Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Participatory system dynamics modeling for groundwater resources management (Case study: Marand Plain, Iran)

Amir Isanezhad[1], Shapour Zarifian [2]*, Hossein Raheli [3], Saeed Pourmasoumi Langarudi [4]

[1] Ph.D. , Department of Extension and Rural Development, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[2] Associate Professor, Department of Extension and Rural Development, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[3] Professor, Department of Extension and Rural Development, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[4] Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Social Science, University of Bergen, Bergen, Norway

Abstract

Introduction

The capacity of groundwater systems to offer various services depends on their geographically varying properties and is dynamically influenced by ongoing natural and human processes. Because groundwater is often perceived as a private resource (closely connected to land ownership, and in some jurisdictions treated as privately owned), regulation and top–down governance and management are difficult. Governments need to fully assume their role as resource custodians given the common-good aspects of groundwater. The participatory modeling approach included several stakeholder groups from groundwater users, policymakers, environmental groups, and other organizations involved in groundwater management. The scarcity of water resources and ever-increasing demand for these vital resources require identification, quantification, and management of groundwater in a way that prevents overexploitation and consequent economic and environmental damage while satisfying the demand for water from competing sectors. Participatory groundwater management is envisaged to take a significant step in groundwater management at the grassroots level to enable the community and stakeholders to monitor and manage the groundwater as a common pool resource themselves.

Materials and Methods

Marand Plain located in East Azarbaijan province, Iran. There are 502 agricultural wells in the Marand Plain, which are used by 16,000 farmers for agriculture. The total volume of consumed water is 226.82 mm^3 and 191.66 mm^3 of it is supplied from underground water sources. The participatory system dynamics modeling process includes five main steps: 1- Identifying the problem through participatory workshops: it aims at collectively defining the problem to be solved and the objectives of the model. 2- Formulating a dynamic hypothesis to explain the causes of the problem, leads to the development of a conceptual model or causal loop diagram. 3- Formulation of a system dynamics quantitative simulation model. This step includes the development of decision rules, the quantification of variables, building the stock and flow diagram, and model calibration using parameters to define initial conditions. 4- Ensuring the model is appropriate for the task through model validation. 5- Formulation of potential strategies and the evaluation of the simulated results. It requires the identification of scenarios, i.e., alternative strategies, and the analysis and discussion of the simulated results generated by the model for each scenario over time.

Results and Discussion

The problem statement was created in a qualitative way using the focus group discussion (FGD) method. The key variables of the system (61 variables), the system boundary (including the internal and external variables of closed loops), and the modeling period (20 years) were defined. For formulating the dynamic hypothesis, 9 CLDs were obtained. In the third step, developing the simulation model, all mathematical relationships, behavioral functions, and differential equations were formulated in the form of a stock and flow diagram (SFD). In the fourth step, model reliability tests were conducted in three categories: structural test (including structure verification test and limit condition test), behavioral test (including reference behavior reconstruction test), and sensitivity analysis test. Also, the stakeholders' feedback test was conducted in a mixed method (quantitative-qualitative). In the policy design and analysis stage, the five general actions in the participatory management of

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

groundwater resources in the Marand Plain, including modifying the cultivation pattern, increasing the irrigation efficiency by implementing modern irrigation networks, decentralizing the water governance and management, creating public institutions for water management (rural production cooperatives), water supply from outside the basin (transfer from the Aras River), were obtained. These actions have the greatest effect on the Marand Plain aquifer reservoir deficit.

Conclusion

The results of our participatory system dynamics simulation show that the balance and restoration of the aquifer are mostly affected by the "reform of the decision-making structure in the governance of groundwater" in the form of institutionalization (empowered farmers association) and decentralization of water management. Other adopted policies will be effective only if these components are present. To get out of the vicious cycle of short-term and unstable policies and decisions in the field of groundwater, fundamental reforms should be made in the structure of governance and groundwater management, and fully equal opportunities should be provided for local communities to participate effectively in the decision-making process. Also, if the process of implementation of laws and decisions is done through the channel of associations of the local community, they will have more executive support. Improving the water use behavior of farmers is the consequence and output of changing the structure and processes of groundwater management and governance.

Keywords: Aquifer of Marand Plain, Groundwater management, Participatory modeling, System dynamics

Article Type: Research Article

Acknowledgment

This research has been done with the help of farmers of Marand county, experts and managers of the regional water company, agricultural jihad, and rural cooperative of East Azerbaijan and the governorate of Marand county. We would like to share our immense gratitude with them for their support and collaboration with our research.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement:

All data generated during the manuscript analysis are included in the article. Further datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Amir Isanezhad: Conceptualization, Software, Writing-original draft preparation; **Shapour Zarifian**: Resources, Supervision; **Hossein Raheli**: Formal analysis and investigation; **Saeed Pourmasoumi** Langarudi: Manuscript editing, methodology, Software.

*Corresponding Author, E-mail: zarifian@tabrizu.ac.ir

Citation: Isanezhad, A., Zarifian, Sh., Raheli, H., & Pourmasoumi Langarudi, S. (2024). Participatory system dynamics modeling for groundwater resources management (Case study: Marand Plain, Iran). *Water and Soil Management and Modeling*, *4*(1), 262-284.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12372.1232
DOR: ……..…

Received: 19 February 2023, Received in revised form: 07 March 2023, Accepted: 07 March 2023, Published online: 07 March 2023
Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 1, pp. 262-284

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili
© Author(s)

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۲۵٤٦

مدل‌سازی دینامیک سیستم مشارکتی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی (منطقهٔ مورد مطالعه: دشت مرند، ایران)

امیر عیسی‌نژاد[۱]، شاپور ظریفیان[۲*]، حسین راحلی[۳]، سعید پورمعصومی لنگرودی[۴]

[۱] دانش‌آموخته دکتری، گروه ترویج و توسعهٔ روستایی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
[۲] دانشیار، گروه ترویج و توسعهٔ روستایی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
[۳] استاد، گروه ترویج و توسعهٔ روستایی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
[۴] دانشیار، گروه جغرافیا، دانشکدهٔ علوم اجتماعی، دانشگاه برگن، برگن، نروژ

چکیده

مسائل مدیریتی منابع آب زیرزمینی از یک‌سو به‌دلیل پیچیدگی و عدم قطعیت ناشی از اثرات عناصر انسانی (شناختی، اجتماعی، فرهنگی، اقتصادی و سیاسی) و از سوی دیگر، به‌دلیل محدودیت در درک چگونگی تقابل و تعامل آن عناصر با سیستم‌های بیوفیزیکی، تبدیل به چالشی بسیار جدی شده است. لذا، شناسایی پیچیدگی‌های ساختاری، فرآیندی و رفتاری حاکم در مدیریت آب، مستلزم به‌کارگیری روش‌های متناسب برای حل این پیچیدگی‌هاست. در این مطالعه برای پاسخ به چگونگی استفاده از روش‌های مشارکتی برای گنجاندن عناصر انسانی پیچیده در مدیریت منابع آب زیرزمینی از روش سیستم دینامیکی استفاده شده است. این روش بر تعامل و مدل‌سازی ذینفعان متمرکز است و در نهایت به تصمیم‌گیری ختم می‌شود. تدوین مدل مشارکتی سیستم دینامیک در پنج گام انجام شد و در گام‌های بیان مسأله، تدوین فرضیهٔ پویا، طراحی و تحلیل سیاست از روش کیفی تبعیت کرد. بخش‌های تدوین و فرمول‌بندی مدل، آزمون مدل به روش کمی و در نهایت سناریوسازی و طراحی سیاست نیز به روش آمیخته (کمی-کیفی) انجام گرفت. گروه‌های مشارکت‌کننده در این پژوهش شامل سه گروه اصلی کارشناسان بخش دولتی (از چهار نهاد وزارت نیرو، وزارت جهاد کشاورزی، سازمان تعاون روستایی و وزارت کشور (فرمانداری) در سطح شهرستان مرند و استان آذربایجان شرقی، متخصصان بخش‌های غیردولتی فعال در بخش مدیریت آب و کشاورزی و نماینده‌های بهره‌برداران منابع آب زیرزمینی در دشت مرند بودند. برای تدوین حلقه‌های علت و معلولی، از تکنیک گروه‌های متمرکز کانونی استفاده شد. سیاست‌های مختلف در قالب شش سناریو مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت دو سناریو منجر به تعادل در منابع آب زیرزمینی و جبران کسری مخزن آبخوان دشت مرند شد. سناریوی مطلوب با ادغام سه راهبرد سیاستی اصلاح ساختار حکمرانی منابع آب زیرزمینی در دشت مرند، افزایش راندمان آبیاری از طریق اجرای شبکه‌های آبیاری مدرن و اصلاح الگوی کشت در سطح دشت مرند به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آبخوان دشت مرند، سیستم دینامیک، مدل‌سازی مشارکتی، مدیریت آب‌زیرزمینی

نوع مقاله: پژوهشی

[*] مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: zarifian@tabrizu.ac.ir

استناد: عیسی‌نژاد، امیر، ظریفیان، شاپور، راحلی، حسین، و پورمعصومی لنگرودی، سعید (۱۴۰۳). مدل‌سازی دینامیک سیستم مشارکتی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی (منطقهٔ مورد مطالعه: دشت مرند، ایران). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۱)، ۲۶۲-۲۸۴.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12372.1232
DOR: .....

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶
مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۱، صفحه ۲۶۲ تا ۲۸۴
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

۱- مقدمه

ویژگی‌های ذاتی آب‌های زیرزمینی و گستردگی دسترسی به آن در دوره‌های بدون بارندگی، آن را به یک منبع مطمئن آب تبدیل کرده است (WWAP, 2019) و از سوی دیگر هزینه‌های بهره‌برداری مقرون به‌صرفه از آب زیرزمینی دسترسی به آن را نسبتاً آسان و ارزان می‌کند (Cuadrado-Quesada, 2022). آب‌های زیرزمینی تقریباً ۹۹ درصد از کل آب شیرین روی زمین را تشکیل می‌دهند و این پتانسیل را دارند که مزایا و فرصت‌های اجتماعی، اقتصادی و محیط زیستی فوق‌العاده‌ای را برای جوامع فراهم کنند (UN Water, 2022). موضوع آب یکی از چالش‌های اصلی بسیاری از جوامع مدرن امروزی است و در گزارش مجمع جهانی اقتصاد نیز، بحران آب به‌عنوان یکی از خطرات اصلی پیش روی بشریت معرفی شد (World Economic Forum, 2020). افزایش استفاده از آب‌های زیرزمینی در کشاورزی منجر به افزایش نرخ تخلیه در سفره‌های زیرزمینی اصلی و مناطق نیمه‌خشک شده است (UNEP, 2019; UN Environment, 2019). نرخ پمپاژی که برای سال‌های متمادی از تغذیهٔ طبیعی طولانی‌مدت فراتر رفته است، منجر به بهره‌برداری بیش از حد برخی از سفره‌های زیرزمینی شده است (Famiglietti, 2014). هم‌چنین، استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی باعث فرونشست زمین و اثرات منفی بر اکوسیستم تالاب‌ها شده است (UN Environment, 2019). علاوه‌بر این، سطح آب‌های زیرزمینی و ظرفیت آن‌ها برای تغذیه، به‌طور فزاینده‌ای در معرض تأثیرات طبیعی و انسان‌ساخت اقلیمی چرخهٔ هیدرولوژیکی قرار می‌گیرد که اثرات منفی این موارد بر تجدیدپذیری آب‌های زیرزمینی و نرخ و سطح تغذیهٔ آن‌ها تأثیر می‌گذارد (Gupta and Pahl-Wostl, 2013; Pahl-Wostl, 2015; UN Environment, 2019).

آمارهای جهانی برداشت از منابع آب شیرین نشان می‌دهند که ایران پس از کشورهای هند، اندونزی، چین و پاکستان، با برداشت ۹۳ میلیارد مترمکعب در سال ۲۰۱۷ در مقایسه با سال ۱۹۷۷ (با ۴۸ میلیارد مترمکعب برداشت)، رتبهٔ پنجم جهانی را در افزایش برداشت‌ها به‌خود اختصاص داده است. این در حالی است که بیش از ۶۵ کشور دنیا در بازهٔ زمانی مشابه، میزان برداشت‌های خود را به تراز منفی سال پایه کاهش داده‌اند. در شرایط کشور ایران که در دسته‌بندی مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان قرار دارد، در حدود ۹۲/۸ درصد از کل مصرف منابع آب کشور به کشاورزی اختصاص یافته است (FAO, 2017). این رقم برای منابع آب زیرزمینی ۸۷ درصد برآورد شده و بر همین اساس ایران بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶ بین رتبه‌های سه تا پنج جهانی استفاده از منابع آب زیرزمینی قرار گرفته است. نتایج چنین برداشت‌های بی‌رویه‌ای باعث شده است که بر اساس شاخص سازمان ملل، ایران با برداشت ۷۲/۳ درصد از منابع آب شیرین تجدیدپذیر، در ردهٔ بحران شدید آب قرار داشته باشد. در سال ۱۳۹۱ از مجموع ۶۰۹ دشت کشور ۲۲۸ دشت (۳۷/۴ درصد) جزو دشت‌های ممنوعه و ۶۶ دشت (۱۰/۸ درصد) نیز جزو دشت‌های ممنوعه بحرانی قرار داشتند (Mohammad Jani and Yazdanian, 2014). اما در سال ۱۴۰۰ تعداد دشت‌های ممنوعه کشور به ۴۱۰ دشت افزایش پیدا کرد (Islamic parliament research center of the islamic republic of Iran, 2023) و این موضوع بسیار هشدار دهنده است، چراکه بیش از ۹۰ درصد پتانسیل آب زیرزمینی کشور در این دشت‌ها قرار دارد (Iran Water Resources Management Company, 2022).

مدیریت آب در کنار اهمیت روزافزون آن، به‌عنوان یک مشکل پیچیده تلقی می‌شود، زیرا شامل متغیرهای بسیار متعددی از محیطی و هیدرولوژیکی، اجتماعی، قانونی و نهادی و غیره است. در دهه‌های اخیر، این سطح از پیچیدگی توسط کارشناسان مدیریت آب که مفهوم مدیریت یکپارچهٔ آب را توسعه داده‌اند، مورد تأکید بیش‌تری قرار گرفته است. این مفهوم جدید رویکرد جدیدی را پیشنهاد می‌کند که ابعاد فیزیکی، اجتماعی، اقتصادی و محیطی این رشته را شامل می‌شود (GWP, 2017). بهره‌برداری از منابع آب به‌طور مستقیم تحت تأثیر خصوصیات جوامع محلی است. در نهادهای مرتبط با آب‌های زیرزمینی، ذینفعان و بازیگران مختلفی وجود دارند؛ بخشی از نقش این نهادها اجرای سیاست و قانون، تبدیل تصمیمات به اقدامات و اطمینان از اجرای مقررات، رویه‌های حاکمیتی و اجرایی بر اساس اطلاعات و دانش کسب شده در مورد سیستم‌های آب زیرزمینی است. سازمان‌های دولتی معمولاً وظایف حکمرانی و مدیریت آب‌های زیرزمینی چندسطحی را بر عهده دارند. اما، در عمل نقش آن‌ها ممکن است به‌طور قابل‌توجهی از یک رویکرد تنظیم‌گرانه بالا به پایین تا موضعی بی‌تفاوت و رها شده، متفاوت باشد (Kemper, 2007). هم‌چنین، ذینفعان نیز می‌توانند نقش‌های بسیار متفاوتی داشته باشند. به‌عنوان مثال، نهادها و هنجارهای محلی ممکن است بر تقسیم کار و عملکردهایی که به نوبهٔ خود تأمین و تخصیص آب را شکل می‌دهند، تأثیر بگذارند. دولت‌ها باید تلاش کنند تا مشارکت سیستماتیک ذینفعان را با هدف ایجاد مکانیسم‌های دائمی برای مشارکت ذینفعان استفاده کنند. این اقدام می‌تواند به شکل انجمن‌های مصرف‌کنندگان آب و یا دیگر شکل‌ها باشد (Groundwater Governance Project, 2016).

