University of Tehran Press

ECO HYDROLOGY

Home Page: https://ije.ut.ac.ir

Online ISSN: 2423-6101

Dynamic Analysis of Energy Export and Helmand Rights Scenarios in Water Resources Management of Sistan Region

Zahra Ghaffari Moghadam,[1]✉ **Ali Sardarshahraki,**[2] **Neda Aliahmadi**[3]

1. Assistant Professor Department of Agricultural Economics, Agriculture Institute, Research Institute of zabol, Zabol, Iran; Email: zahraghafari@uoz.ac.ir
2. Associate Professor of Agricultural Economics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran; Emial: a.s.shahraki@eco.usb.ac.ir
3. PhD in Agricultural Economics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran; Email: ahmadi_15877@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received April 09, 2025
Received in revised form May 08, 2025
Accepted June 11, 2025
Available online June 22, 2025

Keywords:
Water-Food-Energy Nexus,
Dynamic System,
Resource Security,
Policy,
Sistan.

ABSTRACT

Research Topic: The present study models the dynamics of the water resources management system in the Sistan region, focusing on the water-food-energy nexus.

Objective: a water, food, energy system dynamic model simulation was developed, taking into account the results of Sensitivity analysis, to develop sustainable water resources policy in the form of a water demand, water supply, food resource management, and energy management.

Method: The initial modeling and simulation were conducted using Vensim DSS software. The required data included surface water inflow, water delivered to the domestic and agricultural sectors, the number of agricultural wells, cultivated area and crop yields, production levels of livestock, poultry, and fisheries, as well as energy carriers for the period 2006-2036. After applying each of the water demand and supply management policies and food and energy resource management policies separately to the model, the best scenarios were selected and implemented in combination. The results were then compared with one another.

Results: According to the results of the simulation model, in the scenario of electricity export in exchange for receiving water rights, water security increased by 4,920 million cubic meters, and consequently, energy security also increased by 297,504 kilowatt-hours. Moreover, implementing the scenario of eliminating water-intensive crops such as wheat and barley and replacing them with alternative crops led to an improvement in water security, and energy security increased by 692,399 kilowatt-hours compared to the base year. However, food security declined due to the complete removal of these crops from the region. Under the scenario of enforcing water rights by the neighboring country (Afghanistan), water security increased by 9,840 million cubic meters, which showed a significantly higher growth compared to the base scenario. In the scenario of reducing large livestock by 10% and increasing small livestock by 10%, water security showed no increase (remained at zero).

Conclusions: Analysis of the results and data comparison trends revealed that the system dynamics modeling in the Sistan region indicates an unfavorable outlook for water resources and food production over the 30-year period. The simultaneous implementation of policies including energy export, enforcement of water rights, crop pattern reform, and livestock optimization can improve the security of water, food, and energy resources and contribute to achieving regional sustainability. These strategies, within the framework of the water-food-energy nexus approach, play a key role in integrated resource management.

Cite this article: Ghaffari Moghadam, Z., Sardarshahraki, A., Aliahmadi, N. (2024). Dynamic Analysis of Energy Export and Helmand Rights Scenarios in Water Resources Management of Sistan Region. *ECOHYDROLOGY*, 12(2), 695-719. http//doi.org/10.22059/IJE.2025.389977.1862

© Zahra Ghaffari Moghadam, Ali Sardarshahraki, Neda Aliahmadi.
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/IJE.2025.389977.1862

Background and Objective
With the increasing demand for water, energy, and food in the coming decades, pressure on these three sectors has intensified, highlighting the importance of a systemic approach to the interconnected issues of water-energy-food. In recent years, the water-energy-food nexus approach has been increasingly recognized globally as a means to facilitate policymaking in this area. Accordingly, the main objective of this study is to model the dynamic system of water resource management based on the water-food-energy nexus and to explore sustainable water resource management policies aimed at resource security.

Materials and Methods
To achieve the study's objectives, after simulating the water, food, and energy system dynamics model, and considering the results of sensitivity analysis, the development of sustainable water resource policies will be formulated in four strategies: water demand, water supply, food resource management, and energy resource management. The initial modeling and simulation will be conducted using Vensim DSS software. Required data include surface water inflows during the specified period, water delivered to drinking and agricultural sectors, the number of agricultural wells, cultivated land area, agricultural crop yields, livestock, poultry, and fisheries production, and energy carriers, which will be collected from relevant organizations. The time horizon for this research spans a 30-year period from 2006 to 2036.

Findings
The model calibration results indicate that the coefficient of determination between simulated and observed data for all variables is above 0.80, and all values meet the Nash-Sutcliffe criterion with values greater than 0.50. Additionally, the root mean square error (RMSE) is less than 0.30, providing a solid basis for validating the model and its predictions. Validation results also show that the model simulation closely aligns with observed data. Applying the scenario of exporting wind turbine-generated electricity to Afghanistan and receiving water rights will increase water security from -4336.58 million cubic meters to 4920 million cubic meters. Furthermore, by 2036, food security will significantly decrease from -620.16 tons to -3355.53 tons, and energy security will rise by 297,504 kilowatts due to wind turbines. Under the second scenario, food security in 2036 will decrease to -3396.18 tons per hectare compared to the baseline year, and water security in 2036 will reach zero, indicating that controlling water-intensive crops in the region will significantly contribute to water security. Energy security in 2036 will increase to 692,399 kilowatts. In the third scenario, water security will experience much greater growth compared to the baseline. Additionally, it is predicted that by 2036, food security will slightly increase from -3355.53 tons to -1677.73 tons. With the implementation of the fourth scenario, water security will rise to zero, and the region will no longer face issues regarding water supply in various sectors. This scenario has shown less growth in water, food, and energy security compared to other scenarios.

Conclusion
A review of the results and data trends over the 30-year period indicates that the Sistan region will face unfavorable conditions regarding water resources and food production. Resource management in the Sistan region requires a shift in organizational, agricultural, and developmental beliefs and values. Developing wind turbine systems to meet energy demands, securing water rights from the neighboring country, proper and optimized management in livestock units, and crop pattern adjustments can help stabilize the current situation. The results of policy implementation show that the water rights scenario, compared to other scenarios, offers a suitable solution for achieving sustainability in the region.

Author Contributions
Author 1: Conceptualization; data curation; formal analysis; methodology; software; writing, review and editing.

Author 2: Conceptualization; data curation; formal analysis; methodology; project administration; writing, review and editing.

Author 3: software, formal analysis

Ethical considerations

The authors avoided from data fabrication and falsification.

Funding

This article was prepared with the financial support Research Institute of Zabol in the form of a research project with the code PR-RIOZ-1402-0702-1.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

مجله اکوهیدرولوژی
انتشارات دانشگاه تهران
شاپای الکترونیکی: ۶۱۰۱-۲۴۲۳
سایت نشریه: https://ije.ut.ac.ir

تحلیل دینامیک سناریوهای صادرات انرژی و حقابهٔ هیرمند در مدیریت منابع آب منطقهٔ سیستان

زهرا غفاری مقدم،[۱*] علی سردارشهرکی،[۲] ندا علی‌احمدی[۳]

۱. استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، پژوهشکده کشاورزی، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: zahraghafari@uoz.ac.ir
۲. دانشیار اقتصاد کشاورزی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. رایانامه: a.s.shahraki@eco.usb.ac.ir
۳. دکتری اقتصاد کشاورزی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. رایانامه: ahmadi_15877@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:
همبست آب- غذا- انرژی،
سیستم پویا،
امنیت منابع،
سیاست،
سیستان

چکیده

موضوع: مطالعهٔ حاضر به مدل‌سازی پویایی سیستم مدیریت منابع آب در منطقهٔ سیستان با تمرکز بر همبست آب- غذا- انرژی پرداخته است.

هدف: شبیه‌سازی مدل دینامیک سیستم آب، غذا، انرژی، با در نظر گرفتن نتایج تحلیل حساسیت، توسعهٔ سیاست‌گذاری پایداری منابع آب در قالب چهار راهبرد تقاضای آب، عرضهٔ آب، مدیریت منابع غذا و مدیریت منابع انرژی.

روش تحقیق: مدل‌سازی و شبیه‌سازی اولیه به کمک نرم‌افزار ونسیم (Vensim DSS) انجام شد. اطلاعات مورد نیاز شامل میزان آب سطحی ورودی، آب تحویلی به بخش شرب و کشاورزی، تعداد چاهک‌های کشاورزی، سطح زیرکشت و عملکرد محصولات کشاورزی، میزان تولید محصولات دامی و طیور و شیلات و حامل‌های انرژی برای دورهٔ ۱۳۸۵- ۱۴۱۵ است. بعد از اعمال هرکدام از سیاست‌های مدیریت تقاضا و عرضهٔ آب و مدیریت منابع غذا و انرژی به‌صورت مجزا بر روی مدل از بین آن‌ها بهترین سناریوها انتخاب و به‌صورت ترکیبی اعمال شد و نتایج با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت.

یافته‌ها: بر طبق نتایج مدل شبیه‌سازی انجام‌شده، در سناریو صادرات انرژی برق به‌ازای دریافت حقابهٔ امنیت آب به میزان ۴۹۲۰ میلیون مترمکعب افزایش و به‌دنبال آن امنیت انرژی نیز به میزان ۲۹۷۵۰۴ کیلووات افزایش یافت. همچنین با اعمال سناریو حذف محصولات آب‌بر چون گندم و جو جایگزینی آن با دیگر محصولات سبب بالا رفتن امنیت آب می‌شود و امنیت انرژی به میزان ۶۹۲۳۹۹ کیلووات در ساعت نسبت به سال پایه افزایش یافت، ولی امنیت غذا به‌دلیل حذف کامل این محصولات در منطقه کاهش یافت. با اعمال سیاست رعایت حقابه از جانب کشور همسایه (افغانستان) امنیت آب به میزان ۹۸۴۰ میلیون متر مکعب افزایش یافت که این سناریو نسبت به سناریوی پایه، رشد خیلی بیشتری داشته است. در سناریو سیاست کاهش ۱۰ درصدی دام بزرگ و افزایش ۱۰ درصدی دام کوچک امنیت آب به صفر افزایش یافته است.

نتیجه‌گیری: بررسی نتایج و روند مقایسهٔ داده‌ها نشان داد. نتایج مدل‌سازی سیستم پویا در منطقهٔ سیستان نشان داد طی دورهٔ ۳۰ ساله، منطقهٔ سیستان درزمینهٔ منابع آب و تولید غذا وضعیت نامطلوبی خواهد داشت و اجرای هم‌زمان سیاست‌های صادرات انرژی، رعایت حقابه، اصلاح الگوی کشت و بهینه‌سازی دامداری می‌تواند به بهبود امنیت منابع آب، غذا و انرژی و دستیابی به پایداری منطقه‌ای منجر شود. این راهبردها در قالب رویکرد همبست آب-غذا-انرژی نقش کلیدی در مدیریت یکپارچهٔ منابع ایفا می‌کنند.

