت شد. در اینجا خاطر نشان می‌گردد که اطلاعات مندرج در آمارنامه‌های کشاورزی ممکن است از دقت کافی برخوردار نباشند. با این حال، عدم دسترسی به اطلاعات میدانی مانع از صحت‌سنجی این اطلاعات بوده است. همچنین، تعمیم دادن داده‌های شهرستانی و استانی به یک محدوده مطالعاتی دقت بررسی‌ها را کاهش می‌دهد.

- سایر اطلاعات تکمیلی

با توجه به اینکه محدوده مطالعاتی مهاباد خود یک زیرحوضه درجه چهار بوده و در بخش حاشیه‌ای حوضه دریاچه ارومیه قرار گرفته است، جریان سطحی‌ای از سایر زیرحوضه‌های مجاور به این محدوده وارد نمی‌شود و بنابراین I_{sw} برابر با صفر است. همچنین، مؤلفه T_{sw} نیز به دلیل عدم وجود انتقال بین حوضه‌ای در این محدوده‌ی مطالعاتی برابر با صفر است. از آنجا که داده‌های مربوط به مؤلفه‌های تشکیل دهنده O_{sw} (یا O_{gw}) در دسترس نیستند، این مؤلفه به عنوان یک پارامتر تنظیم‌کننده در مدل درنظر گرفته شده است. با توجه به جنس خاک در این منطقه، ضریب تخلخل برابر با ۰/۵ و عمق ناحیه ریشه برابر با ۱ متر درنظر گرفته شده است.

بر اساس نتایج مطالعات مربوط به به‌هنگام‌سازی بیلان منابع آب محدوده مطالعاتی حوضه دریاچه ارومیه منتهی به سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ (Consulting Engineers for Water and Sustainable Development, 2014)، کل ارتفاع تبخیر-تعرق واقعی سالانه بر اساس روش تورنت وایت در دشت و ارتفاع به ترتیب برابر با ۲۳۶ و ۲۲۵ میلی‌متر تخمین زده شده‌اند. بر این اساس، کل تبخیر-تعرق سالانه برابر با ۳۴۳/۲۳ میلیون مترمکعب برآورده شده که این میزان تقریباً برابر با ۵۳/۳ درصد بارش سالانه است. از این میزان تبخیر-تعرق، ۲۸۴/۳۱ میلیون مترمکعب آن در ارتفاعات و ۵۸/۹۲ میلیون مترمکعب در دشت اتفاق می‌افتد. در اینجا اضافه می‌شود که در روش به کار گرفته شده به منظور تخمین تبخیر-تعرق واقعی از تبخیر-تعرق پتانسیل، با توجه به وضعیت اقلیمی، سنگ‌شناسی و پوشش گیاهی محدوده مطالعاتی، میزان بارندگی مورد نیاز جهت تأمین رطوبت خاک برابر با ۷۵ میلی‌متر در ارتفاعات و ۱۰۰ میلی‌متر در دشت درنظر گرفته شده است. در این مطالعه از تبخیر-تعرق در بخش عمیق آب زیرزمینی صرف‌نظر شده است.

طبق اطلاعات موجود در سامانه داده شرکت مدیریت منابع آب ایران، میزان کل برداشت از چاه‌های محدوده مطالعاتی مهاباد در سال‌های ۱۳۸۸، ۱۳۸۹ و ۱۳۹۲ به ترتیب برابر با ۰/۰۶۱، ۱۵/۲۱ و ۲/۲۱ میلیون مترمکعب بوده است. همچنین، میزان برداشت آب از انهار در سال‌های ۱۳۸۷، ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹ به ترتیب برابر با ۱/۱۸، ۱۸/۳۲ و ۲/۸۹ میلیون مترمکعب بوده است. میزان برداشت آب از آب‌بندان‌ها در سال‌های ۱۳۸۶، ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ به ترتیب برابر با ۰/۰۴۷، ۰/۱۴ و ۰/۳۳ میلیون مترمکعب بوده است. میزان برداشت آب از چشمه‌ها در سال ۱۳۸۱ برابر با ۰/۷۷ میلیون مترمکعب بوده است. میزان برداشت آب از موتورپمپ‌ها در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ به ترتیب برابر با ۰/۷۴ و ۰/۴۱۵ میلیون مترمکعب بوده است. با توجه به اطلاعات بالا، ضریب برگشت آب از مجموع مصارف سطحی و زیرزمینی برابر با ۰/۳۲ تعیین شده است.

سری زمانی بارش از میانگین سری زمانی دو ایستگاه پل سرخ مهاباد و سیاه‌قل به دست آمدند. علت انتخاب این دو ایستگاه، ثبت داده در آنها در بازه مورد نظر برای مدل‌سازی بوده است که البته از آنجا که این دو ایستگاه به تنهایی معرف گرادیان بارش در کل محدوده مورد نظر نیست، این محدودیت یکی از عوامل خطا در مدل‌سازی محسوب می‌شود. میزان تبخیر-تعرق هر ماه از سال با توجه به نسبت تبخیر-تعرق ماهانه به کل تبخیر-تعرق سالانه درنظر گرفته شد که طبق

نتایج مطالعات به‌هنگام‌سازی بیلان منابع آب محدوده مطالعاتی حوضه دریاچه ارومیه منتهی به سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ (Consulting Engineers for Water and Sustainable Development, 2014)، این نسبت برای ماه‌های مهر تا شهریور به ترتیب برابر با ۰/۰۹۱۷، ۰/۰۴۶۸، ۰/۰۱۷۷، ۰/۰۰۱۴، ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۸، ۰/۰۶۷۵، ۰/۱۰۸، ۰/۱۵۲، ۰/۱۸۲، ۰/۱۷۶ و ۰/۱۴۷ تعیین شده است. از آنجا که محدوده مدل‌سازی در ارتفاعات محدوده مطالعاتی مهاباد قرار دارد، از ارتفاع تبخیر-تعرق واقعی تخمین زده شده در ارتفاعات (یعنی ۲۲۶ میلی‌متر) برای تخمین ارتفاع تبخیر-تعرق در هر ماه استفاده شد. در اینجا خاطر نشان می‌شود که این میزان برای تمام سال‌های دوره مدل‌سازی برابر درنظر گرفته شد که این فرض با توجه به نوع کاربری اراضی غالب در این محدوده (یعنی مرتع) و عدم تغییر قابل توجه آن در سال‌های گذشته به دلیل اینکه توسعه کشاورزی عمدتاً در پایین دست سد مهاباد انجام شده است، منطقی است. برداشت آب از منابع سطحی (شامل انهار، آب‌بندان و موتورپمپ) و زیرمینی (شامل چاه و چشمه) به ترتیب برابر با ۱۸/۹ میلیون مترمکعب (بر اساس اطلاعات سال ۱۳۸۹) و ۱/۴۸ میلیون مترمکعب (بر اساس اطلاعات سال ۱۳۹۲) به صورت ثابت در طول دوره مدل‌سازی درنظر گرفته شدند. مشابه آنچه پیشتر عنوان شد، با توجه به توسعه غیر قابل ملاحظه کشاورزی در محدوده مدل‌سازی، این فرض نیز قابل قبول به نظر می‌رسد. با توجه به اینکه آبخوان آبرفتی دشت مهاباد در پایین دست سد مهاباد واقع است، مؤلفه‌های $I_{gw,in}$ و $I_{gw,out}$ برابر با صفر درنظر گرفته شدند.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- واسنجی و اعتبارسنجی مدل هیدرولوژیکی