تلاش‌های اولیه برای مدل‌سازی منابع آب بیش‌تر در خصوص فرآیندهای هیدرولوژیک انجام می‌شد. اما نیاز به مطالعات میان رشته‌ای منجر به افزایش پیچیدگی و ادغام

عملکردهای محیط زیستی، اجتماعی و اقتصادی شده است و این تغییر تدریجی از کاربرد صرف مدل‌های شبیه‌سازی مبتنی بر مهندسی به استفاده از چارچوب‌های جامع‌تر، شاخصی از تغییرات امیدوار کننده در الگوهای سنتی است (Mirchi and Watkins Jr, 2013). مدل‌های آب زیرزمینی ابزار مناسبی برای پایش مداوم کمی و کیفی سفره‌های زیرزمینی هستند (Sheikha Bagem Ghaleh et al., 2023). مدل‌سازی مشارکتی یک فرآیند یادگیری هدفمند برای اقدام است که دانش ضمنی و صریح ذینفعان را برای ایجاد درک رسمی و مشترک از واقعیت درگیر می‌کند (Quimby and Beresford, 2023). در این فرآیند، دینفعان مسأله را با هم فرمول‌بندی کرده، مدل‌های مبتنی بر رایانه از سیستم‌های پیچیده مانند سیستم‌های اجتماعی–محیطی را تدوین کرده در کنار کیفیت معنایی، ترکیبی و کارکردی مورد ارزیابی قرار گرفته و در نهایت تنها زمانی مفید خواهد بود که انتظارات ذینفعان را برآورده کند (Gutschmidt et al., 2023).

آب به‌دلیل ماهیت خاص خود و در ارتباط بودن با سیستم‌های طبیعی، فنی و اجتماعی، اقتصادی و سیاسی یک سیستم پیچیده تلقی می‌شود. پارادایم سنتی تفکر خطی، فاقد چارچوب ذهنی و سازمانی مسیرهای توسعهٔ پایدار است و منجر به راه‌حل‌های سریعی می‌شود که در پرداختن به محرک‌های اصلی مشکلات منابع آب ناتوان هستند. برای تسهیل در تحلیل جامع سیستم‌های منابع آب، تفکر سیستمی به‌دنبال درک متقابل روابط بین سیستم‌های فرعی است. پویایی سیستم با ارائه ابزارهای کیفی، چارچوب مناسبی را برای عملیاتی کردن تفکر سیستمی و کاربرد آن در مشکلات منابع آبی فراهم می‌کند. این رویکرد یک چارچوب مدل‌سازی کمّی و کیفی سطح بالا را برای درک تصویری کلان از سیستم‌های منابع آب، مشارکت ذینفعان، تحلیل سیاست‌ها و تصمیم‌گیری راهبردی فراهم می‌کند. علی‌رغم این‌که مدل‌سازی کمّی با استفاده از شبیه‌سازی و بهینه‌سازی رایانه‌ای هنوز بسیار مهم است، اما مدل‌های سیستم دینامیک کیفی می‌توانند درک روند کلی و علل اصلی مشکلات را بهبود بخشند و تصمیم‌گیری پایدار منابع آب را ارتقاء دهند (Mirchi and Watkins Jr, 2013). لذا، در این مقاله برای درک پیچیدگی ساختار و رفتار مدیریت و حکمرانی منابع آب زیرزمینی، از رویکرد سیستمی در قالب سیستم‌های دینامیک استفاده شده و یک مدل مدیریت مشارکتی با دیدگاهی کمّی و کیفی تدوین و طراحی شده است. در پژوهشی، Pourmasoumi Langarudi et al. (2019) با ارائهٔ یک مدل حلقهٔ بستهٔ هیدرولوژی اجتماعی به این نتیجه رسیدند که ادغام پیوندهای بازخورد اجتماعی در یک سیستم هیدرولوژی می‌تواند پیامدهای تحلیل سیاست مربوط به آب را تغییر دهد و مدل حلقهٔ بستهٔ معرفی شده می‌تواند به‌عنوان یک ساختار عمومی برای هر سیستم هیدرولوژی اجتماعی عمل کند. در بخش کشاورزی Moghadam Manesh and Pourmasoumi Langarudi (2020) با بررسی تراژدی منابع مشترک در استفاده از منابع آب‌های زیرزمینی به نتایج ذیل دست یافتند: ۱) بازدهی آبیاری یک نقطهٔ اهرمی است و با افزایش بازدهی از ۴۰ درصد به ۴۵ درصد می‌توان به‌طور قابل‌توجهی مشکل را درمان کرد و دولت باید تمرکز خود را روی بهبود بازدهی آبیاری بگذارد. هم‌چنین، به‌طور هم‌زمان، برای کنترل اثر ارتجاعی از افزایش زمینه‌ای زیرکشت و افزایش زمینه‌ای زیرکشت محصولات با مصرف آب بالا جلوگیری شود. ۲) هیچ راه‌حلی به تنهایی برای حل این معضل وجود ندارد و باید اقدامات متنوعی به‌صورت هم‌زمان انجام گیرد.

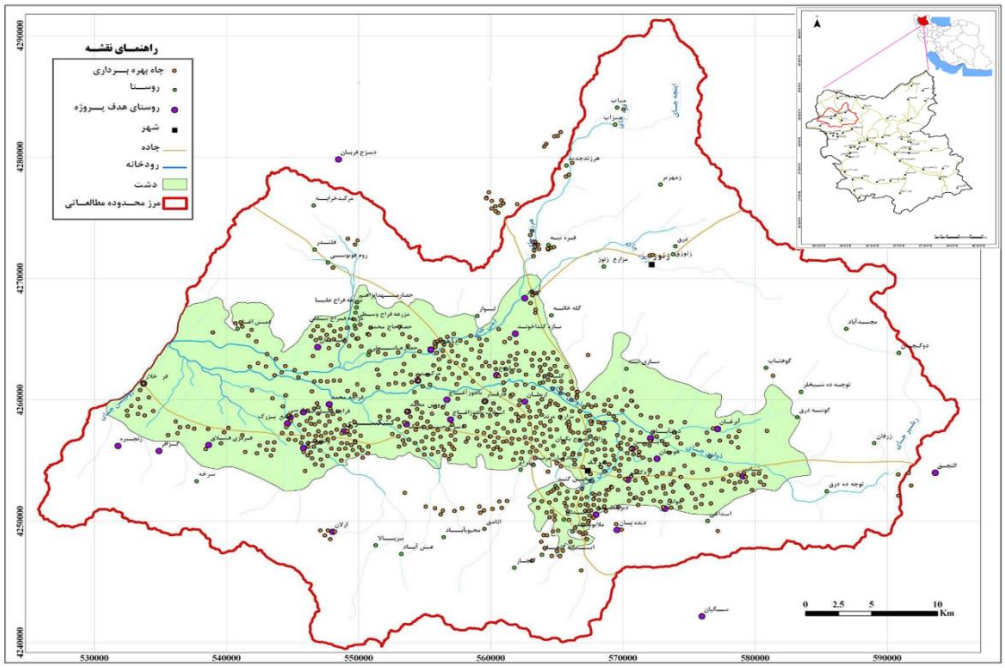
از سایر پژوهش‌ها، Mousavi et al. (2023) برای ارزیابی راه‌کارهای تأمین نیاز محیط زیستی دریاچهٔ ارومیه، منابع آب درون حوضهٔ آبریز را (شامل انتقال پساب، کاهش ۴۰ درصدی مصرف از محل منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی) با راه‌کار انتقال آب بین‌حوضه‌ای از رودخانهٔ زاب با استفاده از روش سلسله مراتبی (AHP) در هر یک از دوره‌های خشکسالی با تعریف شش سناریو با مدل MODSIM شبیه‌سازی کردند. هم‌چنین، Bai et al. (2021) برای تعیین پیامدهای هیدرولوژیکی و اقتصادی یک سیاست راندمان آبیاری (IE) (افزایش راندمان انتقال و راندمان مزرعه) در یک سیستم اجتماعی هیدرولوژیکی همراه با سه سناریوی اقلیمی از مدل‌سازی دینامیک سیستم استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی آنان نشان داد که مدیریت تطبیقی آب، بهره‌برداری از آب زیرزمینی را در سال‌های خشکسالی محدود کرده و آبخوان‌ها را در سال‌های پربارش احیاء می‌کند و انگیزه‌های اقتصادی برای جبران هزینه‌های بهبود زیرساخت‌های راندمان آبیاری در راستای دست‌یابی به پایداری در کشاورزی و منابع آبی ضروری هستند. نتایج مطالعهٔ Ahmadi (2022) با موضوع اثر افزایش راندمان کاربری آب بر بهبود وضعیت منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل WEAP در دشت قزوین نشان داد، جایگزینی سامانه‌های نوین آبیاری، مانند آبیاری میکرو به‌تنهایی نمی‌تواند مشکل آب منطقه را حل کند. از این‌رو، به‌علت اُفت سطح آب زیرزمینی در منطقه می‌توان راه‌کارهایی از جمله تغذیهٔ مصنوعی آبخوان را مد نظر داشت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقهٔ مورد مطالعه

حوضهٔ آبریز رودخانهٔ ارس شامل ۱۳ محدودهٔ مطالعاتی است که یکی از آن‌ها محدودهٔ مطالعاتی مرند است که از سال ۱۳۵۹ جزء دشت‌های ممنوعهٔ کشور قرار گرفته است. محدودهٔ مطالعاتی مرند بین ۴۵°.۱۷ تا ۴۶°.۵ طول شرقی و ۳۸°.۱۸ تا ۳۸° ′۴۵ عرض شمالی قرار دارد. مساحت دشت مرند ۵۸۹/۷۶ کیلومتر مربع است که از غرب به شرق کشیده شده است. میانگین بارندگی در این محدوده بین ۳۰۰ میلی‌متر (در محدودهٔ دشت) تا ۳۵۹ میلی‌متر (در ارتفاعات) است. میزان آب مصرفی در سطح دشت مرند ۲۲۶/۸۲ میلیون مترمکعب است که از این مقدار ۱۹۱/۶۶ میلیون مترمکعب متعلق به منابع آب زیرزمینی و ۳۵/۱۶ میلیون مترمکعب مربوط به آب‌های سطحی و چشمه‌های این محدوده است. از مقدار ذکر شده ۱۹۳/۸۳ میلیون مترمکعب در بخش کشاورزی (معادل درصد۸۶ از کل مصارف آب دشت)، ۲/۵۰ میلیون مترمکعب در بخش صنعت و ۳۰/۴۹ میلیون مترمکعب در بخش شرب به مصرف می‌رسد. از مجموع ۱۹۱/۶۶ میلیون مترمکعب آب برداشت شده از منابع آب زیرزمینی نیز ۱۵۸/۶۷ میلیون مترمکعب در بخش کشاورزی، ۳۰/۳۵ میلیون مترمکعب در بخش شرب و ۲/۵ میلیون مترمکعب نیز در بخش صنعت استفاده می‌گیرد (Saman Abraeh Consulting Engineers, 2019).

تعداد چاه‌های کشاورزی موجود در دشت مرند ۵۰۲ حلقه است که ۴۵۴ حلقهٔ چاه فعال و ۴۸ حلقهٔ چاه غیرفعال است و این تعداد چاه در ۵۰ نقطهٔ روستایی و شهری واقع شده‌اند (شکل ۱). تمامی این چاه‌ها نیز مجاز و دارای پروانه بهره‌برداری هستند (Iran Water Resources Management Company, 2022). با توجه به آمار ارائه شده از سوی وزارت نیرو، در محدودهٔ دشت مرند هیچ چاه عمیق و نیمه‌عمیق غیرمجازی وجود ندارد. مطالعات موجود در خصوص آبخوان دشت مرند، حاکی از آن است که تراز آب این دشت بین سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۳ با اُفت تجمعی معادل ۱۶/۵۶ متر روبه‌رو شده است و در دورهٔ آماری ۳۲ ساله به‌طور میانگین با اُفتی معادل ۵۲ سانتی‌متر در سال روبه‌رو شده است (Dini and Mohammadi Aydinlo, 2018). هم‌چنین، بین سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۵ نیز در برخی از نقاط آبخوان دشت مرند تا ۱۳/۵ متر اُفت تراز مشاهده شده است (Saman Abraeh Consulting Engineers, 2019).



شکل ۱- موقعیت دشت مرند و چاه‌های کشاورزی در استان آذربایجان شرقی و ایران

Figure 1- Location of Marand Plain and agricultural wells in East Azarbaijan Province, Iran

۲-۲- روش‌شناسی

بر اساس ملزومات مدل‌سازی مشارکتی سیستم داینامیک[1]، مراحل اصلی پژوهش طی پنج مرحله و در دو بخش کیفی و کمی صورت گرفت. مشارکتی بودن تمامی مراحل مدل‌سازی، موجب رفع مشکلات بنیادینی مانند سوگیری و مداخلات آرای شخصی پژوهش‌گر در مدل‌سازی می‌شود. جامعهٔ آماری شامل سه گروه اصلی ذینفعان بود؛ ۱) نمایندگان بهره‌برداران چاه‌های کشاورزی دشت مرند (در قالب هیأت امنای دشت مرند) به تعداد

[1] Participatory system dynamic modeling (PSDM)

۹۶ نفر در سطح ۴۵ روستا. به ازای هر پنج الی شش حلقهٔ چاه، یک نفر به‌عنوان نمایندهٔ بهره‌برداران چاه‌ها، از طریق برگزاری انتخابات در سطح روستاهای دشت مرند انتخاب شده و در قالب هیأت امنای دشت مرند، به رسمیت شناخته شده‌اند. ۲) نمایندگان نهادهای دولتی مسئول در بخش آب زیرزمینی (شرکت سهامی آب منطقه‌ای آذربایجان‌شرقی و ادارهٔ امور منابع آب شهرستان مرند، سازمان جهاد کشاورزی استان آذربایجان‌شرقی و ادارهٔ جهاد کشاورزی شهرستان مرند و بخش‌های بنابِ مرند، کشکسرای و یامچی، سازمان تعاون روستایی استان آذربایجان شرقی و ادارهٔ تعاون روستایی شهرستان مرند، فرمانداری شهرستان مرند) به تعداد ۶۱ نفر و ۳) خبرگان و متخصصین حوزهٔ آب در سطح شهرستان مرند، سمن‌های محلی و شرکت‌های تخصصی غیردولتی به تعداد ۲۱ نفر.

نمونه‌گیری در هر سه گروه اصلی هدف، به روش هدفمند با ملاک سوابق اجرایی، دانشی و تجربی در خصوص موضوع مدیریت منابع آب زیرزمینی با محوریت مسائل اختصاصی حوزهٔ آبریز دشت مرند انجام شد. این روش نمونه‌گیری برای دسترسی به افراد دارای دانش و تخصص مورد نیاز هدف پژوهش، در گروه‌های شش الی ۱۲ نفره در قالب گروه‌های کانونی مرکزی (FGD)[1] مورد استفاده قرار گرفت. در جامعه آماری نمایندگان کشاورزان (هیأت امنای دشت مرند) با توجه به تفاوت‌های موجود در نظام بهره‌برداری آب زیرزمینی در نقاط مختلف دشت، سه گروه کانونی ۱۱ نفره تشکیل شد. برای نمایندگان بخش دولتی دو گروه کانونی ۱۰ نفره و در بخش خبرگان و متخصصین غیردولتی نیز یک گروه کانونی ۱۲ نفره تشکیل شد. مجموع مشارکت‌کنندگان در کارگاه‌های مشارکتی گروه‌های کانونی ۶۵ نفر بوده و نسبت به تعداد جلسات تشکیل شده برای هر موضوع بحث، حداکثر پنج نفر از این تعداد، امکان مشارکت در جلسات مربوط به گروه‌های خود را نداشتند.