استناد: غفاری مقدم، زهرا؛ سردار شهرکی، علی؛ علی‌احمدی، ندا. تحلیل دینامیک سناریوهای صادرات انرژی و حقابهٔ هیرمند در مدیریت منابع آب منطقهٔ سیستان. *مجله اکوهیدرولوژی*، ۱۲(۲)، ۶۹۵-۷۱۹.
http//doi.org/10.22059/IJE.2025.389977.1862

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.
© زهرا غفاری مقدم، علی سردار شهرکی، ندا علی‌احمدی.

مقدمه

آب، انرژی و غذا منابع اساسی برای تأمین نیازهای روزانه و توسعهٔ پایدار محسوب می‌شوند. رشد جمعیت، شهرنشینی و افزایش تقاضا در این حوزه‌ها، فشار زیادی بر منابع طبیعی وارد کرده که در صورت مدیریت نادرست، منجر به بهره‌برداری بی‌رویه خواهد شد (لی و ما،[1] ۲۰۲۰). در بخش کشاورزی، بیش از یک‌چهارم انرژی مصرفی جهان به تولید غذا اختصاص می‌یابد که این امر لزوم توسعهٔ کشاورزی با مصرف کمتر آب و هزینه‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی کمتر را در آینده تقویت می‌کند (دلبرقی، مورچی و گالو،[2] ۲۰۲۰).

شناسایی و ارزیابی دقیق ارتباط پیچیدهٔ میان آب، انرژی و غذا در کشورهای درحال‌توسعه، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک خاورمیانه که با بحران کم‌آبی و افزایش فزایندهٔ نیازهای غذایی و انرژی روبه‌رو هستند، اهمیت ویژه‌ای دارد (بنی‌حبیب و غفوری خرانق، ۱۳۹۸). ایران به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین کشورهای خاورمیانه، در اقلیم خشک و نیمه‌خشک واقع شده و توزیع نامتوازن بارندگی و کمبود منابع آب، از چالش‌های اساسی برای دستیابی به امنیت غذایی در این کشور محسوب می‌شود (بنی‌حبیب و غفوری خرانق، ۱۳۹۸).

در چنین شرایطی، تمرکز بر افزایش تولید و خودکفایی در محصولات کشاورزی، همراه با اجرای سیاست‌های افزایش جمعیت و توسعهٔ شهرنشینی، نیاز به بازنگری در شیوه‌های مدیریتی گذشته را ضروری ساخته است. استفاده از رویکردهای نوین همچون همبست آب، انرژی و غذا (WEF) می‌تواند در این مسیر مؤثر واقع شود. رشد جمعیت و رشد اقتصادی موجب افزایش تقاضا برای این منابع شده و با توجه به محدودیت ذاتی منابع، ضرورت استفادهٔ بهینه از آن‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. منابع آب، انرژی و غذا به‌طور قابل توجهی به یکدیگر وابسته‌اند و تغییر در هر بخش بر سایر بخش‌ها اثرگذار است (بنی‌حبیب و غفوری خرانق، ۱۳۹۸؛ کلاه‌زر مقدم و کتابچی، ۱۳۹۹). یکی از روش‌های مناسب برای تحلیل این پیوندهای پیچیده، روش پویایی سیستم‌ها (SD) است که برای نخستین بار توسط جی. دبلیو. فارستر[3] برای درک مسائل استراتژیک در سیستم‌های پیچیدهٔ پویا ارائه شد (فرانسیسکو[4] و همکاران، ۲۰۲۳). پویایی سیستم با ترسیم حلقه های بازخورد و روابط دینامیکی غیرخطی، ابزاری مؤثر برای تحلیل سیستم های پیچیدهٔ اجتماعی و اقتصادی به شمار می‌رود و می‌تواند بینش عمیقی دربارهٔ ساختار و رفتار سیستم‌ها ارائه کند.

بیشتر مطالعات موجود دربارهٔ پیوندهای منابع، عمدتاً به ارتباط‌های دوتایی مانند آب–غذا (WF) یا آب–انرژی (WE) پرداخته‌اند. مطالعات زیادی در حوزهٔ آب–غذا (WF) انجام شده است (یانگ[5] و همکاران، ۲۰۰۳؛ ژائو، لیو و دنگ،[6] ۲۰۰۵؛ الگافی،[7] ۲۰۱۴؛ دو[8] و همکاران، ۲۰۱۵)، درحالی‌که مطالعات آب–انرژی (WE) (خیرالدین و همکاران، ۲۰۱۸؛ پسیتی، لومباردی و فدریکی،[9] ۲۰۱۵؛ کابرا[10] و همکاران، ۲۰۱۰؛ پلاپلی،[11] ۲۰۱۲) و انرژی–غذا (FE) (سماواتیان، رفیعی و مبلی، ۱۳۹۰) محدودترند. همچنین تعداد معدودی مطالعات جامع دربارهٔ همبست آب–غذا–انرژی (WFE) با رویکرد کیفی، کمی و مدل‌سازی وجود دارد.

صفویان و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از دیدگاه پیوند آب–انرژی–غذا و رویکرد پویایی سیستم، مدیریت منابع آب در حوزهٔ آبریز دریاچهٔ مهارلو را بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که تداوم وضعیت موجود، سطح آب‌های زیرزمینی را به مرحلهٔ بحرانی خواهد رساند و تهدیدی جدی برای ادامهٔ حیات منطقه به شمار می‌رود. شاه‌محمدی و همکاران (۱۴۰۲) با به‌کارگیری روش مدل ذهنی و پویایی همبست آب–انرژی–غذا، وضعیت منابع طبیعی در دشت ورامین را تحلیل کردند. یافته‌ها نشان داد که این منطقه با

1. Li & Ma
2. Del Borghi, Moreschi & Gallo
3. J. W. Forrester
4. Francisco
5. Yang
6. Zhao, Liu & Deng
7. El-Gafy
8. Du
9. Pacetti, Lombardi & Federici
10. Cabrera
11. Plappally

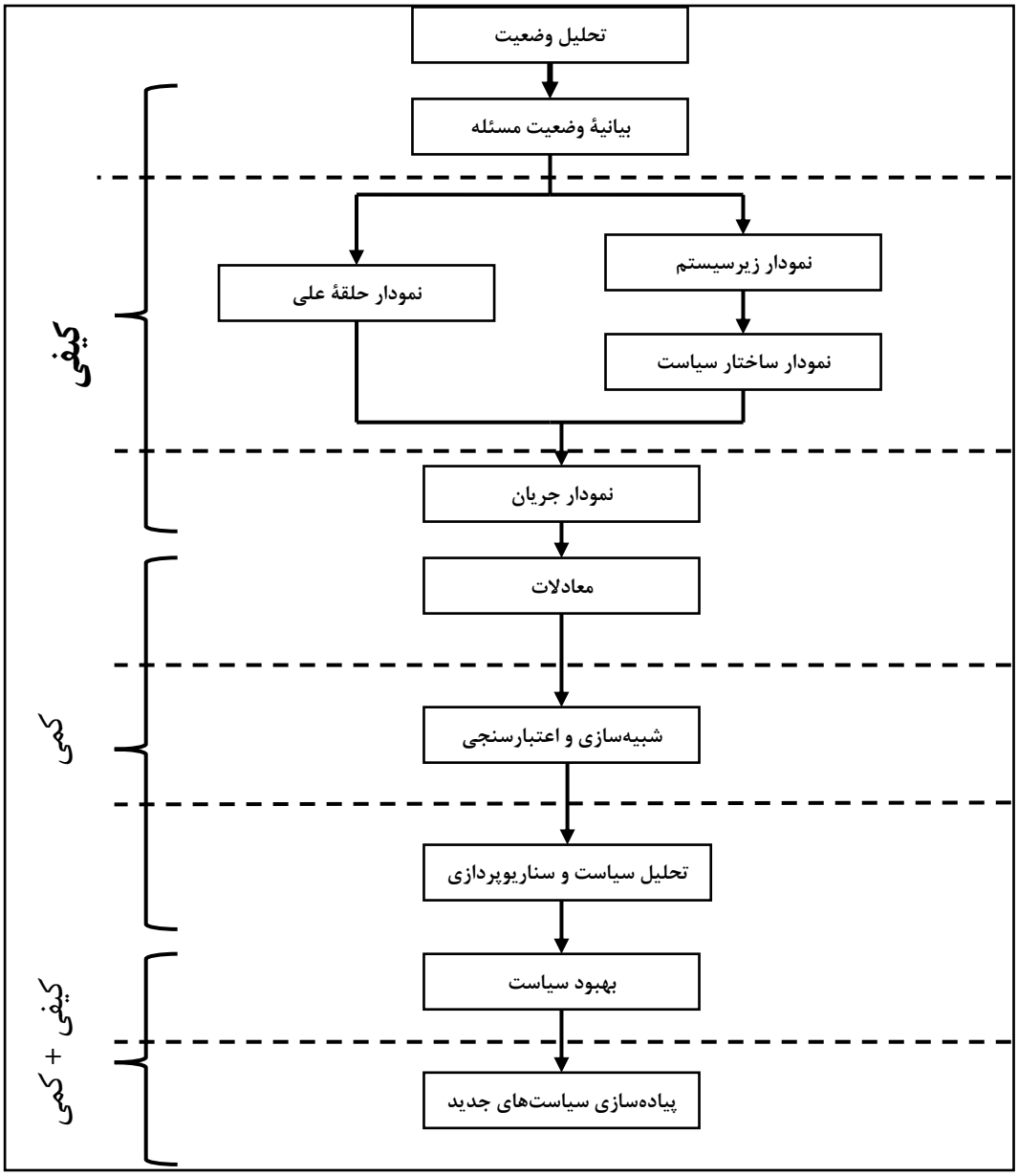
چالش‌های جدی درزمینهٔ منابع آب و تولید غذا مواجه است و مدیریت آن مستلزم تغییر در باورها و ارزش‌های سازمانی و کشاورزی است. سیمپسون و جویت[1] (۲۰۱۹) در راستای اهداف توسعهٔ پایدار، امنیت منابع آب، غذا و انرژی را از منظر رویکرد Nexus ارزیابی کرده و یک چارچوب مفهومی در این حوزه پیشنهاد دادند. میرزایی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی ارتباط منابع آب زیرزمینی با غذا و انرژی در ایران پرداختند و نشان دادند که افزایش تولیدات کشاورزی پایدار در کشور عمدتاً با بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی و انرژی ارزان تحقق یافته است. اسچول[2] و همکاران (۲۰۲۰) با به‌کارگیری مدل SWAT در چارچوب Nexus WFE، تأثیر رشد جمعیت، رشد اقتصادی و تغییرات اقلیمی بر مدیریت منابع آب را بررسی کردند. آنان تأکید کردند که مدل‌های غیردینامیکی از تحلیل بازخوردهای زمانی میان عناصر سیستم غافل مانده‌اند. کارنیب و علامه[3] (۲۰۲۰) یک چارچوب فناوری‌محور برای ارزیابی کمی پیوند آب–انرژی–غذا طراحی کرده و فرصت‌ها و ملاحظات سیاستی WFE را برای کشور لبنان مورد بحث قرار دادند. زنگ و همکاران (۲۰۲۲) با توسعهٔ یک مدل پویایی سیستم، تأثیر تخصیص منابع آب بر پیوند آب–انرژی–غذا–جامعه (WEFS) را در بخش میانی پایین رودخانهٔ هانجیانگ در چین تحلیل کردند. ون[4] و همکاران (۲۰۲۲) در شهر داکینگ چین، مدلی بازخوردی از سیستم آب–غذا–انرژی ارائه کردند و با تحلیل پنج سناریوی سیاستی، به این نتیجه رسیدند که تعدیل ساختار تولید و صرفه‌جویی منابع می‌تواند هم‌زمان به بهبود امنیت WEN و کاهش آلودگی محیطی منجر شود. راور[5] و همکاران (۲۰۲۰) چارچوب WFE-SD را برای ارتقای خدمات اکوسیستم در مقیاس حوضه معرفی کرده و نشان دادند که امنیت منابع آب و وضعیت زیرسیستم انرژی به‌شدت به بخش غذا وابسته است. فرانسیسکو و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از مدل‌سازی دینامیک سیستم، مدیریت تولید مواد غذایی پایدار در کمربند سبز شهر سائوپائولو در برزیل را بررسی کردند و بر لزوم اصلاح سیاست‌های جاری، ازجمله پرداخت برای خدمات زیست‌محیطی تأکید داشتند.