پنج پارامتر مدل مفهومی هیدرولوژیکی توسعه داده شده از روش شبیه‌سازی مانتی کارلو برای یک دوره ۱۱ ساله در بازه زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۱ به صورت ماهانه واسنجی گردیدند. تعداد کل مجموعه ترکیب پارامترها برای اجرای مدل برابر با ۱۹۲۰۰۰ و معیار واسنجی مدل، بیشینه کردن ضریب NSE بین دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی بوده است. مقادیر واسنجی برای پارامترهای b_u، b_l، β_0، $Su_{,ref}$ و $Sl_{,ref}$ به ترتیب برابر با ۱۸، ۱، ۰/۸، ۹۰۰ میلیمتر و ۲۰۰۰ سانتی‌متر بدست آمد. از نتایج حاصل از پارامترهای واسنجی شده، این نکته قابل توجه است که مقدار b_l، یعنی توان رابطه توانی بین دبی و حجم ذخیره در مخزن تحتانی، برابر با ۱ واسنجی شده است که این نتیجه، یعنی رابطه خطی بین این دو متغیر، در بسیاری از مطالعات دیگر نیز مشاهده شده و بنابراین مطابقت دارد. همچنین، میزان افت سطح آب در لایه‌ی تحتانی در دوره ۱۱ ساله واسنجی مدل برابر با ۷/۶ سانتی‌متر در سال بدست آمده است که تطابق قابل قبولی با نتایج دیگر مطالعات در این محدوده دارند. به عنوان نمونه، مطالعه (Abbas Novinpour and Sadeghi Aghdam, 2018) افت سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی سال‌های ۱۳۷۶-۱۳۷۵ تا ۱۳۹۰-۱۳۸۹ را برابر با ۶ سانتی‌متر بر سال گزارش کرده است.

شکل ۲ مجموع سری زمانی دبی ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری بیطاس و کوتر را به همراه دبی شبیه‌سازی شده در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۳تا ۱۳۹۱ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، مدل توسعه داده شده با مقدار ضریب NSE برابر با ۰/۶۸ توانسته است تغییرات دبی مشاهداتی را به خوبی شبیه‌سازی کند. با این وجود، مدل عمکرد خوبی در شبیه‌سازی برخی دبی‌های حدی نداشته است. دلایل مختلفی را برای این اختلاف می‌توان برشمرد که از جمله‌ی آنها می‌توان به احتمال خطای ثبت دبی‌های حدی توسط تجهیزات ثبت داده، عدم توانایی مدل در شبیه‌سازی آن بخش از جریان که به صورت رواناب سطحی مازاد بر نفوذ یا رواناب سطحی مازاد بر اشباع تشکیل می‌شود، و یا عدم دقت داده‌های موجود برای مصارف قانونی غیرقانونی آب از طریق انهار و چاه‌ها اشاره کرد. در گام بعدی با در اختیار داشتن پارامترهای واسنجی شده، مدل توسعه داده شده برای بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵-۱۳۹۴ اعتبارسنجی شده است که نتایج آن در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، مدل به خوبی و با دقت بالایی (NSE برابر با ۰/۷۳) توانسته است تغییرات سری زمانی دبی ورودی به سد مهاباد را در این دوره شبیه‌سازی کند.

- اثر تغییر اقلیم بر حجم آب ورودی به سد مهاباد

نتایج مربوط به حجم بارش مازاد سالانه (در مقایسه با شرایط بدون تغییر اقلیم)، حجم تبخیر-تعرق واقعی سالانه و حجم آب ورودی سالانه به سد مهاباد تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم حاکی از آن است که بیشترین میزان افزایش بارش ورودی به منطقه طرح به ترتیب مربوط به سناریوهای B1، A1B و A2 اقلیمی است. همچنین، نرخ تبخیر-تعرق سالانه برای سناریوی A2 نسبت به دو سناریوی دیگر در اکثر سال‌ها به طور قابل توجهی بیشتر است. سناریوهای A1B و A2 مقادیر نرخ تبخیر-تعرق مشابهی را نسبت به یکدیگر نشان می‌دهند.

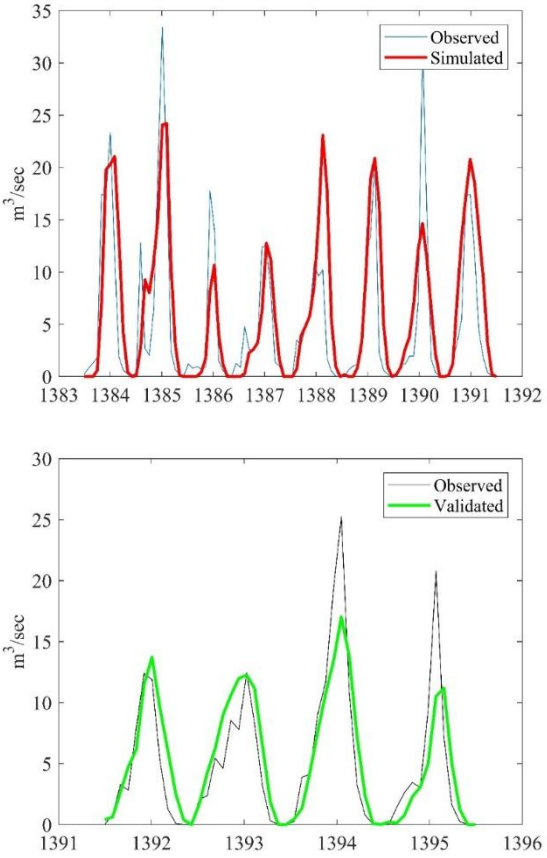

Fig. 2- Simulated versus observed flow into the Mahabad reservoir during the model calibration and validation periods

شکل ۲- مجموع سری زمانی دبی ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری بیطاس و کوتر به همراه دبی شبیه‌سازی شده در بازه زمانی ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۱ (دوره واسنجی) و بازه زمانی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵ (دوره اعتبارسنجی)

بنابراین نتایج بالا حاکی از آن است که سناریوی A2 کمترین بارش و بیشترین تبخیر–تعرق را نسبت به دو سناریوی دیگر نشان می‌دهد، در حالی که سناریوی A1B کمترین تبخیر–تعرق (و نه لزوماً کمترین با بیشترین بارش) و سناریوی B1 بیشترین بارش (و نه لزوماً کمترین یا بیشترین تبخیر–تعرق) را به دست می‌دهند.

