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
۱۰۶-۱۳۲

استفاده از رویکرد هیدرولوژی اجتماعی در ارزیابی اثر رفتار مصرف آبی کشاورزان بر منابع آب سطحی و زیرزمینی در شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی دشت مهاباد، حوضه آبریز دریاچه ارومیه)

مریم جوان صالحی[۱] و مجتبی شوریان[۲*]

چکیده

در این تحقیق چارچوب جدیدی از مدل‌سازی هیدرولوژی- اجتماعی به منظور ارزیابی عملکرد سیستم‌های انسانی- آبی توسعه داده شده است. بدین منظور ابتدا یک مدل جامع هیدرولوژیکی با تلفیق مدل‌های SWAT و MODFLOW برای شبیه‌سازی منابع آب سطحی و زیرزمینی توسعه داده شده است. در ادامه با استفاده از تئوری ارزش- عقیده- هنجار (Value-Belief-Norm Theory) عوامل مؤثر در رفتار مصرف آبی کشاورزان شناسایی شده و در نهایت با ترکیب مدل SWAT-MODFLOW و مدل عامل‌بنیان (Agent-Based Model) مبتنی بر تئوری VBN، الگوی رفتاری کشاورزان در انتخاب نوع کشت و شیوه آبیاری ارزیابی شده است. چارچوب نظری تئوری VBN و قوانین رفتاری عوامل در ABM بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از پرسشنامه‌های میدانی کشاورزان دشت مهاباد طراحی شده است. در ادامه، با استفاده از داده‌های تغییر اقلیم گزارش ششم IPCC و مدل ACCESS-CM2 پاسخ مدل هیدرولوژی اجتماعی توسعه داده شده در افق برنامه‌ریزی تحلیل و بررسی شد. نتایج بیانگر این هستند که آن دسته از کشاورزانی که زیر خط فقر هستند با انتخاب محصولات پرسود برای زراعت، سعی در بهبود بخشیدن به وضعیت نامطلوب اقتصادی خود دارند. لذا بدون ایجاد تغییر اساسی در سیاست‌های مدیریتی در آینده، تغییر اقلیم باعث کاهش سود بخش کشاورزی شده و الگوی کشت به سمت محصولات با سود بالا و در عین حال پر آب بر تغییر خواهد یافت. در صورت ثابت ماندن سیاستهای مدیریتی در آینده، عملکرد محصولات، در آمد کشاورزان منطقه و در عین حال جریان ورودی به دریاچه ارومیه از رودخانه مهاباد کاهش چشمگیری خواهد یافت. از این‌رو تغییر سیاست‌های مدیریتی به عنوان راهکارهای مقابله با اثرات تغییر اقلیم توصیه می‌شود. بطورکلی، نتایج تحقیق حاضر را می‌توان برای برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری‌های آینده مد نظر قرار داد و تخمین زد که چگونه ایجاد تغییرات در عوامل اقتصادی و روانی برای کشاورزان بر احیای دریاچه ارومیه اثر می‌گذارد.

کلمات کلیدی: هیدرولوژی اجتماعی، مدل‌سازی عامل بنیان، تئوری ارزش- عقیده- هنجار، تغییر اقلیم.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۸/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۸

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی.

*- نویسنده مسئول

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

Application of the Socio-Hydrology Approach for Evaluating the Impacts of Farmers' Activities on Surface and Groundwater Resources in Climate Change Condition (Case Study: Mahabad Plain, Urmia Lake Basin)

M. Javan Salehi [1] and M. Shourian [2]*

Abstract

In this research, a new framework of socio-hydrological modeling framework has been developed in order to evaluate the performance of human-water systems. For this purpose, a comprehensive hydrological model has been developed by combining SWAT and MODFLOW models to simulate surface and underground water resources. Then by using Value-Belief-Norm Theory, the effective factors in the water consumption behavior of farmers are identified. Finally, by combining the SWAT-MODFLOW model and the Agent-Based Model based on the theory of VBN, the behavioral pattern of farmers in choosing the type of cultivation and irrigation method has been evaluated. The theoretical framework of the VBN theory and the behavioral rules of agents in ABM are designed based on the data collected from Mahabad plain farmers through field questionnaires. Afterward, an analysis and investigation were conducted on the response of the socio-hydrology model that was developed, utilizing climate change data from the 6th IPCC report and the ACCESS-CM2 model, for the planning horizon. The results showed that those farmers who are below the poverty threshold try to improve their unfavorable economic situation by choosing profitable crops for farming. Therefore, if no fundamental change is made in management policies in the future, the climate change will reduce the profit within the agricultural sector and the pattern of cultivation will change towards crops with high profits and yet high water consumptions. If the management methods remain unchanged in the future, the yield of the crops, the income of the farmers in the region, and at the same time the inflow to Lake Urmia from the Mahabad River will decrease significantly. Therefore, it is recommended to adjust the management policies as a way to deal with the effects of the climate change. In general, the results of the present research can be considered for future planning and policies and for estimating how changes in economic and psychological factors for farmers affect the restoration of Lake Urmia.

Keywords: Socio-Hydrology, Agent-Based Modeling, Value-Belief-Norm Theory, Climate Change.

Received: November 1, 2022
Accepted: March 9, 2023

1- Ph.D. Candidate, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: m_shourian@sbu.ac.ir

*- Corresponding Author

Dor: 20.1001.1.17352347.1402.19.2.7.4

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

۱- مقدمه

با نگاهی به توسعه جوامع انسانی درمی‌یابیم که دخالت جوامع بشری از طریق تغییر کاربری اراضی و اعمال شیوه‌های مدیریتی گوناگون در استخراج منابع آبی، تغییرات شدید رژیم هیدرولوژیکی را در طول تاریخ هر منطقه ای در پی داشته است. به طوریکه رژیم هیدرولوژیکی که در گذشته غالباً توسط محرک‌هایی از جمله اقلیم، پوشش گیاهی، زمین‌شناسی و توپوگرافی حوضه آبریز کنترل می‌شد، امروزه به طور فزاینده‌ای تحت تأثیر محرک‌های اجتماعی و اقتصادی قرار دارد (Kuil et al., 2019). با این حال، از دیدگاه مدل‌سازی کمی و ریاضی، مدل‌سازی تمام جنبه‌های رفتاری و تکامل همزمان انسان و سیستم‌های آبی چالش‌برانگیز است. از جمله روش‌های مدل‌سازی که اخیراً در مطالعات زیادی برای شبیه‌سازی رفتاری عوامل انسانی و تکامل همزمان انسان و سیستم‌های آبی استفاده شده است، مدل‌سازی عامل بنیان است. در مدل‌سازی عامل بنیان هر یک از عوامل دنیای واقعی به صورت موجودیت‌های تصمیم‌گیر و کاملاً خودکار به نام عامل[1] تعریف می‌شود. رویکرد مدل‌سازی عامل بنیان تمرکز مستقیم روی اشیاء منفرد، رفتار و تعامل آن‌ها دارد. به همین ترتیب، یک مدل شبیه‌سازی عامل بنیان مجموعه‌ای از اشیاء در حال تعامل است که منعکس کننده روابط در دنیای واقعی هستند. در نتیجه می‌توان مدل‌سازی عامل بنیان را گامی در جهت درک و مدیریت پیچیدگی سیستم‌های اجتماعی امروزی دانست.

در ادامه چندین مورد از مطالعات انجام شده در زمینه مدل‌سازی سیستم‌های هم تکاملی آب و انسان ارائه شده است: Akhbari and Grigg (2013) از مدل‌سازی عامل بنیان برای شبیه‌سازی رفتار عوامل کشاورز استفاده کردند، آن‌ها نشان دادند دو عامل فشار عوامل مدیریتی و فشار عوامل همسایه در تعیین رفتار نهایی کشاورز در جهت همکاری یا عدم همکاری برای کاهش میزان تقاضای آب تاثیرگذار است. در ادامه، Elshafei et al. (2015) یک مدل هیدرولوژیکی–اجتماعی برای سیستم‌های تکاملی آب و انسان برای حوضه تولبین در غرب استرالیا ارائه کردند. نویسندگان این مقاله با تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از مدل مفهومی ارائه شده مدعی شدند، بحث و بررسی اخیر منابع آب در مورد مدل‌سازی هیدرولوژیکی–اجتماعی تأکید می‌کند که اهمیت این دانش به نفع جامعه است. چراکه با درک و الگویابی رفتارهای انسانی، می‌توان بینشی دقیق برای سیاستگذاران نسبت به خروجی‌های محتمل از استراتژی‌های مدیریتی متفاوت فراهم کرد. Farhadi et al (2016) یک رویکرد یکپارچه شبیه‌سازی آب زیرزمینی با استفاده از MODFLOW، و چارچوب مدل‌سازی نش مبتنی بر عامل را برای بررسی تصمیم ذی‌نفعان بمنظور مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی ارائه کردند. نتایج این مطالعه نشان داد، استفاده از رویکردهای یکپارچه مدیریت منابع آبی این امکان را به تصمیم‌گیران می‌دهد تا عملکرد سناریوهای مختلف مدیریت را ارزیابی کرده و تصمیمات عملی‌تری بگیرند. O'Keefe et al. (2018) به تشریح مدلی که شیوه‌های آبیاری کشاورزان، تأثیرات و تعامل بین محیط و عوامل را در نظر می‌گیرد، پرداختند. آن‌ها نشان دادند، چارچوب پیشنهادی قابلیت شبیه‌سازی مهمترین جنبه‌های محیط و کشاورزان دارد. همچنین، Pouladi et al. (2019)، چارچوب جدیدی از مدل‌سازی هیدرولوژیکی–اجتماعی با هدف بررسی اثرات فعالیت‌های انسانی بر خشک شدن دریاچه ارومیه معرفی کردند. آن‌ها با یکپارچه‌سازی مدل‌سازی عامل‌بنیان و تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده، رفتار کشاورزان و تمایل آن‌ها به مشارکت در احیای دریاچه ارومیه شبیه‌سازی کردند. آن‌ها نشان دادند، چارچوب هیدرولوژیکی–اجتماعی ارائه شده، قابلیت شبیه‌سازی الگوهای رفتاری کشاورزان حوضه زرینه‌رود را که موجب خشکی دریاچه ارومیه شده است، دارا می‌باشد. در ادامه، Neisi et al. (2020)، از تئوری انگیزه محافظت برای ارزیابی رفتار مدیریت ریسک خشکسالی کشاورزان در پایین حوضه سد کرخه استفاده کردند. در این مطالعه یافته‌ها حاکی از آن است، سیاست‌های مدیریتی باید کشاورزان را توانمند سازند تا بتوانند تصمیمات مربوط به مدیریت ریسک خود را بگیرند و به انواع ابزار و استراتژی دسترسی داشته باشند. همچنین، سیاست‌های عمومی باید به طور مؤثر کشاورزان متضرر را هدف قرار دهد تا روابط مستقیمی با آن‌ها برقرار کرده و بتواند رفتارهای سازگارانه آن‌ها را در رابطه با خشکسالی و تغییرات آب و هوایی تقویت کند. Aghaie et al. (2020) یک مدل بازار آب زیرزمینی مبتنی بر عامل برای تجزیه و تحلیل اثرات اقتصادی و هیدرولوژیکی سیاست‌های مختلف خرید و فروش آب را در منطقه دشت رفسنجان ارائه کردند. آن‌ها در این مطالعه نشان دادند، تعریف دقیق سیاست‌های نظارت و اجرا می‌تواند منجر به ظهور هنجار اجتماعی برای جلوگیری از تخلف کشاورزان شده، همچنین بازار کارآمدی را به وجود آورد که در آن کشاورزان بتوانند از نظر اقتصادی رشد کرده و کسری سالانه کمتر داشته باشند. از طرفی نتایج آن‌ها نشان داد، برنامه‌های خرید آب می‌تواند باعث افزایش رقابت در بازار، سطح انطباق و سود کشاورزان شود. Du et al. (2020) یک چارچوب مدل‌سازی تلفیقی هیدرولوژیکی و یک مدل عامل بنیان به‌منظور پیش‌بینی تصمیم‌گیری کشاورزان در مورد نحوه استفاده از آب ارائه کرده‌اند، آن‌ها نشان دادند که شرایط فیزیکی کشاورزان به‌عنوان مثال فاصله از رودخانه‌ها و وضعیت آب زیر زمینی موجود در منطقه به طور

قابل ملاحظه‌ای بر تعامل بین فعالیت‌های انسانی و سیستم‌های هیدرولوژیک تأثیرگذار است. در مجموع، مطالعات زیادی وجود دارد که بر اهمیت ارتباط متقابل سیستم‌های انسانی و هیدرولوژیکی تأکید می‌کند. این در حالی است که در ایران علیرغم حاکم بودن شرایط بحرانی بر اکثر حوضه‌های آبریز، مطالعات هیدرولوژی سالیان مدیدی است که با ساختاری مشخص و مبتنی بر ماهیت حوضه‌های آبریز بکر انجام می‌شود. حتی در دهه اخیر با وجود فشارها و تهدیدهای فزاینده بر کمیت و کیفیت منابع آب شیرین، مطالعات پایه هیدرولوژی نسبت به گذشته تغییری نداشته است. نمونه‌ای از نقش فعالیت‌های انسانی در فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز در ایران که چارچوب هیدرولوژیکی- اجتماعی می‌تواند به مطالعه آن بپردازد، حوضه دریاچه ارومیه است. این حوضه یکی از حوضه‌های پرتنش در ایران است که به دلیل خشک شدن بخش عظیمی از دریاچه طی سال‌های گذشته، اهمیت زیادی پیدا کرده است. لذا در راستای تحقق این مهم، در این مطالعه تلاش شده است، بطور صریح و دقیق نقش عوامل فرهنگی و میزان همکاری بالقوه کشاورزان در جامعه بررسی شده و با تلفیق مدل اجتماعی پیشنهادی با یک مدل یکپارچه هیدرولوژیکی (منابع آب سطحی و زیرزمینی) نقش شرایط هیدرولوژیکی را در همبستگی بین فعالیت‌های انسانی و بالعکس تجزیه و تحلیل کند. در مجموع، در این تحقیق تلاش شده‌است ابتدا یک مدل هیدرولوژیکی جامع با استفاده از مدل SWAT و مدل MODFLOW به منظور شبیه‌سازی یکپارچه آب سطحی و زیرزمینی دشت مهاباد توسعه داده شود. سپس با کمک علم روانشناسی و مدل‌سازی عامل بنیان سعی شد، عوامل مؤثر در رفتار مصرفی کشاورزان شناسایی شده و در نهایت با ترکیب مدل SWAT-MODFLOW و مدل عامل‌بنیان[۲](ABM)، الگوی رفتاری کشاورزان در انتخاب نوع کشت و شیوه آبیاری شبیه‌سازی شود. در ادامه، با صحت‌سنجی مدل هیدرولوژیکی- اجتماعی پیشنهادی، اثرات سناریوهای اقلیمی در صورت ثابت ماندن روش‌های مدیریتی در آینده نزدیک بر رفتار کشاورزان محدوده مطالعاتی و شرایط منابع آبی دشت مهاباد تحلیل و بررسی شده است.

۲- معرفی منطقه مطالعاتی

محدوده مطالعاتی در این پژوهش دشت مهاباد (شکل ۱) در حوضه آبریز دریاچه ارومیه است. دشت مهاباد با مساحت ۱۵۰۸کیلومترمربع و با مختصات ۴۵ درجه و ۴۳ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۴۶ دقیقه عرض شمالی در استان آذربایجان غربی و قسمت جنوبی دریاچهٔ ارومیه واقع شده است (West-Azerbaijan Regional Water Company, 2010). در این محدوده، یک ایستگاه هیدرومتری گرد یعقوب و همچنین مخزن سد مهاباد وجود دارد که موقعیت هر دو در شکل ۱ مشخص شده است. متوسط دمای سالانه و متوسط بارندگی سالانه در این محدوده به ترتیب ۱۲درجه سانتی‌گراد و ۳۵۰ میلی‌متر در سال ثبت شده است (West-Azerbaijan Regional Water Company, 2010). همچنین، مهمترین جریان سطحی مهاباد، رودخانه مهاباد است که این رودخانه در جهت شمال جریان یافته و وارد دریاچه ارومیه می‌شود. بخش عمده معیشت مردم در حوضه مهاباد در ارتباط با امور کشاورزی بوده و می‌توان گفت شغل اصلی مردم ساکن در این دشت کشاورزی است. در منطقه مورد مطالعه، مهمترین محصولات کشت آبی سیب[۳] (APPL)، گندم زمستانه[۴] (WWHT)، یونجه[۵] (ALFA) و چغندر قند[۶] (SGBT) هستند که به ترتیب ۳۱، ۲۹، ۲۶ و ۱۴ درصد از کل سطح زیر کشت را شامل می‌شوند (Urmia Lake Restoration Program, 2017). همچنین، این حوضه شامل آبخوان آزاد مهاباد به مساحت ۱۷۳ کیلومترمربع با ضخامت ۳۰ تا ۹۰ متر است. آبدهی ویژه این آبخوان ۰/۰۳ و هدایت هیدرولیکی از ۰/۰۳ تا ۱۰ متر در روز متغیر است. هزار و هشتصد و پنجاه حلقه چاه پمپاژ با آبدهی ۲ تا ۶۰ لیتر بر ثانیه به عنوان یکی از منبع اصلی تأمین آب در این منطقه است (West-Azerbaijan Regional Water Company, 2010). لازم به ذکر است، با توجه به این که بخش کشت آبی دشت مهاباد عمدتاً در پایین‌دست سد مهاباد قرار گرفته، لذا در این تحقیق پایین‌دست سد مهاباد با مساحت ۶۶۴/۰۷ کیلومتر مربع به‌عنوان محدوده مطالعاتی در این مطالعه درنظر گرفته شده است (West-Azerbaijan Regional Water Company, 2010).