در بخش کیفی در فرآیند تدوین مدل سیستم دینامیک بخش‌های "بیان مسأله، تدوین فرضیهٔ پویا، طراحی سیاست" به شیوهٔ کیفی صورت گرفت و مدل مشارکتی سیستم دینامیک در بخش‌های مذکور از راهبرد کیفی تبعیت می‌کند (Pluchinotta et al., 2021). در روش‌شناسی مشارکتی سیستم دینامیک، رویکرد کیفی مشارکتی از مرحلهٔ تعریف و بیان مسأله شروع شده که با استفاده از ابزارهای مشارکتی با ذینفعان انجام می‌شود. مداخلات عمیق مشارکتی ذینفعان نیز در ساخت مدل، از نوع مدل‌سازی رفتار ذینفعان با خود ذینفعان است. جمع‌آوری داده‌های کیفی نیز از طریق مجموعه‌ای از کارگاه‌های مشارکتی گفت‌وگو و تبادل نظر کانونی برای شناسایی و تعیین متغیرها، شناسایی روابط و ساختن حلقه‌های علّی معلولی (CLD)[2] و اعتبارسنجی با تعداد حداکثر ۱۵ نفر مشارکت‌کننده در هر گروه انجام شد. علاوه‌بر این‌که یک CLD فرضیه‌ای در مورد ساختار بازخورد سیستم نشان می‌دهد (Lane et al., 2016)، به‌عنوان ابزاری برای ایجاد درک مشترک از سیستم در میان اعضای گروه کانونی نیز عمل می‌کند. لذا، تشکیل گروه‌های بحث کانونی چندین مرحله تکرار شد و این فرآیند بازخوردی در تمامی مراحل تا مدل‌سازی نهایی ادامه داشت.

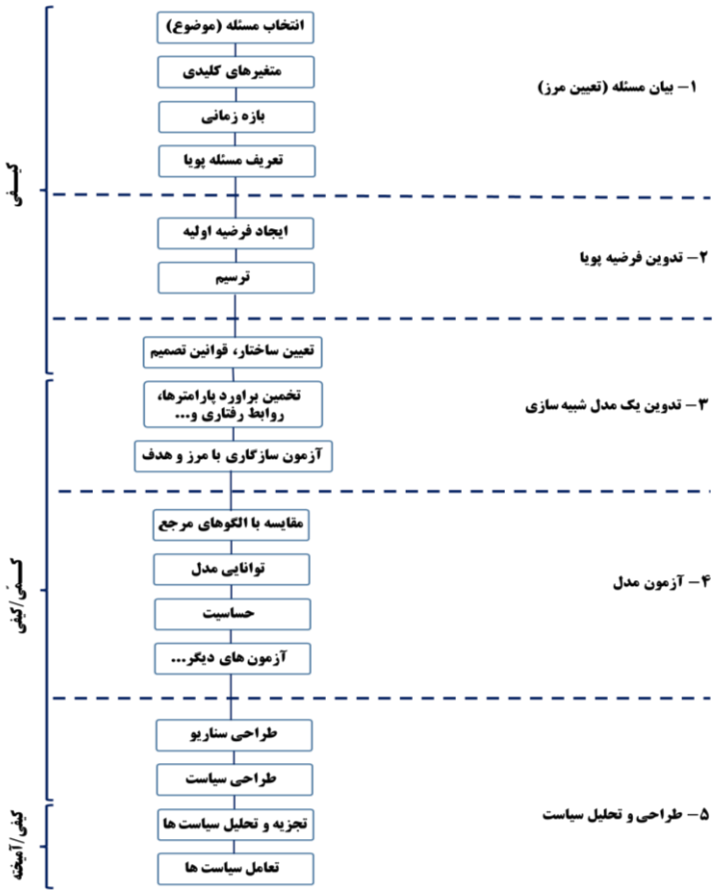
در بخش کمی مراحل اصلی شبیه‌سازی، آزمون و تحلیل مدل انجام شد. این بخش خود شامل سه قسمت اصلی است؛ ۱) انجام مراحل تدوین مدل، ۲) آزمون مدل مشارکتی سیستم دینامیک و ۳) تحلیل کمّی سیاست‌ها. گردآوری داده‌های کمّی مورد نیاز این بخش مانند بررسی میزان عرضهٔ آب زیرزمینی، بررسی میزان تقاضای آب زیرزمینی، سطح زیرکشت محصولات زراعی و باغی، میزان مصارف آب زیرزمینی محصولات باغی و زراعی، راندمان کل آبیاری، وضعیت الگوی کشت، هزینه و درآمد کشت محصولات باغی و زراعی، هزینهٔ حامل‌های انرژی در بخش کشاورزی، میزان برداشت مجاز و غیرمجاز آب زیرزمینی در سطح دشت مرند، نیاز آبی سالانه بخش کشاورزی و کمبود منابع آب مورد نیاز. داده‌های لازم برای فرمول‌نویسی و مقادیر متغیرهای کمکی، جریان و حالت به روش کمّی و از طریق پرسشنامه، آمار و داده‌های وزارت نیرو و جهاد کشاورزی، منابع کتابخانه‌ای و نرم‌افزار (NETWAT) گردآوری شد.

مدل نهایی طراحی شده بر اساس حلقه‌های علّی و معلولی (CLD) کیفی و نمودارهای حالت و جریان (SFD)[3] کمّی به‌دست آمد. در قالب مدل مشارکتی سیستم دینامیک، مجموع داده‌ها و اطلاعات کمی–کیفی بر اساس مدل Sterman (2000) و Pluchinotta et al. (2021) یکپارچه شد (شکل ۲). در این مطالعه از روش کلی مدل پنج مرحله‌ای Sterman استفاده شد و روش اجرای این پنج گام نیز با استفاده از رویکرد و ابزارهای مشارکتی Pluchinotta et al. (2021) انجام شد، مراحل این روش در بخش نتایج و بحث به تفکیک مراحل گزارش‌دهی شده است. ترسیم و تحلیل مدل نیز با استفاده از نرم‌افزار Vensim PLE8.3.5 انجام شد. هدف نهایی مدل‌سازی سیستم دینامیک مشارکتی، مدل‌سازی رفتار ذینفعان با خود دینفعان در خصوص مدیریت و حکمرانی آب در سطح دشت مرند است. لذا، مداخله ذینفعان در هر مرحله از فرآیند مدل‌سازی چندین بار تکرار شده و سپس مراحل بعدی نیز بر اساس مراحل قبلی به‌روزرسانی شدند.

[1] Focused group discussion (FGD)

[2] Causal loop diagram (CLD)

[3] Stock and flow diagram (SFD)



شکل ۲- گام‌های روش‌شناسی سیستم دینامیک، (Sterman, 2000; Pluchinotta et al., 2021)

Figure 2- Methodological steps of a dynamic system, Derived from (Sterman, 2000; Pluchinotta et al., 2021)

۳- نتایج و بحث

با توجه به مبانی روش‌شناسی مدل‌سازی مشارکتی سیستم دینامیک، نتایج به‌دست آمده هر گام به‌صورت جدا ارائه شده است:

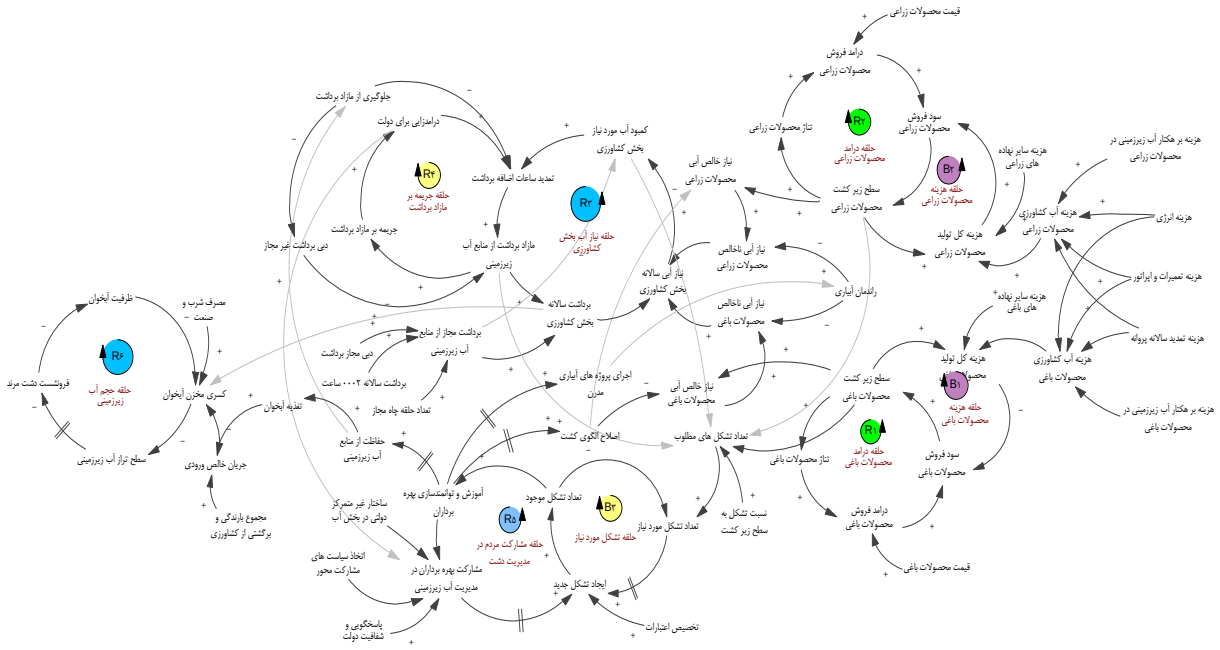
۳-۱- بیان مسأله

این مرحله به شیوهٔ کیفی و با استفاده از روش گروه‌های بحث متمرکز (FGD) انجام شد. این بحث‌ها در بین تمامی گروه‌های هدف مشارکت کننده (سه گروه اصلی با شش زیرمجموعه) برگزار شد و مسائل اصلی مدیریت و حکمرانی منابع آب زیرزمینی دشت مرند شناسایی و معرفی شدند. مسأله محوری دشت مرند، افزایش کسری مخزن آبخوان دشت مرند در طول زمان تعیین شد. هم‌چنین، متغیرهای کلیدی سیستم (۶۱ متغیر)، مرز سیستم (شامل متغیرهای داخلی و خارجی حلقه‌های بسته) و بازهٔ زمانی مدل‌سازی (۲۰ ساله و از ۱۳۹۱ تا ۱۴۱۰) تعریف شدند. متغیرهای کلیدی پژوهش پس از تحلیل و ادغام، به‌صورت متغیرهای وارد شده در حلقه‌های علت و معلولی (CLD) نمایش داده شدند (شکل ۳).

۳-۲- تدوین فرضیهٔ پویا

در هر جلسهٔ گروه کانونی، برای متغیرهای شناسایی شده یک حلقهٔ بستهٔ علت و معلولی (CLD) تهیه شد. روابط علّی و معلولی شناسایی شده، پس از تعیین علامت و جهت رابطه (تعیین قطبیت حلقه)، وارد نرم‌افزار Vensim PLE8.3.5 شدند. بر اساس یافته‌های حاصل از گروه‌های بحث کانونی نُه حلقهٔ علّی و معلولی به‌دست آمد که علامت سه حلقه (فرضیهٔ پویا) منفی بوده (شامل حلقه‌های هزینهٔ محصولات باغی، هزینهٔ محصولات زراعی و تشکل مورد نیاز) که نقش تعدیل کننده داشتند و با حرف انگلیسی (B) مشخص شده‌اند. شش حلقه نیز علامت مثبت داشته (شامل حلقه‌های درآمد محصولات باغی، درآمد محصولات زراعی، نیاز آب بخش کشاورزی، جریمه بر مازاد برداشت، مشارکت مردم در مدیریت دشت، حجم آب زیرزمینی) که نقش تقویت کننده داشتند و با حرف انگلیسی (R) مشخص شده‌اند (شکل ۳). دلیل تقویت‌کننده یا مثبت بودن حلقهٔ «جریمه بر مازاد برداشت آب زیرزمینی» این است که با توجه به شرکایی بودن چاه‌ها (بین ۷۰ الی ۸۰ نفر بهره‌بردار)،

جرایم تعیین شده بین شرکا تقسیم شده و به‌دلیل کاهش سهم هر کشاورز از میزان جرایم و کشش ناپذیر بودن قیمت آب در کشاورزی سنتی، این جرایم نقش بازدارندگی خود را از دست می‌دهند. از سوی دیگر تورم قیمتی محصولات کشاورزی نیز افزایش ناچیز در هزینه‌های تولید (ناشی از افزایش هزینهٔ آب) را جبران می‌کند، چرا که در شرایط دشت مرند، هزینهٔ تأمین آب مورد نیاز کشاورزی، نسبت به هزینهٔ سایر نهاده‌ها سهمی بین ۱۰ الی ۱۲ درصد (در هکتار) در محصولات زراعی و سه تا پنج درصد (در هکتار) در محصولات باغی دارد. دلیل مهم دیگر برای مثبت بودن حلقه علت و معلولی جریمه بر مازاد برداشت این است که جرایم دریافت شده به حساب خزانهٔ دولتی واریز شده و به‌دلیل عدم نظارت کافی و شفاف‌سازی در خصوص محل هزینه‌کرد آن‌ها، تبدیل به منبعی برای جبران کمبود اعتبارات جاری دولتی شده است. لذا، این سیاست نه تنها نقش بازدارندگی ندارد، بلکه با توجه به ماهیت درآمدزا بودن آن برای بخش دولتی، به‌عنوان یک مشوق درون ساختاری وزرات نیرو برای صدور مجوز برداشت غیرمجاز شده و با هر نوبت درخواست کشاورزان، مجوز ۲۰۰ ساعت اضافه برداشت (با پرداخت جریمه) صادر می‌شود.



شکل ۳- شناسایی متغیرها و تدوین فرضیهٔ پویا با ترسیم حلقه‌های علّی و معلولی (CLD) در بخش کیفی

Figure 3- Identifying variables and formulating a dynamic hypothesis by drawing cause and effect loops (CLD)

۳-۳- تدوین مدل شبیه‌سازی

این مرحله شامل تعریف و تفکیک متغیرهای حالت و جریان (SFD) بوده و معادله‌نویسی مربوط به هر یک از روابط علّی- معلولی نیز در دو بخش کمّی و کیفی انجام شد. برای اساس مبانی روش‌شناسی، تمامی روابط مربوط به متغیرهای حالت[1] (دارای اثر تجمعی و مقداراولیه) و متغیرهای نرخ[2] (بر حسب زمان) به‌صورت روابط ریاضی و کمّی وارد شده و متغیرهای کمکی[3] کمّی نیز به دو صورت توابع لوک‌آپ[4] و فرمول‌نویسی (روابط دیفرانسیل) تهیه شد. متغیرهای ثابت[5] نیز به‌صورت اعداد ثابت وارد روابط مدل شدند. هم‌چنین، متغیرهای کمکیِ کیفی نیز بر حسب نمودارهای رفتاری با استفاده از توابع لوک‌آپ وارد فرآیند مدل‌سازی شدند.