شکل ۳ نمودار جعبه‌ای حجم آب ورودی سالانه به سد مهاباد طی سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۱۵ تحت هر یک از سناریوهای تغییر اقلیم به همراه نمودار مشابه برای این حجم طی ۲۰ سال گذشته را نشان می‌دهد. در سناریوهای A1B و B1 تمامی کمیت‌های آماری مانند میانگین، کمینه و بیشینه بیشتر از مقادیر مشابه نسبت به سناریوی پایه هستند که نشان دهنده افزایش حجم آب ورودی به سد تحت این سناریوها در آینده است. بیشترین جریان ورودی به سد مهاباد مربوط به سناریوی B1 و بعد از آن مربوط به سناریوهای A1B و A2 است. دامنه تغییرات این حجم برای سناریوی A1B بین ۱۰۰ تا ۴۰۱ میلیون مترمکعب و برای سناریوی B1 بین ۱۰۵ تا ۴۱۷ میلیون مترمکعب است. همچنین، میانگین حجم آب ورودی به سد در سناریوهای A1B و B1 به ترتیب ۱۵ و ۲۱ درصد (معادل ۳۲ و ۴۴ میلیون مترمکعب) بیشتر از مقدار مشابه در زمان پایه خواهد بود. این مقادیر بیش از یک‌سوم میزان کنونی آب تخصیص شونده به شبکه آبیاری و زهکشی مهاباد برای مصارف کشاورزی است که قابل توجه می‌باشد. بنابراین، با توجه به اینکه مصارف محدوده مطالعاتی طی تقریباً ۲۰ سال گذشته تقریباً صد درصد تأمین شده است (نتایج در اینجا آورده نشده است)، در صورت عدم توسعه کشاورزی در سال‌های آینده و کنترل مصارف، این مقدار افزایش حجم آب ورودی به سد مهاباد می‌تواند متضمن کاهش نیاز کنونی به برداشت (قانونی یا غیرقانونی) از منابع آب سطحی و زیرزمینی و همچنین امکان انجام رهاسازی از سد برای تأمین بیشتر نیاز زیست محیطی دریاچه ارومیه باشد. در مقابل، میانگین و کمینه حجم ورودی به سد تحت سناریوی A2 کمتر از مقادیر مشابه نسبت به گذشته است، به طوری که میانگین حجم ورودی به سد این سناریوی طی ۲۰ سال آینده ۱۵ میلیون مترمکعب کمتر از مقدار مشابه در گذشته می‌باشد که این مقدار تقریباً معادل ۱۶٪ مصارف سالانه کشاورزی است. این نتیجه به طور مشخص از منظر بازنگری برنامه‌های تخصیص آب حائز اهمیت است. به عبارت بهتر، تحت این سناریو نه تنها تأمین بخشی از نیاز زیست محیطی دریاچه ارومیه از طریق رهاسازی سد مهاباد امکان پذیر نیست، بلکه حصول اطمینان از تأمین نیاز مصارف کشاورزی محدوده نیز (با توجه به بیلان منفی کنونی در محدوده مطالعاتی مهاباد (Consulting engineers for water and sustainable development, 2014)) منوط به کاهش تقاضا برای آب از طریق اجرای سیاست‌های کاهش مصرف آب در بخش کشاوزی است.

نکته قابل توجه دیگر از نتایج به دست آمده آن است که با توجه به اینکه در سناریوی A2 بیشترین مقدار افزایش تبخیر–تعرق نسبت سناریوهای دیگر اتفاق می‌افتد، این نرخ افزایش توانسته اثر قوی‌تری را بر میزان دبی تولید شده نسبت به نرخ افزایش بارش اعمال نماید. این در حالی است که در دو سناریوی دیگر، اثر تجمعی مقادیر بیشتر نرخ بارش به همراه مقادیر کمتر نرخ تبخیر–تعرق (نسبت به سناریوی A2) موجب افزایش نرخ دبی تولید شده در مقایسه با گذشته شده

است. بنابراین، این نتایج حاکی از آن است که مقدار نسبی افزایش نرخ بارش در برابر افزایش نرخ تبخیر–تعرق، تعیین کننده نحوه تغییرات میزان دبی تولید شده است، به طوری که نه افزایش بارش لزوماً به معنای افزایش دبی تولید شده است و نه افزایش تبخیر–تعرق لزوماً به کاهش دبی تولید شده منجر می‌شود. آنچه درخور توجه است، مقدار نسبی تغییرات این دو متغیر و اثر تجمعی آن روی دبی تولید شونده تحت یک سناریوی اقلیمی مورد نظر است.

– تغییرات نیاز آبی، کل نیاز ناخالص آبیاری و عملکرد محصولات زراعی (تحت کشت آبی) و باغی

نتایج تحلیل تغییرات نیاز آبی، کل نیاز ناخالص آبیاری و عملکرد محصولات زراعی (تحت کشت آبی) و باغی را به همراه حجم آب تخصیص داده شده از سد مهاباد برای مصارف کشاورزی در بازه زمانی سال‌های ۱۳۷۷–۱۳۷۶ تا ۱۳۹۵–۱۳۹۴ حاکی از آن است که حجم نیاز آبی محصولات باغی با شیبی بسیار ملایمی از میزان ۲۴ به ۷۴ میلیون مترمکعب افزایش یافته است. این افزایش برای محصولات زراعی با شیب بسیار بیشتری همراه بوده، به طوری که نیاز آبی محصولات زراعی از میزان ۲۲۶ به ۵۶۰ میلیون مترمکعب تغییر یافته است. همچنین، این میزان در سال ۱۳۹۵–۱۳۹۴ تقریباً ۷/۵ برابر مقدار مشابه برای محصولات باغی در همین سال است که نشان از سهم چندین برابری محصولات زراعی در این منطقه از مصارف آب دارد. از سال آبی ۱۳۹۳–۱۳۹۲ تا ۱۳۹۵–۱۳۹۴ میزان نیاز خالص آبیاری به ترتیب برابر با ۱۶۶/۷۷، ۱۴۷/۸۶ و ۱۵۱/۸۸ میلیون مترمکعب، میزان نیاز خالص آبیاری به ترتیب برابر با ۴۱۶/۹۲، ۳۶۹/۶۶ و ۳۷۹/۷۰ میلیون مترمکعب و میزان تخصیص از سد مهاباد برای مصارف کشاورزی به ترتیب برابر با ۱۰۶/۲، ۱۰۳/۴ و ۹۵ میلیون مترمکعب در سال بوده است. آنچه در این سال‌ها قابل توجه است، کمتر بودن میزان تخصیص آب از سد مهاباد از میزان نیاز ناخالص آبیاری است که این کمبود می‌تواند یا منجر به کاهش عملکرد محصول شده باشد و یا اینکه کشاورزان برای تأمین آب مورد نیاز خود، روی به افزایش برداشت از چاه‌ها و انهار برای جبران این کسری آورده باشند.