حوضهٔ آبریز فرامرزی هیرمند به‌عنوان یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبریز ایران، نقش حیاتی در حیات منطقهٔ سیستان ایفا می‌کند. این منطقه با میانگین بارندگی پایین (۵۰ میلی‌متر در سال) و تبخیر بالا (۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ میلی‌متر در سال)، دارای اقلیم خشک و فراخشک است. نوسانات جریان رودخانهٔ هیرمند، موجب تغییرات سطح زیرکشت و درآمد کشاورزان شده است. با توجه به رشد جمعیت، توسعهٔ کشاورزی، و توزیع نامناسب آب، مدیریت پایدار منابع آبی در سیستان امری ضروری است. این پژوهش با اتخاذ رویکرد همبست آب–غذا–انرژی(WFEN) ، به‌جای تحلیل‌های تک‌بخشی رایج، پیوندهای متقابل و پویای بین این سه حوزه را در منطقهٔ سیستان به صورت جامع و یکپارچه بررسی کرده است. این نگرش سیستمی به درک بهتر پویایی‌ها و پیچیدگی‌های منابع محدود منطقه کمک می‌کند و نسبت به مطالعات قبلی که صرفاً به یک یا دو بخش از این سه حوزه توجه داشتند، دیدگاه کامل‌تری ارائه می‌دهد. مدل‌سازی پژوهش با استفاده از روش پویایی سیستم (System Dynamics) انجام شده است که امکان تحلیل کمی حلقه‌های بازخوردی، تأخیرهای زمانی و سناریوهای بلندمدت را فراهم کرده است. مدل براساس داده‌های محلی منطقهٔ سیستان تنظیم شده و علاوه‌بر منابع آب و غذا، نقش انرژی‌های تجدیدپذیر (به‌ویژه انرژی خورشیدی) نیز به‌عنوان یکی از سیاست‌های آینده‌نگرانه وارد تحلیل شده که در مطالعات مشابه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این تحقیق با شبیه‌سازی سناریوهای مختلف سیاست‌گذاری، امکان ارزیابی تأثیر سیاست‌های گوناگون بر امنیت آب، غذا و انرژی را فراهم می‌آورد. شایان ذکر است که سناریوهای طراحی‌شده در این پژوهش، با توجه به ویژگی‌های خاص منطقهٔ سیستان و نیازهای بومی آن، برای نخستین‌بار مطرح شده و در مطالعات پیشین مشابه، به‌ویژه در چارچوب همبست آب–غذا–انرژی، مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. نتایج مدل می‌تواند ابزار مؤثری برای تصمیم‌گیری بهتر در سطح منطقه‌ای و ملی باشد و به‌جای سیاست‌های مقطعی و بخشی، زمینه‌ساز تدوین سیاست‌های هماهنگ، پایدار و آینده‌نگر برای مدیریت منابع سیستان گردد.

1. Simpson & Jewitt
2. Schull
3. Karnib & Alameh
4. Wen
5. Ravar

روش‌شناسی پژوهش

در این تحقیق، مدل پویایی سیستم همبست آب، غذا و انرژی که شامل زیرسیستم‌های عرضه و تقاضای آب، غذا و انرژی و تبادلات و اثرات آن‌ها با یکدیگر است، توسعه داده شده است. در شکل ۱ فلوچارت مربوط به روش استفاده شده در این مطالعه آورده شده است.



شکل ۱. مراحل مدل‌سازی با رویکرد پویایی‌های سیستم

براساس رویکردهای همبست آب– غذا– انرژی و پویایی سیستم، مسئلهٔ مدیریت پایدار منابع آب در سه زیر سیستم منابع آب، منابع غذایی و منابع انرژی برای منطقهٔ سیستان در دورهٔ زمانی ۱۳۸۵–۱۴۱۵ طراحی شده است. مدل شبیه‌سازی‌شده با استفاده از نرم‌افزار Vensim Dss 6.4E ساخته می‌شود.

مراحل اجرای روش پژوهش به شرح زیر است:

۱. تعریف مسئله و دامنهٔ مدل: شناسایی چالش‌های منابع آب و تأثیر آن بر امنیت غذایی و انرژی در منطقهٔ سیستان؛
۲. جمع‌آوری داده‌ها: داده‌های آماری، هیدرولوژیکی، کشاورزی، انرژی و جمعیتی از منابع رسمی مانند وزارت نیرو، جهاد کشاورزی، شرکت آب منطقه‌ای و... گردآوری شد؛

۳. شناسایی زیرسیستم‌ها و متغیرهای کلیدی: سه زیرسیستم آب، غذا و انرژی طراحی‌شده و متغیرهای عرضه، تقاضا، کمبود، و شاخص‌های امنیت منابع در هر زیرسیستم تعریف شدند؛

۴. طراحی نمودارهای علّی- معلولی: با تدوین فرضیه‌های پویا و الهام از نظریه‌های معتبر درزمینهٔ مبانی نظری مدیریت منابع آب، روابط بین متغیرهای هر زیرسیستم با هم و همچنین با سایر زیرسیستم‌ها در قالب نمودارهای علّی متشکل از حلقه‌ها ارتباط می‌یابد، بازخوردهای مثبت و منفی شناسایی می‌شوند؛

۵. ساخت مدل جریان- انباشت (Stock & Flow): با استفاده از روابط ریاضی، مدل جریان و انباشت برای هر زیرسیستم پیاده‌سازی شد؛

فرمول‌بندی معادلات: سپس به‌منظور ساخت مدل جریان، روند متغیرها در طول زمان در نظر گرفته می‌شود و رابطهٔ بین متغیرها با در نظر گرفتن روندها و مطابق با قوانین موجود به‌صورت ریاضی فرموله می‌شود (کیهان‌پور، جهرمی و ابراهیمی، ۲۰۲۱).

معادلات انباشت و جریان

$$Stock\ (t) = Stock(t-1) + \int_{t0}^{t} (inflow - outflow)dt\ stcok(t)$$ رابطهٔ ۱)

در این رابطه، Stock (t) مقدار متغیر انباشت در زمان t، inflow میزان ورودی به انباشت، Outflow میزان خروجی از انباشت و dt گام زمانی شبیه‌سازی است.

معادلهٔ نرخ تغییر

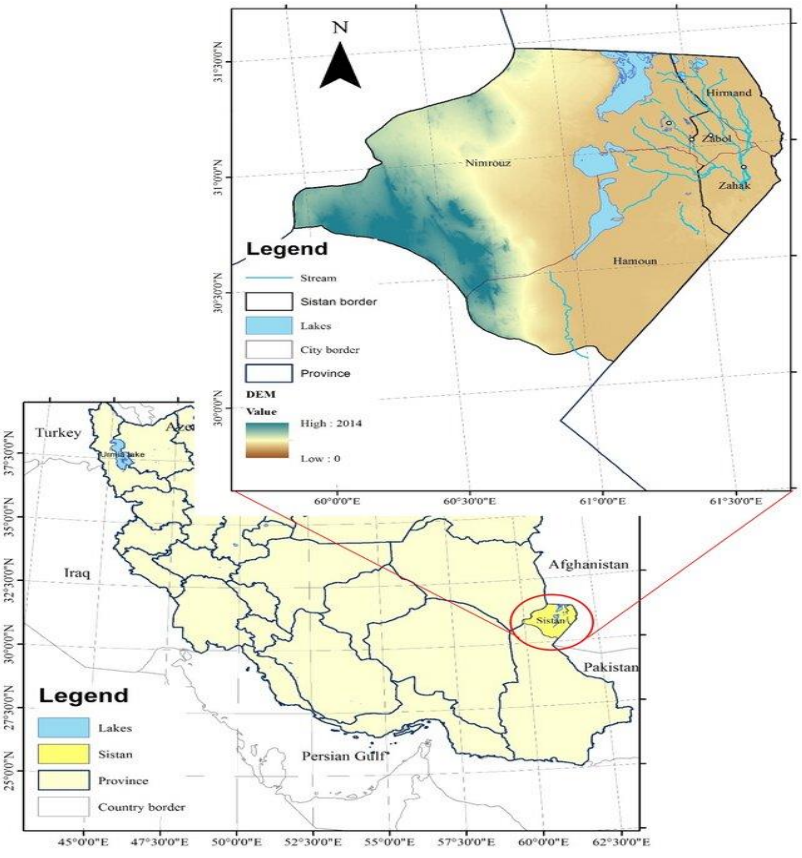
$$outflow - inflow = \frac{dStock}{dt}$$ رابطهٔ ۲)

۶. اعتبارسنجی مدل: صحت ساختار و روندهای خروجی مدل با داده‌های واقعی سنوات گذشته مقایسه و اعتبارسنجی شد؛

۷. تحلیل سناریوها: اثرات سیاست‌های مختلف بر شاخص‌های امنیت آب، غذا و انرژی بررسی شد.