چهار متغیر حالت به‌دست آمده شامل موارد زیر بودند: سطح زیرکشت محصولات زراعی آبی، سطح زیرکشت محصولات باغی آبی، کسری مخزن آبخوان دشت مرند و تعداد تعاونی‌های تولید روستایی فعال موجود بودند. متغیرهای نرخ و روابط بین متغیرهای نرخ، حالت، کمکی و بیرونی برای دو متغیر کشت محصولات زراعی آبی، سطح زیرکشت محصولات باغی آبی در یک نمودار نشان داده شده است (شکل ۴). این کار برای

[1] Stock
[2] Flow/Rate
[3] Auxiliary
[4] Look up
[5] Constant

دو متغیر حالت کسری مخزن آبخوان دشت مرند و تعداد تعاونی‌های تولید روستایی نیز انجام شده و به‌صورت یک نمودار مجزا نشان داده شده است (شکل ۵). در نهایت دو زیر سیستم تهیه شده با یک‌دیگر ادغام شده و مدل شبیه‌سازی مدیریت مشارکتی منابع آب زیرزمینی تدوین شد (شکل ۶). روابط ریاضی و روابط بین هر یک از زیرسیستم‌ها نیز بر اساس رابطه‌های شناسایی شده در مدل وارد شد. متغیر حالت کسری مخزن آبخوان دشت مرند به‌عنوان متغیر نهایی مدل مد نظر بوده و اثر نهایی تمامی روابط ریاضی روی این متغیر بررسی خواهد شد. معادلات دو متغیر حالت سطح اراضی زراعی و سطح اراضی باغی به‌ترتیب به‌صورت زیر است:

$$CA_A = \int (N_A - R_A, 14750) \qquad (۱)$$

در این رابطه مقدار عددی ۱۴۷۵۰ مساحت اولیهٔ اراضی زراعی در سال پایهٔ شبیه‌سازی است. N_A اراضی زراعی جدید کشت شده و R_A نیز کاهش سطح زیرکشت اراضی زراعی است (شکل ۴).

$$CA_H = \int (N_H - R_H, 6410) \qquad (۲)$$

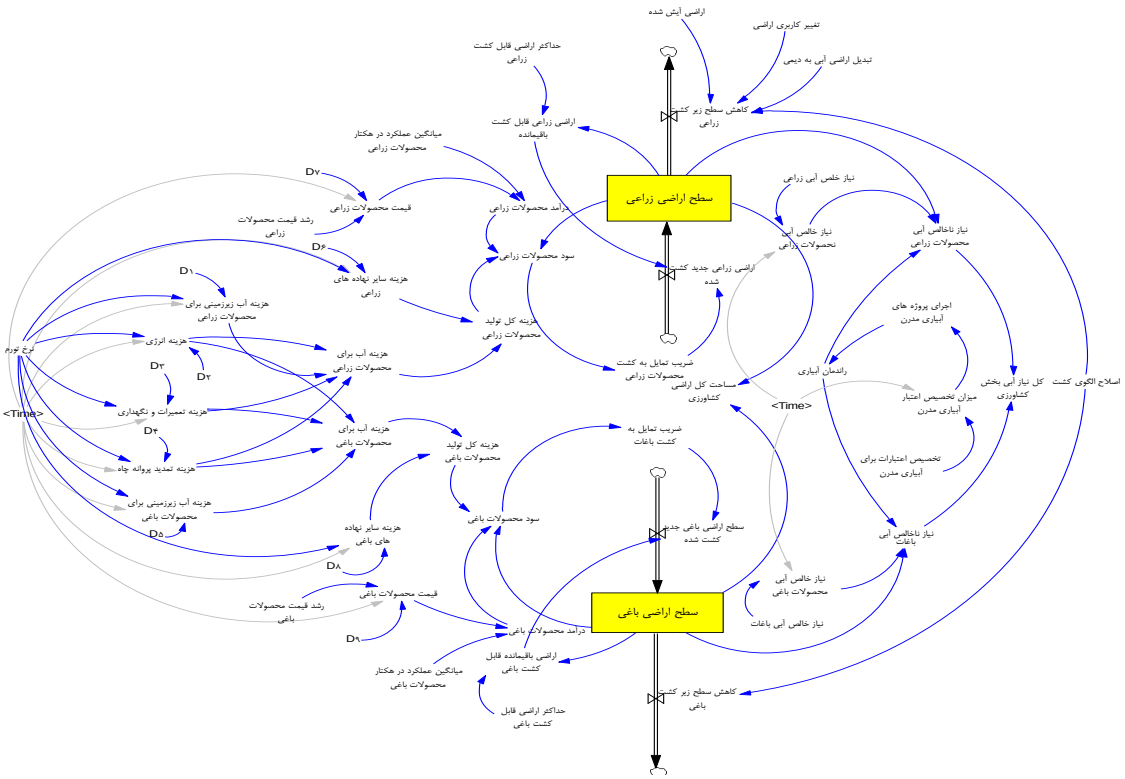
در رابطهٔ بالا، مقدار عددی ۶۴۱۰ مساحت اولیهٔ اراضی باغی بر حسب هکتار در سال پایهٔ شبیه‌سازی است. N_H اراضی باغی جدید کشت شده و R_H نیز کاهش سطح زیرکشت اراضی باغی است. سایر متغیرهای نرخ و کمکی و ثابت مربوط به این دو متغیر حالت نیز روابط مجزا داشته و در توالی یک‌دیگر دارند (شکل ۴). روابط دو متغیر حالت کسری مخزن آبخوان دشت مرند و تعاونی‌های تولید روستایی فعال نیز به‌صورت زیر است:

$$AD = \int (GA + DI - RF - SA, 395) \qquad (۳)$$

در این رابطه مقدار عددی ۳۹۵ حجم اولیهٔ کسری مخزن (بر حسب میلیون مترمکعب) در سال پایهٔ شبیه‌سازی است. GA حجم برداشت سالانهٔ بخش کشاورزی از آب زیرزمینی، DI برداشت سالانهٔ بخش شرب و صنعت از منابع آب زیرزمینی، RF حجم آب برگشتی سالانه به آبخوان و SA حجم سالانهٔ تأمین آب از رودخانهٔ ارس است. واحد تمامی موارد فوق بر حسب میلیون مترمکعب است (شکل ۵).

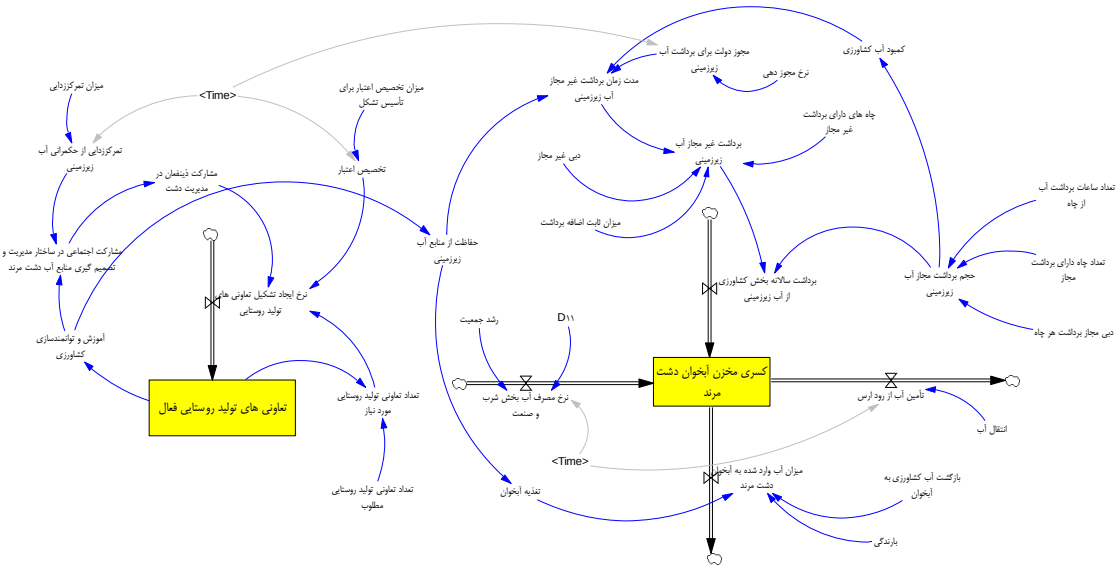
$$ARC = \int (FRA, 2) \qquad (۴)$$

در رابطهٔ بالا، مقدار عددی دو تعداد اولیهٔ تعاونی‌های تولید روستایی در پایهٔ شبیه‌سازی بوده و FRA نرخ ایجاد تشکل سالانه در سطح دشت مرند است (شکل ۵).



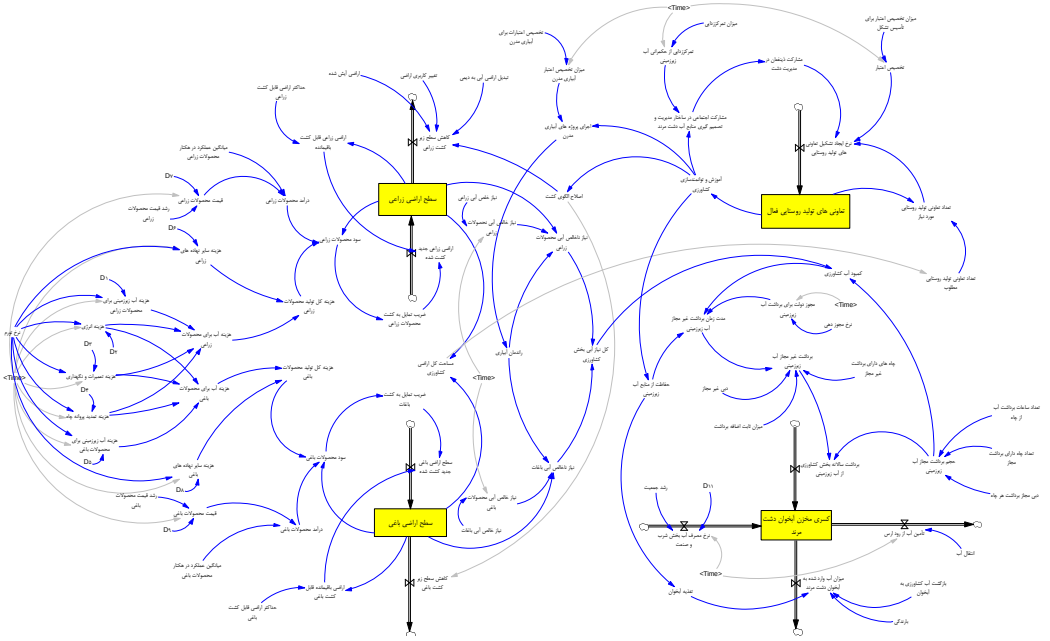
شکل ٤- نمودار کمّی حالت و جریان (SFD) برای دو متغیر حالت کسری مخزن دشت مرند و تعاونی‌های تولید روستایی فعال

Figure 4- Stock and Flow Diagram (SFD) for two variables of "Marand aquifer reservoir deficit and Active rural production cooperatives"



شکل ٥- نمودار کمّی حالت و جریان (SFD) برای دو متغیر حالت سطح اراضی زراعی و سطح اراضی باغی

Figure 5- Stock and Flow Diagram (SFD) for two variables of "cultivated area of agronomic crops and cultivated area of horticultural crops"



شکل ٦- تدوین مدل شبیه‌سازی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی

Figure 6- Formulation of a simulation model for participatory groundwater management

۳-٤- آزمون مدل

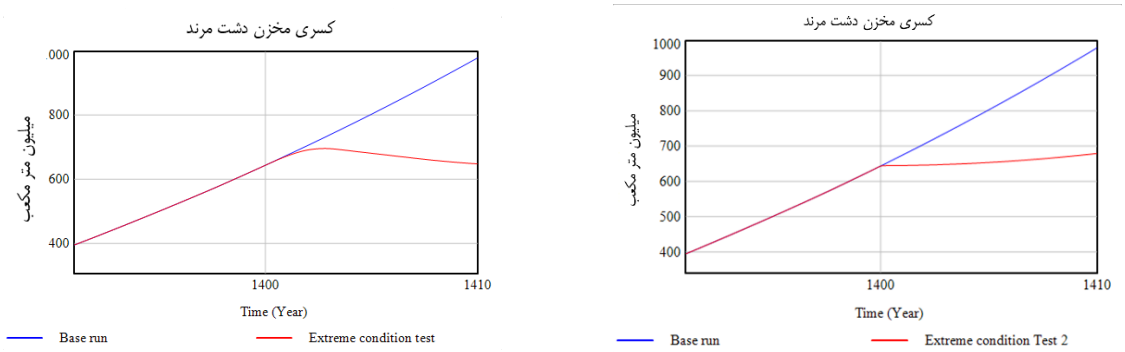
آزمون‌های اعتبارسنجی مدل در سه دستهٔ کلی آزمون ساختاری، آزمون رفتاری و آزمون پیامدهای سیاست‌ها انجام گرفت. در دسته آزمون‌های ساختاری از دو روش آزمون راستی‌آزمایی ساختار و آزمون شرایط حدی استفاده شد. در بخش آزمون‌های رفتاری از آزمون بازسازی رفتار مرجع استفاده شده و در بخش آزمون‌های پیامدهای سیاست‌ها از آزمون تحلیل حساسیت استفاده شد. هم‌چنین، با توجه به مشارکتی بودن روش مدل‌سازی، در نهایت آزمون کمّی-کیفی بازخورد از ذینفعان نیز به‌عنوان یک روش تلفیقی انجام شده و طی آن ساختار و رفتار معادلات و توابع متغیرهای کیفی و پیامدهای سیاست‌ها توسط گروه‌های مختلف ذینفع مورد ارزیابی مجدد قرار گرفت.

۳-٤-۱- آزمون‌های ساختاری مدل

آزمون راستی آزمایی ساختار از طریق دستور Check model در محیط نرم‌افزار Vensim PLE8.3.5 انجام شده و در صورت وجود هر گونه خطای ساختاری در نوع روابط بین متغیرها، جهت روابط، رابطه‌های ناقص و غیره نرم‌افزار پیغام خطای ساختاری

داده و مدل اجرا نمی‌شود. در صورت تعریف صحیح انواع متغیرها و قرارگیری صحیح هر یک از متغیرها در ارتباط با یک‌دیگر، نرم‌افزار ساختار را تأیید خواهد کرد. ساختار مدل طراحی شده با استفاده از این روش، اعتبارسنجی شده و مورد تأیید قرار گرفت.

آزمون شرایط حدی نیز از طریق تحلیل رفتار مدل با وارد کردن شوک از طریق وارد کردن داده‌های بسیار بزرگ به متغیرهای کمکی و ثابت انجام می‌شود و طی آن رفتار مدل بررسی می‌شود. به‌عبارتی بایستی بررسی کرد که آیا هر رابطه حتی زمانی که ورودی‌های آن مقادیر خارج از دامنهٔ نرمال باشند، معنا دارد و اگر در معرض سیاست‌ها، شوک‌ها و پارامترهای افراطی باشد، به‌طور قابل‌قبولی پاسخ می‌دهد یا خیر. در این بخش برای متغیر انتقال آب بین حوضه‌ای از رودخانهٔ ارس مقدار متغیر را از صفر به ۳۰ میلیون مترمکعب در سال (از سال ۱۴۰۰ به بعد) رسانده و میزان تغییرات وارد شده در متغیر حالت کسری مخزن دشت مرند بررسی شد. در حالت انتقال آب بین حوضه‌ای صفر، مقدار کسری مخزن در سال ۱۴۱۰ به ۹۷۸ میلیون مترمکعب رسید، اما در حالت افزایش میزان آب انتقالی به حجم ۳۰ میلیون مترمکعب، کسری مخزن در سال ۱۴۱۰ به ۶۸۵/۶۳ میلیون مترمکعب کاهش پیدا کرد (شکل ۷–الف). هم‌چنین، این آزمون به‌طور هم‌زمان برای دو متغیر تمرکززدایی در حکمرانی آب زیرزمینی و تخصیص اعتبار برای تأسیس تعاونی‌های تولید روستایی نیز انجام شد (شکل ۷–ب). در هر دو مورد مدل رفتاری منطقی داشته و خروجی داده‌ها متناسب با شرایط مشابه واقعی نشان داد.