۳- روش تحقیق

این بخش شامل نحوه مدل‌سازی حوضه آبریز (آب سطحی+ آب زیرزمینی) با استفاده از مدل SWAT-MODFOLOW، مدل‌سازی الگوی رفتاری کشاورزان با استفاده از مدل عامل بنیان، نحوه تلفیق مدل هیدرولوژیکی مذکور با مدل عامل بنیان و مدل‌سازی تغییر اقلیم به‌منظور تحلیل و بررسی شرایط آینده حوضه با استفاده از مدل یکپارچه SWAT–MODFLOW–ABM است. روند کلی مدل یکپارچه SWAT–MODFLOW–ABM پیشنهادی در شکل ۲ ارائه شده است.

۳-۱- مدل‌سازی هیدرولوژیکی آب سطحی و زیرزمینی

۳-۱-۱- شبیه‌سازی آب سطحی دشت مهاباد

تخمینی از بیلان آبی حوضه‌های آبریز همواره یک نیاز مهم و مداوم

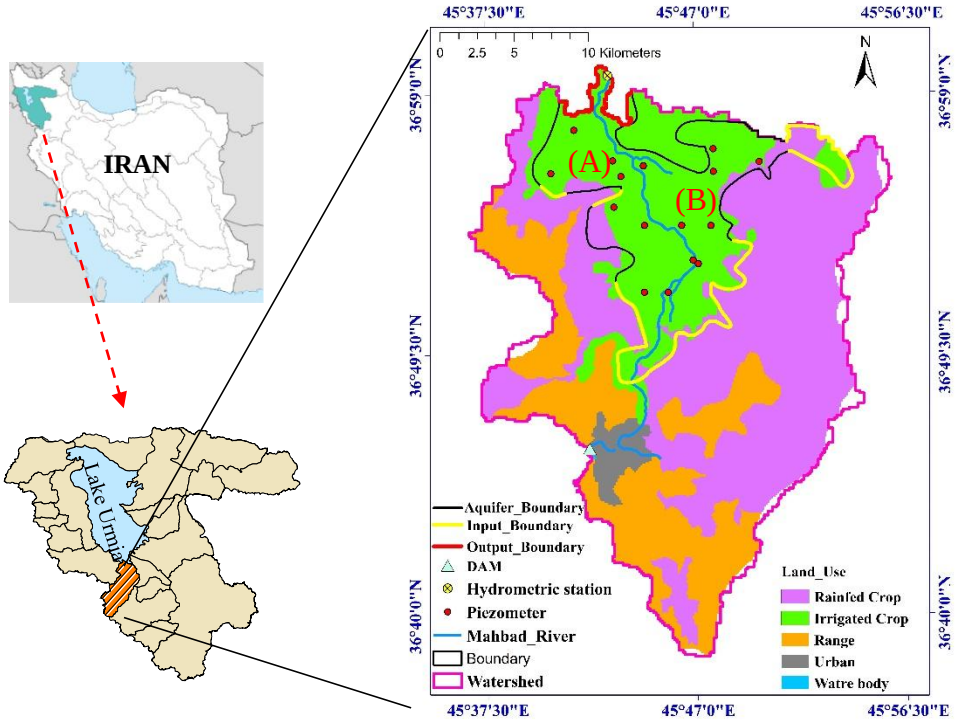


Fig. 1– Location of the Mahabad watershed in the Urmia Lake basin, IRAN

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت مهاباد در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، ایران

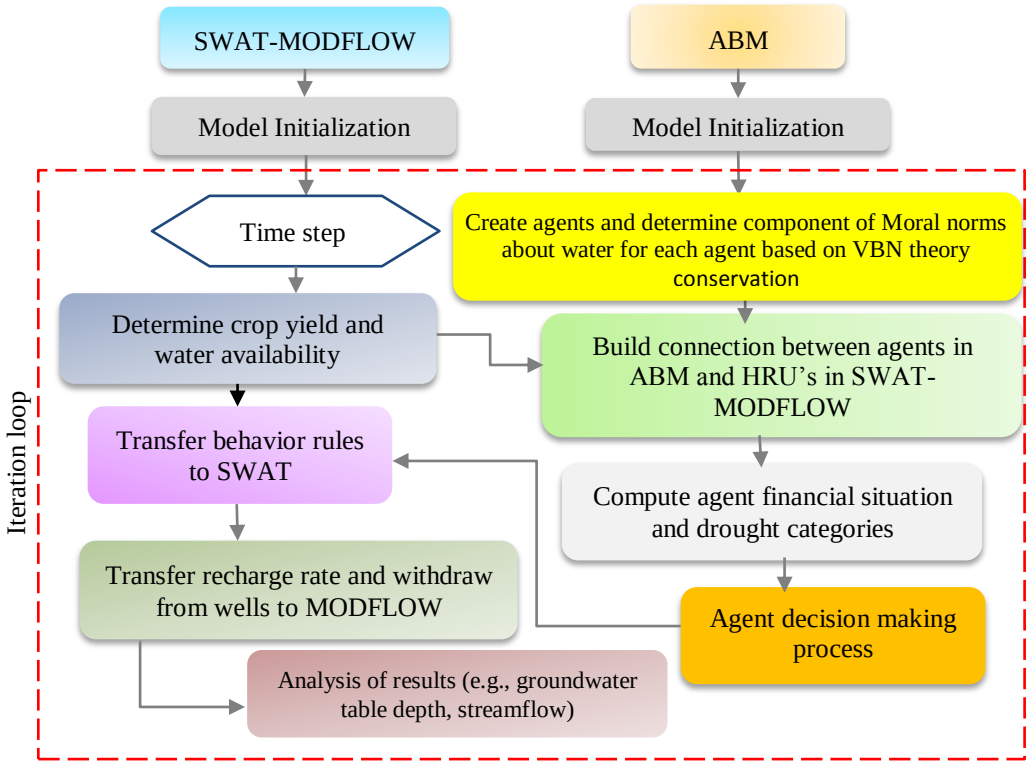


Fig. 2- The workflow of the integrated SWAT-MODFLOW-ABM model proposed in this study

شکل ۲- روند کلی مدل یکپارچه SWAT–MODFLOW–ABM پیشنهادی در تحقیق

برای مسائل کاربردی در زمینه‌های ارزیابی منابع آب می‌باشد. مدل SWAT یکی از مدل‌های هیدرولوژیک مناسب است که در محدوده وسیعی از دنیا و در چند حوضه ایران برای شبیه‌سازی کلیه مؤلفه‌های هیدرولوژیکی از جمله شبیه‌سازی بیلان آبی بکار برده شده است. مدل SWAT نمونه‌ای از مدل‌های نیمه توزیعی و مفهومی است که با حل معادلات اساسی فیزیک به شبیه‌سازی فرایندهای سیستم آبریز می‌پردازد (Bailey et al., 2016). کوچکترین واحد کاری در ایـن مدل واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی یا HRU است کـه از ترکیب نقشه‌های طبقات شیب، کاربری اراضی و نوع خاک حاصل می‌شود (Abbaspour et al., 2007). لذا در این مطالعه، جهت شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی آب سطحی و عملکرد محصولات کشاورزی دشت مهاباد از نسخه اصلاح شده SWAT (WA^+) استفاده شده است. در این نسخه اصلاح شده، راندمان آبیاری از آب سطحی در محاسبات اعمال می‌شود (Delavar et al., 2020). برای شبیه‌سازی مدل SWAT، لایه DEM منطقه مطالعاتی، نقشه نوع خاک و کاربری اراضی مورد نیاز است، که تمامی این اطلاعات از ستاد احیای دریاچه ارومیه تهیه شد. در ادامه با توجه به موقعیت ایستگاه هیدرومتری و نقشه آبراهه‌های منطقه مطالعاتی، محدوده به ۱۱ زیرحوضه و با استفاده از سه نقشه DEM، خاک و کاربری اراضی، زیرحوضه‌ها به ۴۹۶ HRU تقسیم شدند. همچنین، برای این تحقیق داده‌های دو ایستگاه باران‌سنجی پل سرخ و گرد یعقوب و ایستگاه سینوپتیک مهاباد که نزدیکترین فاصله را با منطقه مورد مطالعه داشتند، جهت شبیه‌سازی استفاده شد. آمار ماهانه دبی ایستگاه گرد یعقوب، اطلاعات مربوط به بخش کشاورزی و محصولات عمده حوضه نیز از طریق شرکت منابع آب ایران، جهاد کشاورزی و ستاد احیای دریاچه ارومیه جمع‌آوری شد. لازم به ذکر است، برای شبیه‌سازی جریان، سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۵ میلادی برای آماده‌سازی[۷]، سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ برای واسنجی و سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ برای صحت‌سنجی مدل به صورت ماهانه درنظر گرفته شدند. در شکل ۳، نقشه زیر حوضه‌ها، نقشه HRUs و نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی در مدل SWAT ارائه شده است.

۳-۱-۲- شبیه‌سازی آب زیرزمینی آبخوان مهاباد

بمنظور شبیه‌سازی منابع زیرزمینی منطقه در این تحقیق از مدل MODFLOW استفاده شد. MODFLOW یک مدل شبیه‌سازی سه بعدی است که از روش تفاضل محدود برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی استفاده می‌کند. در این تحقیق، آبخوان مهاباد به ۲۰۱ سلول (۲۳ ردیف و ۲۲ ستون) تقسیم شده است. همچنین در این مطالعه اطلاعات ۱۶ حلقه چاه مشاهده‌ای و ۱۸۵۰ حلقه چاه پمپاژ از شرکت مدیریت منابع آب ایران بمنظور شبیه‌سازی جمع‌آوری شد. سایر داده‌های مرتبط با آب‌های زیرزمینی مانند اطلاعات زمین‌شناسی، هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه، اطلاعات سنگ بستر، ارتفاع سطح ایستابی ماهانه در طول دوره مورد مطالعه از ستاد احیای دریاچه ارومیه جمع‌آوری شد.

۳-۱-۳- تلفیق مدل‌های SWAT و MODFLOW

به منظور توسعه مدلی جامع که بتواند فرآیند هیدرولوژیکی منطقه را به درستی شبیه‌سازی کند، دو مدل SWAT و مدل MODFLOW با یکدیگر تلفیق شدند. همان‌طوری که ذکر شد، SWAT فرآیندهای آب سطحی را در مقیاس HRU و MODFLOW در مقیاس سلول شبیه‌سازی می‌کند. در این تحقیق برای ایجاد این ارتباط، HRUها در مدل SWAT، با استفاده از ArcGIS بر اساس سلول‌های شبکه MODFLOW به واحدهای کوچکتر (که در این مطالعه SHRU نامیده می‌شوند) تفکیک شدند، تا تبادل اطلاعات بین دو مدل فراهم شود. به‌طوری‌که، اطلاعات در SHRU استخراج شده و متناسب با جایگاه مشترک به سلول‌های آبخوان انتقال داده می‌شود. در واقع، تغذیه حاصل از بارندگی و آب مورد نیاز کشاورزی که از آبخوان برداشت می‌شود از مدل SWAT استخراج شده و به سلول‌های شبکه آبخوان اعمال گردید. در شکل ۴، نحوه تبادل اطلاعات بین دو مدل مذکور نشان داده شده است.

۳-۲- شبیه‌سازی الگوی رفتاری کشاورزان دشت مهاباد با استفاده از مدل عامل بنیان

با توجه به مطالب ذکر شده، یکی از اهداف پژوهش حاضر، فهمیدن نقش انسان در سیستم‌های آبی برای حل مسائل مدیریتی و توضیح ترجیحات میان کشاورزان است. بدین منظور از روش مدل‌سازی عامل بنیان برای شبیه‌سازی رفتاری عوامل انسانی استفاده شد. مدل‌سازی عامل بنیان نوعی از مدل‌سازی محاسباتی است که امکان مدل‌سازی یک سیستم را از پایین به بالا میسر می‌سازد. جهت مدل به این حقیقت اشاره دارد که مدل‌سازی عامل بنیان ابتدا اجزای (عامل‌های) یک سیستم را شناسایی می‌کند، سپس رفتار آن‌ها و نحوه تعاملات آن‌ها را تعریف نموده و در آخر با راه‌اندازی مدل مشاهده می‌کند که رفتار و تعاملات عامل‌ها چه اتفاقاتی را در سطح کلان سیستم به وجود می‌آورند. در واقع، مدل‌سازی عامل بنیان نشان می‌دهد که چگونه قواعد رفتاری و گاه ساده عامل‌ها و تعاملات آن‌ها در سطح خرد می‌تواند الگوهای بسیار پیچیده‌ای را در سطح کلان ایجاد کند (Anbari and Zarghami, 2019). توسعه یک مدل عامل بنیان

شامل سه مرحله اساسی است که در ادامه به تفصیل توضیح داده شده است. لازم به ذکر است که تمامی روابط مدل‌سازی عامل بنیان و ایجاد ارتباط بین مدل هیدرولوژیک و مدل عامل بنیان در نرم‌افزار متلب کدنویسی شده است.

۳-۲-۱- شناسایی عامل‌ها و محیط

همانظوری که در بخش قبل اشاره شد، مهمترین مؤلفه‌های اساسی تشکیل یک مدل عامل بنیان، عامل‌ها و محیط مدل‌سازی می‌باشد. عامل نماینده یک موجودیت مستقل است که بر فرآیند تصمیم‌گیری تأثیر می‌گذارد و می‌تواند یک فرد، یک نهاد یا یک گروه از ذینفعان مؤثر باشد. همچنین، این عامل‌ها در یک محیط دینامیک قرار دارند و با محیط دارای اثر متقابل است (Anbari and Zarghami, 2019). در این تحقیق دشت مهاباد به عنوان محیط و کشاورزان به‌عنوان موجودیت‌های مستقل که از طریق فعالیت‌های کشاورزی با محیط خود در تعامل هستند، شناسایی شدند.

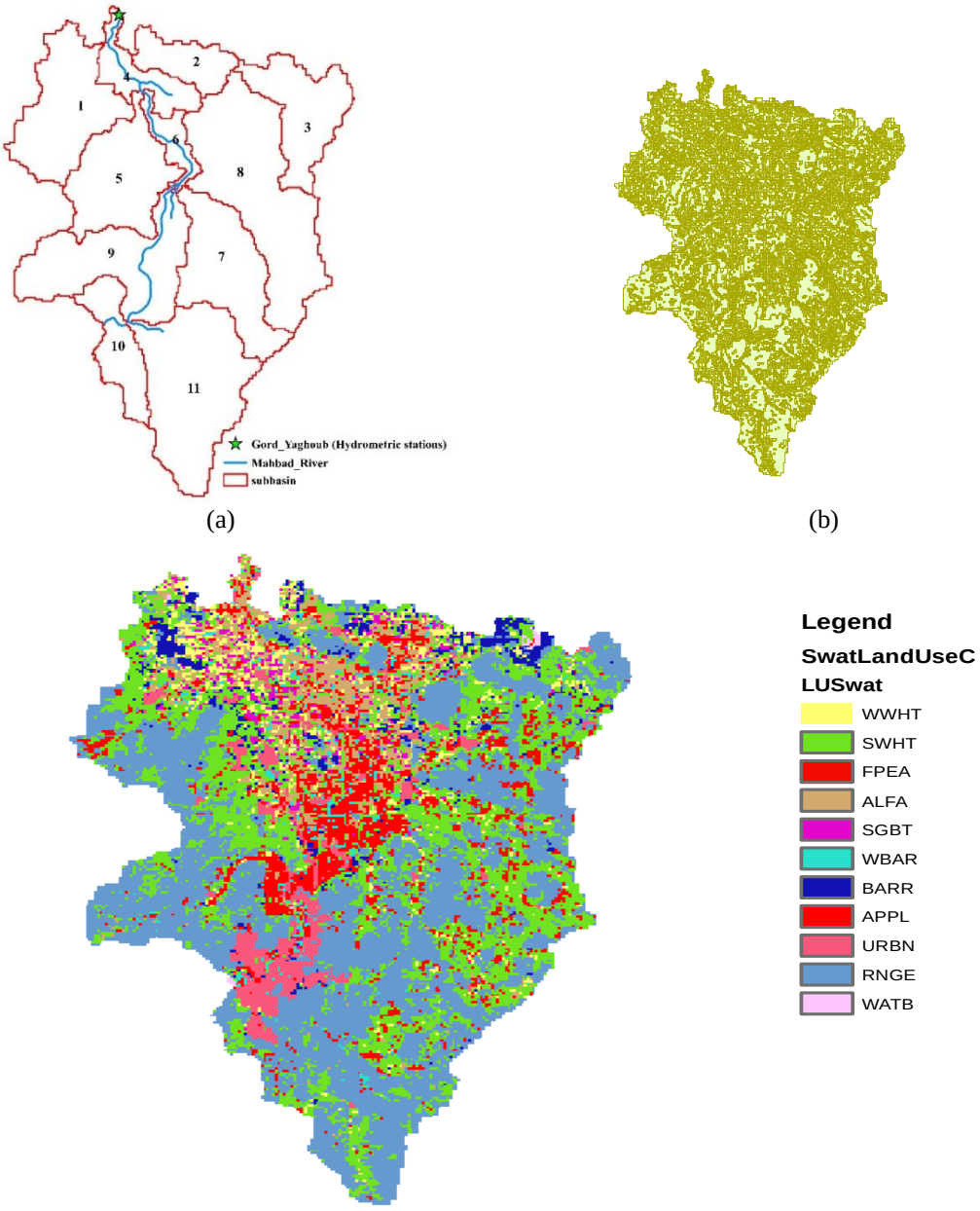


Fig. 3- (a) Subbasins map, (b) HRU distribution map, (c) Land-use map for agricultural