بررسی عملکرد محصولات زراعی غالب در منطقه در بازه زمانی سال‌های ۱۳۷۷–۱۳۷۶ تا ۱۳۹۵–۱۳۹۴ نشان می‌دهد که عمکرد این محصولات از سال ۱۳۹۲ نه تنها کاهش نیافته، بلکه با شیب زیادی در مقایسه با سال‌های پیش از آن در حال افزایش بوده است. بنابراین این مشاهده گواه آن است که کسری آب خالص مورد نیاز آبیاری باید منجر به افزایش برداشت از ذخایر آب زیرزمینی و سطحی (به جز سد) شده باشد که طبعاً ضرورت توجه مدیریت کشاورزی و همچنین مصارف آب در این منطقه را تبیین می‌سازد.

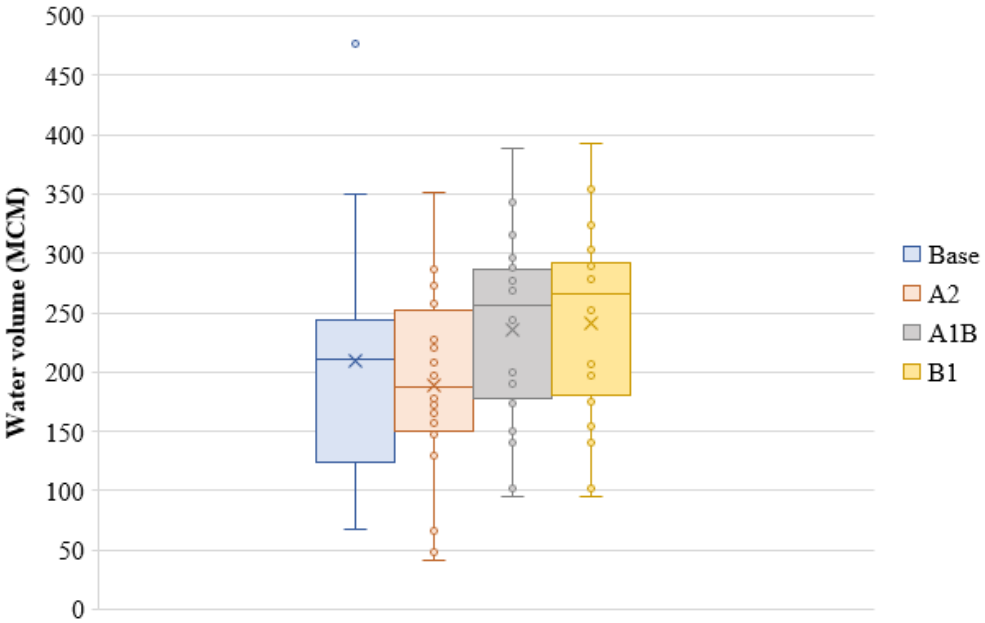

Fig. 3- The box diagram of the annual volume of water entering the Mahabad dam during the years 1395 to 1415 (Persian Calendar) under each of the climate change scenarios along with a similar diagram for this volume during the previous 20 years

شکل ۳– نمودار جعبه‌ای حجم آب ورودی سالانه به سد مهاباد طی سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۱۵ تحت هر یک از سناریوهای تغییر اقلیم به همراه نمودار مشابه برای این حجم طی ۲۰ سال ماقبل

- شناسایی محصولات کشاورزی با بیشترین ارزش خالص تولید

شکل ۴ ارزش خالص تولید محصولات غالب زراعی با کشت آبی در محدوده مطالعاتی مهاباد را برای سال‌های ۱۳۸۷-۱۳۸۶ تا ۱۳۹۳-۱۳۹۲ نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، ارزش خالص تولید گندم و جو آبی نسبت به سایر محصولات پایین‌تر و و در برخی از سال‌ها نزدیک به صفر بوده است. دلیل این مشاهده را می‌بایست در نحوه تغییرات میزان تولید، سطح زیرکشت و قیمت تولید این محصول جستجو کرد. نتایج بررسی‌های اضافی حاکی از ان است که سطح زیر کشت گندم و جو در این بازه زمانی رشدی منفی بوده، اما میزان تولید آن‌ها نیز کاهش یافته است. از طرفی دیگر، هزینه تولید این محصولات نیز افزایش یافته است. بنابراین، علی رغم اینکه قیمت فروش این محصولات نیز با افزایش همراه بوده است، افزایش قیمت نتوانسته منجر به رشد قابل ملاحظه ارزش ناخالص تولید شود و لذا هزینه تولید تقریباً با ارزش ناخالص تولید برابری و حتی در برخی سالها پیشی گرفته و منجر به منفی شدن ارزش خالص تولید شده است.

در مقابل، ارزش خالص تولید چغندرقند رشد مثبت قابل توجهی را نشان می‌دهد که عمدتاً ناشی از افزایش میزان تولید آن بوده است. همچنین، نکته قابل توجه در مورد چغندرقند آن است که هزینه تولید آن در یک هکتار به مراتب بیشتر از سایر محصولات بوده است و از طرفی قیمت فروش آن در یک هکتار نسبت به سایر محصولات از افزایش کمتری برخوردار بوده است. اما رشد بسیار زیاد تولید آن توانسته موجب غلبه میزان ارزش خالص تولید این محصول بر محصولات دیگر شود. به طور مشابه، یونجه نیز رفتار مشابهی از خود نشان می‌دهد. بنابراین، نتایج بالا نکات مهمی را در راستای ضرورت بازنگری مدیریت کشاورزی در محدوده مطالعاتی مهاباد تبیین می‌سازد. به طور مشخص، اگرچه تمایل کشاورزان برای افزایش تولید چغندرقند و یونجه برای دستیابی به سود بیشتر مشهود است، رشد فزاینده تولید این محصولات با نیاز آبی بسیار بالا تهدیدی برای مصارف آب در این منطقه محسوب می‌شود. به عنوان مثال، طبق نتایج حاصل از بخش ارزیابی اثرات تغییر اقلیم تحت سناریوی A2، تغییر اقلیم در این منطقه منجر به کاهش حجم آب ورودی به سد مهاباد به میزان ۱۵ میلیون مترمکعب می‌شود که این مقدار معادل نیاز آبی چغندرقند در صورت افزایش ۱۳ درصد در سطح زیر کشت آن است.

بنابراین، تغییر الگوی کشت و افزایش میزان تولید فعلی محصولات زراعی پُر آب‌بر در این منطقه افزایش تنش آبی به منابع آب زیرزمینی و سایر منابع آب سطحی را در پی خواهد داشت.