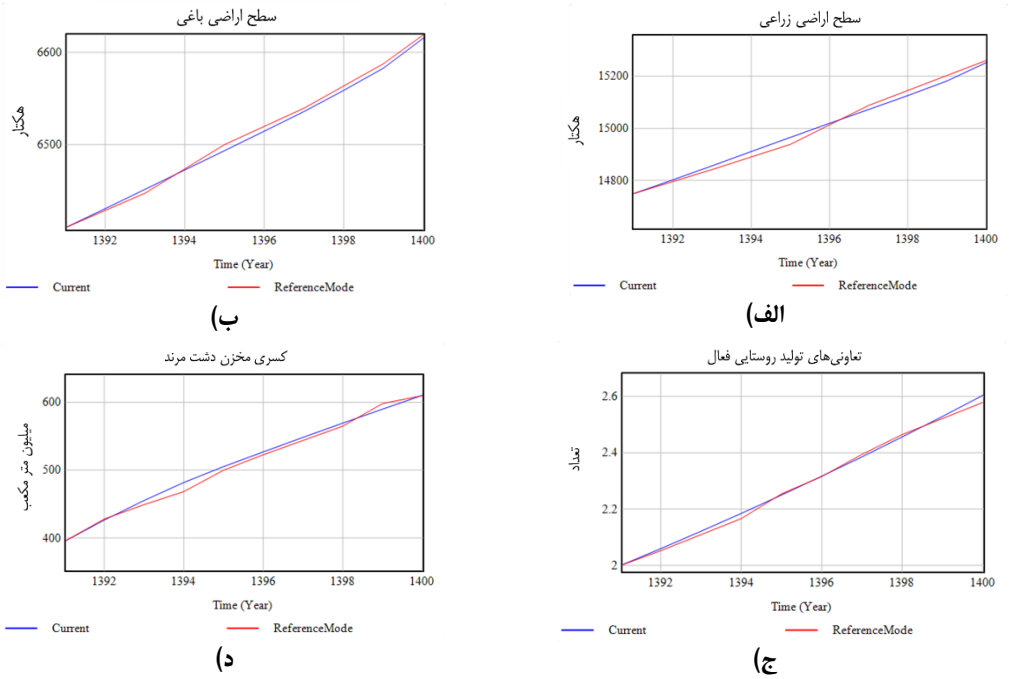
الف) ب)

شکل ۷- مقادیر به‌دست آمده در آزمون شرایط حدی برای متغیر حالت کسری مخزن آبخوان مرند (الف) افزایش حجم آب انتقالی و (ب) تمرکززدایی از حکمرانی آب

Figure 7- The obtained values of Extreme Conditions test for Stock variables (a) Increasing the volume of transferred water, (b) Decentralization of water governance

۳-٤-۲- آزمون رفتاری مدل

در آزمون بازسازی رفتار مرجع باید بررسی شود که آیا مدل حالت‌های مختلف رفتار مشاهده شده در سیستم واقعی را ایجاد می‌کند؟ آیا فرکانس‌ها و روابط فاز بین متغیرها با داده‌ها مطابقت دارند؟ آیا مدل (از لحاظ کیفی و کمی) رفتار مطلوب در سیستم را بازتولید می‌کند؟ برای دست‌یابی به این هدف، توابع لوک‌آپ از نوع سری زمانی را با مدل طراحی شده بین بازهٔ زمانی سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ مورد مقایسه قرار داده و مشاهده شد که در بازهٔ ۱۰ ساله بر اساس الگوی مرجع، مساحت کلی اراضی زراعی از ۱۴۷۵۰ هکتار در سال ۱۳۹۱ به ۱۵۲۵۱ هکتار در سال ۱۴۰۰رسیده و بر اساس مدل طراحی شده نیز همان مقدار اولیه به ۱۵۲۵۷ هکتار در سال ۱۴۰۰ رسیده است. اختلاف مشاهده شده از رفتار مدل با رفتار مرجع یک درصد به‌دست آمد (شکل۸–الف). در خصوص اراضی تحت کشت محصولات باغی نیز بر اساس داده‌های واقعی توابع لوک‌آپ سری زمانی در بازهٔ زمانی ۱۰ ساله از سال ۱۳۹۱–۱۴۰۰ سطح اراضی باغی از ۶۴۱۰ هکتار به ۶۶۱۵ هکتار رسیده است (شکل ۸–ب). میانگین تعداد تعاونی‌های تولید روستایی نیز در همین بازهٔ زمانی از تعداد دو واحد به ۲/۶ واحد رسیده است. تعاونی‌های تولید روستایی در شرف تأسیس نیز بر اساس مراحل پیشرفت تشکیل (فرم‌های ۳۲گانهٔ ثبت تعاونی تولید روستایی) ضرایب اعشاری گرفتند (شکل ۸–ج). متغیر حالت (انباشت) کسری مخزن آبخوان دشت مرند نیز در بازهٔ زمانی مشابه از ۳۹۵ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۹۱ به ۶۱۰ میلیون مترمکعب در سال ۱۴۰۰ رسیده و مدل تهیه شده نیز عدد ۳۹۸ و ۶۱۰ میلیون مترمکعب را برای همان سال نشان می‌دهد (شکل ۸–د).



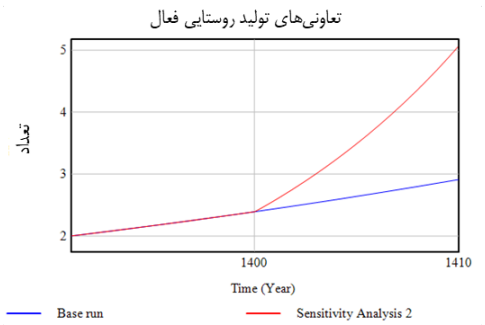
شکل ۸- مقادیر به‌دست آمده در آزمون بازسازی رفتار مرجع برای متغیرهای حالت: (الف) سطح اراضی زراعی (ب) متغیر حالت سطح اراضی باغی (ج) تعداد تعاونی‌های تولید روستایی (د) کسری مخزن آبخوان مرند

Figure 8- The obtained values of the behavior reproduction test for stock variables: (a) cultivated area of agronomic crops, (b) cultivated area of horticultural crops, (c) active rural production cooperatives, (d) Marand aquifer reservoir deficit

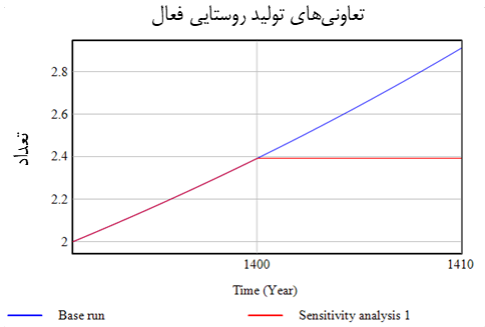
۳-٤-۳- آزمون پیامدهای سیاست

در آزمون تحلیل حساسیت سیاست، متغیرهایی که به‌عنوان تغییرات سیاستی مد نظر هستند، به‌صورت پله‌ای افزایش و یا کاهش پیدا کرده و رفتار مدل مشارکتی مدیریت منابع آب زیرزمینی نسبت به تغییرات سیاستی وارد شده مورد ارزیابی قرار گرفت. در این مرحله بازخوردهای دریافت شده از حساسیت سیاستی مجدداً در ساختار مدل مورد ارزیابی قرار گرفته و در نهایت متغیرهایی که در طول زمان‌های تعیین شده در توالی نمودارهای درختی فرمول‌بندی شده[1] هیچ اثری روی رفتار مدل و یا اثر تجمعی متغیرهای حالت نداشتند و یا این‌که افزایش و کاهش آن‌ها تأثیر پیش‌بینی شده روی متغیر حالت را نداشت، از مدل حذف شدند. این مرحله چندین بار به‌صورت بازخوردی و تکرار شونده در فرآیند مدل‌سازی انجام شد. به‌عنوان مثال، برای انجام تحلیل حساسیت سیاستی، میزان تخصیص اعتبارات برای تشکیل تعاونی‌های تولید روستایی، به‌صورت پله‌ای کاهش و افزایش پیدا کرد. در شرایط نرمال و با توجه سطح اعتبارات فعلی برای ایجاد تشکل، در طول ۱۰ سال تعداد تعاونی‌های تولید روستایی به تعداد سه واحد خواهد رسید. اگر این میزان اعتبارات نیز حذف شود، مراحل تشکیل یک تعاونی (تکمیل مراحل فرم‌های ۳۲گانه) نیمه‌کاره رها شده و به ثبت نهایی و دریافت شناسه ملی و کد اقتصادی نخواهد رسید و به تبع آن تعداد تعاونی‌های تولید روستایی به میزان ۲/۴ ثابت باقی خواهد ماند. اما اگر اعتبارات تخصیص یافته برای ایجاد تشکل افزایش یابد، تعداد واحدهای تعاونی تولید روستایی، در طول ۱۰ سال از ۲/۵ واحد به پنج واحد (در سال ۱۴۰) خواهد رسید. در تحلیل حساسیت بایستی به ازای مقادیر متفاوت اعتبارات تخصیص یافته (با ضرایبی از میزان تخصیص یافته در شرایط نرمال)، اعداد مربوط به تعداد تعاونی‌های تولید روستایی افزایش و یا کاهش یابد (شکل ۹). این آزمون می‌تواند برای تمامی سیاست‌های مد نظر پژوهش انجام شود. در صورتی‌که متغیر حالت مد نظر، فاقد حساسیت نسبت به تغییر در یک متغیر کمکی یا بیرونی (به‌عنوان سیاست) باشد، این سیاست بایستی حذف و یا اصلاح شود.

[1] Couses Strip



الف)



ب)

شکل ۹- مقادیر به‌دست آمده در آزمون تحلیل حساسیت برای متغیر حالت تعاونی‌های تولید روستایی: (الف) حساسیت به کاهش تخصیص اعتبارات، (ب) حساسیت به افزایش تخصیص اعتبارات

Figure 9- The obtained values of theSensitivity analysis test for theStock variable (active rural production cooperatives): (a) Sensitivity to decreasing finance allocation, (b) Sensitivity to increasing finance allocation

۳-٤-٤- آزمون بازخورد از ذینفعان

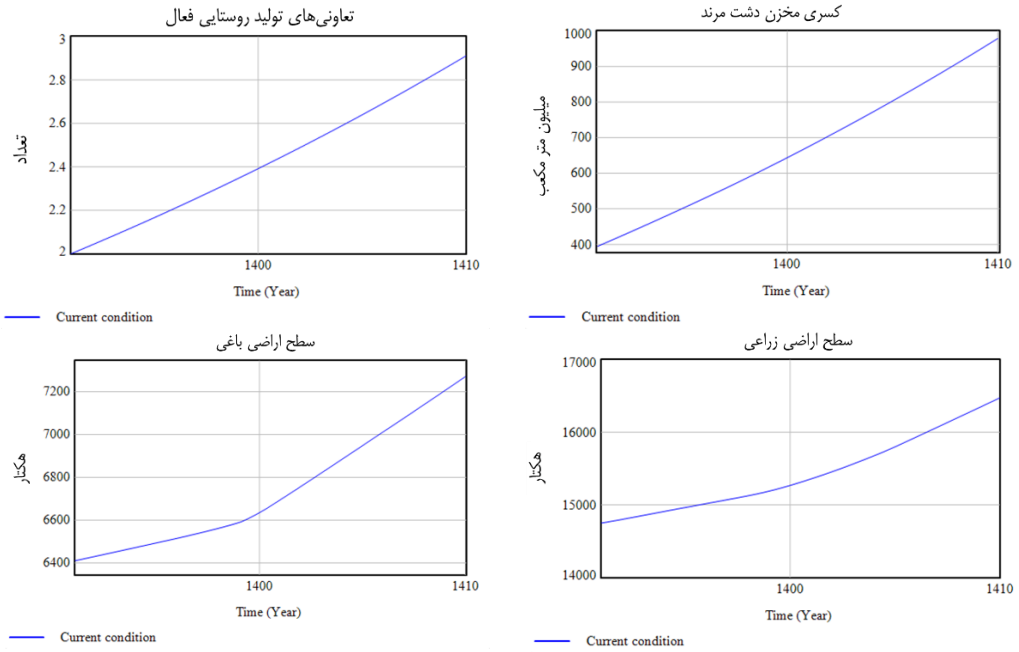
با توجه به این‌که هدف نهایی مدل‌سازی مشارکتی در این پژوهش، مدل‌سازی رفتار ذینفعان با خود دینفعان در قبال مدیریت و حکمرانی منابع آب زیرزمینی در سطح دشت مرند است، لذا برای تکمیل مبانی روش‌شناختی پژوهش نیاز به یک آزمون مشارکتی برای اعتبارسنجی مدل وجود دارد. این آزمون به‌صورت کمّی-کیفی انجام شده و بازخورد نظرات ذینفعان در خصوص سطح اعتماد آنان به مدل و تأمین انتظارات آنان از مدل نهایی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این کار، مدل طراحی شده با گروه‌های مختلف ذینفع از لحاظ ساختاری، رفتاری و پیامدسنجی مورد بررسی مجدد قرار گرفته و بازخوردهای دریافتی در خصوص هر یک از موارد فوق، مجدداً در گروه‌های کانونی مورد بحث و تبادل نظر قرار گرفت. برای مثال، تغییر رفتار متغیر حالت «تعاونی‌های تولید روستایی فعال» در اثر تغییر هم‌زمان متغیرهای بیرونی تخصیص اعتبار و تمرکززدایی از ساختار حکمرانی و مدیریت آب زیرزمینی، گروه‌های کانونی تشکیل شده و بازخورد رفتار مدل مورد بررسی مجدد قرار گرفت. هم‌چنین، نسبت اثرگذاری و وزن هر یک از متغیرها در روابط و میزان تطبیق پیش‌بینی‌ها با شرایط واقعی توسط ذینفعان مورد بررسی مجدد قرار گرفت.

۳-۵- طراحی و تحلیل سیاست

در این مرحله بهترین یا مطلوب‌ترین شرایط سیستم مدیریت منابع آب زیرزمینی دشت مرند در مقیاس نسبی به‌دست آمد. در سیاست‌های اتخاذ شده، گزینه‌هایی توسط گروه‌های ذینفع انتخاب شد که اولاً تغییر در آن‌ها در شرایط دشت مرند به‌عنوان یک منطقه پایلوت کشوری امکان‌پذیر بوده و ثانیاً مطلوب‌ترین نتایج در خصوص وضعیت منابع آب زیرزمینی را نسبت به وضع موجود ایجاد کنند. در این مرحله با ایجاد راهبردهای جدید، ساختارها و قوانین تصمیم‌گیری برای کنترل کسری مخزن آبخوان دشت مرند مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی متغیرهای کمکی اثرگذار روی متغیرهای حالت، پنج اقدام کلی در مدیریت مشارکتی منابع آب زیرزمینی دشت مرند شامل: اصلاح الگوی کشت، افزایش راندمان آبیاری با اجرای شبکه‌های آبیاری مدرن، تمرکززدایی از ساختار بخش دولتی در مدیریت بخش آب، ایجاد تشکل‌های مردمی برای مدیریت آب (تعاونی‌های تولید روستایی)، تأمین آب از خارج از حوضه (انتقال از رودخانهٔ ارس)، به‌دست آمدند که بیش‌ترین میزان اثرگذاری روی مدیریت منابع آب زیرزمینی و کسری مخزن آبخوان دشت مرند را داشتند.