شکل ۳- (a) نقشه زیر حوضه‌ها، (b) نقشه HRUs، (c) نقشه کاربری اراضی

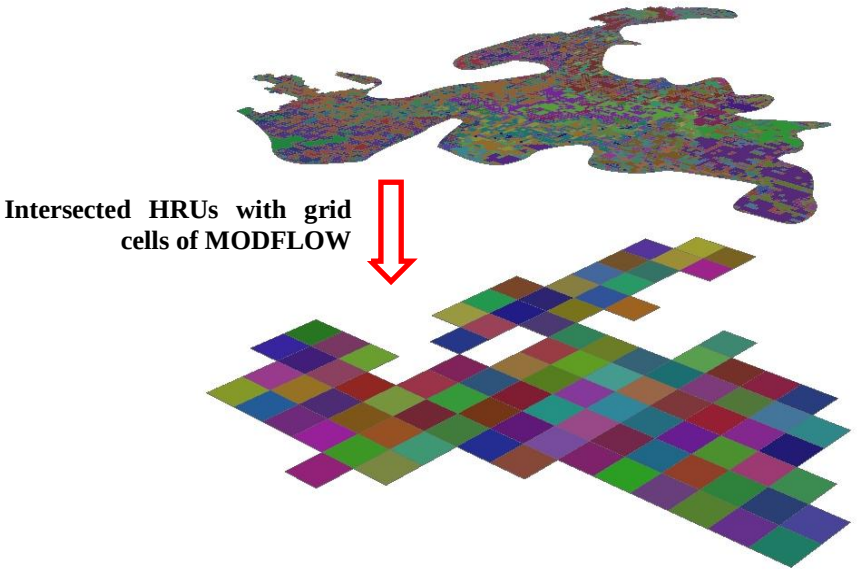


Fig. 4- Schematic overview of SWAT-MODFLOW integration

شکل ۴- شماتیک نحوه اتصال دو مدل SWAT و MODFLOW

۳-۲-۲- تشکیل عامل‌ها و توسعه روشی به منظور الگویابی قواعد رفتاری عامل‌ها

در این پژوهش به منظور تشکیل عامل‌ها و الگویابی قواعد رفتاری آن‌ها از پرسش‌نامه‌های تکمیل شده از ۱۰۳ کشاورز در دشت مهاباد توسط (Valizadeh et al., 2019) استفاده گردید. تشکیل عامل‌ها در این مطالعه بدین صورت است که، ابتدا ۱۰۳ کشاورز پایین‌دست سد مهاباد که از آن‌ها پرسشنامه تهیه شده بود، بر اساس موقعیت مکانی اراضی کشاورزی و تقسیم‌بندی جغرافیایی کشوری (شکل ۵) در دو گروه کشاورزان دهستان مکریان غربی و کشاورزان دهستان مکریان شرقی قرار گرفتند. در ادامه، کشاورزان هر دهستان بر اساس نوع کشت به چهار گروه کشاورزان گندم‌کار، چغندرکار، یونجه‌کار و باغداران سیب گروه‌بندی شده، سپس هر گروه از این کشاورزان بر اساس شاخص‌های فنی اراضی کشاورزی در محدوده مهاباد به سه دسته کشاورزان دارای زمین بزرگ (بیشتر از ۳ هکتار)، متوسط (مابین ۱ تا ۳ هکتار) و کوچک (کمتر از ۱ هکتار) دسته‌بندی شدند. بدین ترتیب ۱۰۳ کشاورز پایین دست سد مهاباد که از آن‌ها پرسشنامه تهیه شده بود، در ۲۴ گروه به‌عنوان عامل در مدل‌سازی درنظر گرفته شدند. در واقع عامل‌ها در این مطالعه گروهی از کشاورزانی هستند که دارای سه ویژگی مشترک نوع کشت، ابعاد زمین و موقعیت مکانی هستند.

یکی از چالش‌هایی که در بحث مدل‌سازی عامل بنیان مطرح است، نحوه تعیین تمایلات و الگویابی قواعد رفتاری عامل‌ها است. این مسئله زمانی که عامل‌های ما نماینده انسان و یا اجتماعات انسانی باشند، بسیار پررنگ‌تر می‌شود. بر این اساس، در این تحقیق تلاش شده است، به روش کمی و با استفاده از شیوه پرسشنامه محور، به تعیین مدل رفتار زیست محیطی کشاورزان با استفاده از تئوری ارزش- عقیده - هنجار استرن[۸] (VBN) پرداخته شود. بر اساس تعریف عنوان شده برای رفتار محیط زیستی، رفتار صرفه‌جویی آب را می‌توان به صورت اقداماتی که کشاورزان برای کاهش و صرفه‌جویی در مصرف آب انجام می‌دهند، تعریف کرد (Stern et al., 1992). با توجه به اهمیت موضوع، در سالهای اخیر نظریه‌های مختلفی به منظور بررسی الگوی رفتاری انسان در مواجهه با محیط زیست ارائه شده است، بطوریکه تحولات اخیر در نظریه‌ها و پژوهش‌های رفتاری و اخلاقی، امیدواری‌هایی برای ایجاد فهم مناسب رفتارهای انسانی در رابطه با محیط زیست بوجود آورده است. در این خصوص تنها نظریه رفتاری اختصاصی در مورد رفتارهای زیست‌محیطی، نظریه ارزش- عقیده- هنجارِ استرن[۹] است، این نظریه هم از لحاظ نظری قوی است، هم به دلیل جامعیت مدل، سادگی در سنجش متغیرها، تأکید بیشتر بر روی مسائل روان‌شناسی فردی به ویژه ارزش‌ها و باورهای درونی و تناسب بیشتر متغیرها با موضوعات زیست محیطی به شکل جدی‌تری از سوی محققان و صاحب نظران در حوزه محیط زیست مورد توجه قرار گرفته

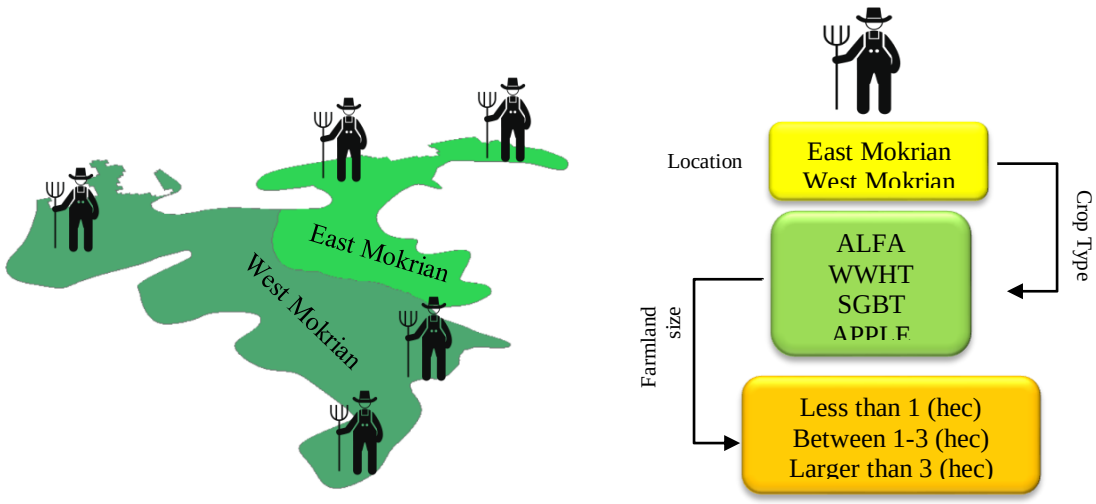


Fig. 5- Location of West and East Mokrian villages and grouping of farmers
شکل ۵- موقعیت روستاهای مکریان غربی، مکریان شرقی و گروه بندی کشاورزان

است (Chen., 2015). در نظریه ارزش- عقیده- هنجار، استرن هنجارهای اخلاقی را به‌عنوان پیش‌آیند مستقیم رفتار محیط زیستی مطرح می‌سازد و عنوان می‌کند اگر هنجارهای اخلاقی فعال شوند احتمالاً بروز رفتار محیط زیستی در فرد بیشتر می‌شود. از طرفی بر اساس نظریه ارزش- عقیده- هنجار، هنجارهای اخلاقی مربوط به حفاظت از آب می‌توانند به وسیله باورها و ارزش‌های کشاورزان فعال شوند (Garling et al., 2003). لذا در این پژوهش به‌منظور شناسایی عوامل مؤثر بر رفتار مصرفی کشاورزان و الگویابی قواعد رفتاری عامل‌ها از نظریه ارزش عقیده- هنجار استفاده شد. طبق نظریه استرن، مبانی ارزشی نهادینه شده در افراد (فردگرایی و جمع‌گرایی) خود اساسی برای مسئولیت‌پذیری کشاورزان در زمینه بکارگیری آب در جامعه کشاورزی می‌باشد. بنابراین استرن ارزش‌های فردگرایانه و جمع‌گرایانه در زمینه حفاظت از آب به عنوان پیش‌بینی‌کننده‌های مستقیم مسئولیت‌پذیری درنظر گرفته است. وی همچنین مدعی است متغیرهای دلبستگی مکانی و نگرانی نسبت به کمبود آب از اصلی‌ترین عوامل تبیین‌کننده هنجارهای اخلاقی در زمینه حفاظت از آب هستند که این متغیر را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در نهایت با توجه به مطالبی که در مورد نظریه استرن ذکر شد، چارچوب نظری که برای تعیین مؤلفه‌های اصلی تأثیرگذار در رفتار کشاورزان و الگویابی قواعد رفتاری عامل‌ها در این مطالعه درنظر گرفته شده است، مطابق شکل ۶ است.

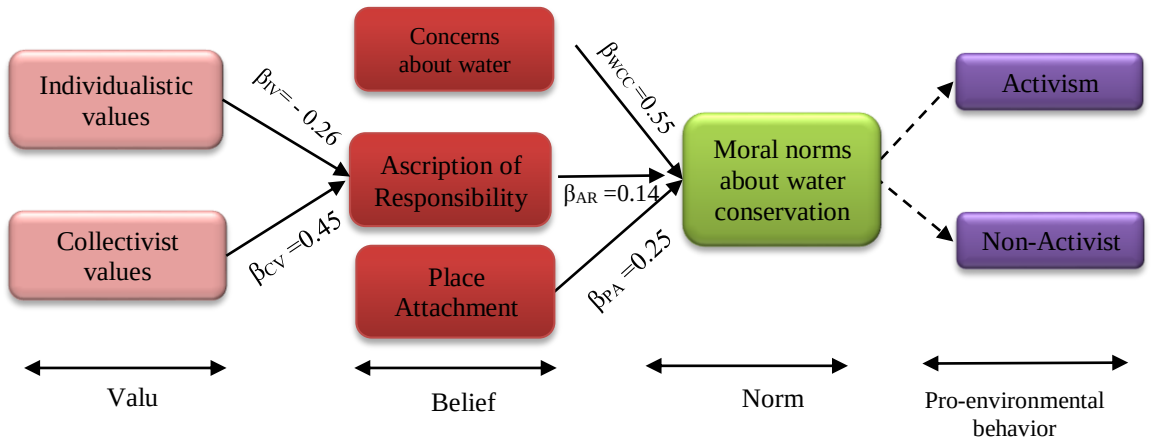


Fig. 6- Value-Belief-Norm Theory to predict pro-environmental behaviors
شکل ۶- چارچوب نظری ارزش- عقیده- هنجار برای پیش‌بینی رفتارهای محیط زیستی

باید خاطر نشان کرد، در پرسشنامه‌هایی که توسط (Valizadeh et al., 2019) تهیه شده است، ۲۶ سؤال برای سنجش متغیرهای هنجارهای اخلاقی، ارزش فردگرایانه، ارزش جمع‌گرایانه، دلبستگی مکانی و نگرانی نسبت به کمبود آب طراحی شده و از کشاورزان درخواست شده بود برای پاسخ به هر سؤال از از پنج گزینه (صفر: کاملاً مخالفم، ۱: مخالفم، ۲: نظری ندارم، ۳: موافقم و ۴: کاملاً موافقم) استفاده کنند.

در ادامه، به منظور تعیین مؤلفه‌های مؤثر بر رفتار عامل‌ها با استفاده از نتایج پرسشنامه‌ها تهیه شده توسط (Valizadeh et al., 2019) مبتنی بر تئوری استرن در این مطالعه از روش تکنیک تحلیل مسیر استفاده شد. تحلیل مسیر نوعی از تحلیل آماری رگرسیون چندگانه است که برای ارزیابی مدل‌ها به بررسی روابط بین یک متغیر وابسته و دو یا چند متغیر مستقل می‌پردازد. در واقع با استفاده از این روش، می‌توان بزرگی و اهمیت ارتباط بین متغیرها را در یک مدل نظری را تخمین زد (Wright, 1960). به‌عبارتی در تحلیل مسیر یک مدل نظری به آزمون گذاشته می‌شود تا در نهایت با اجرای تحلیل، این مدل نظری به یک مدل تجربی منتهی شود. قاعده کلی این است که در اجرای تحلیل مسیر، متغیرهایی که مقدار ضریب مسیر (بتای استاندارد) کوچک‌تر از ۰/۰۵ داشته باشند، از مدل حذف می‌شوند. ضریب مسیر (بتای استاندارد) بیان‌کننده وجود رابطه علی خطی و شدت و جهت این رابطه بین متغیرها است. همان‌طور که انتظار می‌رفت تکنیک تحلیل مسیر نشان داد (شکل ۶)، ارتباط معنی‌داری بین هنجارهای اخلاقی نسبت به حفاظت از منابع آب و تمامی متغیرها وجود دارد. بر اساس نتایج تحلیل مسیر، ارزشهای فردگرایانه رابطه منفی و معنی‌داری (β_{IV} = -0.26) با هنجارهای اخلاقی زیست محیطی دارد. به عبارتی کشاورزان با جهت‌گیری بیشتر به سوی ارزش‌های فردگرایانه (انسان محور) اخلاق محیط‌زیستی کمتری از خود بروز می‌دهند. اما متغیر ارزش‌های جمع‌گرایانه رابطه مثبت معنی‌داری با هنجارهای اخلاقی (β_{CV} = 0.45) دارد. بدین معنی که کشاورزان با جهت‌گیری ارزش‌های جمع‌گرایانه علاوه بر اهمیت به زندگی خود، توجه خاصی به زندگی سایر موجودات زنده دارند و تلاش می‌کنند کارهای منفی آن‌ها کمترین تاثیر منفی را بر محیط زیست بگذارد. همچنین، در بین سه متغیر نگرانی نسبت به کمبود منابع آب، دلبستگی مکانی و مسئولیت‌پذیری، نگرانی نسبت به کمبود منابع آب بیشترین ارتباط مثبت و مستقیم (β_{WCC} =0.55) را با هنجارها اخلاقی حفاظت از منابع آب دارد. در گام آخر، بر اساس نتایج پرسشنامه‌ها و مقادیر بتای استاندارد میزان تمایل هر عامل نسبت به کاهش مصرف آب بر اساس فرمول (۱) محاسبه شد (Wright, 1960):

(۱)

$$Score\ (AR) = W_{CV} * Score\ (CV) - W_{IV} * Score\ (IV)$$
$$Score\ (MNWC) = W_{WCC} * Score\ (WCC) + W_{PA} * Score\ (PA) + W_{AR} * Score\ (AR)$$

در رابطه (۱)، Score (CV)، Score (IV)، Score (WCC)، Score (PA)، Score (AR) و Score (MNWC) مؤلفه‌های کیفی ارزش‌های جمع‌گرایانه، ارزش‌های فردگرایانه، نگرانی نسبت به کمبود منابع آب و دلبستگی مکانی، مسئولیت‌پذیری و هنجار اخلاقی در مورد حفاظت از آب می‌باشند که بر اساس نتایج حاصل از پرسشنامه‌های تهیه شده، مطابق جدول ۱ برای هر عامل امتیازدهی شدند.

Table 1- The score of each agent based on the average answer to the questions

جدول ۱- امتیاز هر عامل بر اساس متوسط پاسخ به هر گروه از سوالات پرسشنامه

Average responses	Score	Status
0	0	Low desire
1	0.25	Low desire
2	0.5	Low desire
3	0.75	High desire
4	1	High desire

همچنین، ضرایب W وزن‌های تجربی هر کدام از مؤلفه‌ها است، برای محاسبه این مقادیر از ضرایب بتا استاندارد استفاده گردید (Wright, 1960).

$$W_{CV} = \frac{|\beta_{CV}|}{|\beta_{CV}|+|\beta_{IV}|} \quad (۲)$$

در نهایت، مؤلفه هنجارهای اخلاقی Score (MNWC) امتیازی بین ۰ تا ۱ دریافت می‌کند. هر چه مقدار Score (MNWC) به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده تمایل زیاد به اقدام در تغییر شیوه آبیاری از آبیاری سنتی به آبیاری قطره‌ای و تغییر نوع کشت به سمت کشت کم آبر (که جزو رفتاری حافظت از محیط زیست هستند) است. لازم به ذکر است، برای تحلیل مسیر تحقیق حاضر از نرم‌افزار SPSS استفاده شده است.