- تأثیر تغییر الگوی کشت بر نیاز خالص آبیاری و اقتصاد کشاورزی

در این بخش از مطالعه به ارزیابی تأثیر انواع مختلف سناریوهای تغییر الگوی کشت روی نیاز خالص آبیاری و ارزش خالص تولید در محدوده مطالعاتی مهاباد پرداخته می‌شود. برای این هدف، از آنجا که داده‌های لازم برای محاسبه ارزش خالص تولید تا سال ۱۳۹۳-۱۳۹۲ در دسترس هستند، این سال به عنوان سال پایه و به عبارتی مبنای مقایسه با نتایج سناریوهای تحت بررسی درنظر گرفته شده است. نتایج تحلیل سناریوهای تغییر الگوی کشت نشان می‌دهند که چنانچه ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد این سطح از چغندرقند (بر مبنای اطلاعات سال ۱۳۹۳) به کشت زعفران تغییر یابد، کل نیاز خالص آبی بخش زراعی آبی کاهش محسوسی می‌یابد. در واقع چنانچه کل ۲۷ درصد سطح کشت چغندرقند در سال ۱۳۹۳ به زعفران اختصاص می‌یافت، میزان نیاز خالص آبی بخش زراعت آبی از ۱۱۸ میلیون مترمکعب به ۹۸ میلیون مترمکعب، یعنی به میزان ۲۰ میلیون مترمکعب کاهش می‌یافت که معادل ۱۷ درصد صرفه‌جویی در مصارف آب کشاورزی است. این میزان همچنین معادل ۲۵ درصد حجم فعلی تخصیص آب از سد مهاباد برای مصارف کشاورزی است که قابل توجه است. علاوه بر این، متوسط ارزش ناخالص تولید بسته به درصد تغییر سطح زیر کشت چغندرقند می‌تواند تا ۲/۷۵ برابر افزایش یابد که رقمی چشگیر است. بنابراین، تغییر الگوی کشت از چغندرقند به زعفران هم از منظر صرفه‌جویی در مصارف آب کشاورزی و هم افزایش سود ناخالص تولید کشاورزان بسیار مقرون به صرفه است. در سناریوی دیگری مشاهده می‌شود که با تبدیل کل سطح زیرکشت گندم به زعفران، ارزش ناخالص تولید در بخش زراعت آبی تا ۳ برابر افزایش می‌یابد.

همچنین، نیاز خالص آبی در این سناریو به میزان ۱۱ درصد (معادل ۱۳ میلیون مترمکعب) کاهش می‌یابد که کمتر از مقدار مشابه در سناریوی تغییر الگوی کشت از چغندرقند به زعفران است. در مقایسه با چغندرقند، تغییر الگوی کشت از گندم به زعفران با ارزش ناخالص تولید بیشتری همراه خواهد بود.

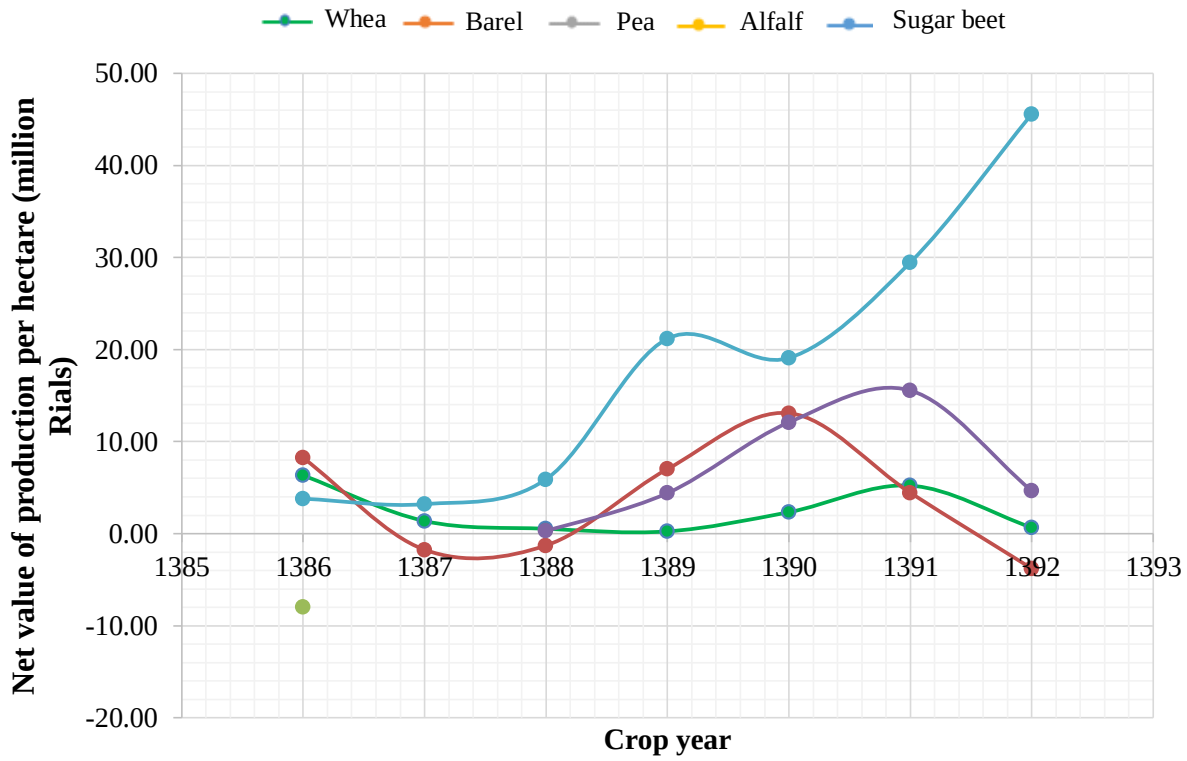

Fig. 4- The net value of production of dominant crops in Mahabad study area during the years 1386-1387 to 1392-1393 (Persian Calendar)

شکل ۴- ارزش خالص تولید محصولات غالب زراعی در محدوده مطالعاتی مهاباد طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۳۸۶ تا ۱۳۹۳-۱۳۹۲

منظور تبیین میزان اثربخشی تغییر الگوی کشت از چغندرقند و گندم به زعفران در راستای سیاست‌های کاهش ۴۰ درصدی مصرف آب در بخش کشاورزی، جدول ۱ و جدول ۲ به ترتیب میزان نیاز خالص آبی و متوسط ارزش ناخالص تولید زراعت آبی به ازای تغییر درصد مشخصی از سطح زیرکشت فعلی گندم و چغندرقند در منطقه طرح را به زعفران نشان می‌دهند.