طراحی سناریو در مدل‌سازی سیستم دینامیکی با هدف به چالش کشیدن مدل‌های ذهنی مدیران و ذهنیت غالب آن‌ها انجام می‌شود (Canava, 2010) و هدف پیش‌بینی یا توصیف وضعیت آینده نیست، بلکه هدف آن ارائهٔ مجموعه‌ای از شرایط امکان‌پذیر در آینده است (Kanti Bala et al., 2017). کاربست هر یک از متغیرهای اثرگذار برای سیاست‌گذاری و نحوهٔ تعامل و ترکیب آن‌ها به‌عنوان یک سناریو در نظر گرفته می‌شود. نحوهٔ انتخاب هر یک از سناریوها به‌عنوان سیاست‌های راهبردی، توسط گروه‌های ذینفع در جلسات بحث کانونی تعیین و انتخاب شد. به‌عبارتی این سیاست‌های راهبردی از طریق گفت و گوی ذینفعان به‌دست آمده و به‌صورت مجموعه‌ای ترکیبی از سیاست‌ها با تغییرات داخلی و خارجی سیستم به‌دست آمد. نکتهٔ حائز اهمیت در ارائهٔ سیاست‌ها و سناریوها، میزان امکان‌پذیری تحقق آن از دیدگاه گروه‌های ذینفع در شرایط قابل کنترل واقعی است. برای مثال، در خصوص تغییر و اصلاح الگوی کشت، مساحت اراضی مد نظر برای تغییر الگوی کشت بایستی در طول یک دورهٔ زمانی که مورد توافق گروه‌های ذینفع باشد، اعمال شود. برای انجام این‌کار زمانی که مدل را برای متغیر حالت «کسری مخزن آبخوان دشت مرند» در حالتِ (Steady-State) قرار می‌دهیم، هر کدام از متغیرها را بر اساس شرایط امکان‌پذیر واقعی و مورد توافق گروه‌های ذینفع بایستی

تغییر داد. گروه پژوهشی اجازهٔ اعمال نظر شخصی خود (و یا انتخاب تصادفی) را برای انتخاب نوع پارامتر و میزان تغییر متغیرها را ندارد. بر اساس یافته‌های پژوهش شش سناریوی مختلف بر اساس اتخاذ سیاست‌های مختلف مد نظر قرار گرفت که هر کدام از موارد بررسی می‌شوند (شکل ۱۰):



شکل ۱۰- شبیه‌سازی مدل دینامیک برای سناریوی صفر (تداوم شرایط موجود)

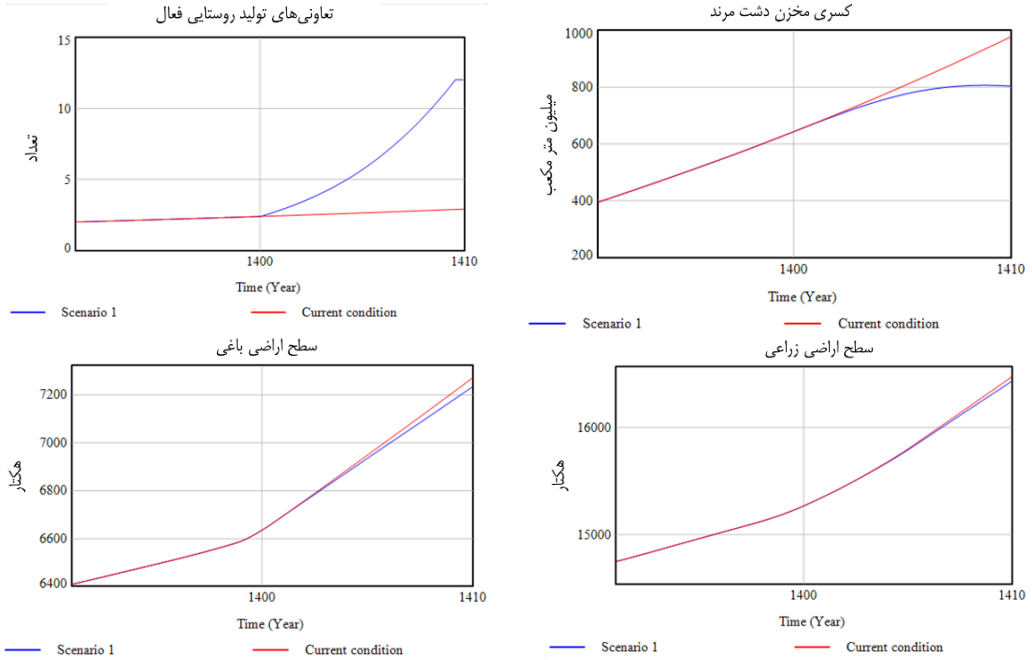
Figure 10- The Simulated dynamic model for scenario zero (current condition)

سناریوی صفر یا شرایط موجود[1]: این سناریو تداوم شرایط فعلی شرایط سیستم بوده و هیچ تغییری خارج از سیستم در متغیرهای کمکی و نرخ ایجاد نخواهد شد. لذا، مدل شبیه‌سازی شده برای سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۴۱۰ نشان می‌دهد که میزان کسری مخزن آبخوان دشت مرند در سال ۱۳۹۱ برابر با ۳۹۵ میلیون مترمکعب، در ابتدای سال ۱۴۰۱ به ۶۷۳ میلیون رسیده و در سال ۱۴۱۰ نیز به ۹۷۸ میلیون مترمکعب خواهد رسید. نتایج به‌دست آمده برای متغیر حالت سطح اراضی کشت شده زراعی نشان می‌دهد با تداوم شرایط موجود و عدم انجام تغییراتی مانند اصلاح الگوی کشت و جلوگیری از توسعهٔ اراضی زراعی، سطح اراضی تحت کشت از ۱۴۷۵۰ هکتار در سال ۱۳۹۱ به ۱۶۵۲۰ هکتار در سال ۱۴۱۰ خواهد رسید. سطح اراضی باغی نیز از مساحت اولیهٔ ۶۴۱۰ هکتار در سال ۱۳۹۱ به ۷۲۲۷ هکتار در سال ۱۴۱۰ خواهد رسید. تعاونی‌های تولید روستایی نیز از تعداد دو تعاونی به حدود سه تعاونی افزایش خواهد یافت. اعداد اعشاری برای تعداد تعاونی تولید روستایی بر اساس مراحل تکمیل تأسیس تعاونی و تکمیل فرم‌های ۳۲ گانه اعمال شده است (شکل ۱۰).

سناریوی اول: این سناریو تحت عنوان «اصلاح ساختار حکمرانی منابع آب زیرزمینی در دشت مرند» مورد بررسی قرار گرفت و شامل تغییر در دو متغیر «افزایش تخصیص اعتبارات برای ایجاد تشکل» و «تمرکززدایی از ساختار مدیریت آب در دشت مرند» بود. میزان تغییر در هر یک از موارد فوق بر اساس شرایط ممکن در دشت مرند توسط ذینفعان تعیین شد. میزان تخصیص اعتبارات تا سه برابر مقادیر فعلی (با در نظر گرفتن تورم سالانه) و در خصوص تمرکززدایی نیز امتیاز کسب شده برای تمرکززدایی از عدد پایهٔ دو در سال ۱۴۰۰ به عدد شش افزایش یافت. نتایج شبیه‌سازی مدل نشان داد که در صورت اتخاذ این سناریو و با در نظر گرفتن توابع تأخیر زمانی برای اثرگذاری روی متغیرهای حالت، بیش‌ترین تأثیر ممکن را روی تعداد تعاونی‌های تولید روستایی (افزایش از دو واحد تعاونی تولید روستایی به ۱۲ واحد) داشته و کسری مخزن آبخوان دشت مرند نیز در سال ۱۴۱۰ به ۸۰۴ میلیون مترمکعب خواهد رسید. این میزان کسری مخزن در آبخوان دشت مرند نسبت به سناریوی تداوم شرایط موجود (با ۹۷۸ میلیون مترمکعب)، ۱۷۴ میلیون مترمکعب کاهش در کسری مخزن دشت مرند را نشان می‌دهد. هر چند در بازهٔ ۱۰ ساله هنوز کسری مخزن وجود دارد ولی از پایان سال ۱۴۰۸ شیب نمودار منفی شده مقدار عددی کسری مخزن از ۸۰۷/۲۰ میلیون

[1] Current condition

مترمکعب در سال ۱۴۰۸ به ۸۰۴ میلیون مترمکعب در سال ۱۴۱۰ کاهش پیدا کرده است (شکل ۱۱).

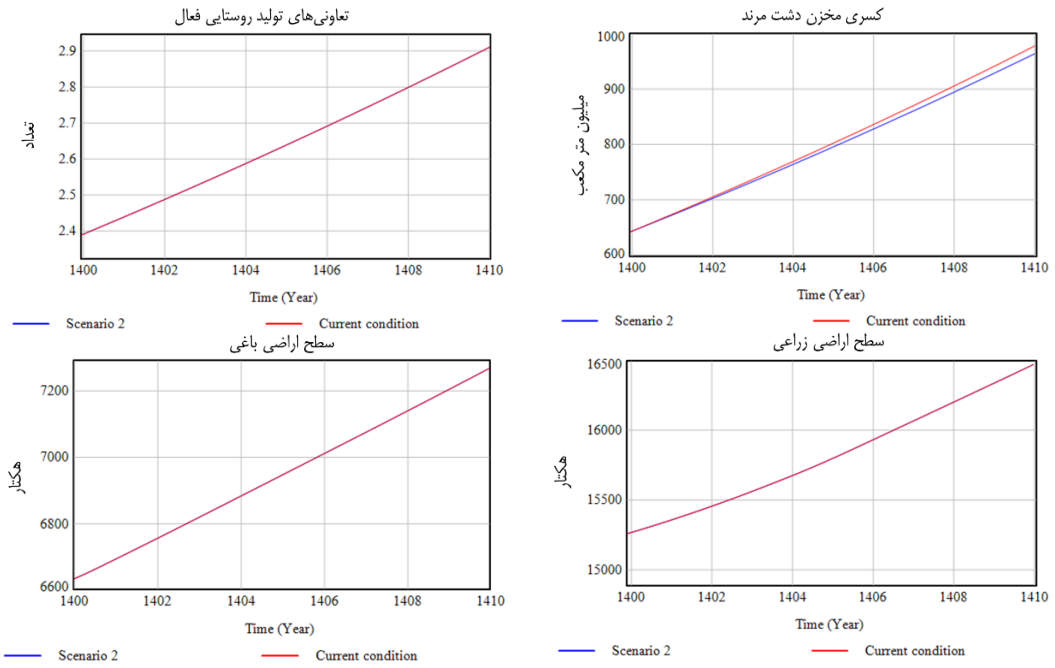


شکل ۱۱- شبیه‌سازی مدل دینامیک برای سناریوی اول

Figure 11- The Simulated dynamic model for Scenario 1

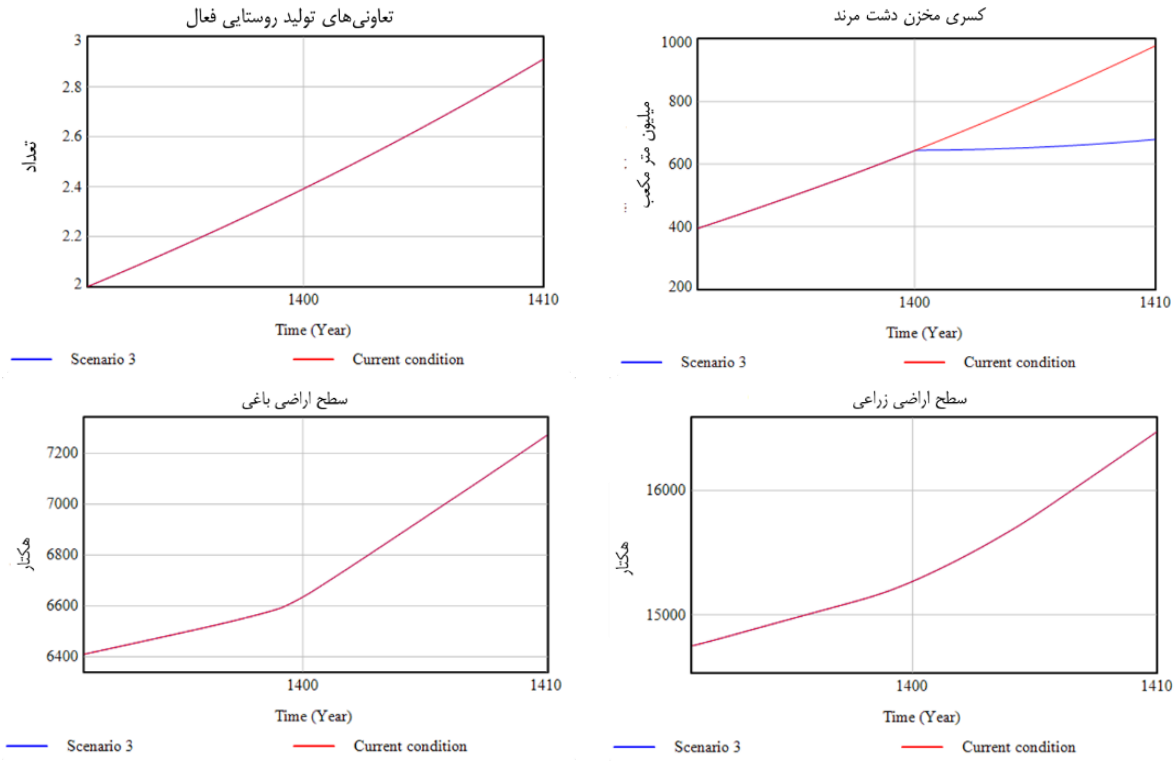
سناریوی دوم: سناریوی دوم تحت عنوان «افزایش راندمان آبیاری از طریق اجرای شبکه‌های آبیاری مدرن» در مدل ایجاد شده شبیه‌سازی شد. این سناریو از طریق افزایش سه برابری در نرخ اعتبارات تخصیص داده شده از سوی سازمان جهاد کشاورزی برای اجرای پروژه‌های آبیاری مدرن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که اجرای شبکه‌های آبیاری مدرن به‌عنوان یک سناریوی مجزا هیچ تأثیری روی سطح زیرکشت زراعی و باغی و ایجاد تشکل‌های تعاونی نداشته و دو نمودار شبیه‌سازی شده برای سناریوی دو و تداوم شرایط موجود نیز کاملاً بر روی هم مماس هستند. بر اساس این سناریو در پایان سال ۱۴۱۰ کسری مخزن آبخوان دشت مرند به ۹۶۴/۰۴ میلیون مترمکعب رسیده و نسبت به تداوم سناریوی صفر (تداوم شرایط موجود) تنها ۱۴ میلیون مترمکعب صرفه‌جویی ایجاد می‌کند (شکل ۱۲).