۳-۲-۳- ایجاد ارتباط مکانی بین عامل‌ها و محیط و تصمیم‌گیری عامل‌ها در پاسخ به تعاملات با محیط

گام نهایی در مدل‌سازی عامل بنیان، ایجاد ارتباط مکانی بین عامل‌ها با محیط و طراحی تصمیم‌گیری عامل در واکنش به محیط می‌باشد. با توجه به اینکه، مدل هیدرولوژی این پژوهش در نرم‌افزار SWAT

تشکیل شد. به منظور ایجاد ارتباط مکانی بین عامل‌ها و محیط، HRUهای تشکیل شده در مدل SWAT ابتدا بر اساس موقعیت مکانی به دو گروه HRUهای واقع در دهستان مکریان غربی و HRUهای واقع در دهستان مکریان شرقی تقسیم شدند. در ادامه هر گروه HRU بر اساس نوع کشت (گندم، چغندر، یونجه، سیب) و مساحت تحت کشت (زمین بزرگ، متوسط، کوچک) به ۲۴ گروه دسته‌بندی شدند. بدین ترتیب با اختصاص هر گروه از عامل‌ها، بعنوان نمایندگان کشاورزانِ هر گروه HRU ارتباط مکانی بین عامل‌ها و مدل هیدرولوژی ایجاد شد. در واقع در این تحقیق گروهی از HRUها نماینده کشاورزانی هستند از لحاظ موقعیت مکانی، نوع کشت و ابعاد زمین یکسان هستند و در مورد تغییرات HRUهای مربوطه (تغییر نوع کشت و شیوه آبیاری) تصمیم‌گیری می‌کنند، نحوه این گروه‌بندی در شکل ۷ ارائه شده است.

در ادامه به منظور تدوین تصمیم‌گیری عامل‌ها در پاسخ به تعاملات با محیط، سه گام تصمیم‌گیری برای عامل‌ها درنظر گرفته شد. در گام اول، عامل وضعیت اقتصادی خود بر اساس رابطه (۳) که حاصل فعالیت‌های کشاورزی‌اش در سال گذشته بوده مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

$$F_c = \left(\frac{Profit - Cost_{ave}}{12}\right) \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، F_c، وضعیت اقتصادی عامل، Profit سود خالص سالانه و $Cost_{ave}$ متوسط هزینه سالانه است. در صورتی‌که مقدار F_c، کمتر از آستانه فقر (شکل ۸) باشد، آنگاه عامل به جهت جبران وضعیت اقتصادی نامطلوب خود، برای زراعت غالب در سال آتی به صورت تصادفی از بین محصولاتی انتخاب می‌کند که سود بالایی داشته باشند، یعنی یونجه و یا گندم.

در نقطه مقابل اگر وضعیت اقتصادی کشاورز مطلوبیت نسبی داشته باشد، در این حالت عامل وارد گام دوم از مرحله تصمیم گیری می‌شود، از آنجاییکه، میزان موجودیت آب در دسترس ارتباط مستقیمی با میزان تولید و نوع محصولات زراعی دارد. از این رو موجودیت منابع آبی همواره مورد توجه کشاورزان قرار دارد. در این تحقیق، برای بررسی از شاخص شدت خشکسالی RDI طبق رابطه (۴) و رابطه (۵) برای ارزیابی وضعیت منابع آبی استفاده شده است (Tsakiris et al., 2007).

$$\alpha_b^{(x)} = \frac{\sum_{y=1}^{b} p_{xy}}{\sum_{y=1}^{b} PET_{xy}} \quad , x = 1 to T \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، p_{xy} و PET_{xy} به ترتیب میزان بارندگی و پتانسیل تبخیر و تعرق در ماه y ام از سال هیدرولوژیکی x ام است. همچنین T، تعداد سال‌های هیدرولوژیکی درنظر گرفته شده است.

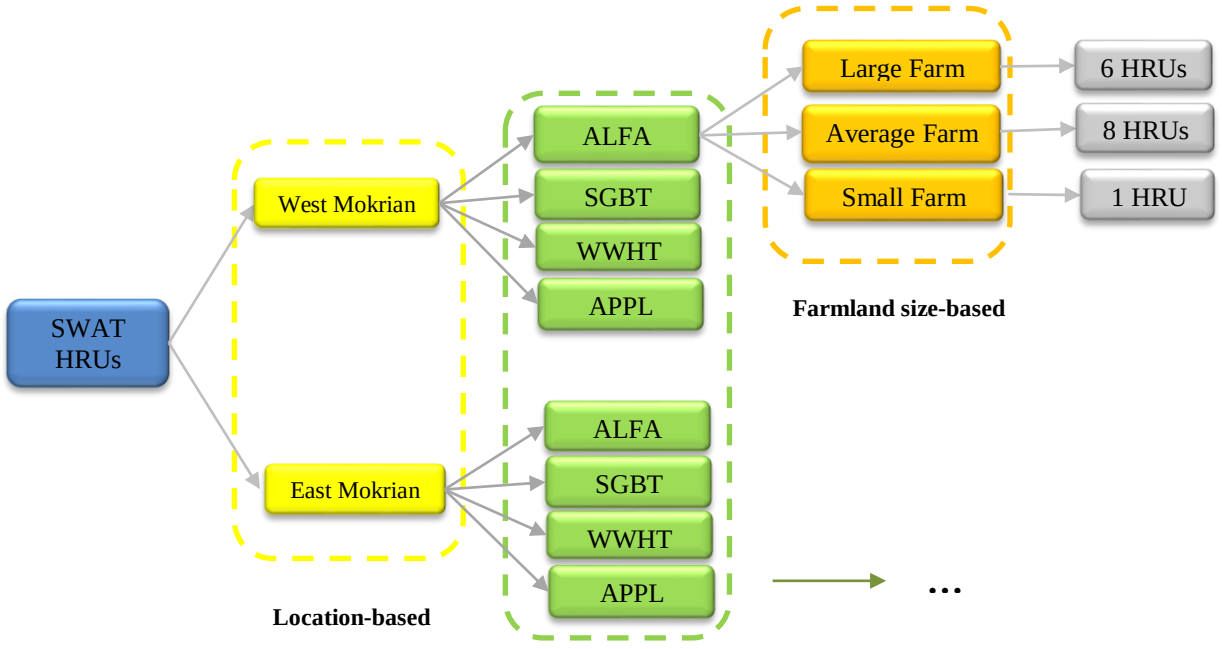


Fig. 7- Schematic overview of the HRU types categorization

شکل ۷- شماتیک نحوه گروه‌بندی HRUs

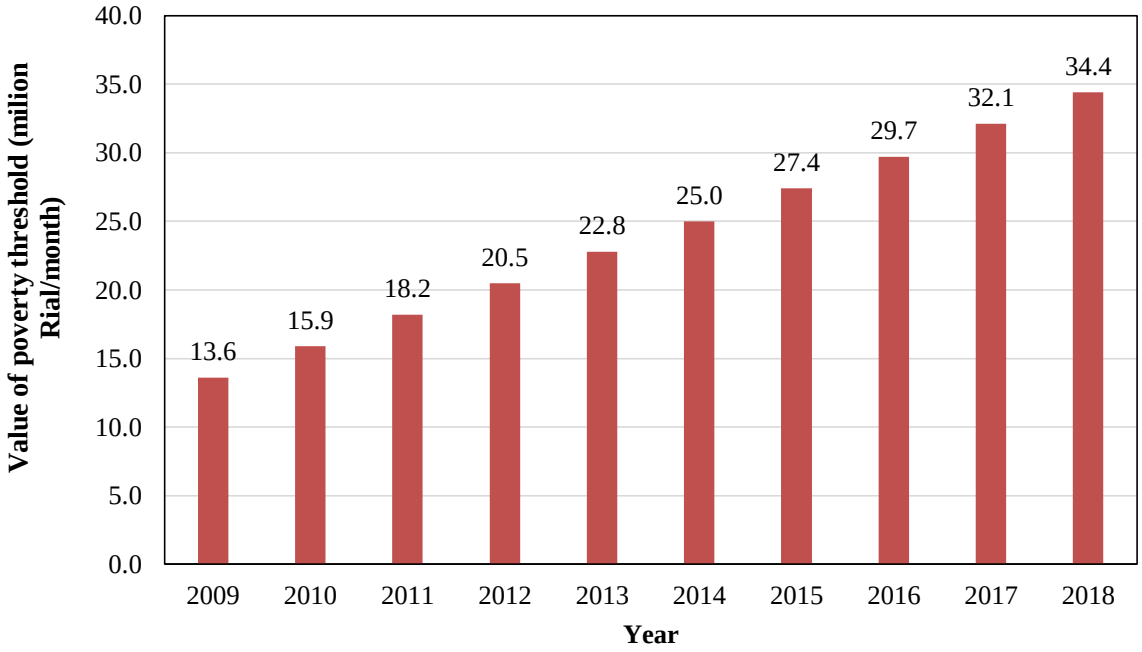


Fig. 8- Values of the poverty threshold in Iran (Central Bank of the Islamic Republic of Iran)

شکل ۸- مقادیر آستانه فقر در ایران (بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران)

$$RDI_{st}^{(x)} = \frac{u_b^{(x)} - \bar{u}_b}{\widehat{\sigma_{ub}}} \quad (۵)$$

در رابطه (۵)، RDI شاخص خشکسالی، $u_b^{(x)}$، $\bar{u}_b$، σ_{ub} به ترتیب $\ln(\alpha_b^{(x)})$ و میانگین و انحراف معیار u_b هستند. در صورتی که شاخص خشکسالی RDI بزرگتر از صفر باشد، یعنی وضعیت آب و هوایی در شرایط ترسالی است و عامل فراوانی آب را مشاهده می‌کند. از این رو نگرانی کمتری نسبت به مسائل آبی داشته و تغییری در فعالیت کشاورزی خود ایجاد نمی‌کند. اما در صورتی که شاخص خشکسالی کوچکتر از صفر باشد، یعنی وضعیت آب و هوایی در شرایط خشکسالی است، کشاورز باید تصمیم بگیرد که به چه اندازه می‌خواهد در صرفه‌جویی و احیا محیط زیست نقش داشته باشد.

در این مرحله برای اندازه‌گیری میزان تمایل عامل به فعالیت‌هایی که در راستای صرفه‌جویی قرار دارند، از چارچوب فکری "تئوری رفتاری ارزش- عقیده- هنجار" توسعه داده شده استفاده می‌شود. در جدول ۲، نحوه تصمیم‌گیری عامل‌ها با استفاده از تئوری VBN ارائه شده است، در این جدول، S_1 مقداری بین صفر و یک است که مرز بین تمایل کشاورزان برای اقدام در تغییر شیوه آبیاری از آبیاری سنتی به آبیاری قطره‌ای و تغییر نوع کشت به سمت کشت کم آب‌بر و یا صرفاً اقدام به کشت محصول کم آب بر است را تعیین می‌کند. بدین صورت که، اگر مقدار Score (MNWC) که نشانگر تمایل کشاورز به صرفه‌جویی در مصرف آب است، به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده تمایل زیاد به اقدام در تغییر شیوه آبیاری از آبیاری سنتی به آبیاری قطره‌ای و تغییر نوع کشت به سمت کشت کم آب بر (به بیان دیگر صرفه‌جویی در مصرف آب) است و عامل، روش آبیاری خود را از روش سنتی به روش آبیاری قطره‌ای و نوع کشت خود را به کشت کم آبر گندم تبدیل می‌کند. در غیر این صورت، اگر مقدار Score (MNWC) به صفر نزدیک‌تر باشد، تمایل کشاورز به اقدام در تغییر شیوه آبیاری از آبیاری سنتی به آبیاری قطره‌ای (به بیان دیگر صرفه‌جویی در مصرف آب) پایین بوده و فقط نوع کشت خود را به کشت پر سود اما کم آبر گندم تبدیل می‌کند.

Table 2- Behavioral rules of the agent based on VBN theory

جدول ۲- قواعد رفتاری عامل بر اساس تئوری VBN

Degree of moral norms about water conservation	Behavioral rules
Score (MNWC) ≤ S_1	Change crop type
Score (MNWC) > S_1	Change crop type and Change irrigation method

لازم به ذکر است، در مدل پیشنهادی عامل بنیان توسعه داده شده تصمیم‌گیری عامل‌ها ۵ ساله درنظر گرفته شده است. بدین صورت که مدل هیدرولوژیک (SWAT-MODFLOW) به مدت ۵ سال به صورت ماهانه اجرا می‌شود. در پایان سال پنجم، خروجی مدل شامل عملکرد محصول، بارش و تبخیر و تعرق وارد مدل ABM شده و تصمیمات عامل‌ها را برای ۵ سال آینده تعیین می‌کند. سپس، خروجی‌های مدل ABM (نوع کشت و روش آبیاری) به مدل هیدرولوژیک اعمال می‌شود.

۳-۳- مدل‌سازی تغییر اقلیم

هیئت بین‌دولتی تغییرات آب‌وهوایی[۱۰] (IPCC) ششمین گزارش ارزیابی خود را در مورد مبنای علوم فیزیکی تغییرات آب‌وهوایی در ماه اوت سال ۲۰۲۲ منتشر کرد. IPCC در گزارش ششم خود، پنج خط سیر کلیدی گازهای گلخانه‌ای با نام‌های SSP1-1.9، SSP11-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0، SSP5-8.5 را معرفی نموده است که، در هر پنج سناریوی انتشار آلاینده‌های منتشرشده IPCC، دمای سطح جهان تا اواسط قرن افزایش می‌یابد. در گام آخر این مطالعه سعی شده است، اثرات تغییر اقلیم بر زیربخش زراعت با استفاده از مدل تلفیقی هیدرولوژیکی- اجتماعی پیشنهادی ارزیابی شود که از دیدگاه مدیریتی بسیار مهم است. در واقع نادیده گرفتن مسائل اجتماعی در ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر شرایط هیدرولوژیکی باعث بوجود آمدن انحراف (بیشتر یا کمتر) از حد برآورد اثرات می‌شود، که این مطالعه با تلفیق دو مدل هیدرولوژیکی و مدل اجتماعی به دنبال پر کردن این شکاف است. بدین منظور در این مطالعه، با بکارگیری مقادیر سری زمانی روزانه‌ی حداکثر و حداقل دما و بارندگی برای سال‌ها ۲۰۱۴-۱۹۸۵، با استفاده از مدل گردش عمومی جو به نام ACCESS-CM2 (Australia)، ۲ سناریو اقلیمی خوش‌بینانه SSP1-2.6 و بدبینانه SSP5-8.5 در دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۸) شبیه‌سازی شد. تا با اعمال تاثیرات تغییر اقلیم به مدل تلفیقی پیشنهادی SWAT-MODFLOW-ABM، نتایج حاصل از رفتار کشاورزان و تعاملات آب سطحی و زیرزمینی در صورت عدم ایجاد تغییرات اساسی در سیاست‌های مدیریتی در آینده نزدیک بررسی گردد.

۴- نتایج و بحث

در ادامه، ابتدا نتایج واسنجی مدل SWAT-MODFLOW پیشنهادی برای دشت مهاباد ارائه شده، سپس نتایج مربوط به مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW- ABM ارزیابی شده است، در گام آخر نیز نتایج حاصل از اعمال تأثیرات تغییر اقلیم برای آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۰) در صورت عدم ایجاد تغییرات اساسی در سیاست‌های مدیریتی تحلیل و بررسی شده است.

۴-۱- واسنجی مدل SWAT-MODFLOW دشت مهاباد

در گام اول مدل پیشنهادی SWAT-MODFLOW باید برای ارائه عملکرد مناسب به‌منظور شبیه‌سازی یکپارچه آب‌های سطحی و زیرزمینی کالیبره شود. در این تحقیق، کالیبراسیون مدل یکپارچه در سه گام انجام شد. در گام اول و دوم، مدل SWAT و مدل MODFLOW در حالت پایدار و ناپایدار به طور مستقل واسنجی شدند. سپس در گام سوم، واسنجی توأمان مدل SWAT-MODFLOW با استفاده از اطلاعات دو گام اول و دوم انجام شد. بدین صورت که، پس از انجام فرایند واسنجی مدل SWAT، ۱۰ دسته جواب قابل قبول دارای ضریب نش بزرگتر از ۰/۶۵ استخراج شد. سپس با اجرای هر دسته جواب در مدل SWAT، مقادیر نفوذ به آبخوان و حجم آبیاری به مدل MODFLOW وارد شد و مقادیر پارامترهای ضریب هدایت هیدولیکی و ضریب انیزوتراپی برای حالت پایدار و مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه برای حالت ناپایدار با روش صحت‌سنجی PEST مجددا در مدل MODLOW محاسبه شد. نتایج حاصل از سطح آب مشاهداتی و محاسباتی مقایسه و دسته جوابی که بهترین پاسخ را برای هر دو مدل حاصل کند، به عنوان جواب نهایی مورد استفاده قرار گرفت.

(شکل ۹، (I)) سری زمانی رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری گرد یعقوب را نشان می‌دهد، که مقادیر ضریب نش ساتکلیف (NS) و ضریب تعیین (R^2) به ترتیب ۰/۶۴ و ۰/۷۳ برای واسنجی و ۰/۶۰ و ۰/۷۰ برای دوره صحت‌سنجی به دست آمد. همچنین (شکل ۹، (II))، متوسط عملکرد سالانه محصولات را در دو حالت شبیه‌سازی شده و مشاهداتی نشان می‌دهد، مقادیر شبیه‌سازی شده متوسط عملکرد سالانه محصول برای گندم، چغندرقند، یونجه و سیب به ترتیب ۳/۱۸، ۴۷/۲۵، ۸/۳۶ و ۱۶/۶۳ تن بر هکتار و مقادیر مشاهداتی به ترتیب ۳/۳۷، ۵۰/۱۴، ۸/۳۲، ۱۳/۸۹تن بر هکتار می‌باشد. همچنین به دلیل عدم دسترسی و کمبود داده‌های لایسیمتری در محدوده مطالعاتی به‌منظور بررسی توانایی مدل SWAT، در شبیه‌سازی تبخیر و تعرق، مقادیر شبیه‌سازی تبخیر و تعرق واقعی سالانه با متوسط مقادیر تبخیر و تعرق حداکثر گزارش شده از سند ملی آب مقایسه شد (شکل ۱۰). در مجموع می‌توان گفت، مدل SWAT توسعه داده شده در این مطالعه برای دشت مهاباد عملکرد مناسبی داشته است.