Table 1- The amount of net water requirement of irrigated agriculture for each pair of the amount of change in the cultivation pattern of sugar beet and wheat to saffron (million cubic meters)

جدول ۱- میزان نیاز خالص آبی زراعت آبی برای هر جفت میزان تغییر الگوی کشت چغندرقند و گندم به زعفران (میلیون مترمکعب)

		Conversion percentage of wheat to saffron				
		0	25	50	75	100
Conversion percentage of sugar beet to saffron	0	117.6	114.4	111.2	107.9	104.6
	25	112.8	109.5	106.3	103.0	99.8
	50	107.9	104.7	101.5	98.2	94.9
	75	103.1	99.8	96.6	93.4	90.1
	100	98.2	95.0	91.8	88.5	85.3

Table 2- The average gross value of irrigated agriculture production for each pair of changes in the cultivation pattern from sugar beet and wheat to saffron (million Rials per hectare)

جدول ۲- متوسط ارزش ناخالص تولید زراعت آبی برای هر جفت میزان تغییر الگوی کشت چغندرقند و گندم به زعفران (میلیون ریال بر هکتار)

		Conversion percentage of wheat to saffron				
		0	25	50	75	100
Conversion percentage of sugar beet to saffron	0	55.47	83.39	111.32	139.25	167.17
	25	79.84	107.76	135.59	163.62	191.54
	50	104.21	132.14	160.06	187.99	215.92
	75	128.58	156.51	184.43	212.36	240.29
	100	152.95	180.88	208.81	236.73	264.66

حال با توجه به اینکه درصد عمده‌ای از سطح زیر کشت گندم در شهرستان مهاباد به صورت دیم است، به مقایسه ارزش خالص تولید این محصول در حالت کشت دیم و آبی می‌پردازیم. به این منظور، به علت اینکه اطلاعات موجود از متوسط ارزش ناخالص تولید و متوسط هزینه تولید محصولات کشاورزی زراعی در استان آذربایجان غربی بسیار کامل‌تر از اطلاعات مشابه برای شهرستان مهاباد است، در این بخش به تحلیل این اطلاعات برای استان آذربایجان غربی می‌پردازیم تا دید کلی‌تری نسبت به کل استان نیز به دست آید. نتایج بررسی داده‌های عملکرد و ارزش خالص تولید گندم آبی و دیم را طی سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۷۸ تا ۱۳۹۴-۱۳۹۳ حاکی از آن است که ارزش خالص تولید گندم دیم از نیمه دوم دهه ۱۳۷۵ به مراتب کمتر از مقدار مشابه برای گندم آبی است و حتی در سال زراعی ۱۳۸۷-۱۳۸۶ این مقدار منفی نیز بوده است؛ به این معنی که کشاورزان از کشت گندم دیم در این استان حتی متحمل ضرر هم شده‌اند. هزینه تولید گندم دیم تقریباً یک‌سوم مقدار مشابه برای گندم آبی است که یکی از دلایل کمتر بودن ارزش خالص تولید گندم دیم نسبت به گندم آبی کمتر بودن عملکرد گندم دیم است، به قسمی که در سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ عملکرد گندم دیم ۱۸۲۶/۵ کیلوگرم بر هکتار و عملکرد گندم آبی ۳۸۳۱/۹ کیلوگرم بر هکتار بوده است. یکی از عوامل کاهش عملکرد گندم دیم نسبت به گندم آبی آسیب‌پذیری بیشتر این نوع کشت در تقابل با تغییرات اقلیمی نظیر خشکسالی است. برای مثال، Wang et al. (2021) نشان دادند که آبیاری برنامه‌ریزی شده جهت مبارزه با رخدادهای اقلیمی حدی در جهان می‌تواند تا ۴۳ درصد عملکرد گندم را نسبت به گندم دیم افزایش دهد. طبق اعلام کمیسیون کشاورزی، آب و منابع طبیعی مجلس شورای اسلامی در سال ۱۳۹۸، قیمت خرید تضمینی گندم که توسط شورای اقتصاد در این سال اعلام شده بود، از قیمت تمام شده این محصول کمتر باشد. کمتر بودن عملکرد گندم دیم نسبت به آبی در کنار قیمت خرید تضمینی کم گندم باعث شده است که کشاورزان در سال‌های اخیر به گندم آبی روی بیاورند. داده‌های جهاد کشاورزی نیز به عنوان شاهد این قضیه بیانگر افزایش سطح زیر کشت آبی از سال ۱۳۹۳ در شهرستان مهباد و آذربایجان غربی است. ادامه قیمت‌گذاری تضمینی کنونی و نبود بازار اقتصادی آزاد بدون درنظر گرفتن هزینه‌ها و نیازهای کشاورزان، کشاورزان بیشری را از گندم دیم به گندم آبی سوق خواهد داد. طبعاً این رویکرد از منظر مصارف آب کشاورزی مقرون به صرفه نیست و بار بیشتر به منابع آبی را به همراه خواهد داشت. در واقع، این تصمیمات اقتصادی دولت بوده است که کشاورزان را به این رویکرد سوق داده است و طبعاً تحت این شرایط کشاورزان انگیزه‌ای برای کاهش کشت آبی گندم و تبدیل آن به کشت دیم ندارند.

البته از آنجا که گندم یک کالای استراتژیک برای کشور محسوب می‌شود، ممکن است تصمیمات کلان کشور مانعی برای این رویه ایجاد نکند و تحت شرایط فعلی، کافی بودن تولید گندم بر ذخیره هر چه بیشتر منابع آبی در کشور ترجیح داده شود. اما باید توجه داشت که در درازمدت در صورت در دسترس نبودن منابع آب کافی برای تأمین نیاز آبی بخش کشاورزی، این حجم از تولیدات کشاورزی نیز دیگر ممکن نخواهد بود و بنابراین ارجحیت تولید گندم بر ذخیره منابع آبی رویکردی پایدار محسوب نمی‌شود. به عبارت بهتر، ممکن است در آینده مجبور به اتخاذ تصمیماتی در زمینه الگو و سطح زیرکشت کشاورزی در کشور بشویم که در واقع می‌بایست سال‌ها قبل‌تر از آن در مورد آنها اقدام می‌شده است. طبق نتایج این بخش از مطالعه، حوضه دریاچه ارومیه و به طور مشخص محدوده مطالعاتی مهاباد که منطقه هدف مطالعه حاضر است نیز از این قاعده مستثنا نخواهد بود. بنابراین، مستقل از شرایط اقتصادی کشور و تصمیمات دولت در زمینه قیمت خرید گندم، متولیان بخش آب و کشاورزی منطقه می‌توانند با این معضل از طریق آموزش و ترغیب کشاورزان به تغییر الگوی کشت

به محصولات با نیاز آبی پایین‌تر اما به همان اندازه یا بیشتر سودده مقابله کنند. همچنین، بارندگی‌های گسترده طی دو سال آبی اخیر نیز نباید موجب خوش‌بینی در زمینه کافی بودن منابع آبی موجود شود، کما اینکه کشور پیش از این یک دوره خشکسالی شدید و بلندمدت ۲۰ ساله را تجربه کرد و این شرایط ممکن است در آینده نیز دامن‌گیر کشور شود؛ همان‌طور که مدل‌های گردش عمومی جهانی نیز کاهش بارندگی را برای دهه‌های آتی در منطقه‌ی جغرافیایی ایران به واسطه اثرات تغییر اقلیم پیش‌بینی کرده‌اند.