سناریوی سوم: سناریوی سوم «انتقال آب به آبخوان دشت مرند از رودخانه ارس» است که در مطالعات انجام شده توسط وزارت نیرو و شرکت آب‌منطقه‌ای آذربایجان شرقی برنامه‌ریزی برای انتقال ۳۰ میلیون مترمکعب در سال انجام شده است. در صورت اجرای این سناریو از سال ۱۴۰۱ شرایط پیش‌رو برای آبخوان دشت مرند شبیه‌سازی شد (شکل ۱۰). با توجه به این‌که اضافه شدن منبع آب جدید به سطح دشت مرند، با هدف کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی انجام می‌شود، این اقدام از زمان شروع بهره‌برداری سالانه ۳۰ میلیون مترمکعب از برداشت آب زیرزمینی را کاهش خواهد داد. اما کسری مخزن در ابتدای سال ۱۴۰۱ با ۶۷۳ میلیون مترمکعب، به ۶۷۹ میلیون مترمکعب در سال ۱۴۱۰ خواهد رسید و این روند افزایش تداوم خواهد داشت. این سناریو با اضافه کردن حجم آب به چرخهٔ هیدرولوژی دشت، موجب توقف نسبی در افزایش کسری مخزن دشت مرند می‌شود. اما در بلند مدت (بیش از ۱۰ سال) بیلان آب زیرزمینی دشت مرند به حالت تثبیت و پایداری نرسیده و نمودار کسری مخزن افزایشی خواهد شد. همچنین، بدون بسترسازی مشارکتی از طریق تشکل‌های مردمی، سطح کل زیرکشت نیز هیچ تغییری نسبت به حالت پایه نخواهد داشت (شکل ۱۳).



شکل ۱۲- شبیه‌سازی مدل دینامیک برای سناریوی دوم

Figure 12- The Simulated dynamic model for Scenario 2

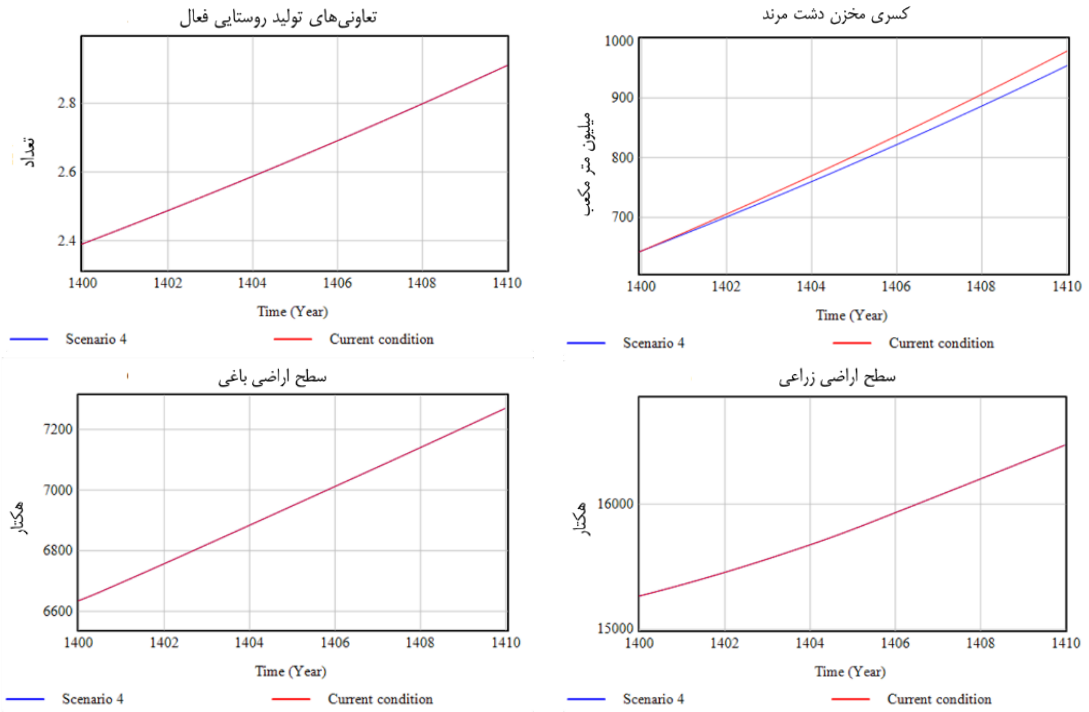


شکل ۱۳- شبیه‌سازی مدل دینامیک برای سناریوی سوم

Figure 13- The Simulated dynamic model for scenario 3

سناریوی چهارم: سناریوی چهارم «اصلاح الگوی کشت در سطح دشت مرند» است. بر اساس داده‌های مربوط به سطح کشت محصولات مختلف در سطح شهرستان مرند و سند ملی آب و نرم‌افزار NETWAT، در شرایط پایهٔ میانگین نیز خالص آبی محصولات زراعی ۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار و برای محصولات باغی نیز ۵۳۸۰ مترمکعب در هکتار برآورد شده است. در برنامهٔ اصلاح الگوی کشت نیاز آبی خالص محصولات زراعی به ۳۷۰۰ مترمکعب و محصولات باغی نیز به ۵۰۰۰

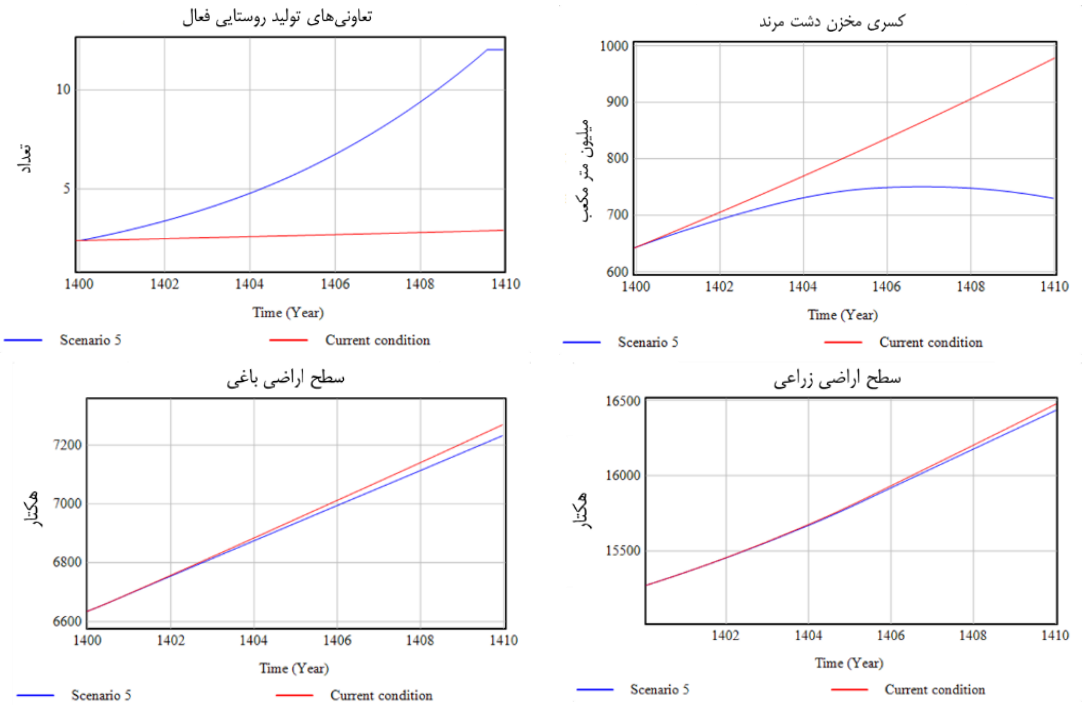
مترمکعب در سال کاهش می‌یابند. این تغییرات شامل توابع تأخیر نیز می‌شوند، چرا که امکان تغییر یک‌باره الگوی کشت در سطح کل دشت به لحاظ عملی امکان‌پذیر ناست. نتایج شبیه‌سازی برای این سناریو نشان داد که با اجرای سیاست اصلاح الگوی کشت در شرایط دشت مرند، کسری مخزن آبخوان در پایان سال ۱۴۱۰ به ۹۵۶/۲ میلیون مترمکعب خواهد رسید که نسبت به حالت پایه (تداوم شرایط موجود) ۲۲ میلیون مترمکعب کاهش در کسری مخزن آبخوان را نشان می‌دهد. سایر متغیرهای حالت مدل، از این سیاست تأثیرپذیری نداشته و نمودارهای مربوط به آن‌ها نیز کاملاً روی هم منطبق شده‌اند (شکل ۱۴).



شکل ١٤- شبیه‌سازی مدل دینامیک برای سناریوی چهارم

Figure 14- The Simulated dynamic model for Scenario 4

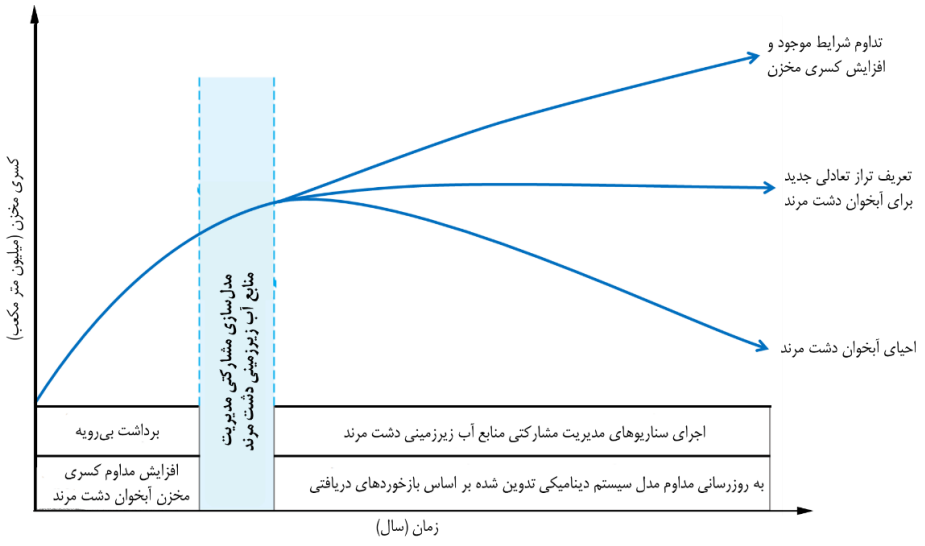
سناریوی پنجم: سناریوی پنجم به‌عنوان سناریوی منتخب، اتخاذ هم‌زمان سه راهبرد سیاستی شامل «اصلاح ساختار حکمرانی منابع آب زیرزمینی در دشت مرند»، «افزایش راندمان آبیاری از طریق اجرای شبکه‌های آبیاری مدرن» و «اصلاح الگوی کشت در سطح دشت مرند» بود. در این سناریو به‌طور هم‌زمان متغیرهای مربوط به هر یک از سه راهبرد سیاستی به همان مقدار سناریوهای اول، دوم و چهارم تغییر یافتند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی این سناریو به‌عنوان سناریوی مطلوب (با در نظر گرفتن امکان‌پذیری اجرایی) منتج به این شد که از ابتدای سال ۱۴۰۷ افزایش کسری مخزن آبخوان دشت مرند متوقف شده و نمودار شیب منفی پیدا کند. در ادامه آبخوان از نقطهٔ تثبیت با کسری مخزن ۷۵۰/۴۹ میلیون مترمکعب به سمت احیا حرکت کرده و کسری مخزن نیز کاهش می‌یابد. هم‌چنین، تعداد تعاونی‌های تولید روستایی نیز اویل سال ۱۴۱۰ به تعداد ۱۲ واحد خواهد رسید. سطح زیرکشت زراعی و باغی نیز در سال ۱۴۱۰ نسبت به حالت تداوم شرایط موجود، تغییر معناداری نخواهد یافت. به‌طوری که سطح زیرکشت باغات در این سناریو ۷۲۳۳ هکتار بوده و به میزان ۳۷ هکتار کم‌تر از حالت پایه خواهد بود. سطح زیرکشت محصولات زراعی نیز در سال ۱۴۱۰ برابر با ۱۶۴۳۲ هکتار بوده و ۴۲ هکتار از مقدار حالت پایه کم‌تر خواهد بود (شکل ۱۵).



شکل ۱۵- شبیه‌سازی مدل دینامیک برای سناریوی پنجم

Figure 15- The Simulated dynamic model for Scenario 5

سناریوهای طراحی شده برای شرایط دشت مرند به‌طور کلی سه دسته هستند: در دستهٔ اول افزایش کسری مخزن آبخوان دشت مرند تداوم داشته و شدت (شیب) متفاوتی نسبت به یک‌دیگر دارند. در دستهٔ دوم نقطهٔ تعادل جدیدی برای آبخوان تعریف شده و کسری مخزن در آن نقطه تقریباً تثبیت و متوقف می‌شود. در دستهٔ سوم ضمن تثبیت آبخوان، احیای مجدد نیز صورت گرفته و کسری مخزن روند کاهشی پیدا می‌کند (شکل ۱۶).



شکل ۱٦- دسته‌بندی سناریوهای قابل اجرا بر اساس اهداف سیاستی و شرایط آبخوان دشت مرند

Figure 16- Categorization of applicable scenarios based on policy targets and the Marand Plain aquifer conditions

بر اساس دسته‌بندی انجام شده، سناریوهای صفر، دو و چهار در دستهٔ اول تقسیم‌بندی قرار گرفته و هیچ یک از آن‌ها به‌صورت منفرد منجر به توقف روند افزایشی کسری مخزن آبخوان دشت مرند نمی‌شوند. سناریوی سوم با ایجاد یک تعادل جدید و موقتی، نقطهٔ کسری مخزن بین ۶۷۳ تا ۶۷۹ میلیون مترمکعب در دستهٔ دوم را شامل می‌شود. به‌عبارتی دولت با اتخاذ این سناریو می‌بایست این میزان کسری مخزن تجمعی در آبخوان را پذیرفته و با اتخاذ برخی سیاست‌های پیشگیرانه

جانبی، به‌دنبال حفظ تراز آبخوان در این نقطه باشد. این سناریو به دو دلیل ناپایدار است. انتقال آب از رودخانه ارس به دشت مرند که یکی از پروژه‌های مد نظر شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان‌شرقی است، به‌دلیل توسعهٔ پروژه‌های سدسازی ترکیه بر روی این رودخانه در آینده با چالش تأمین آب مواجه خواهد بود. از سوی دیگر با افزایش سطح زیرکشت اراضی دشت مرند و افزایش جمعیت شهری و روستایی و افزایش نیاز به آب در بخش شرب و صنعت، تراز آبخوان دشت مرند در یک بازهٔ ۲۰ ساله با شدت بیش‌تری اُفت خواهد داشت.

سناریوهای اول و پنجم دستهٔ سوم را شامل می‌شوند. اجرای این سناریوها ضمن تثبیت کسری مخزن آبخوان، منجر به احیای مجدد آبخوان نیز می‌شوند. در سناریوی اول کاهش کسری مخزن آب از سال ۱۴۰۸ و پس از نقطهٔ کسری مخزن ۸۰۷ میلیون مترمکعب شروع می‌شود. در این سناریو هر چند به لحاظ تئوریک افزایش کسری مخزن تثبیت شده و روند آن کاهشی نیز می‌شود، اما در شرایط دنیای واقعی تبعات آن قابل چشم‌پوشی نیست. شکل سه بعدی آبخوان دشت مرند به گونه‌ای است که در بخش شرقی دشت عمق آبخوان پایین بوده و ممکن است پس از رسیدن کسری مخزن به ۸۰۷ میلیون مترمکعب، تمامی چاه‌های کشاورزی این منطقه خشک شده و تبعات جبران‌ناپذیری برای نقاط روستایی و شهری شرق دشت مرند در پی داشته باشد.

سناریوی پنجم به‌عنوان سناریوی مطلوب و منتخب که در دستهٔ سوم تقسیم‌بندی فوق قرار دارد، نقطهٔ تثبیت و بازگشت کسری مخزن آب در نقطهٔ ۷۵۰ میلیون مترمکعب رخ داده و به لحاظ زمانی نیز یک سال قبل از سناریوی اول رخ خواهد داد. از سوی دیگر شیب منفی آن برای جبران کسری مخزن نیز بیش‌تر از سناریوی اول بوده و در سال ۱۴۱۰ مقدار کسری مخزن به ۷۲۹ میلیون مترمکعب کاهش خواهد یافت.