در ادامه، نمودار جریان و حلقه های بازخوردی هریک از زیرسیستم‌ها ارائه شده است.

منطقهٔ مورد مطالعه رودخانه هیرمند در منطقهٔ سیستان با مشخصات جغرافیایی (61°50′E, 30°-31°N)، مهم‌ترین حوضه آبریز جنوب شرق ایران است که نقش مهمی در حیات منطقهٔ سیستان دارد. دشت سیستان با مرکزیت شهر زابل در مرز افغانستان و در جنوب شرقی ایران واقع شده است. این منطقه از مغرب به شهرستان نهبندان وکویر لوت از مشرق و شمال به کشور افغانستان و از جنوب به شهرستان نصرت‌آباد استان سیستان و بلوچستان محدود است.



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی منطقهٔ سیستان

زیرسیستم منابع آب

حلقه جریان- ذخیرهٔ زیرسیستم عرضه و تقاضای آب، متغیرهای چرخهٔ عرضه و تقاضای آب، تأمین آب و اکوسیستم منطقهٔ سیستان را نشان می‌دهد. طرح‌های انتقال آب، روابط متقابل آب‌های سطحی، زیرزمینی، هیدرولوژی منطقه و تأمین آب در منطقه اجزای اصلی این زیر سیستم را تشکیل می‌دهد (شکل ۳). در نمودار حلقهٔ جریان- ذخیره، دینامیک بین این اجزا با استفاده از پیکان نشان داده شده است. تقاضای آب شامل متغیرهای تقاضای آب شرب، تقاضای آب کشاورزی و تقاضای آب زیست‌محیطی است. عرضهٔ آب شامل عرضه منابع آب سطحی (رواناب‌ها) و عرضهٔ منابع آب زیرزمینی (چاهک) است.

امنیت منابع آب= عرضهٔ آب- تقاضای آب

عرضهٔ منابع آب= منابع آب سطحی+ منابع آب زیرزمینی

تقاضای منابع آب= تقاضا آب بخش کشاورزی+ تقاضای آب بخش انرژی+ تقاضای آب بخش شرب + تقاضای آب بخش محیطزیست

منابع آب مخازن چاه‌نیمه= جریان ورودی هیرمند+ منابع آب زیرزمینی+ منابع آب سطحی

جریان ورودی هیرمند= جریان ورودی پریان+ جریان ورودی سیستان+ بارندگی

کمبود آب زیست‌محیطی= عرضهٔ آب زیست‌محیطی- تقاضای آب زیست‌محیطی

کمبود آب کشاورزی= عرضهٔ آب کشاورزی- تقاضای آب کشاورزی

کمبود آب شرب= عرضهٔ آب شرب- تقاضای آب شرب

تقاضای آب بخش کشاورزی= تقاضای آب در بخش زراعی و باغی+ تقاضای آب در بخش دامپروری+ تقاضای آب در بخش شیلات

تقاضا آب محیطزیست= حداقل نیاز آبی گیاهان و جانوران اکوسیستم + تقاضای ماهانه آب محیطزیست

عرضهٔ آب محیطزیست= عرضه کل آب - (تقاضای آب بخش کشاورزی+ تقاضای آب بخش شرب)

زیر سیستم منابع غذا

زیرسیستم منابع غذا، به‌طور کلی شامل عرضه و تقاضای منابع غذایی است. زیرسیستم غذای تعریف‌شده در این مدل به سه دستهٔ زراعی و باغی، دامی و شیلات طبقه‌بندی شده است. حلقه‌های جریان و حالت زیرسیستم غذا برای کل محصولات کشاورزی و دامی در شکل ۴ نشان داده شده است. تأمین و نیاز آب در بخش کشاورزی و دام، ارتباط مستقیم با کل سطح زیرکشت و میزان آب مصرفی دام در این بخش دارد. چهار شاخص، سطح زیرکشت، عملکرد محصول، عرضه و تقاضای غذا برای این زیرسیستم طراحی و در نظر گرفته شده است.

عرضهٔ غذا شامل میزان تولید محصولات بخش کشاورزی، بخش دامی و شیلات است. تقاضا غذا نیز شامل متغیرهای مصرف محصولات بخش کشاورزی و مصرف محصولات بخش دامی (شامل دام بزرگ و کوچک)، شیلات (تولید ماهی قزل‌آلا) توسط خانوارهای شهری و روستایی است. امنیت غذا تفاوت بین عرضهٔ غذا و تقاضای غذاست.

امنیت منابع غذا= عرضهٔ منابع غذا- تقاضای منابع غذا

عرضهٔ غذا= if then else (نسبت عرضه به تقاضای غذا=> ۱، منابع غذا شیلات+ منابع غذا کشاورزی+ منابع غذا دام، (نسبت عرضه به تقاضای غذا× (منابع غذا شیلات+ منابع غذا کشاورزی+ منابع غذا دام))

تقاضای غذا= f (قیمت محصول، درآمد مصرف کننده، جمعیت کل)

عرضهٔ غذا کشاورزی= سطح زیر کشت× عملکرد محصولات کشاورزی

تقاضای آب بخش غذا= تقاضای آب بخش شیلات+ تقاضای آب بخش دام+ تقاضای آب بخش کشاورزی

تقاضای آب بخش کشاورزی= منابع غذا کشاورزی× نیاز آبی محصولات کشاورزی

تقاضای آب بخش دام= منابع غذا دام× مصرف آب تولید یک واحد دام

تقاضای آب بخش شیلات= منابع غذا شیلات× مصرف آب تولید یک واحد شیلات

منابع غذا دام= عرضهٔ دام- تقاضای دام

منابع غذا شیلات= عرضهٔ شیلات- تقاضای شیلات

زیرسیستم منابع انرژی

شکل ۵ بیانگر عرضهٔ انرژی شامل منابع انرژی فسیلی، برق و منابع انرژی نیروگاه بادی است. همچنین، تقاضای انرژی شامل میزان مصارف برق و سوخت فسیلی (شامل گازوئیل و نفت) برای بخش‌های مختلف صنعت، کشاورزی و خدمات است و امنیت منابع انرژی به‌صورت اختلاف بین عرضه و تقاضای انرژی در زیرسیستم منابع انرژی در نظر گرفته شده است.

امنیت منابع انرژی= عرضهٔ منابع انرژی- تقاضای انرژی

عرضهٔ منابع انرژی= if then else (نسبت عرضه به تقاضای آب در بخش انرژی=> ۱، منابع انرژی برق + منابع انرژی فسیلی، (نسبت عرضه به تقاضای آب در بخش انرژی× (منابع انرژی برق+ منابع انرژی فسیلی)

تقاضای انرژی= (تقاضای انرژی شبکهٔ آبیاری+ تقاضای انرژی بخش شرب+ تقاضای انرژی بخش محیطزیست+ تقاضای انرژی تصفیهٔ آب)× شدت مصرف انرژی

تقاضای انرژی شبکهٔ آبیاری= تقاضای آب بخش کشاورزی× نرخ مصرف انرژی یک واحد آبیاری

تقاضای انرژی تصفیهٔ آب= (تقاضای آب شرب+ آلودگی آب+ تقاضای آب کشاورزی× نرخ مصرف انرژی تصفیهٔ یک واحد آب

کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل

آزمون تکرار رفتار

بررسی نتایج مدل از طریق مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده از مدل با داده‌های مشاهده شده انجام می‌شود. در آزمون روند داده‌های شبیه‌سازی شده مدل با داده‌های مشاهده شده مطابقت داده می‌شود؛ به علت اینکه هر یک از ابزارهای آماری در راستای مقایسه داده‌های تاریخی و تولید شده دارای محاسن و معایبی در بررسی‌های آماری است، در این آزمون ابتدا داده‌های تاریخی و داده‌های تولید شده ترسیم شده، سپس تست خطا با استفاده از ضریب تعیین R^2، معیار نش- ساتکلیف و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برای ارزیابی عملکرد بیشتر مدل انجام می‌شود (استرمن،[1] ۲۰۰۲).

برای ارزیابی بهتر عملکرد مدل، داده‌های سری زمانی به دو مجموعه داده تقسیم می‌گردد: بخش اول، شامل داده‌های سال ۱۳۸۵-۱۳۹۳ است که برای اعتبار سنجی مدل استفاده می‌شود و بخش دوم شامل داده‌های سال‌های ۱۳۹۴-۱۴۰۲ است که برای کالیبراسیون مدل استفاده می‌شود. چهار متغیر ذخیره برای انجام کالیبراسیون و اعتبارسنجی، شامل دام سنگین، دام سبک، عملکرد محصول و ذخایر چاه‌نیمه است.

ضریب تعیین بیانگر میزان همبستگی میان دو دسته داده است. این ضریب در واقع نتایج تقریبی پارامتر مورد نظر در آینده را براساس مدل ریاضی تعریف شده که منطبق بر داده‌های موجود است، بیان می‌دارد و با استفاده از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود. این شاخص بین صفر و یک متغیر است.

رابطهٔ ۳)
$$R^2 = \frac{\left[\sum\left(y_{m,i} - \bar{y}_{m,i}\right)\left(y_{s,i} - \bar{y}_{s,i}\right)\right]^2}{\sum\left(y_{m,i} - \bar{y}_{m,i}\right)^2 \left(y_{s,i} - \bar{y}_{s,i}\right)^2}$$

معیار نش- ساتکلیف نیز از رابطهٔ زیر به دست می‌آید که دامنهٔ تغییرات آن از منفی بی‌نهایت تا ۱ را شامل می‌شود. هرچه این معیار به ۱ نزدیک‌تر باشد، صحت‌سنجی مدل دقیق‌تر خواهد بود. مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۵ حاکی از عملکرد قابل قبول مدل است.

رابطهٔ ۴)
$$NSE = 1 - \frac{\sum\left(y_{m,i} - \bar{y}_{m,i}\right)^2}{\sum\left(y_{s,i} - \bar{y}_{s,i}\right)^2}$$

1. Sterman

در روابط بالا $y_{m,i}$ مقدار شبیه‌سازی‌شده و $y_{s,i}$ نمایانگر مقدار واقعی است. $\bar{y}_{m,i}$ و $\bar{y}_{s,i}$ مقدار میانگین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و واقعی است.