۶- نتیجه گیری

مهم‌ترین یافته‌های کاربردی این مطالعه را می‌توان در قالب موارد زیر بیان نمود:

(۱) در صورت عدم توسعه کشاورزی در سال‌های آینده و کنترل مصارف در منطقه طرح، میزان افزایش حجم آب ورودی به سد مهاباد تحت سناریوهای تغییر اقلیم A1B و B1 می‌تواند متضمن کاهش نیاز کنونی به برداشت (قانونی یا غیرقانونی) از منابع آب سطحی و زیرزمینی و همچنین امکان انجام رهاسازی از سد مهاباد برای تأمین بیشتر نیاز زیست محیطی دریاچه ارومیه باشد. در غیر این صورت، دلایل افزایش مصرف آب (علی‌رغم تحویل حجمی از منابع آب سطحی) می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد تا از هرگونه اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی جلوگیری به عمل آید؛

(۲) با توجه به کاهش حجم آب ورودی به سد مهاباد تحت سناریوی تغییر اقلیم A2، نه تنها تأمین بخشی از نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه از طریق رهاسازی سد مهاباد امکان‌پذیر نیست، بلکه حصول اطمینان از تأمین نیاز مصارف کشاورزی محدوده نیز (با توجه به بیلان منفی کنونی در محدوده مطالعاتی مهاباد) منوط به کاهش تقاضا برای آب از طریق اجرای سیاست‌های کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی است؛

(۳) حجم نیاز آبی محصولات زراعی در محدوده مطالعاتی مهاباد در سال ۱۳۹۵-۱۳۹۴ تقریباً ۷ برابر مقدار مشابه برای محصولات باغی بوده است. همچنین، میزان نیاز ناخالص آبیاری نیز طی ۲۰ سال گذشته همواره از میزان تخصیص از سد مهاباد برای مصارف کشاورزی بیشتر بوده است. با توجه به روند رو به رشد عملکرد محصولات زراعی در این بازه‌ی زمانی، افزایش برداشت از ذخایر آب زیرزمینی و سطحی (به جز از محل سد) می‌بایست به وقوع پیوسته باشد. این مشاهده، لزوم توجه به راهکارهای کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی را دو چندان می‌سازد؛

(۴) ارزش خالص تولید گندم و جو آبی در سال‌های گذشته بسیار کمتر از مقدار مشابه برای سایر محصولات زراعی در منطقه طرح بوده است، به طوری که در برخی سال‌ها حتی نزدیک به صفر نیز بوده است که این مشاهده عدم توجیه اقتصادی کشت این محصولات را تبیین می‌سازد؛

(۵) میزان تولید و ارزش خالص تولید چغندرقند روند رو به رشد قابل ملاحظه‌ای را در منطقه طرح طی سال‌های اخیر نشان می‌دهد. با توجه به نیاز آبی بسیار زیاد این محصول، این روند در مغایرت آشکار با سیاست‌های کاهش ۴۰ درصد مصرف آب در بخش کشاورزی است. بعد از چغندرقند، کشت یونجه نیز نتیجه مشابهی را نشان داده است؛

(۶) با توجه به امکان کاشت زعفران در منطقه‌ی طرح، تغییر الگوش کشت از چغندرقند (به دلیل نیاز آبی بسیار بالا) و گندم آبی (به دلیل پایین بودن ارزش خالص تولید) به زعفران توصیه می‌شود. این اقدام به طور قابل ملاحظه‌ای موجب کاهش نیاز آبی و افزایش ارزش ناخالص تولید در بخش زراعی خواهد شد؛

(۷) کمتر بودن عملکرد گندم دیم نسبت به گندم آبی و آسیب‌پذیری بیشتر آن در برابر تغییرات اقلیمی (نظیر خشکسالی) باعث شده است که کشاورزان بیشتری به جهت افزایش سود خالص و جبران هزینه‌های خود به سمت تولید گندم آبی سوق پیدا کنند. متاسفانه این اقدامات باعث افزایش تنش به منابع آبی منطقه و کاهش آن‌ها شده است. ادامه این روند می‌تواند چه در میان‌مدت و چه بلندمدت تهدیدی بزرگ نه‌تنها برای منابع آبی منطقه بلکه کشاورزی و به تبع معیشت خانوارها باشد. لذا دولت با یک برنامه‌ریزی دقیق و سیاستگذاری مناسب در این حوزه نیازمند ایجاد تغییر در انگیزه‌های کشاورزان جهت تغییر الگوی کشت بوده تا کاشت به صورت دیم گندم برای کشاورزان توجیه اقتصادی داشته باشد.

مطالعه حاضر تلاش کرد تا با توسعه دو مدل هیدرولوژیکی و اقتصادی، تأثیرات تغییرات اقلیم را بر منابع آب و اقتصاد کشاورزی محدوده مطالعاتی مهاباد برآورد کند و راهکارهای سیاستی متناسب با تغییرات الگوی کشت را ارائه دهد. مدل حاضر در سطح محدوده مطالعاتی مهاباد واسنجی شده است، امّا قابلیت توسعه در سطوح بالاتر نظیر استانی را نیز دارد. لذا پیشنهاد می‌شود مدل پیشنهاد شده در مقیاسی وسیع‌تر توسعه داده شود تا سیاست‌های احیای دریاچه ارومیه در ابعاد گسترده‌تری ارزیابی شوند. قیمت‌ها در مدل‌سازی اقتصادی مطالعه حاضر به صورت برونزا[1] وارد مدل شده‌اند و مطالعات آتی می‌توانند قیمت را به صورت درونزا[2] درنظر گیرند. همچنین، مدل حاضر می‌تواند از جنبه‌های گوناگونی مانند بررسی ابعاد اجتماعی-اقتصادی تکمیل

شود. مدل‌سازی بازار محصولات کشاورزی در منطقه می‌تواند روشی دیگر برای تکمیل مدل‌سازی انجام شده در پژوهش‌های آینده باشد. در نهایت داده‌های کشاورزی استفاده شده (سطوح زیرکشت محصولات، عملکرد محصولات، تولید محصولات، قیمت محصولات و غیره) در این مطالعه در سطوح شهرستانی (پایین‌ترین سطح دسترسی به داده‌ها) بوده است و پیشنهاد می‌شود سازمان جهاد کشاورزی داده‌ها را در سطوح پایین‌تری نظیر سطوح مزارع در اختیار محققان ارائه دهد. دسترسی به داده‌ها در سطوح پایین‌تر نتایج مدل‌سازی را به واقعیت نزدیک‌تر کرده و خروجی آن جهت سیاستگذاری قابلیت اطمینان بیشتری خواهد داشت.

۷- قدردانی

نویسنده اول مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از حمایت‌های انجام شده توسط معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی شریف و بنیاد ملی نخبگان برای انجام این پژوهش ابراز می‌دارد.