در ادامه نتایج مربوط به مدل MODFLOW توسعه داده شده در این تحقیق ارائه شده است. در شکل ۱۱ (I) و شکل ۱۱ (II) سری زمانی تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در مدل MODFLW و مقادیر مشاهداتی تراز آب در دو چاه منتخب A و B نشان داده شده است (به دلیل بالا بودن تعداد چاه‌های مشاهداتی دو چاه برای نمونه انتخاب شده‌اند که در شکل ۱ مشخص است). همچنین، تراز آب محاسبه شده توسط مدل و مقادیر مشاهده‌ای، در همه چاه‌های مشاهده‌ای پس از واسنجی مدل در شرایط ناپایدار در شکل ۱۱ (III)، و آبنمود آبخوان دشت مهاباد در دو حالت شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در شکل ۱۱(IV) ارائه شده است.

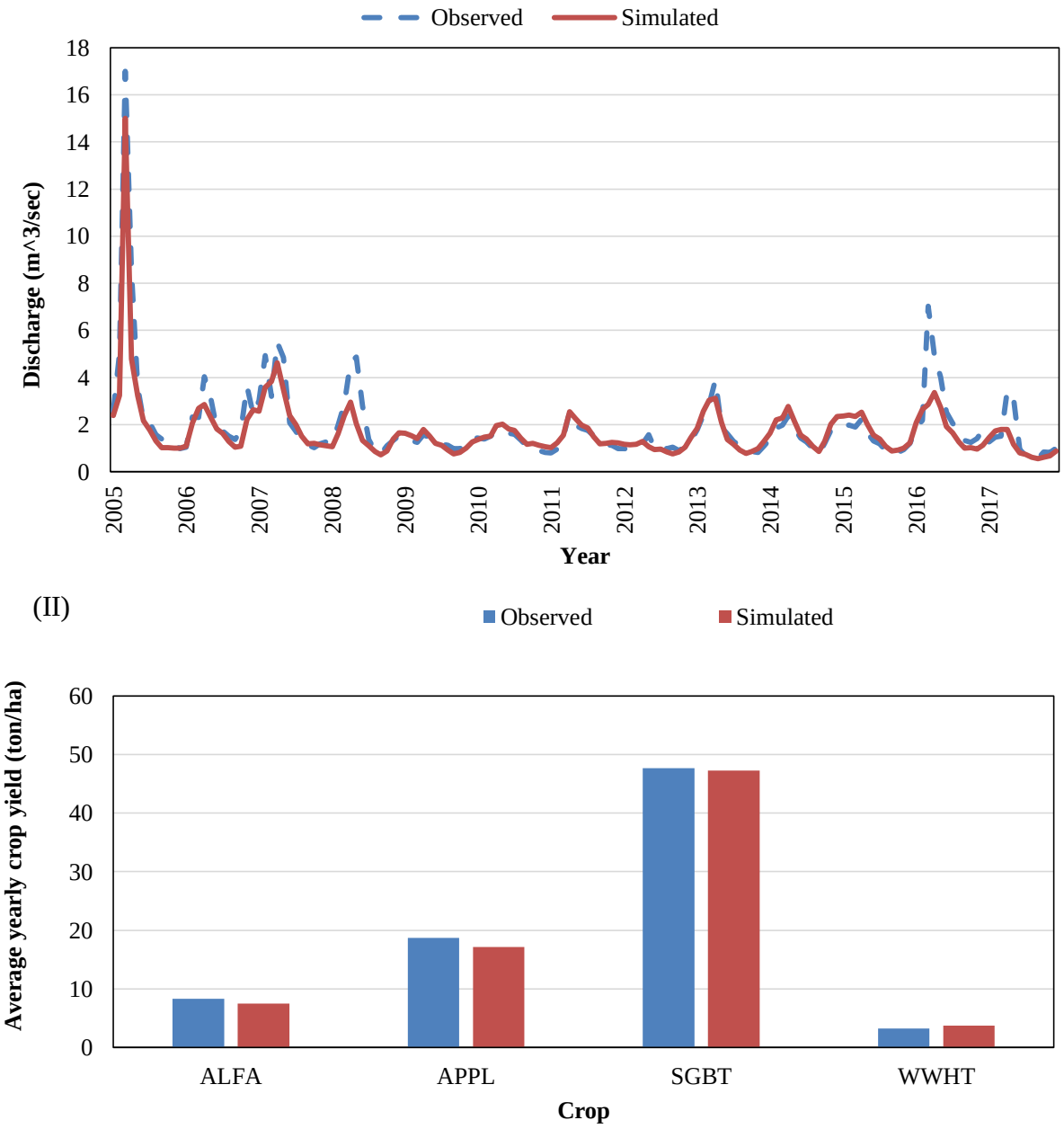


Fig. 9- (I) Discharge at the Gord-yaghoub hydrometric station and (II) Simulated vs. observed average crop yield

شکل ۹- (I) سری زمانی دبی جریان در ایستگاه هیدرومتری گرد یعقوب و (II) مقادیر متوسط عملکرد سالانه محصول در دو حالت مقادیر شبیه‌سازی شده در مدل SWAT و مقادیر مشاهداتی

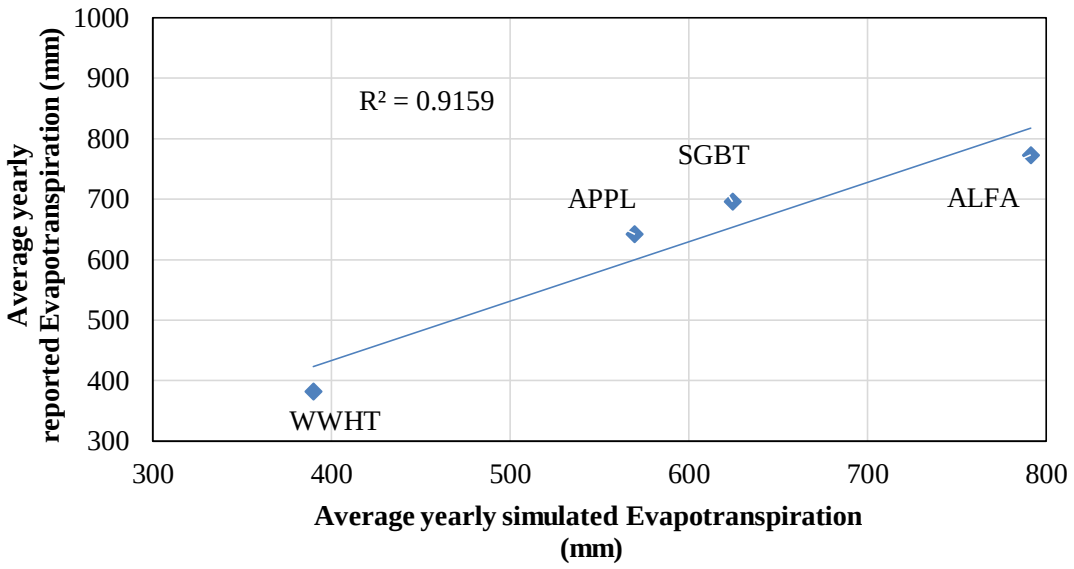


Fig. 10- Average yearly simulated evapotranspiration by SWAT vs. reported evapotranspiration
شکل ۱۰- میانگین سالانه تبخیر و تعرق واقعی در مدل SWAT در مقابل تبخیر و تعرق گزارش شده

بمنظور بررسی بیشتر، مقادیر به دست آمده برای معیارهای ارزیابی کمترین خطای مربعات[۱۱] (RMSE) و میانگین خطای باقیمانده مطلق[۱۲] (MAE) برای متوسط تراز آب محاسبه شده توسط مدل و مقادیر مشاهده‌ای در دو حالت پایدار و ناپایدار در جدول ۳ ارائه شده است.

همانطوری که از نتایج ارائه شده مشخص است، مدل MODFLOW توانسته روند تغییرات سطح آب در آبخوان را به‌خوبی و مطابق با روند تغییرات سطح آب اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی کند. بطورکلی می‌توان گفت نتایج به دست آمده برای مدل SWAT-MODFLOW پیشنهادی در این تحقیق رضایت بخش است.

در ادامه پس از صحت سنجی مدل هیدرولوژیکی پیشنهادی (SWAT-MODFLW)، مدل اجتماعی پیشنهادی (ABM) به مدل کالیبره شده هیدرولوژیکی اعمال شد. در این مرحله نیاز است مجددا مدل هیدرولوژیکی- اجتماعی پیشنهادی به‌منظور نشان دادن عملکرد مناسب این مدل در پیش‌بینی رفتار کشاورزان محدوده مطالعاتی در دوره مطالعاتی تاریخی صحت‌سنجی شود. برای صحت‌سنجی مدل‌های عامل بنیان دو روش ارائه شده است. در روش اول مطابقت ساختار رفتاری تعریف شده برای عامل‌ها با تئوری‌ها و مکانیزم رفتاری دنیای واقعی و نظرات متخصصان بررسی می‌شود، این روش صحت‌سنجی ساختاری شناخته می‌شود.

در روش دوم، در صورتی که داده‌های واقعی همنوع داده‌های خروجی مدل موجود باشد، میزان انطباق این دو سری از داده‌ها بررسی می‌شود (Du & Cai, 2017). از این رو در این مطالعه، سری زمانی جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری گرد یعقوب و تغییرات سطح آب زیرزمینی در آبخوان مهاباد برای صحت‌سنجی نتایج استفاده شده است. همچنین شایان ذکر است که مدل ABM در این تحقیق به گونه‌ای تنظیم شده است که عوامل به صورت تصادفی یک محصول سودآور را برای کشت سال آینده خود انتخاب می‌کنند. لذا، اجرای مدل نتایج متفاوتی را برای هر اجرا به همراه داشت، که در این مطالعه، میانگین ۳ اجرا برای ارائه نتایج انتخاب شده است.

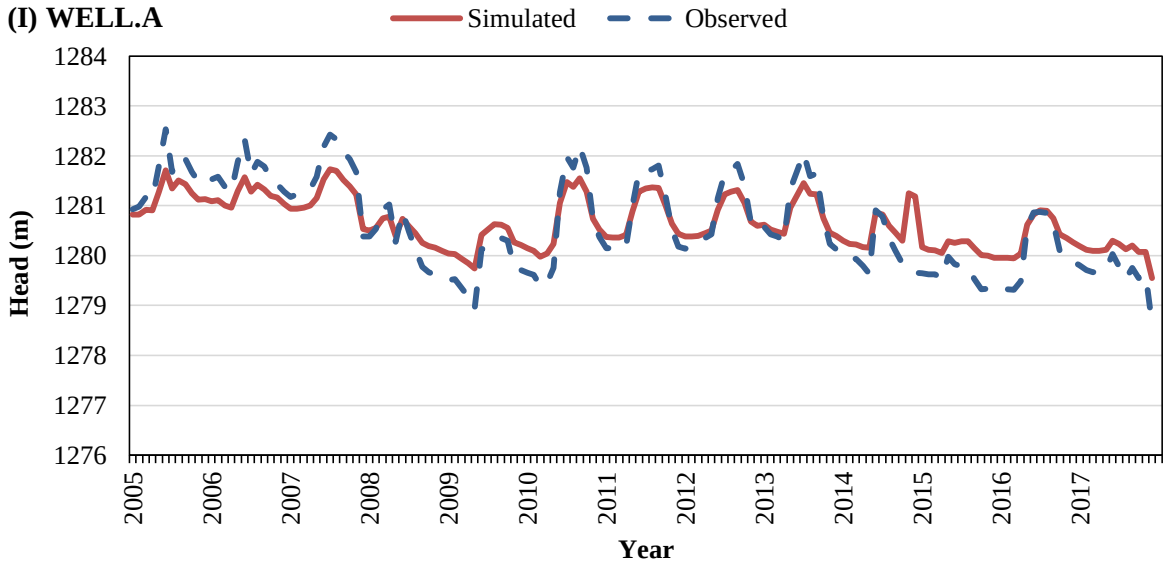
۴-۲- صحت‌سنجی نتایج مدل SWAT-MODFLOW-ABM توسعه داده شده برای دشت مهاباد

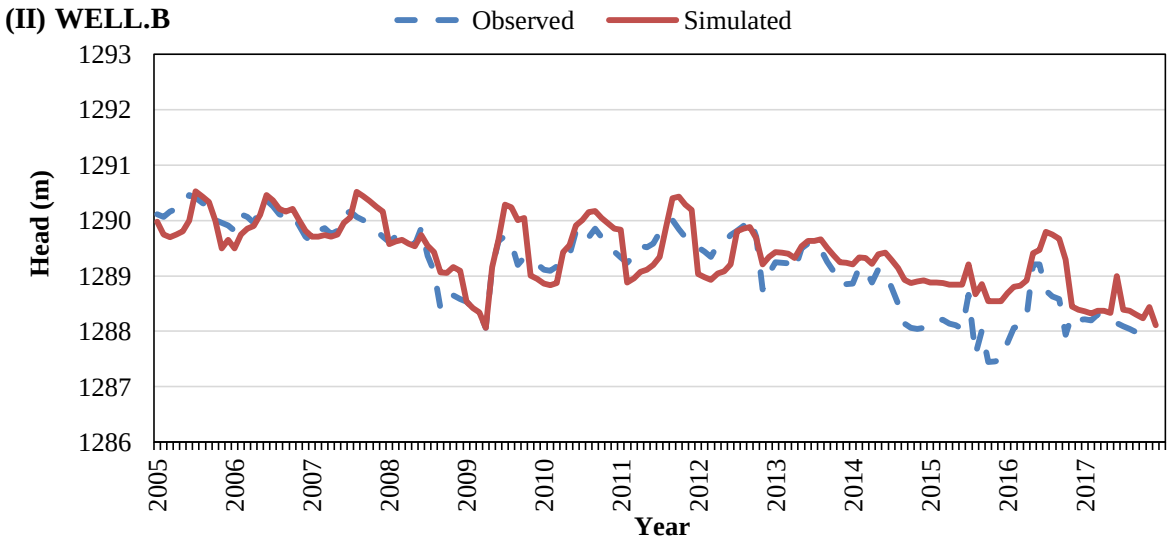
همانطور که در جدول ۲ ذکر شد، در این تحقیق قوانین رفتاری عامل‌ها در مدل‌سازی عامل بنیان، بر اساس امتیاز مؤلفه هنجار اخلاقی که هر کدام از عوامل مطابق تئوری اخلاقی VBN دریافت می‌کنند، تعیین می‌شود.