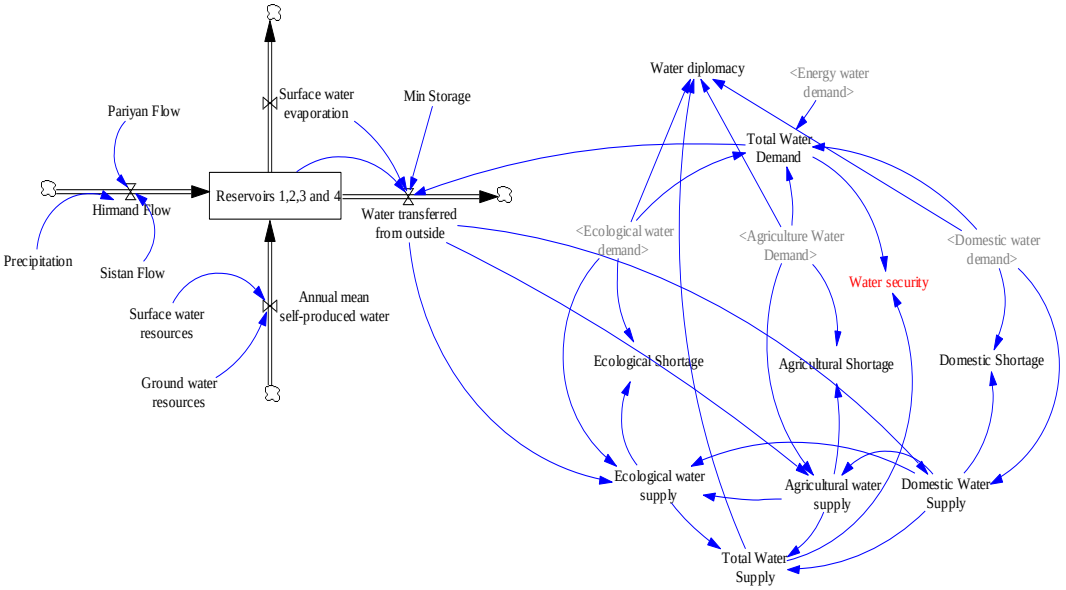
$$RMSE = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2\right]^{0.5}$$ رابطهٔ ۵)

در معادلهٔ y_i مقدار واقعی و $\hat{y}_i$ مقدار شبیه‌سازی‌شده برای متغیر مورد نظر از داده‌های اعتبارسنجی است. شاخص $RMSE$ نیز بیانگر میزان دقت پیش‌بینی است. مقادیر شاخص فوق در بهترین حالت (ناریبی) باید تا حد امکان کوچک و نزدیک به صفر باشد (استرمن، ۲۰۰۲).

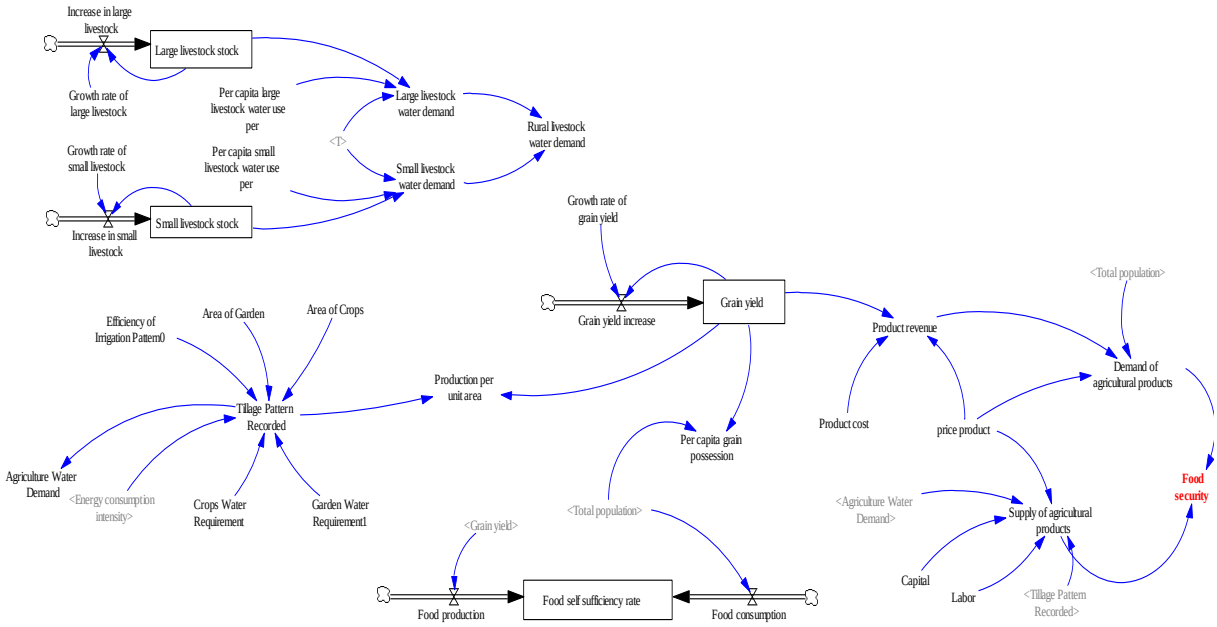
در این مطالعه، پویایی سیستم مدیریت منابع آب با کاربرد مدل همبست آب- غذا- انرژی در منطقهٔ سیستان با رویکرد پایداری بر مبنای تئوری دینامیک سیستم‌ها توسعه یافته است.

نتایج و بحث

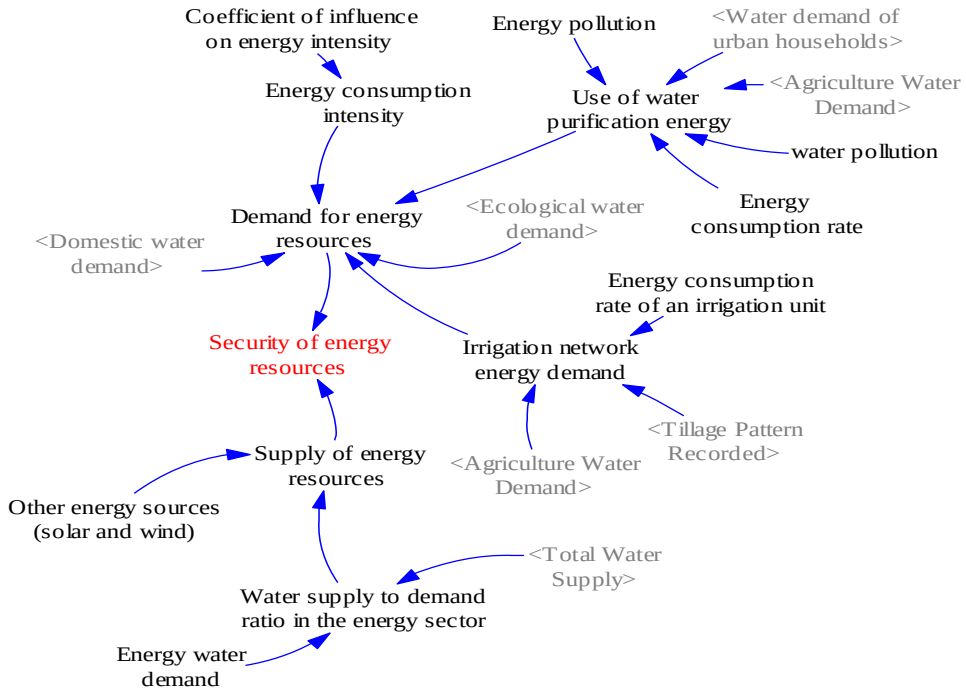
شبیه‌سازی اولیهٔ مدل‌سازی پویا در افق زمانی ۳۰ ساله (۱۳۸۵-۱۴۱۵) انجام گرفته است. سال پایه در مدل‌سازی ۱۳۸۵ است و از داده‌های سری زمانی ۱۳۸۵-۱۴۰۲ برای ارزیابی اعتبار رفتاری مدل استفاده شده است. جمع‌آوری اطلاعات سری زمانی با توجه به اسناد عملکرد وزارت نیرو، جهاد کشاورزی، شرکت آب منطقه‌ای انجام شده است. از رایج‌ترین آزمون‌های اعتبارسنجی، مقایسهٔ نتایج مدل با اطلاعات مشاهده‌شده (آزمون تکرار رفتار) و آزمون شرایط حدی است. برای اعتبارسنجی و کالیبراسیون از آزمون بازتولید رفتار استفاده شده که در جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۳. نمودار جریان زیرسیستم امنیت منابع آب براساس همبست آب، غذا و انرژی



شکل ۴. نمودار جریان زیرسیستم امنیت منابع غذا براساس همبست آب، غذا و انرژی



شکل ۵. نمودار جریان زیرسیستم امنیت منابع انرژی براساس همبست آب، غذا و انرژی

نتایج واسنجی

نتایج حاصل از آزمون مدل در جدول ۱ نشان داده شده است. مقادیر شبیه‌سازی نشان‌دهندهٔ هماهنگی خوب با مشاهدات است. در جدول ۲ مقادیر ضریب تعیین بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شدهٔ تمامی متغیرهای سطح بالاتر از ۰/۸۰ درصد است و تمامی مقادیر در معیار نش- ساتکلیف (*NSE*) مقدار آن بیشتر از ۰/۵ و همچنین مقدار خطای جذر میانگین مربعات (*RMSE*) کمتر از ۰/۳ است که این نتایج مبنای خوبی برای اعتبارسنجی مدل و پیش‌بینی‌های ساخته‌شده با استفاده از مدل ارائه می‌دهد.

نتایج اعتبارسنجی

برای تأیید مدل، یک سری آزمون‌های کیفی و کمی انجام می‌شود. این آزمون‌ها برای ارزیابی اینکه آیا مدل دقیقاً سیستم واقعی را نشان می‌دهد استفاده می‌شود. نتایج اعتبارسنجی نشان می‌دهد که شبیه‌سازی مدل با داده‌های مشاهده‌شده بسیار سازگار است (جدول ۱). اکثر مقادیر مطلوب معیار نش- ساتکلیف (*NSE*) بیشتر از ۰/۷ و خطای جذر میانگین مربعات (*RMSE*) عددی نزدیک به صفر دارد. علاوه‌بر این، ضریب تعیین (R^2) بیشتر از ۰/۸۰ است.