پی‌نوشت‌ها

1- Exogenous
2- Endogenous

۶- مراجع

Abbas Novinpour E, Sadeghi Aghdam F (2018) The assessment of hydrogeological characteristics and sustainable development of groundwater of Mahabad Plain Aquifer. Geography and Development 16(51):219–240

Ahmadaali J, Barani G-A, Qaderi K, Hessari B (2018) Analysis of the effects of water management strategies and climate change on the environmental and agricultural sustainability of Urmia lake basin, Iran. Water 10(2):160

Alizade Govarchin Ghale Y, Altunkaynak A, Unal A (2018) Investigation anthropogenic impacts and climate factors on drying up of Urmia Lake using water budget and drought analysis. Water Resources Management 32(1):325–337

Alizadeh-Choobari O, Najafi M. S (2018) Extreme weather events in Iran under a changing climate. Climate Dynamics 50(1–2):249–260

Asal pishe Z, Manaffar R (2018) Study on phytoplankton community in the Mahabad Hasanlu (Shur Gol) and Yadegarlu Lakes. Iranian Scientific Fisheries Journal 26(5):111–120

Azizi G, Nazif S, Abbasi F (2016) Assessment of performance of Urmia basin dams using system dynamic approach. Journal of Arid Regions Geographics Studies 7(25):48–63

Babamiri O, Dinpashoh Y (2017) Trend analysis of reference crop evapotranspiration in Urmia lake basin. Water and Soil Science 27(1):267–279

Behmanesh J (2016) Determination and evaluation of blue and green water footprint of dominant tillage crops in Urmia lake watershed. Journal of Water and Soil Conservation 23(3):337–344

Benettin P, Kirchner JW, Rinaldo A, Botter G (2015) Modeling chloride transport using travel time distributions at Plynlimon Wales: chloride transport and ttds. Water Resources Research 51(5):3259–3276

Brutsaert W, Nieber J L (1977) Regionalized drought flow hydrographs from a mature glaciated plateau. Water Resources Research 13(3):637–643

Consulting Engineers for Water and Sustainable Development (2014) Studies on updating the balance of water resources of the study areas of the catchment area of Lake Urmia until the water year 1389-1390. Ministry of Energy: Iran Water Resources Management Company

Danesh-Yazdi M, Ataie-Ashtiani B (2019) Lake Urmia crisis and restoration plan: Planning without appropriate data and model is gambling. Journal of Hydrology 576:639–651

Ebrahimiyan S, Ghaderi J (2014) Evaluation and calibration of the HEC-HMS/WMS model in Mahabad dam's basin. Irrigation and Water Engineering 4(4):70–80

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2021) Monitoring agricultural water use in the Urmia Lake Basin: Integrating Research and Outreach. Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Ghahroudi Tali M, Talebpour Asl D (2017) Spatial analysis of the instability slope in Mahabad Dam watershed. Geospace 17(59):83–101

Jalili S, Hamidi SA, Ghanbari RN (2016) Climate variability and anthropogenic effects on Lake Urmia water level fluctuations northwestern Iran. Hydrological Sciences Journal 1–11

Japan International Cooperation Agency (2020) Data collection survey on the improvement of hydrological cycle model of Lake Urmia Basin in the Islamic Republic of Iran.

Khazaei B, Khatami S, Alemohammad SH, Rashidi L, Wu C, Madani K, Kalantari Z, Destouni G, Aghakouchak A (2019) Climatic or regionally induced by humans? Tracing hydro-climatic and land-use changes to better understand the Lake Urmia tragedy. Journal of Hydrology 569:203–217

Mohammad Pour H, Pirkharati H, Rahim Souri Y (2016) Investigation of hydrogeochemistry and water quality of Mahabad Reservoir Dam West Azarbaijan province Northwest Iran. New Findings in Applied Geology 10(20):150–163

Mohammadpour O, Hasanzadeh Y, Khodadadi A, Sagafiyan B (2016) Application of multi criteria analysis to select the best fit flood frequency distribution (case study of Mahabad river). Water and Soil Science 25(1–4):83–98

Naraghi M, Akbari G A, Banihabib M E (2015) Optimal cropping pattern of Urmia lake basin. ? ?(?):1–9 (In Persian)

Pope V D, Gallani M L, Rowntree P R, Stratton R A (2000) The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3. Climate Dynamics 16(2–3):123–146

Razaghi A, Ahmadi H, Haghdoost N, Hessari B (2019) The evaluation of river environmental flow by using the ecohydrological methods Case study: Mahabad-

chi River. Journal of Water and Soil Conservation 25(6):47–65

RSRC (2016) Monitoring the changes in water consumption and land use in Urmia Lake River Basin. (unpublished report in Persian)

Sanikhani H, Kisi O, Amirataee B (2018) Impact of climate change on runoff in Lake Urmia basin Iran. Theoretical and Applied Climatology 132(1–2):491–502

Schulz S, Darehshouri S, Hassanzadeh E, Tajrishy M, Schüth C (2020) Climate change or irrigated agriculture– what drives the water level decline of Lake Urmia. Scientific Reports 10(1):236

Shahraki Mojahed R, Alizadeh A, Sanaei-Nejad S H, Faridhosseini A, Zarrin A (2022) Modeling snowmelt runoff by SRM model and estimation of degree-day factor parameter using net radiation satellite images (Case study: Kardeh Basin). Journal of Geography and Environmental Hazards, 1682.

Soleimani M, khalili K, Behmanesh J (2017) Prediction of EC and TDS quality parameters by using changes in River discharge. Case Study: Rivers of Mahabadchay and Balkhlouchay located in Urmia Lake basin (1992-2013). Journal of Research in Environmental Health 2(4):285–298

STPRI (2016) The value chain of medicinal plants to improve employment and economic revenue in the Urmia Lake Basin. Science and Technology Policy Research Institute

Tanhaei V, Rostami Koshki N (2018) Water Qualitative monitoring of water of Mahabad River in terms of microbiological parameters Based on Protocol 1011 of the National Iranian Standards Organization. New Cellular and Molecular Biotechnology Journal 8(31):57–64

Vafabakhsh J, Mohammadzadeh A, Bazargan K, Navidi M N (2019) Comparative study of cultivation pattern and land suitability of major agricultural and horticultural products in Urmia Lake catchment area. Agroecology 11(3):775–805

Valizadegan E, Yazdanpanah S (2018) Quantitative model of optimal conjunctive use of Mahabad plain's surface and underground water resources. Amirkabir Journal of Civil Engineering 50(4):631–640

Wang X, Müller C, Elliot J, Mueller N D, Ciais P, Jägermeyr J, Gerber J, Dumas P, Wang C, Yang H, Li L, Deryng D, Folberth C, Liu W, Makowski D, Olin S, Pugh T. A. M, Reddy A, Schmid E … Piao S (2021) Global irrigation contribution to wheat and maize yield. Nature Communications 12(1):1235

Water Research Institute (2003) Comprehensive water resources management synthesis report of Lake Urmia basin. West Azerbaijan Regional Water Company

West Azerbaijan Regional Water Company (2017) The latest measures taken in the volumetric water delivery of the Mahabad network. Operation and Maintenance Group of Irrigation and Drainage Networks