Table 3- The outcomes of the calibration and validation of the groundwater model

جدول ۳- نتایج به دست آمده برای صحت‌سنجی و واسنجی مدل آب زیرزمینی

	Steady state (2005-2006)	Unsteady state (2006-2015)	Validation check (2015-2017)
Mean Absolute Residual Error (MAE)	0.35	0.92	0.98
Root Mean Square Error (RMSE)	0.55	1.38	1.98





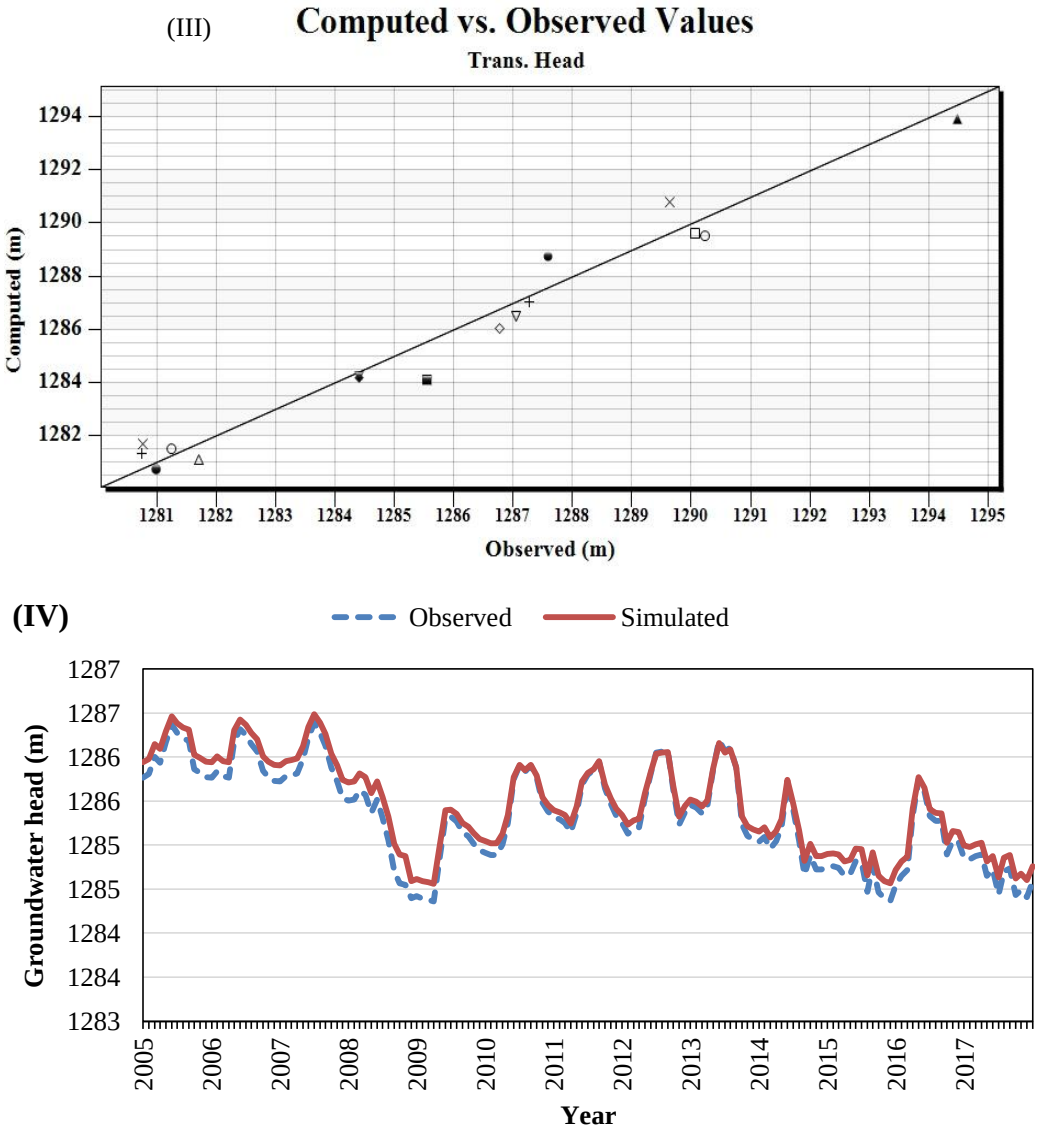


Fig. 11- (I) and (II) Time series of simulated and observed head in two selected piezometers, (III) comparison of the head calculated by the model after calibrating the model in unsteady state with the observed head, (IV) Simulated and observed water profile of the Mahabad plain aquifer

شکل ۱۱- (I) و (II) سری زمانی تراز آب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دو چاه مشاهداتی منتخب، (III) سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای محاسبه شده توسط مدل و مشاهده‌ای پس از واسنجی مدل در شرایط ناپایدار، (IV) آبنمود آبخوان دشت مهاباد در دو حالت شبیه‌سازی شده و مشاهداتی

در این مطالعه، پس از تحلیل حساسیت، مقدار S_1 که مرز بین تمایل کشاورزان برای اقدام در تغییر شیوه آبیاری از آبیاری سنتی به آبیاری قطره‌ای و تغییر نوع کشت به سمت کشت کم آب بر و یا صرفا اقدام به کشت محصول کم آب بر می‌باشد، عدد ۰/۵ درنظر گرفته شد. همچنین به دلیل عدم قطعیت در تعیین قواعد رفتاری بر اساس نظریه VBN، تنها ۷۰ درصد از نتایج مدل‌سازی مبتنی بر عامل در مدل‌سازی هیدرولوژیکی (SWAT-MODFLOW) اعمال شد. در شکل ۱۲ (I) و ۱۲ (II) سری زمانی دبی جریان در ایستگاه هیدرومتری گرد یعقوب و آبنمود آبخوان دشت مهاباد در دو حالت مقادیر مشاهداتی و نتایج مدل هیدرولوژیکی–اجتماعی پیشنهادی نشان داده شده است. همچنین بمنظور کمیت‌بخشی به مقایسه نتایج، مقادیر به دست آمده برای معیارهای ارزیابی NS و R^2 برای دبی جریان در ایستگاه

هیدرومتری گرد یعقوب و RMSE، MAE برای سطح آب زیرزمینی در آبخوان مهاباد بعد از اعمال مدل عامل بنیان پیشنهادی به مدل SWAT-MODFLOW در جدول ۴ ارائه شده است.

در مجموع، نتایج به دست آمده بر اساس معیارهای ارزیابی نشان می‌دهد، مـدل هیدرولوژی اجتماعی پیشنهادی (SWAT-MODFLOW-ABM) قادر است رفتارهای مصرفی کشاورزان (اعم از نوع کشت و شیوه آبیاری) دشت مهاباد را در برداشت آب از منابع آب سطحی و آبخوان به درستی به تصویر بکشد. در گام آخر این مطالعه، پس از صحت‌سنجی مدل هیدرولوژی اجتماعی پیشنهادی، تأثیرات تغییر اقلیم برای آینده نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۴۰) به مدل پیشنهادی (SWAT-MODFLOW-ABM) اعمال شده و نتایج حاصله تحلیل و بررسی شده است.

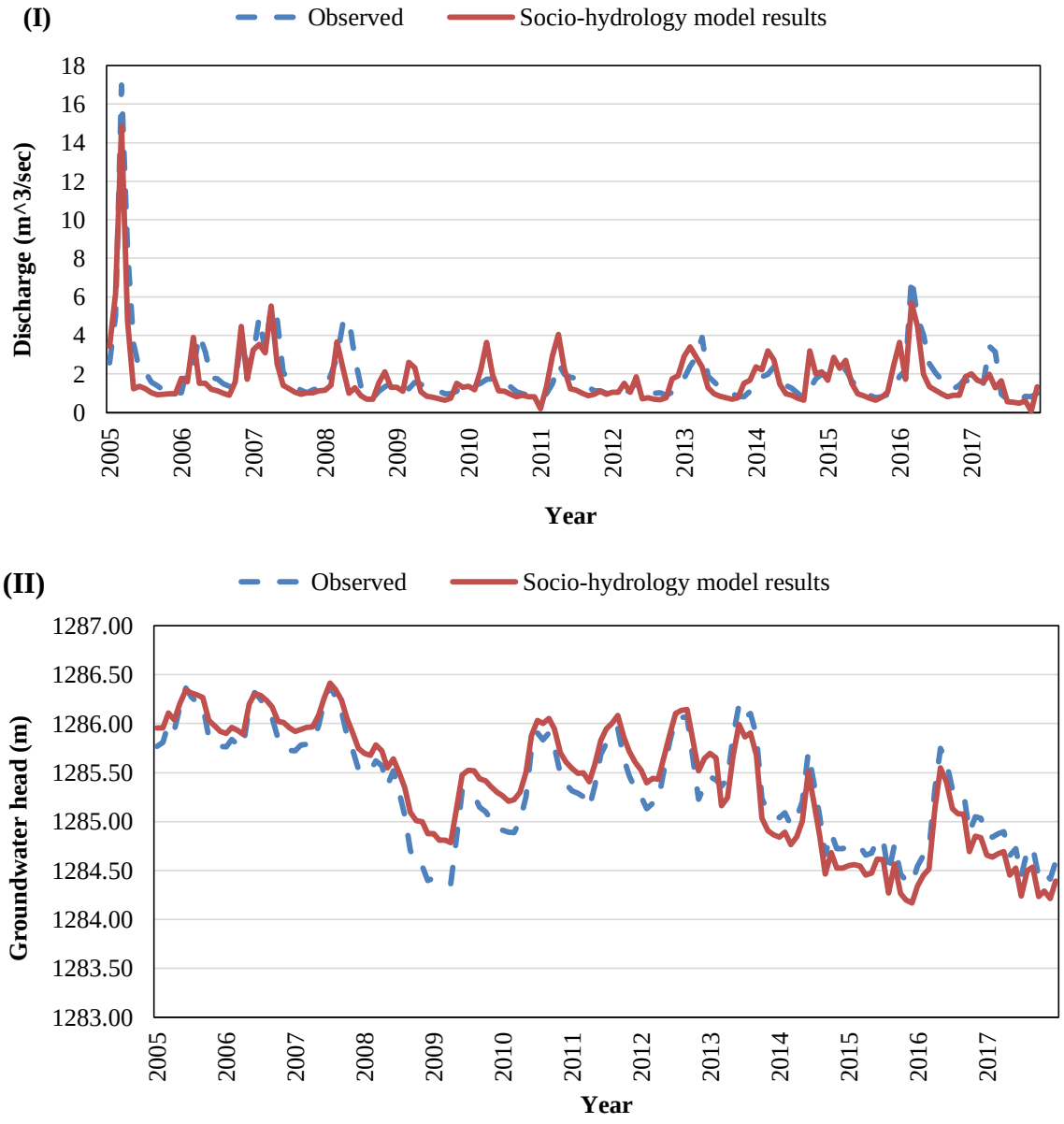


Fig. 12- (I) Discharge at the Gord-yaghoub hydrometric station and (II) The water profile of the Mahabad plain aquifer; observed vs the results of the proposed socio-hydrology model

شکل ۱۲- (I) سری زمانی دبی جریان در ایستگاه هیدرومتری گرد یعقوب (II) آبنمود آبخوان دشت مهاباد در دو حالت مقادیر مشاهداتی و نتایج مدل هیدرولوژیکی-اجتماعی پیشنهادی

Table 4- Results of the calibration of the proposed ABM-SWAT-MODFLOW model

جدول ۴- نتایج صحت‌سنجی مدل پیشنهادی ABM-SWAT-MODFLOW

Gord-yaghoub hydrometric station	Nash-Sutcliffe coefficient (NS)	0.61
	Coefficient of determination (R^2)	0.69
Groundwater head in Mahabad aquifer	Mean Absolute Residual Error (MAE)	1.16
	Root Mean Square Error (RMSE)	1.92

۴-۳- نتایج سناریوهای تغییر اقلیم

نتایج به دست آمده از اجرای مدل ACCESS-CM2 (Australia)، تحت ۲ سناریو اقلیمی خوش‌بینانه SSP1-2.6 و بدبینانه SSP5-8.5 در دوره آتی (۲۰۴۰–۲۰۱۸) برای متغیرهای اقلیمی بارش در (شکل ۱۳ (I)) و دما در (شکل ۱۳ (II) و شکل ۱۳ (III)) بر روی حوضه دشت مهاباد ارائه شده‌است. در این دوره هر دو سناریو برای ماه‌های ژانویه، مارس، آوریل، نوامبر، جولای، آگوست، سپتامبر، اکتبر و دسامبر کاهش بارش و برای ماه‌های فوریه، می، ژوئن و نوامبر افزایش بارش را پیش‌بینی کرده‌اند. در مقایسه میانگین بارش سالانه برای دو سناریو در دوره مورد نظر نسبت به دوره پایه مقدار میانگین بارش سالانه دارای یک مقدار کاهشی بوده است.

به‌طوری‌که مقدار میانگین بارش سالانه برای دوره پایه ۲۹۶/۵۹ میلیمتر می‌باشد، این در حالی است که مقدار میانگین بارش سالانه برای سناریو SSP1-2.6، ۲۸۳/۴۵ میلی متر و برای سناریو-SSP5 8.5، ۲۴۹/۴۹ میلی‌متر بدست آمده است. در این دوره مقدار میانگین دمای حداکثر ماه‌های مختلف در هر دو سناریو نسبت به دوره پایه افزایش پیدا کرده است، به‌طوری‌که در این دوره میانگین دمای حداکثر سالانه ۱۷/۶۰ درجه سلسیوس در دوره پایه می‌باشد، دمای حداکثر سالانه تحت سناریوهای سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به ترتیب ۲۱/۱۰ و ۲۱/۲۱ درجه سلسیوس بدست آمده است. همچنین، در این دوره مقدار میانگین دمای حداقل ماه‌های مختلف در هر دو سناریو نسبت به دوره پایه افزایش پیدا کرده است، به‌طوری‌که در این دوره میانگین دمای حداقل سالانه ۷/۸۴ درجه سلسیوس در دوره پایه و تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به ترتیب ۸/۷۸ و ۸/۸۰ درجه سلسیوس بدست آمد.

در ادامه، داده‌های به دست آمده برای بارش و دما تحت دو سناریو مذکور به مدل هیدرولوژیکی- اجتماعی پیشنهادی اعمال شد. لازم به ذکر است که در این مطالعه، سال‌های (۲۰۱۷–۲۰۰۵) به‌عنوان دوره پایه و سال‌های ۲۰۴۰–۲۰۱۸ بعنوان دوره آتی درنظر گرفته شد. در شکل ۱۴ شرایط اقلیمی محدوده مطالعاتی در دوره پایه و آتی طبق رابطه (۵) نشان داده شده است. همانطوری که در بخش روش تحلیل عنوان شد، هر چه مقدار RDI بـه سمت اعداد منفی میل کند، وضعیت اقلیمی منطقه به سمت خشکسالی حرکت کرده و در غیر ایـن صورت وضعیت منطقه در شرایط نرمال و ترسالی قرار خـواهـد گـرفت. همانطوری کـه از شکل ۱۴ مشخص است، بـرای دوره آینده ۲۰۴۰–۲۰۱۸ تحت هر دو سناریو، اقلیم محدوده مطالعاتی به سمت خشکسالی و کاهش میزان موجدیت آب در دسترس برای کشاورزان میل خواهد کرد. در این دوره مقدار شاخص RDI در هر دو سناریو نسبت به دوره پایه افزایش پیدا کرده است، به‌طوری‌که میانگین، حداکثر و حداقل مقدار شاخص RDI به ترتیب صفر، ۰/۵۰ و ۰/۴۸- در دوره پایه و تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به ترتیـب ۰/۲۲-، ۰/۴۲ و ۰/۸۰- و ۰/۲۷-، ۰/۴۱ و ۱/۴۰- بدست آمده است.

شایان ذکر است در این مطالعه، فرض بر این است که وضع موجود بدون تغییر اساسی در سیاست‌های مدیریتی بوده و هزینه تولید محصولات کشاورزی، قیمت خرید تضمینی، قیمت آب و مقادیر آستانه فقر برای دوره آتی ۲۰۴۰–۲۰۱۸ تکرار روند سال‌های گذشته است. در جدول ۵، میزان سطح زیر کشت هر یک از محصولات در دوره پایه و درصد تغییرات سطح زیر کشت برای دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 در انتهای دوره آتی ۲۰۴۰–۲۰۱۸ نشان داده است. تغییرات سطح زیر کشت محصولات زراعی در اثر تغییر اقلیم در دو سناریو مذکور نشان می‌دهد که بیشترین میزان تغییرات سطح زیر کشت مربوط به سناریو SSP5-8.5 است، چراکه در این سناریو تغییر اقلیم بیشتر از سناریو SSP1-2.6 است.

همچنین، بر اساس نتایج به دست آمده، در محدوده مطالعاتی چغندرقند با کاهش ۴۳/۶۴ درصد و ۵۸/۱۱ درصد به ترتیب در سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 بیشترین کاهش سطح زیر کشت را نسبت به دو محصول دیگر داشته است، همچنین، سطح زیر کشت گندم در هر دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به ترتیب ۳۲/۰۸ و ۵۳/۶۴ درصد کاهش یافته، در مقابل سطح زیر کشت یونجه در هر دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به ترتیب ۳۳/۵۴ و ۵۱/۵۵ افزایش یافته است.