جدول ۱. نتایج آزمون‌های اعتبار رفتاری برخی متغیرهای مدل

متغیرها	کالیبراسیون						اعتبارسنجی					
	NSE (RMSE)					R^2	NSE (RMSE)					R^2
سال	۱۳۸۵	۱۳۸۷	۱۳۸۹	۱۳۹۱	۱۳۹۳	۱۳۹۳-۱۳۸۵	۱۳۹۴	۱۳۹۶	۱۳۹۸	۱۴۰۲	۱۴۰۲-۱۳۹۴
ذخایر چاه‌نیمه	۰/۷۲ (۰/۲۴)	۰/۵۷ (۰/۲۱)	۰/۹۰ (۰/۲۷)	۰/۹۷ (۰/۲۸)	۰/۹۳ (۰/۱۷)	۰/۹۱	۰/۷۲ (۰/۲۴)	۰/۷۱ (۰/۲۴)	۰/۸۱ (۰/۲۶)	۰/۹۴ (۰/۲۸)	۰/۸۴
دام سنگین	۰/۹۵ (۰/۲۸)	۰/۶۹ (۰/۲۴)	۰/۹۵ (۰/۲۸)	۰/۸۴ (۰/۲۶)	۰/۸۷ (۰/۲۶)	۰/۹۱	۰/۸۹ (۰/۲۷)	۰/۹۱ (۰/۲۷)	۰/۹۶ (۰/۲۸)	۰/۹۹ (۰/۲۸)	۰/۸۳
دام سبک	۰/۹۲ (۰/۲۷)	۰/۹۶ (۰/۲۸)	۰/۹۹ (۰/۲۸)	۰/۹۹ (۰/۲۸)	۰/۹۹ (۰/۲۸)	۰/۹۹	۰/۹۲ (۰/۲۷)	۰/۹۶ (۰/۱۸)	۰/۹۹ (۰/۲۸)	۰/۹۹ (۰/۲۸)	۰/۹۲
عملکرد محصول	۰/۹۹ (۰/۲۸)	۰/۹۹ (۰/۲۸)	۰/۹۹ (۰/۲۸)	۰/۷۵ (۰/۲۵)	۰/۹۶ (۰/۲۸)	۰/۸۹	۰/۵۵ (۰/۲۱)	۰/۷۶ (۰/۲۵)	۰/۷۹ (۰/۰۸)	۰/۸۴ (۰/۲۶)	۰/۹۳

طراحی سناریوهای مختلف مدیریت منابع آب با کاربرد مدل همبست آب–غذا–انرژی در منطقهٔ سیستان

در این مرحله از پژوهش، سیاست‌های مدیریتی در مدل پویایی سیستم منطقهٔ سیستان شبیه‌سازی شده است. در این راستا می‌توان با سیاست‌هایی چون صادرات برق تولیدی نیروگاه‌های بادی به کشور همسایه (افغانستان) در ازای دریافت نصف حقابه (۴۱۰ میلیون متر مکعب)، کاهش دام بزرگ و افزایش دام کوچک همچنین حذف کشت محصولات گندم و جو و جایگزینی آن با محصولات دیگری با سوددهی بالا و مصرف آب کمتر چون خربزه و پیاز منابع آب منطقه را مدیریت پایدار نمود. سناریو های پیشنهادی و نتایج حاصل در ادامه تشریح شده است.

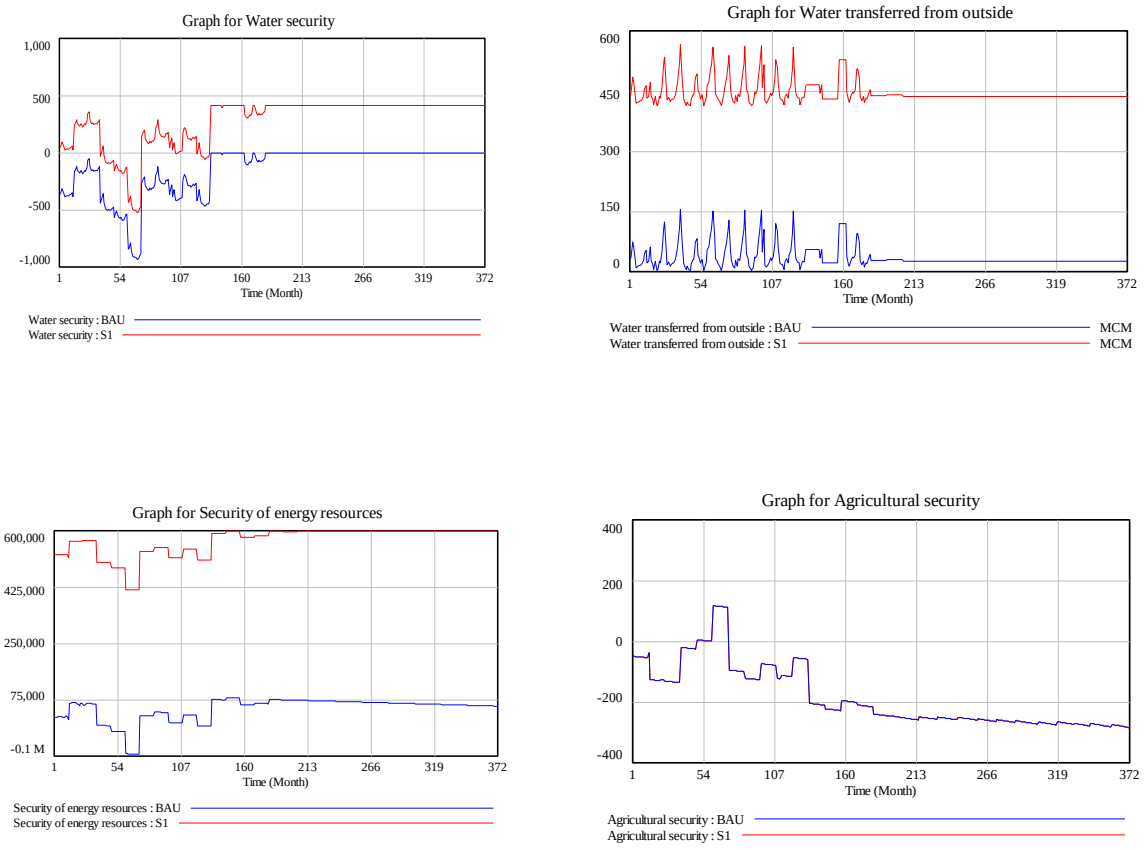
جدول ۲. خلاصه سیاست‌های پیشنهادی و تغییرات اعمالی بر روی مدل

سیاست	تغییر اعمالی بر روی مدل
مدیریت تقاضای انرژی	صادرات انرژی برق تولید از توربین بادی به افغانستان و دریافت حقابه
مدیریت تقاضای آب	کاهش تعداد دام سنگین تا ۱۰ درصد و افزایش تعداد دام سبک تا ۱۰ درصد
مدیریت عرضهٔ آب	تأمین حقابه از رودخانهٔ هیرمند
مدیریت تقاضای آب	حذف کشت محصولات آب‌بر مانند گندم و جو از الگوی کشت و جایگزینی محصولاتی با سودآوری بالا و نیاز آبی کمتر مانند خربزه و پیاز
مدیریت توأم عرضه و تقاضای آب (سناریو ترکیبی)	تأمین حقابه از رودخانهٔ هیرمند، حذف کشت محصولات آب‌بر مانند گندم و جو از الگوی کشت و جایگزینی محصولاتی با سوداوری بالا و نیاز آبی کمتر مانند خربزه و پیاز و کاهش تعداد دام سنگین تا ۱۰ درصد و افزایش تعداد دام سبک تا ۱۰ درصد

سناریوهای پیشنهادی

۱. صادرات انرژی برق تولید از توربین بادی (۵۰۰۰۰۰ کیلووات) به افغانستان و دریافت حقابه (یک دوم حقابه ۴۱۰ میلیون متر مکعب)

تولید برق و صادرات آن به کشورهای همسایه از اصلی‌ترین مزایای انرژی خورشید و باد در سیستان است. با توجه به آنکه بادهای ۱۲۰ روز در سیستان همه‌ساله تداوم دارد، استفاده از این فرصت در راستای تولید انرژی الزامی است. در این سناریو فرض بر این است که کل ظرفیت ۵۰ مگاوات توربین‌های بادی تولید و به کشور همسایه در ازای یک دوم حقابه صادر شود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این سناریو براساس مدل سیستم داینامیک در زیر سیستم آب، همان‌طور که در شکل ۶ و جدول ۳ آورده شده است، با اعمال این سیاست امنیت آب از ۴۳۳۶/۵۸- میلیون متر مکعب به ۴۹۲۰ میلیون متر مکعب افزایش خواهد یافت و همان‌طور که در شکل (۶) ملاحظه می‌گردد، این سناریو نسبت به سناریوی پایه، رشد بیشتری داشته است. نیز پیش‌بینی می‌شود در ۱۴۱۵ امنیت غذا از ۶۲۰/۱۶- کیلوگرم به ۳۳۵۵/۵۳- کیلوگرم نیز روند کاهشی داشته باشد و امنیت انرژی نیز با توجه به میزان تولید توربین‌های بادی، ۲۹۷۵۰۴ کیلووات افزایش یابد. بنابراین، می‌توان با هدف تشویق سرمایه‌گذاران به سرمایه‌گذاری بیشتر در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر، شرایط صادرات برق تجدیدپذیر را فراهم کرد و مقرر شود فعالان این بخش بتوانند برق تولیدی خود را به کشورهای همسایه برای احقاق حقابه صادر کنند. گوهرشاهی و همکاران (۱۴۰۳) در مطالعهٔ خود نیز به نتیجهٔ مشابه با این مطالعه دست یافتند؛ آن‌ها عنوان نمودند بهره‌گیری از ظرفیت انرژی‌های خورشیدی و بادی به‌عنوان انرژی‌های نو در منطقهٔ مورد مطالعاتی منجر به راهکارهای پایدار امنیت منابع و همچنین، مدیریت پایدار بهینهٔ منابع آب در قالب همبست منابع آب، غذا و انرژی می‌شود.