٤- نتیجه‌گیری

ناکارآمدی مدل‌های ذهنی و توصیفی مدیران و سیاست‌گذاران برای حل پیچیدگی‌های آب، منجر به اُفت سالانهٔ سطح تراز آبخوان‌ها و فرونشست دشت‌های کشور شده است. دشت مرند نیز از این قاعده مثتثنی نبوده و در سال ۱۴۰۱ با ۶۷۳ میلیون مترمکعب کسری مخزن مواجه بوده و اجرای پروژه‌های مختلف طرح احیا و تعادل‌بخشی آب‌های زیرزمینی برای تثبیت آبخوان دشت مرند با موفقیت چندانی همراه نبوده است.

برنامه‌های وزارت نیرو و جهاد کشاورزی در خصوص کنترل برداشت از آبخوان‌های کشور با تأکید بر ایجاد تغییر رفتار در مصارف آب کشاورزی از طریق اجرای برنامه‌های نظارتی و حفاظتی تدوین شده است. مصوبه ابلاغ شده توسط هیئت وزیران در خصوص آیین‌نامه صیانت از آبخوان (۱۴۰۱) مشتمل بر نُه ماده بوده و محوریت تمامی سیاست‌های اتخاذ شده این مصوبه، در دریافت مبالغی به‌عنوان آب‌ها و جرایم بر مازاد برداشت خلاصه شده است. هم‌چنین، نصب کنتورهای هوشمند، اعمال جرایم ریالی به ازای هر مترمکعب بر مازاد برداشت، اکیپ‌های گشت کنترل و بازرسی، خرید تضمینی محصولات کشاورزی راهبردی، برنامه‌های ترویجی متداول جهاد کشاورزی و غیره روی تغییر پیامدها و بروندادهای رفتاری کشاورزان متمرکز شده‌اند.

همان‌گونه که نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در مدل مشارکتی سیستم دینامیک پژوهش حاضر نشان داد، تعادل بخشی و احیای آبخوان بیش از تمام مؤلفه‌ها متأثر اصلاح ساختار تصمیم‌گیری در حکمرانی آب زیرزمینی در قالب نهادسازی (تشکل‌های توانمند کشاورزان) و تمرکززدایی از مدیریت دولتی آب بوده و سایر سیاست‌های اتخاذ شده نیز تنها در صورت حضور این دو مؤلفه اثربخش خواهند بود.

سیاست‌های اتخاذ شده توسط دولت (سیاست‌های کنترلی و حفاظتی)، بدون فراهم‌سازی بستر تصمیم‌سازی واقعی و غیر صوری برای جامعهٔ محلی (تغییر در ساختار حکمرانی منابع آب)؛ و سیاست‌های تشویقی برای اجرای شبکه‌های آبیاری مدرن بدون آموزش و توانمندسازی کشاورزان در قالب تشکل‌ها، منتج به کاهش کسری مخازن و پایداری بیلان منابع آب زیرزمینی نخواهد شد. از سوی دیگر مواجهه مدیران ارشد با بازخوردهای منفی سیاست‌های اتخاذ شده، منجر به اعمال تغییر و تجدید نظرهای مداوم در سیاست‌ها شده است. برای مثال با توجه به شکست طرح‌های نوین آبیاری در خصوص کمک به تعادل‌بخشی آبخوان‌ها، مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی (۱۴۰۱) پیشنهاد حذف اعتبارات مربوط به ایجاد شبکه‌های آبیاری مدرن را در بودجه آب سال ۱۴۰۲ ارائه داده است.

نتایج نشان می‌دهد که فقدان دیدگاه سیستمی در سیاست‌گذاری منجر به اتخاذ تصمیمات ناپایدار و فاقد پشتوانه اجرایی می‌شود. برای خروج از چرخهٔ معیوب سیاست‌گذاری‌های ناکارآمد و تصمیمات کوتاه مدت و ناپایدار در فضای مدیریت و حکمرانی آب زیرزمینی کشور، بایستی اصلاحاتی بنیادین در ساختار حکمرانی و مدیریت آب زیرزمینی ایجاد شده و فرصت‌های کاملاً برابری برای جوامع محلی برای حضور مؤثر در فرآیند تصمیم‌سازی فراهم شود. هم‌چنین، اگر فرآیند اجرای قوانین و تصمیمات نیز از مجرای نهادهای توانمند جامعه محلی انجام شود، ضمانت اجرایی بیش‌تری خواهند داشت. اصلاح رفتار مصرفی کشاورزان، پیامد و خروجی تغییر ساختار و

فرآیندهای مدیریت و حکمرانی آب زیرزمینی است. لذا، از ملزومات اصلی اجرای سناریوی پنجم (به‌عنوان سناریوی منتخب)، رسمیت بخشی به نقش کشاورزان در یک بستر قانونی تحت عناوینی مانند پارلمان آب دشت مرند، هیأت امنای آب دشت مرند، تعاونی بهره‌برداران آب دشت، انجمن دشت‌بانان و سایر عناوین مشابه به همراه تفویض اختیارات لازم و حق تصمیم‌گیری در خصوص برنامه‌ریزی و تصویب سالانه برداشت از منابع آب دشت و نظارت بر آن است. هم‌چنین، تخصیص اعتبارات برای انجام شبکه‌های آبیاری مدرن و اصلاح الگوی کشت نیز بایستی با تصویب و تأیید هیئت امنای دشت مرند انجام شود. این اقدام موجب خواهد شد اجرای پروژه‌ها و نحوهٔ مصارف اعتبارات با پایش و ارزشیابی جامعه محلی همراه شده و از سوی دیگر موجب تثبیت و پایداری این تشکل‌ها نیز خواهد شد. شفافیت و پاسخگویی بخش دولتی نسبت به مسائل آب نیز از این رهگذر تحقق خواهد یافت. در این خصوص استفاده از تجارب مشابه موفق در سایر کشورها برای تبیین فرآیند اجرایی چنین تصمیماتی، موثر خواهد بود.

سپاسگزاری

این پژوهش با همکاری کشاورزان شهرستان مرند، کارشناسان و مدیران شرکت آب منطقه‌ای، جهاد کشاورزی و تعاون روستایی آذربایجان شرقی و فرمانداری شهرستان مرند انجام شد. از همکاری تمامی این عزیزان کمال تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

امیر عیسی‌نژاد: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخهٔ اولیهٔ مقاله؛ **حسین راحلی:** مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله؛ **شاپور ظریفیان:** راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ **سعید پورمعصومی لنگرودی:** انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، مشاوره، بازبینی متن مقاله

منابع

احمدی، علیرضا (۱۴۰۰). اثر افزایش راندمان کاربری آب بر بهبود وضعیت منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل WEAP در دشت قزوین. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۱)، ۵۳-۶۲. doi: 10.22098/mmws.2022.9333.1034

دینی، مهدی، و محمدی آیدینلو، ابراهیم (۱۳۹۷). پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی دشت مرند بر اساس پتانسیل‌های موجود. *هیدروژئومورفولوژی*، ۵(۱۵)، ۱۷-۳۵. dor: 20.1001.1.23833254.1397.5.15.2.8

شرکت مدیریت منابع آب ایران (۱۴۰۰). گزارش منابع آب زیرزمینی دشت‌های کشور. وزارت نیرو، دفتر اطلاعات و داده‌های آب کشور، برخط.

شیخا بگم قلعه، سیمین، بابازاده، حسین، رضایی، حسین، و سرایی تبریزی، مهدی (۱۴۰۲). مدل‌سازی عددی و تحلیل روند وضعیت کمی آبخوان مهاباد. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۲)، ۱-۱۷. doi: 10.22098/mmws.2022.11275.1113

مقدم منش، مهدی، و پورمعصومی لنگرودی، سعید (۱۳۹۹). تراژدی منابع مشترک در استفاده از منابع آب‌های زیرزمینی در بخش کشاورزی. *مطالعات مدیریت راهبردی*، ۱۱(۴۲)، ۷۷-۹۸. doi: 20.1001.1.22286853.1399.11.42.6.7

محمدجانی، اسماعیل، و یزدانیان، نازنین (۱۳۹۳). تحلیل وضعیت بحران آب در کشور و الزامات مدیریت آن. *روند (روند پژوهش‌های اقتصادی)*. ۲۱(۶۶-۶۵)، ۱۴۴-۱۷۷. https://www.sid.ir/paper/202249/fa

مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی. (۱۴۰۱). بررسی نقش سامانه‌های نوین آبیاری در جبران کسری آبخوان های کشور طی دهه اخیر: انتظارات، اعتبارات، اثربخشی.

مهندسین مشاور سامان آبراه (۱۳۹۹). گزارش مطالعاتی وضعیت آب‌های زیرزمینی محدوده مطالعاتی مرند؛ کارفرما: شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان‌شرقی، شرکت مدیرین منابع آب ایران، وزارت نیرو.

موسوی، سیدرتضیم، بابازاده، حسین، سرائی تبریزی، مهدی، و خسروجردی، امیر (۱۴۰۲). ارزیابی راهکارهای تأمین نیاز محیط زیستی دریاچه ارومیه با استفاده از مدل شبیه‌سازی MODSIMو روش تحلیل سلسله مراتبی(AHP). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۱۲۰-۱۳۴. doi 10.22098/mmws.2022.11521.1143

References

Ahmadi, A. (2022). The effect of increasing water use efficiency on improving the status of groundwater resources using WEAP model in Qazvin Plain. *Water and Soil Management and Modelling*, *2*(1), 53-62. doi: 10.22098/mmws.2022.9333.1034. [In Persian]

Bai, Y., Langarudi, S.P., & Fernald, A.G. (2021). System dynamics modeling for evaluating regional hydrologic and economic effects of irrigation efficiency policy. *Hydrology*, *8*(2), 61. doi:10.3390/hydrology8020061.

Kanti Bala, B., Mohamed Arshad , F., & Mohd Noh, K. (2017). System Dynamics, Modelling

and Simulation. Publisher Springer Singapore. doi:10.1007/978-981-10-2045-2.

Canava, R.Y. (2010). Scenario modelling for managers: A system dynamics approach. Proceedings of the 45th Annual Conference of the ORSNZ, Auckland, New Zealand Pp. 219-228.

Cuadrado-Quesada, G. (2022). Introduction. In: Governing Groundwater . Water Governance - Concepts, Methods, and Practice. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-030-92778-3_1

Dini, M., & Mohammadi Aydinlo, A. (2018). The Zoning of groundwater level in the Marand Plain based on the existing potential. *Hydrogeomorphology*, *5*(15), 17-35. [In Persian]

Famiglietti, J.S. (2014). The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, *4*, 945–948.

FAO. (2017). The Future of Food and Agriculture: Trends and Challenges. Rome, FAO.

Groundwater Governance Project. (2016). Global Diagnostic on Groundwater Governance. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Gupta, J., & Pahl-Wostl, C. (2013). Global water governance in the context of global and multilevel governance: its need, form, and challenges. *Ecology and Society*, *18*(4), 10. doi:10.5751/ES-05952-180453

Gutschmidt, A., Lantow, B., Hellmanzik, B., Ramforth, B., Wiese, M., & Martins, E. (2023). Participatory modeling from a stakeholder perspective: On the influence of collaboration and revisions on psychological ownership and perceived model quality. *Software and Systems Modeling*, *22*, 13–29. doi:10.1007/s10270-022-01036-7

Global Water Partnership (2017). Groundwater Management Plans (C4.03). GWP. www.gwp.org/en/learn/iwrmtoolbox/ManagementInstruments/Planning_for_IWRM/Groundwater_management_plans/. (Accessed on 24 May 2021).

Iran Water Resources Management Company (2022). Report on the groundwater resources of the country's plains. Ministry of Energy, Water Information and Data Office, online. [In Persian]

Islamic Parliament Research Center Of The Islamic Republic Of Iran (2023). Investigating the role of modern irrigation systems in compensating the deficit of the country's aquifers during the last decade: expectations, credits, effectiveness. Report serial No: 25018724[In Persian]

Kemper, K. (2007). Instruments and institutions for groundwater management. In: Giordano M, Villholth KG (eds) The agricultural groundwater revolution: opportunities and threats to development. In The Agricultural Groundwater Revolution. Opportunities and Threats to Development, Pp. 153–172.

Lane, D.C., Munro, E., & Husemann, E. (2016). Blending systems thinking approaches for organizational analysis: Reviewing child protection in England. *European Journal of Operational Research*, *251*(2), 613–623. doi:10.1016/j.ejor.2015.10.041

Pourmasoumi Langarudi, S., Maxwell, C.M., Bai, Y., Hanson, A., & Fernald, A. (2019). Does socioeconomic feedback matter for water models?. *Ecological Economics*, 159, 35–45. doi:10.1016/j.ecolecon.2019.01.009

Mirchi, A., & Watkins Jr, D. (2013). A systems approach to holistic total maximum daily load policy: case of Lake Allegan, Michigan. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *139*(5), 544–553. doi:10.1061/(ASCE) WR.1943-5452.0000292

Mohammad Jani, I., & Yazdanian, N. (2014). The analysis of water crisis conjecture in iran and the exigent measures for its management. *Trend (Trend of Economic Research*), *21*(65-66), 117-144. https://www.sid.ir/paper/202249/en [In Persian]

Moghadam Manesh, M., & Pourmasoumi Langarudi, S. (2020). Tragedy of the commons in using groundwater resources in agriculture sector. *Journal of Strategic Management Studies*, *11*(42), 77-98. dor: 20.1001.1.22286853.1399.11.42.6.7. [In Persian]

Mousavi, S.M., Babazadeh, H., Sarai-Tabrizi, M., & Khosrojerdi, A. (2023). Evaluation of solutions to supply part of the environmental requirements of Lake Urmia using MODSIM and analytic hierarchy process (AHP). *Water and Soil Management and Modelling*, *3*(3), 120-134. doi: 10.22098/mmws.2022.11521.1143 [In Persian]

Pahl-Wostl, C. (2015). Water Governance in the Face of Global Change. From Understanding to Transformation. Published by Springer.

Pluchinotta, I., Pagano, A., Vilcan, T., Ahilan, S., Kapetas, L., Maskrey, S., Krivtsov, V., Thorne, C., & O'Donnell, E. (2021). A participatory system dynamics model to investigate sustainable urban water management in Ebbsfleet Garden City. *Sustainable Cities and Society*, *67*, 102709. doi:10.1016/j.scs.2021.102709

Quimby, B., & Beresford, M. (2023). Participatory Modeling: A methodology for engaging stakeholder knowledge and participation in social science research. *Field Methods*, *35*(1), 73-82. doi:10.1177/1525822X221076986.

Saman Abraeh Consulting Engineers (2019). Study report on the status of underground water in the Marand study area; Client: East Azarbaijan Regional Water Company, Iran Water Resources Management Company, Ministry of Energy. [In Persian]

Sheikha Bagem Ghaleh, S., Babazadeh, H., Rezaei, H., & Sarai Tabrizi, M. (2023). Numerical modeling and trend analysis of Mahabad aquifer quantitative status. *Water and Soil Management and Modelling*, *3*(2), 1-17. doi: 10.22098/mmws.2022.11275.1113. [In Persian]

Sterman, J. (2000). Business dynamics, system thinking and modeling for a complex world. Published by McGraw-Hill Education.

UN Environment. (2019). Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People. Cambridge University Press.

UN Water. (2022). The United Nations World Water Development Report. GROUNDWATER Making the invisible visible. Unesco.

UNEP (United Nations Environmental Programme). (2019). Global Environment Outlook Geo 6: Healthy Planet, Healthy People. Cambridge University Press.

WWAP (World Water Assessment Program). (2019). The United Nations World Water Development Report: Leaving No One Behind. Paris, UNESCO.

World Economic Forum. (2020). Global Competitiveness Report Special Edition: How Countries are Performing on the Road to Recovery. https://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2020.pdf