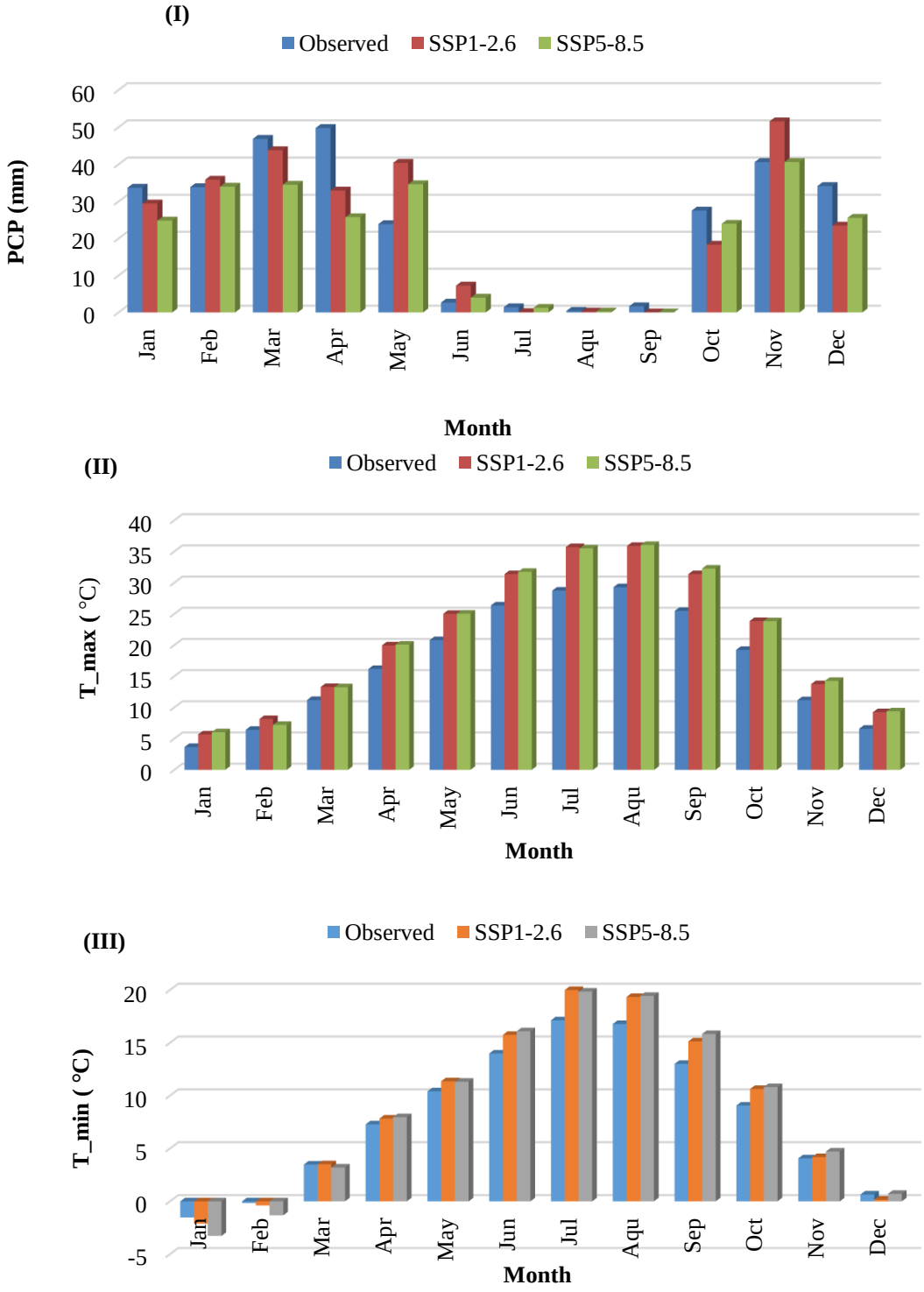


Fig. 13- (I) Variation of average monthly precipitation (II) Variation of average monthly maximum temperature and (III) Variation of average monthly minimum temperature under different scenarios and the base period

شکل ۱۳- (I) تغییرات میانگین بارش ماهانه تحت سناریوهای مختلف و دوره پایه (II) تغییرات میانگین حداکثر دمای ماهانه تحت سنار یوهای مختلف و دوره پایه (III) تغییرات میانگین حداقل دمای ماهانه تحت سناریوهای مختلف و دوره پایه

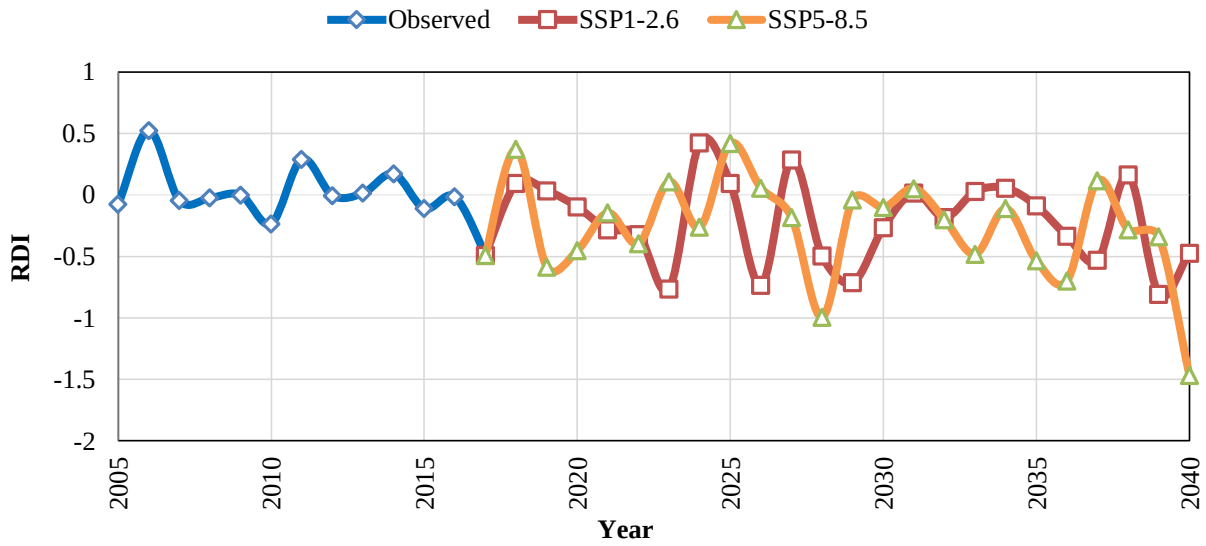


Fig. 14- Value of RDI index in different scenarios and the base period

شکل ۱۴- مقدار شاخص RDI در سناریوهای مختلف و دوره پایه

Table 5- Changes in cropping area under climate changes scenarios (%)

جدول ۵- درصد تغییرات سطح زیرکشت در اثر سناریوهای تغییر اقلیم

	Cropping area (ha)	Percentage of variation in cropping area under climate change scenarios at the end of the 2018-2040 period	
CROP	Basic period	SSP1-2.6	SSP5-8.5
ALFA	4308	33.54	51.55
SGBT	1313	-43.64	-58.11
WWHT	2718	-32.08	-53.64
APPLE	4521	0	0

لازم به ذکر است که امکان تغییر نوع کشت برای باغداران سیب در مدل پیشنهادی درنظر گرفته نشده است. در ادامه این مطالعه، بمنظور بررسی علت نحوه تغییرات سطح زیر کشت تحت سناریوهای تغییر اقلیم، تغییرات عملکرد محصول تحت هر دو سناریو مذکور در جدول ۶ ارائه شده است.

Table 6- Changes in crop yield under climate changes scenarios

جدول ۶- درصد تغییرات عملکرد محصولات در اثر سناریوهای تغییر اقلیم

	Crop yield (ton/ha)	in yield Variation	
CROP	Basic period	SSP1-2.6	SSP5-8.5
ALFA	8.33	-4.26	-6.78
APPLE	47.68	-2.16	-5.26
SGBT	3.27	-18.48	-19.84
WWHT	18.72	-8.11	-14.86

همانطوری که نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، در اثر تغییر اقلیم آینده عملکرد محصولات روند کاهشی نسبت به دوره پایه خواهند داشت. بر اساس نتایج جدول ۶ بیشترین کاهش عملکرد محصول مربوط به چغندرقند و گندم در هر دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 است. همچنین، عملکرد یونجه و سیب نسبت به دو محصول دیگر کاهش کمتری داشته است که نشان دهنده مناسب بودن شرایط اقلیم مانند میانگین دما و طول فصل رشد دو محصول مذکور است. با توجه به نتایج جدول ۶، به دلیل اینکه عملکرد محصول تأثیر مستقیمی بر درآمد کشاورزان دارد و بر اساس الگوی رفتاری که برای کشاورزان در بخش ۳-۲-۳، توضیح داده شد، با کاهش درآمد کشاورزان و قرار گرفتن در زیر خط فقر، تمایل آن‌ها به سمت کشت پر سود در منطقه اعم از یونجه که دو چینه بوده و سود مناسب برای کشاورزان دارد، افزایش می‌یابد. لذا سطح زیر کشت محصول یونجه در انتهای دوره آینده ۲۰۴۰-۲۰۱۸ افزایش یافته است. بطورکلی می‌توان گفت، اثرات تغییر

اقلیم آینده بر خصوصیات رشد و نمو گیاهان، برآیند دو عامل افزایش دما و کاهش بارندگی خواهد بود. از این‌رو با تغییر اقلیم و گرم شدن هوا در آینده می‌توان به عنوان یک خطر جدی برای کاهش عملکرد و درآمد کشاورزان نام برد، که طبعا منجر به کاهش انگیزه آن‌ها در کشاورزی می‌گردد. در ادامه نتایج تغییر اقلیم و تأثیرات تغییرات سطح زیر کشت در دوره آتی بر روی منابع آب سطحی و زیرزمینی تحت دو سناریو مذکور بررسی شده است. شکل ۱۵ متوسط حجم کل آب مورد نیاز برای آبیاری محصولات نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در طی دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۸) در اثر تغییرات سطح زیر کشت ناشی از تغییر اقلیم، حجم کل آب مورد نیاز برای آبیاری از ۱۶۴/۱۰ میلیون مترمکعب در سال به ۱۷۰/۷۵ و ۱۷۴/۲۶ میلیون مترمکعب در سال به ترتیب در سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 افزایش خواهد یافت، که دلیل این افزایش حجم آبیاری، افزایش سطح زیر کشت یونجه است که نیاز آبی بسیار بالایی دارد.

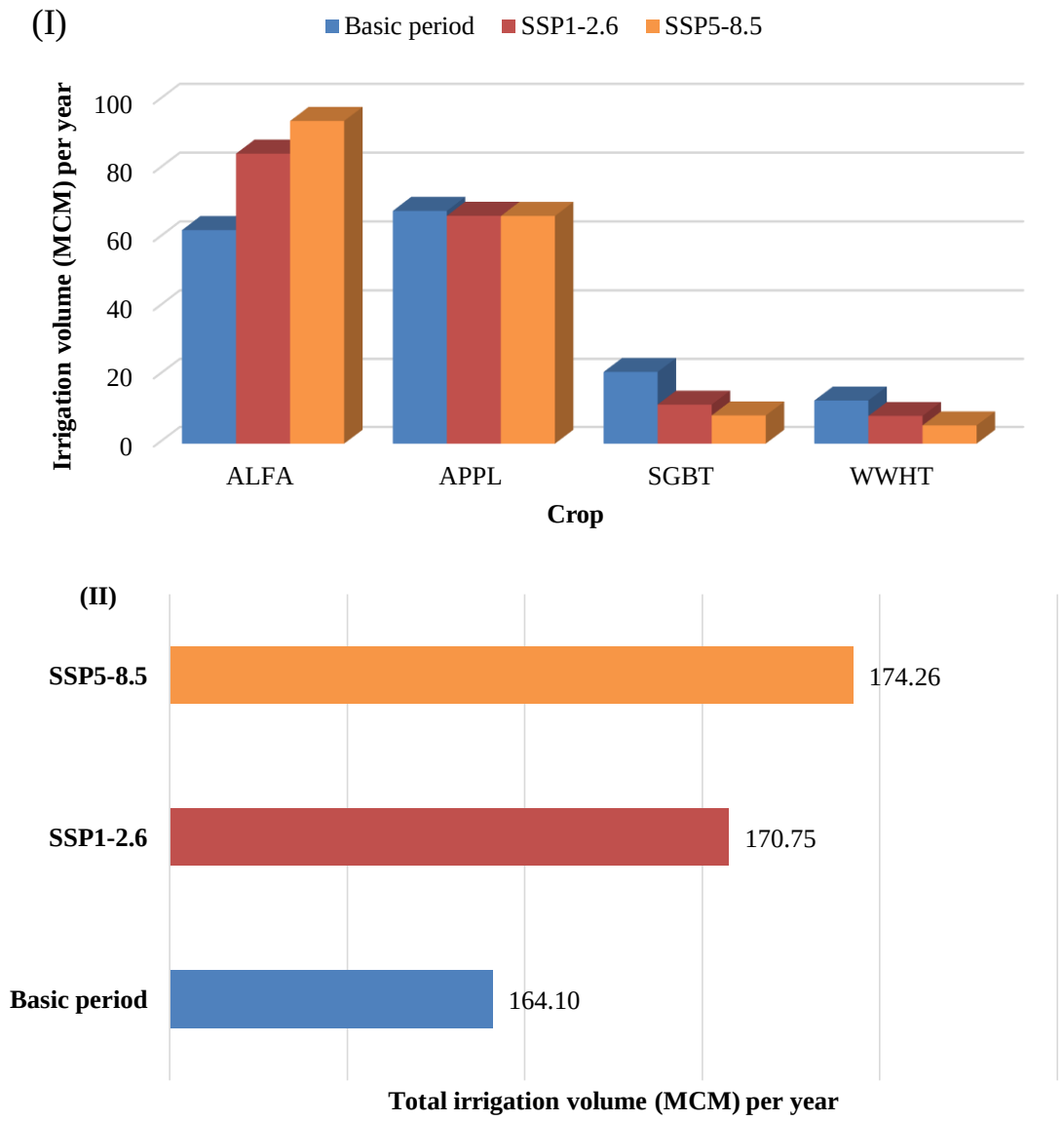


Fig. 15- (I) The irrigation volume of crops (MCM) per year and (II) Total irrigation volume (MCM) in the basic period and climate changes scenarios

شکل ۱۵- (I) حجم آبیاری محصولات زراعی (II) حجم کل آبیاری در دوره پایه و سناریوهای تغییر اقلیم

همچنین در شکل ۱۶ (I) و ۱۶ (II) به ترتیب میانگین دبی ماهانه در ایستگاه هیدرومتری گردیعقوب و میانگین سالانه ورودی به دریاچه ارومیه تحت دو سناریو تغییر اقلیم مذکور و دوره پایه گزارش شده است.

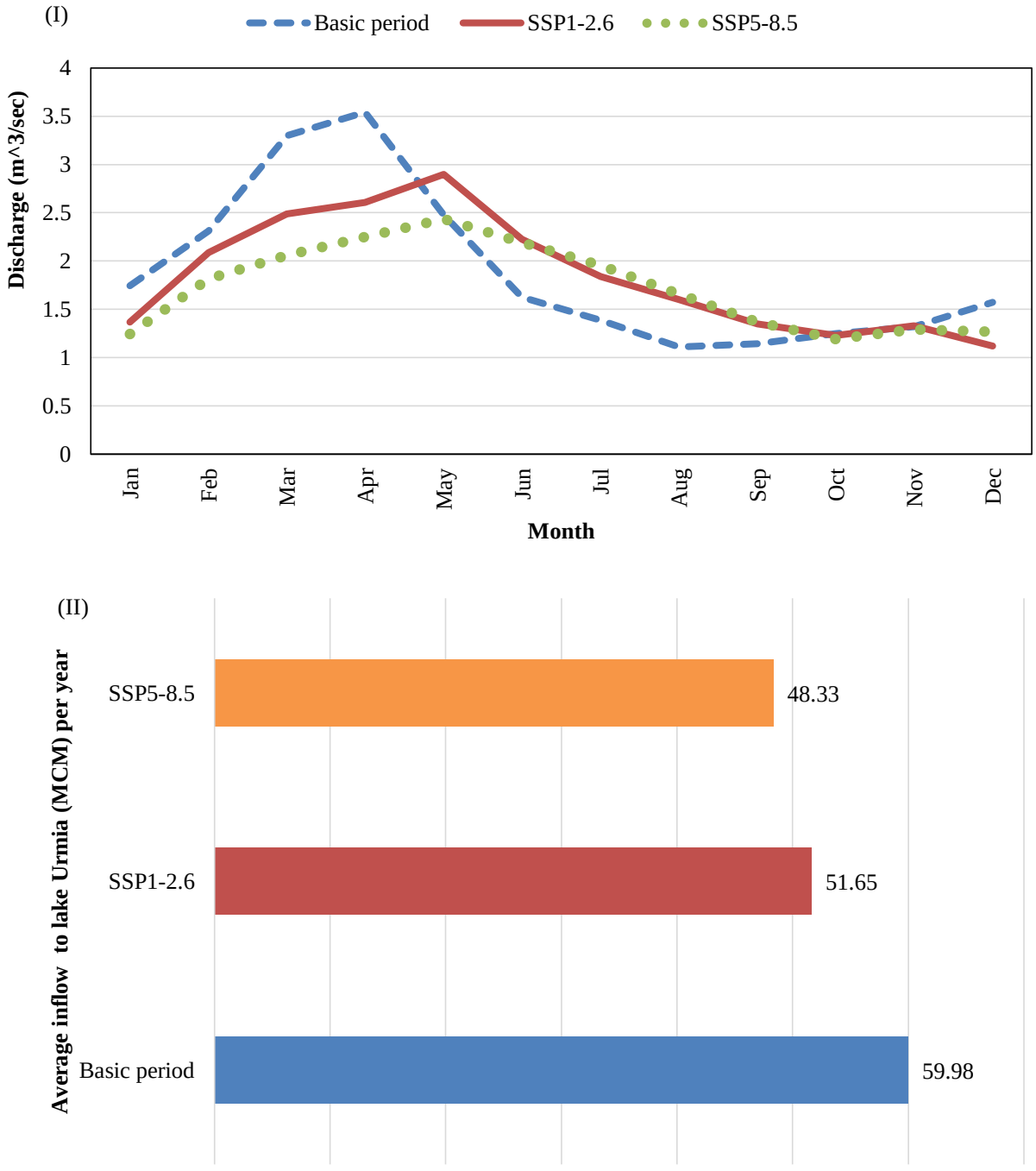


Fig. 16- (I) Average monthly discharge at the Gord-yaghoub hydrometric station, (II) Average yearly inflow to lake Urmia (MCM), in the base period and under the climate changes scenarios

شکل ۱۶- (I) میانگین دبی ماهانه در ایستگاه هیدرومتری گردیعقوب، (II) میانگین سالانه ورودی به دریاچه ارومیه (MCM)، در سناریوهای دوره پایه و تغییرات اقلیمی

بر اساس نتایج حاصله با وقوع تغییر اقلیم، در صورت ادامه سیاست‌های مدیریتی و عدم ایجاد تغییر اساسی در آن‌ها متوسط دبی ماهانه در ایستگاه هیدرومتری گردیقوب (ورودی دریاچه ارومیه از زیر حوضه مهاباد) در طی دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۸) تحت هر دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 روند کاهشی داشته است. به‌طوری‌که طبق شکل ۱۶ (II)، متوسط دبی سالانه در این ایستگاه گردیقوب که ورودی دریاچه ارومیه از زیر حوضه مهاباد است، از ۵۹/۹۸ میلیون مترمکعب در دوره پایه به ۵۱/۶۵ میلیون مترمکعب تحت سناریو SSP1-2.6 و به ۴۸/۳۳ میلیون مترمکعب تحت سناریو SSP5-8.5 کاهش یافته است. همچنین، متوسط تراز ماهانه و سالانه آب در آبخوان مهاباد نیز در دوره مذکور تحت دو سناریو SSP1-2.6، SSP5-8.5 و دوره پایه در شکل ۱۷ (I) و ۱۷ (II) به ترتیب نشان داده شده است.