شکل ۶. نمودارهای سیاست اعمالی صادرات انرژی تولیدی برق به‌ازای دریافت حقابه

جدول ۳. مقایسه امنیت منابع آب، غذا، انرژی بین شرایط فعلی با شرایط سناریوی اول

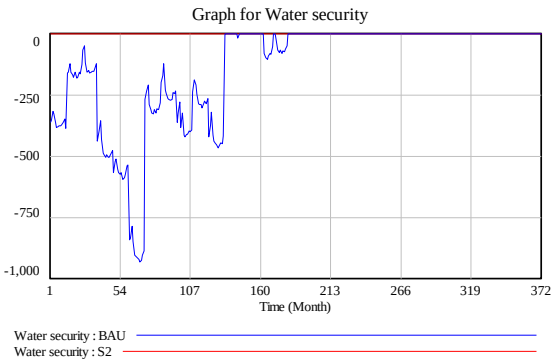
سناریو اول	۱۳۸۵	۱۴۰۲	۱۴۱۵
امنیت منابع آب (پایه) (میلیون متر مکعب)	-۴۳۳۶/۵۸	۰	۰
امنیت منابع آب (S1) (میلیون متر مکعب)	۵۸۳/۳	۴۹۲۰	۴۹۲۰
امنیت منابع غذا (پایه) (تن)	-۶۲۰/۱۶	-۳۰۶۰/۱۷	-۳۳۵۵/۵۳
امنیت منابع غذا (S1) (تن)	-۳۰۶۰/۱۷	-۳۰۶۰/۱۷	-۳۰۶۰/۱۷
امنیت منابع انرژی (پایه) (کیلووات)	۲۹۷۵۰۴	۱۱۷۶۴۶۸	۱۱۷۶۴۶۸
امنیت منابع انرژی (S1) (کیلووات)	۶۲۹۷۵۰۴	۷۱۷۶۴۶۸	۷۱۷۶۴۶۸

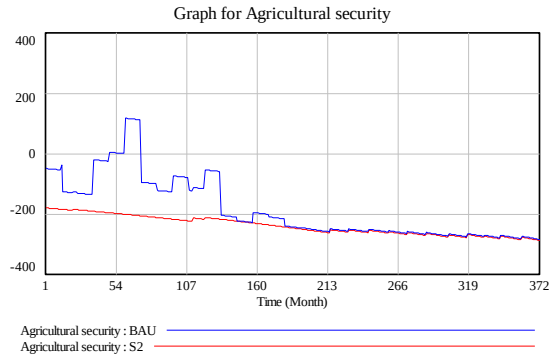
منبع: یافته‌های پژوهش

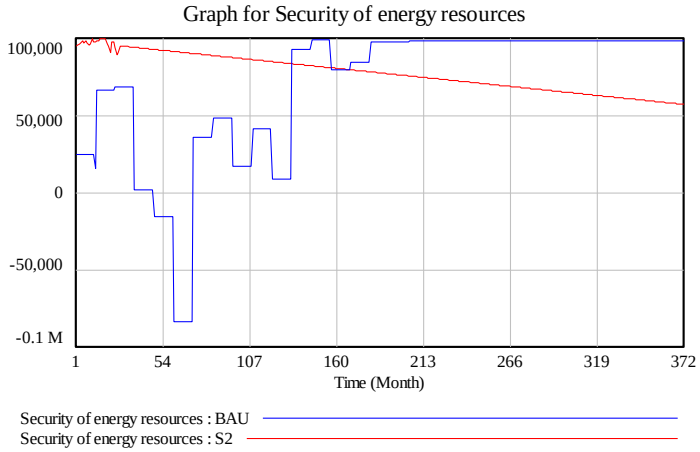
۲. حذف کشت محصولات آب‌بر مانند گندم و جو از الگوی کشت و جایگزینی محصولاتی با سودآوری بالا و نیاز آبی کمتر مانند خربزه و پیاز

کشت محصولات کم‌آب بر از موضوعات مهمی است که در بحران کمبود آب کنونی بیش از پیش اهمیت دارد. تحقیقات آماری انجام‌شده تاکنون نشان می‌دهند که ۷۰ درصد آب مصرفی در بخش کشاورزی مصرف می‌شود. ازطرفی، خشکسالی‌هایی که طی چند سال اخیر در ایران روی داده، کشاورزان را بر آن داشته است که با کشت محصولات جایگزین علاوه‌بر حفظ تنوع محصولات، صرفه‌جویی قابل توجهی نیز در مصرف آب داشته باشند. با توجه به این مسئله سیاست حذف کشت محصولات آب بر مانند گندم و جو از الگوی کشت و جایگزینی محصولاتی با سودآوری بالا و نیاز آبی کمتر مانند خربزه و پیاز مورد توجه قرار گرفته و در این مدل پیاده‌سازی شده است.

نتایج اعمال سناریو پیشنهادی حاکی از آن است که سناریو حذف کشت محصولات آب‌بر مانند گندم و جو از الگوی کشت و جایگزینی محصولاتی با سودآوری بالا و نیاز آبی کمتر مانند خربزه و پیاز در شکل (۷) از مدل SDM، در زیرسیستم غذا، امنیت غذا در سال پایهٔ ۱۳۸۵ به میزان ۶۲۰/۱۶- کیلوگرم در هکتار و در سال ۱۴۱۵ به ۳۳۹۶/۱۸- کیلوگرم در هکتار نسبت به سال پایه کاهش یافته است. دلیل آن این است که گندم و جو که جزء محصولات اصلی منطقه است، تولید آن به صفر رسیده و سبب کاهش امنیت غذایی شده است که برای جبران می‌توان این محصولات را از دیگر استان‌ها وارد منطقه کرد. در زیرسیستم عرضه و تقاضای آب، امنیت آب در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۴۱۵ برابر با ۴۳۳۶/۵۸- و صفر بوده که نشان‌دهندهٔ این است که با کنترل محصولات آب‌بر در منطقه تا حدود زیادی به امنیت آبی خواهیم رسید. امنیت آب در بخش کشاورزی به همین میزان افزایش داشته است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، اجرای سناریوی نام‌برده سبب کاهش امنیت غذا در منطقهٔ سیستان شده است و ازطرفی، سبب افزایش در مصرف ذخایر چاه‌نیمه‌ها می‌شود که در پی آن موجب کاهش کمبود کلی آب ازجمله در بخش کشاورزی که بیشترین سهم مصرف را به خود اختصاص داده است.







شکل ۷. نمودارهای سیاست اعمالی حذف کشت محصولات آب‌بر مانند گندم و جو و جایگزینی با محصولات سودآور و کم‌آب

در زیرسیستم عرضه و تقاضای انرژی، امنیت انرژی در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۴۱۵ برابر با ۲۹۷۵۰۴ و ۶۹۲۳۹۹ کیلووات در سال بوده که حدود ۳۹۴۸۹۵ کیلووات نسبت به سال پایه افزایش امنیت انرژی داشته است. درنهایت با اعمال سناریو حذف محصولات آب‌بر چون گندم و جو جایگزینی آن با دیگر محصولات سبب بالا رفتن امنیت آب و انرژی می‌گردد و ازطرف دیگر، امنیت غذا به‌دلیل حذف کامل این محصولات در منطقه کاهش می‌یابد. صفویان و همکاران (۱۴۰۱) نیز در مطالعهٔ خود به این نتیجه دست یافتند که انتخاب هوشمند محصولات برای کشت می‌تواند مؤثرترین راهکار در قالب همبست منابع آب، غذا و انرژی برای کاهش روند تحلیل منابع آب زیرزمینی باشد.

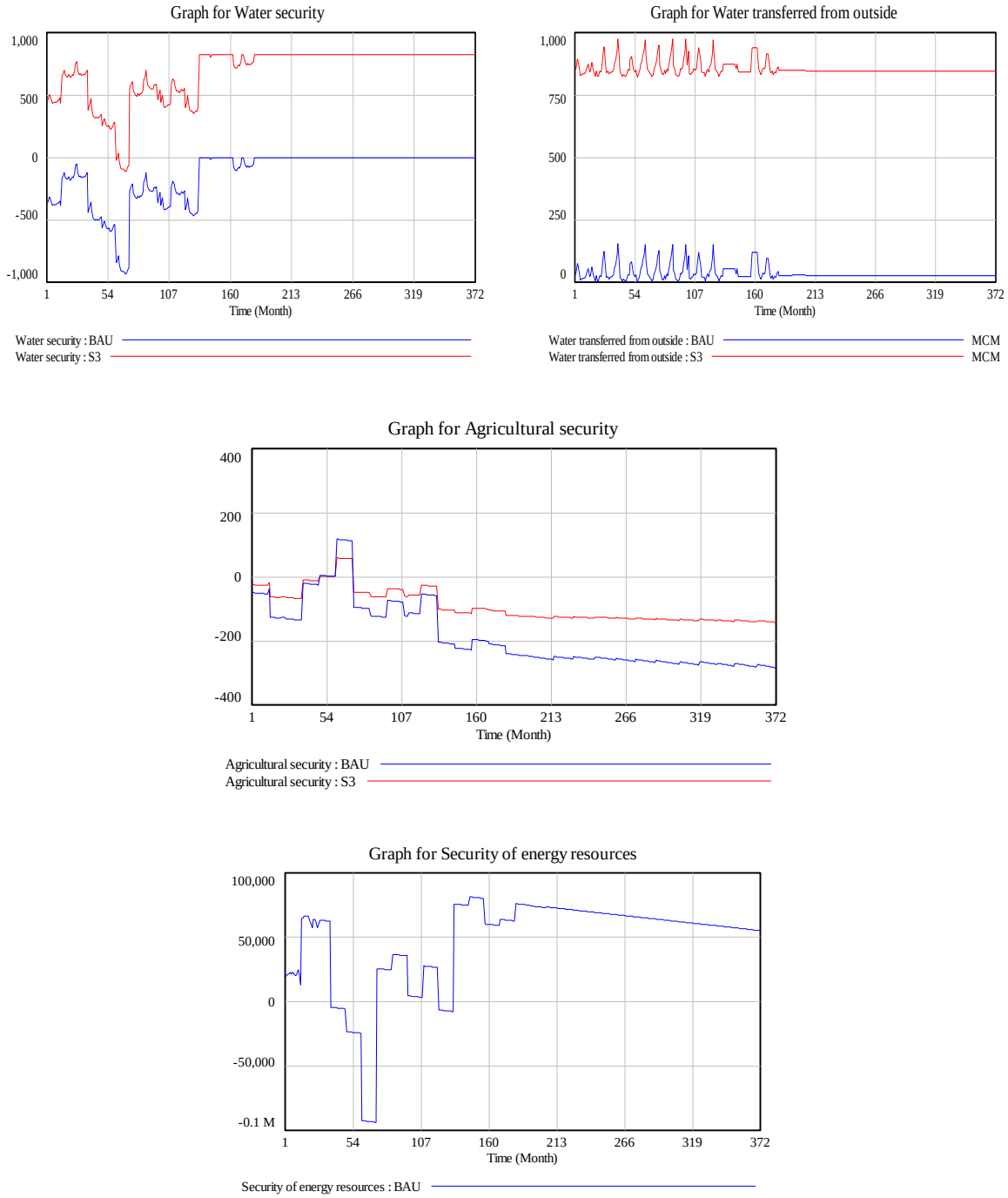
جدول ۴. مقایسهٔ امنیت منابع آب، غذا، انرژی بین شرایط فعلی با شرایط سناریوی دوم