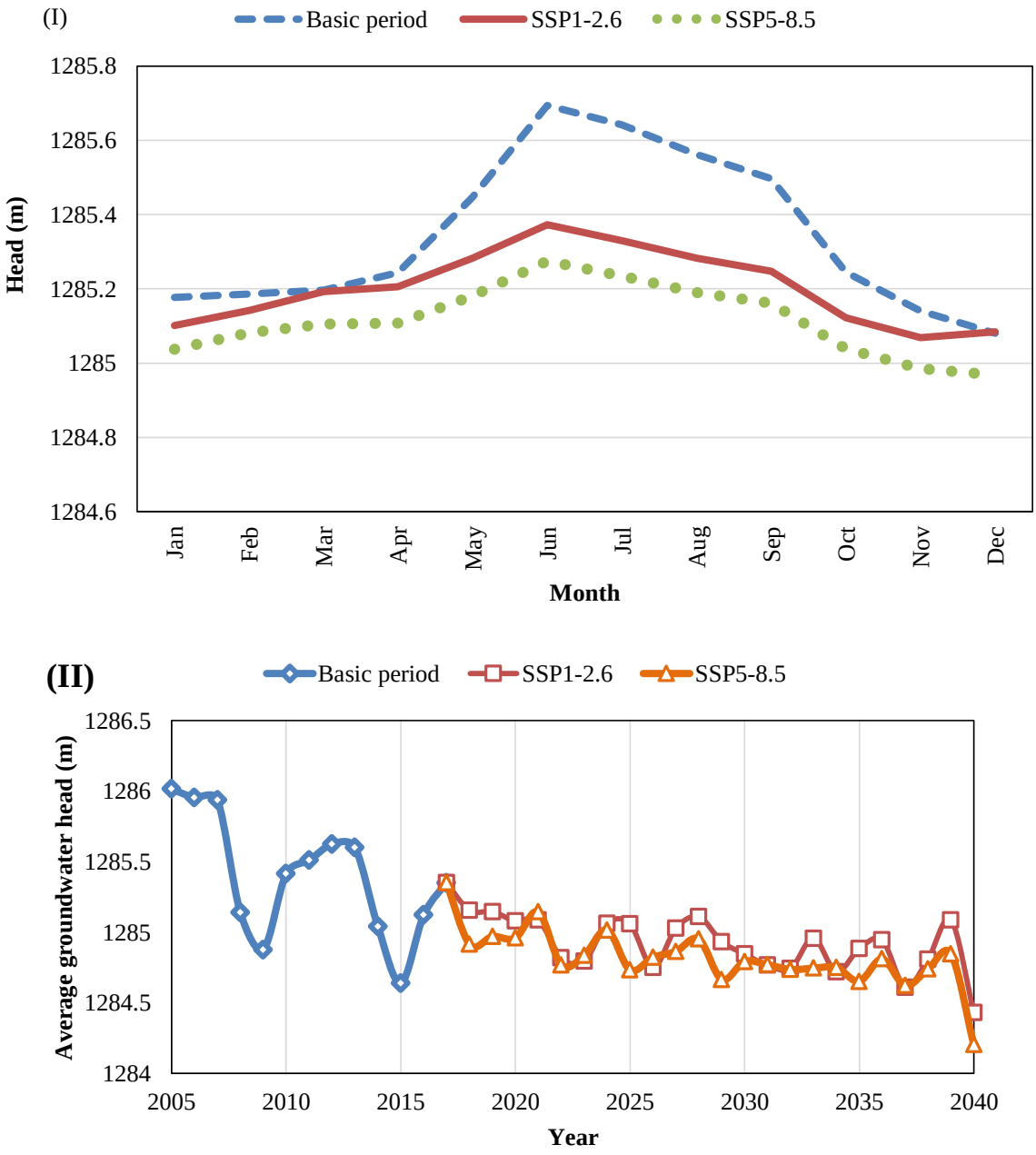


Fig. 17- (I) Average monthly groundwater head and (II) Average yearly groundwater head at the Mahabad aquifer in the base period and under the climate changes scenarios

شکل ۱۷- (I) میانگین ماهانه تراز آب و (II) میانگین سالانه تراز آب در آبخوان مهاباد در دوره پایه و سناریوهای تغییر اقلیم

همانطوری که نتایج نشان داد، تراز آبخوان مهاباد تحت هر دو سناریو تغییر اقلیم روند کاهشی داشته است. به‌طوری‌که متوسط تراز سالانه آب در آبخوان مهاباد تحت سناریو SSP1-2.6 و سناریو SSP5-8.5 به ترتیب ۱۲۸۵/۲۰ و ۱۲۸۴/ ۱۱ متر و در دوره پایه ۱۲۸۵/۳۵ متر به دست آمد. در مجموع با توجه به نتایجی که از مدل هیدرولوژیکی- اجتماعی توسعه داده شده تحت سناریوهای تغییر اقلیم بدست آمد میتوان گفت، هرچه به سمت سال‌های آینده پیش می‌رویم، ضمن اینکه اثرات تغییر اقلیم تشدید شده و موجب کاهش بارش و افزایش دما می‌شود، ممکن است با تأثیری که تغییر اقلیم بر روی عملکرد محصولات کشاورزی می‌گذارد، معیشت کشاورزان با خطر جدی مواجه شده و منجر به تغییر نوع کشت، و همچنین کاهش چندین برابری منابع آب سطحی و زیر زمینی شود. لذا به‌منظور سازگاری و جلوگیری از تبعات منفی ناشی اثر تغییر اقلیم بر منطقه باید با اتخاذ استراتژی‌های مؤثرتر و پایدارتر از آثار سوء تغییر اقلیم بر منطقه کاست، تا به حفظ هر چه بهتر این منابع آب منجر شود.

نکته مهمی که باید اشاره شود، همانطوری که در بخش ۳-۲-۳ توضیح داده شد، در این مطالعه فرض بر آن است که، آن گروه از کشاورزانی که درآمد مناسبی دارند، در صورتیکه شاهد خشکسالی باشند، اگر تمایل بالایی برای صرفه‌جویی در مصرف آب داشته باشند، در عین حال که کشت خود را به کشت کم آبر تبدیل می‌کنند، شیوه آبیاری خود را نیز از آبیاری سنتی به آبیاری قطره‌ای تبدیل می‌کنند. طبق نتایج به دست آمده از پرسشنامه‌ها از بین ۱۰۳ کشاورزی که پرسشنامه از آن‌ها تهیه شده بود، تنها ۱۵ کشاورز امتیاز بالای (Score (MNWC))، ۰/۵ به دست آوردند، که نشان‌دهنده عدم آگاهی و تمایل بسیار پایین کشاورزان محدوده مطالعاتی نسبت به وضعیت منابع آبی است. به همین دلیل در شرایط کنونی و با ادامه وضع موجود در آینده از ۸۸ HRU که در مدل SWAT به‌عنوان نماینده کشاورزانی که نوع کشت یکسان، مالکیت زمین یکسان و موقعیت مکانی یکسان داشتند، تنها ۷ HRU که همگی مربوط به کشاورزان باغداران سیب مهاباد بودند، در دوره مطالعاتی ۲۰۴۰-۲۰۱۸ در گروه عامل‌هایی قرار گرفتند که نوع شیوه آبیاری خود را از سنتی به قطره‌ای تبدیل کردند. لذا این تعداد تغییر شیوه آبیاری در مدل SWAT، تأثیر چشمگیری در وضعیت منابع آب نشان نداشت. از این‌رو در تحقیقات آتی، سعی خواهد شد با تعریف سناریوهای مختلف اعم از افزایش قیمت خرید محصول از کشاورزان و همچنین با توسعه طرح‌های آموزشی در جهت افزایش آگاهی و بهبود پارامترهای روانی- اجتماعی تاثیر گذار بر تصمیمات کشاورزان در این محدوده، تخمین زد که چگونه ایجاد تغییرات در عوامل اقتصادی و روانی برای کشاورزان، بر کاهش آثار سوء تغییر اقلیم و بر احیای دریاچه ارومیه اثر می‌گذارد. بطورکلی، نتایج این مطالعه می‌تواند برای سیاست‌گذاری در آینده با هدف احیای دریاچه ارومیه با درنظر گرفتن شرایط کشاورزان و فرآیندهای تصمیم‌گیری آنها مؤثر باشد.

۵- جمع‌بندی

تحقیق حاضر تلاشی است در جهت توسعه مدلی پکپارچه به منظور ارزیابی رفتار مصرف آب کشاورزان و درک نقش انسان در تعامل با سیستم‌های آبی پیچیده برای حل مسائل مدیریت منابع آب در سطح حوضه آبریز. بدین منظور در این مطالعه ابتدا مدل هیدرولوژیکی دشت مهاباد با تلفیق مدل آب سطحی (SWAT) و آب زیرزمینی (MODFLOW) شبیه‌سازی شد. در گام دوم، با استفاده از پرسشنامه‌هایی که از کشاورزانِ دشت مهاباد تهیه شده بود، و همچنین با استفاده از مدل عامل بنیان و تئوری ارزش- عقیده- هنجارِ استرن مدلی بمنظور شبیه‌سازی رفتار مصرفی کشاورزان توسعه داده شد. در نهایت با یکپارچه‌سازی مدل هیدرولوژیکی محدوده مطالعاتی (SWAT-MODFLW) و مدل عامل بنیان، چارچوب جدیدی بمنظور تحلیل عوامل روانی تأثیرگذار بر کشاورز در کنار سایر عوامل از جمله عوامل زیست‌محیطی و اقتصادی ارائه شد. در این پژوهش، بر اساس پرسشنامه‌های تهیه شده از کشاورزان منطقه، عوامل مهم و اثرگذار در تمایل کشاورزان به صرفه‌جویی در بهره‌برداری از منابع آبی تعیین شدند. سپس برای ساخت چارچوب مدل عامل بنیان مبتنی بر تئوری VBN، کشاورزان بر اساس موقعیت مکانی، نوع کشت و سطح مالکیت اراضی کشاورزی دسته‌بندی شدند و پارامترهای VBN برای هر دسته به صورت مجزا، تعیین شد. مجداً برای دسته‌بندی عامل‌های کشاورزی به کارگرفته شده قوانین رفتاری اختصاصی تعریف شد، تا در برابر تغییرات عوامل محیطی واکنش‌های متفاوت داشته باشند. در ادامه به‌منظور بررسی عملکرد چارچوب SWAT-MODFLOW-ABM ارائه شده، مقادیر شبیه‌سازی شده دبی رودخانه مهاباد با مقادیر مشاهداتی به دست آمده از ایستگاه آب‌سنجی گرد یعقوب بر اساس ضریب نش- ساتکلیف (NS) و ضریب تعیین (R^2) و سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده با استفاده از میانگین خطای مطلق باقیمانده (MAE) و ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) ارزیابی شدند. مقادیر به دست آمده برای NS=0.61، R^2=0.69 و MAE=1.16، RMSE=1.92 بیانگر عملکرد قوی چارچوب هیدرولوژی اجتماعی در شبیه‌سازی رفتارهای کلی کشاورزان مهاباد اعم از انتخاب نوع کشت و شیوه آبیاری را شبیه‌سازی است.

در گام آخر این مطالعه، با استفاده از داده‌های تغییر اقلیم گزارش ششم IPCC و تعریف دو سناریو خوشبینانه SSP1-2.6 و SSP5-8.5 از مدل ACCESS-CM2 پاسخ مدل هیدرولوژی اجتماعی توسعه داده شده در آینده تحلیل و بررسی شد. خروجی‌های مدل شبیه‌ساز بیانگر این بودند که، عده زیادی از کشاورزان حوضه، خصوصا آن دسته که زمین‌های کوچکی دارند، زیر خط فقر زندگی می‌کنند. به همین دلیل آن دسته از کشاورزان با انتخاب محصولات پرسود برای زراعت، سعی در بهبود بخشیدن به وضعیت نامطلوب اقتصادی و یا معیشتی خود دارند. لذا در صورت ادامه وضعیت موجود در منطقه و بدون ایجاد تغییر اساسی در سیاست‌های مدیریتی در آینده تأثیر تغییر اقلیم تشدید شده و علاوه بر کاهش بارش و افزایش دما، ممکن است با تأثیری که تغییر اقلیم بر روی عملکرد محصولات کشاورزی می‌گذارد معیشت کشاورزان را با خطر جدی مواجه کرده و منجر به تغییر الگوی کشت و کاهش چندین برابری منابع آب سطحی و زیرزمینی شود، از این‌رو تغییر سیاست‌های مدیریتی به عنوان راهکارهای مقابله با اثرات تغییر اقلیم توصیه می‌شود. علاوه بر این، توسعه این‌گونه مدل‌ها می‌تواند با ایجاد فهم بهتر در ذینفعان در سطوح مختلف منفرد، گروهی و نهادی، ضمن جلب مشارکت مؤثر، در روند آموزش ذینفعان تأثیر قابل توجهی داشته و تغییر الگوی رفتاری مورد نیاز جهت بهبود عملکرد سیستم را پدید آورد.

پی‌نوشت‌ها

1- Agent
2- Agent-Based Model
3- Apple
4- Winter wheat
5- Alfalfa
6- Sugar beet
7- Warm-up
8- Value-Belief-Norm
9- Value-Belief-Norm Theory
10- Intergovernmental Panel on Climate Change
11- Root Mean Square Error
12- Mean Absolute Error

۶- مراجع

Abbaspour K C, Yang J, Maximov I, et al. (2007) Modelling hydrology and water quality in the Pre-Alpine/Alpine Thur Watershed using SWAT. Journal of Hydrology 333(2–4):413–430

Aghaie V, Alizadeh H, and Afshar A (2020) Emergence of social norms in the cap-and-trade policy: An agent-based groundwater market. Journal of Hydrology 588:125057

Akhbari M and Grigg NS (2013) A framework for an agent-based model to manage water resources conflicts. Water Resources Management 27(11):4039-4052

Akhbari M and Grigg NS (2015) Managing water resources conflicts: modelling behavior in a decision tool. Water Resources Management 29(14): 5201-5216

Anbari MJ and Zarghami M (2019) An Agent-based model to improve groundwater resources conditions with a participatory approach in the Shabestar-Sofian Plain. Iran-Water Resources Research15(2):73-87(In Persian)

Bailey R T, Wible T C, Arabi M, et al. (2016) Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater–surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW Model. Hydrological Processes 30(23): 4420–33

Delavar M, Morid S, Morid R, Farokhnia A, Babaeian F, and Srinivasan Rand Karimi P (2020) Basin-wide water accounting based on modified SWAT model and WA+ framework for better policy making. Journal of Hydrology 585:124762

Du E, Cai X, Brozovic N and Minsker B (2017) Evaluating the impacts of farmers' behaviors on a hypothetical agricultural water market based on double auction. Water Resources Research 53(5):4053-4072

Elshafei Y, Sivapalan M, Tonts M, and Hipsey MR (2014) A prototype framework for models of socio-hydrology: Identification of key feedback loops and parameterisation approach. Hydrology and Earth System Sciences 18(6):2141-2166

Farhadi S, Nikoo MR, Rakhshandehroo GR, Akhbari M, and Alizadeh MR (2016) An agent-based-Nash modeling framework for sustainable groundwater management: A case study. Agricultural Water Management 177:348-358

Garling T, Fujii S, Gärling A, and Jakobsson C (2003) Moderating effects of social value orientation on determinants of pro-environmental behavior intention. Journal of environmental psychology 23(1):1-9

Kuil L, Carr G, Prskawetz A, Salinas JL, Viglione A, and Bloschl G (2019) Learning from the Ancient Maya: Exploring the impact of drought on population dynamics. Ecological Economics 157:1-16

Neisi M, Bijani M, Abbasi E, Mahmoudi H, and Azadi H (2020) Analyzing farmers' drought risk management behavior: Evidence from Iran. Journal of Hydrology 590:125243

O'Keeffe J, Moulds S, Bergin E, Brozovic N, Mijic A, and Buytaert W (2018) Including farmer irrigation behavior in a socio-hydrological modeling framework with application in North India. Water Resources Research 54(7):4849-4866

Pouladi P, Afshar A, Afshar MH, Molajou A, and Farahmand H (2019) Agent-based socio-hydrological modeling for restoration of Urmia Lake: Application of theory of planned behavior. Journal of Hydrology 576:736-748

Stern PC, Dietz T, Abel T, Guagnano GA, and Kalof L (1999) A value-belief-norm theory of support for social movements: The case of environmentalism. Human Ecology Review 6(2):81-97

Tsakiris, G, Pangalou D, and Vangelis H (2007) Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). Water Resources Management 21(5):821-833

Urmia Lake Restoration Program (ULRP) (2017) Challenges of Urmia Lake and Restoration Program International Cooperation Division. International Cooperation Division, Tehran, Iran

Valizadeh N, Karimi H, and Hayati D (2019) Determinants of moral norms and ascription of responsibility towards water conservation: The case of Mahabad and Miandoab counties. Iranian Agricultural Extension and Education Journal 15(1):175-188 (In Persian)

Water Consulting Engineers and Sustainable Development (2010) Update studies of water resources balance study areas of Urmia Lake catchment area. Mahabad Study Area Water Balance Report 5th Volume (In Persian)

West-Azerbaijan Regional Water Company (2010) Updated studies of water resources balance of Urmia

Lake Basin. Mahabad Plain Water Balance Report, 5th Volume (In Persian)

Wright S (1960) The treatment of reciprocal interaction with or without lag in path analysis. Biometrics 6(3):423-445