سناریو دوم	۱۳۸۵	۱۴۰۲	۱۴۱۵
امنیت منابع آب (پایه) (میلیون متر مکعب)	-۴۳۳۶/۵۸	۰	۰
امنیت منابع آب (S2) (میلیون متر مکعب)	۰	۰	۰
امنیت منابع غذا (پایه) (تن)	-۶۲۰/۱۶	-۳۰۶۰/۱۷	-۳۳۵۵/۵۳
امنیت منابع غذا (S2) (تن)	-۲۱۸۱/۷۲	-۳۱۰۰/۸۲	-۳۳۹۶/۱۸
امنیت منابع انرژی (پایه) (کیلووات)	۲۹۷۵۰۴	۱۱۷۶۴۶۸	۱۱۷۶۴۶۸
امنیت منابع انرژی (S2) (کیلووات)	۱۱۶۱۶۶۲	۸۹۸۶۹۲	۶۹۲۳۹۹

منبع: یافته‌های پژوهش

۳. تأمین حقابه از رودخانهٔ هیرمند

یکی دیگر از سناریوهای مورد بررسی رعایت حقابهٔ ۸۲۰ میلیون متر مکعبی سالیانه ایران از جانب افغانستان است. نتایج به‌دست‌آمده از اعمال این سناریو در مدل SDM در شکل ۸ و جدول ۵ ارائه شده است. با اعمال سیاست رعایت حقابه از جانب کشور همسایه (افغانستان) امنیت آب از ۴۳۳۶/۵۸- میلیون متر مکعب به ۹۸۴۰ میلیون متر مکعب افزایش خواهد یافت و همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌گردد، این سناریو نسبت به سناریوی پایه، رشد خیلی بیشتری داشته است. همچنین، مطابق جدول ۵ پیش‌بینی می‌شود در ۱۴۱۵ امنیت غذا از ۳۳۵۵/۵۳- کیلوگرم در هکتار به ۱۶۷۷/۷۳- کیلوگرم در هکتار نیز روند افزایشی داشته اما همچنان نتوانسته به‌طور کامل امنیت غذا را تأمین کند و آن‌هم به‌دلیل خشکسالی‌های متمادی است و امنیت انرژی هیچ تغییری نسبت به اعمال سناریو حاضر نکرده است.



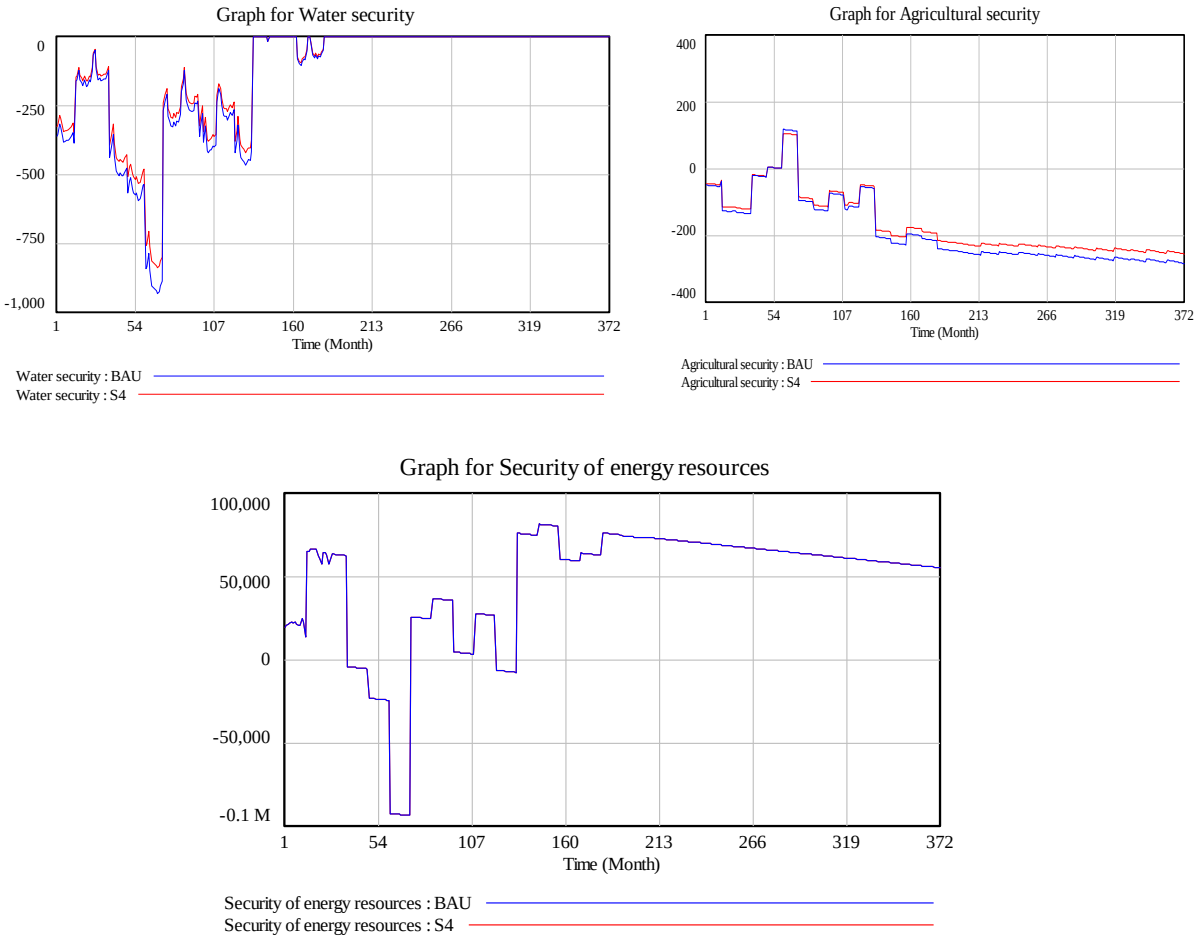
شکل ۸. نمودارهای سیاست اعمالی تأمین حقابه از رودخانهٔ هیرمند

جدول ۵. مقایسهٔ امنیت منابع آب، غذا، انرژی بین شرایط فعلی با شرایط سناریوی سوم

سناریو سوم	۱۳۸۵	۱۴۰۲	۱۴۱۵
امنیت منابع آب (پایه) (میلیون متر مکعب)	-۴۳۳۶/۵۸	0	0
امنیت منابع آب (S3) (میلیون متر مکعب)	۵۵۰۳/۳	۹۸۴۰	۹۸۴۰
امنیت منابع غذا (پایه) (تن)	-۶۲۰/۱۶	-۳۰۶۰/۱۷	-۳۳۵۵/۵۳
امنیت منابع غذا (S3) (تن)	-۳۱۰/۰۵	-۱۵۳۰/۰۶	-۱۶۷۷/۷۳
امنیت منابع انرژی (پایه) (کیلووات)	۲۹۷۵۰۴	۱۱۷۶۴۶۸	۱۱۷۶۴۶۸
امنیت منابع انرژی (S3) (کیلووات)	۲۹۷۵۰۴	۱۱۷۶۴۶۸	۱۱۷۶۴۶۸

۴. کاهش تعداد دام سنگین تا ۱۰ درصد و افزایش تعداد دام سبک تا ۱۰ درصد

براساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد، کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کنندهٔ آب در سراسر جهان است که به‌طور متوسط ۷۰ درصد از کل برداشت آب شیرین را تشکیل می‌دهد. بنابراین، مهم است که کشاورزان تا حد امکان از این منبع طبیعی محافظت کنند. بخش‌های مربوط به صنعت دام‌پروری، در استفاده از آب به‌عنوان پرمصرف‌ترین مراکز پرورشی شناخته شده‌اند. همچنین مطالعات مختلف بیانگر این موضوع هستند که نیاز آبی گاوهای شیری در مقایسه با سایر دام‌ها و حتی گاوهای گوشتی بالاتر است. بنابراین در این سناریو سیاست کاهش ۱۰ درصدی دام بزرگ و افزایش ۱۰ درصدی دام کوچک مورد توجه قرار گرفته است. نتایج حاصل از اعمال این سیاست همان‌طور که در شکل ۹ و جدول ۶ مشاهده می‌شود، بیانگر آن است که امنیت آب از ۴۳۳۶/۵۸- میلیون متر مکعب به صفر افزایش پیداکرده است و دیگر منطقه از نظر عرضهٔ آب در بخش‌های مختلف دچار مشکل نیست، چنان‌که عرضه صفر است و هیچ انباشت آبی در منطقه موجود نیست. همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود، این سناریو نسبت به سناریوهای دیگر رشد کمتری در امنیت آب، غذا و انرژی داشته است. همچنین مطابق جدول ۶، پیش‌بینی می‌شود در ۱۴۱۵ امنیت غذا از ۳۳۵۵/۵۳- کیلوگرم در هکتار به ۳۰۱۹/۹۷- کیلوگرم در هکتار نیز روند کمی افزایشی داشته اما همچنان نتوانسته به‌طور کامل امنیت غذا را تأمین کند و آن‌هم به‌دلیل خشکسالی‌های متمادی است و امنیت انرژی هیچ تغییری نسبت به اعمال سناریو نکرده است. سانسیک[1] و همکاران (۲۰۲۱) نیز در مطالعه خود به سیاست کاهش تعداد دام و اثر آن در بخشهای غذا و اقلیم اشاره نموده‌اند.



شکل ۸. نمودارهای سیاست اعمالی کاهش تعداد دام سنگین و افزایش تعداد دام سبک

1. Sušnik

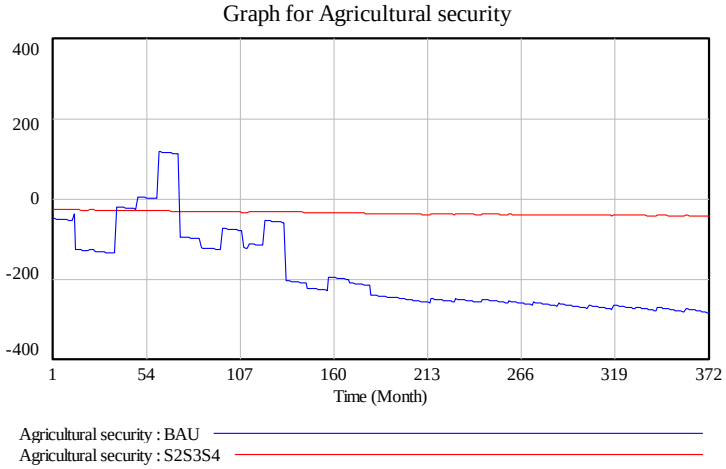
جدول ۶. مقایسهٔ امنیت منابع آب، غذا، انرژی بین شرایط فعلی با شرایط سناریوی چهارم

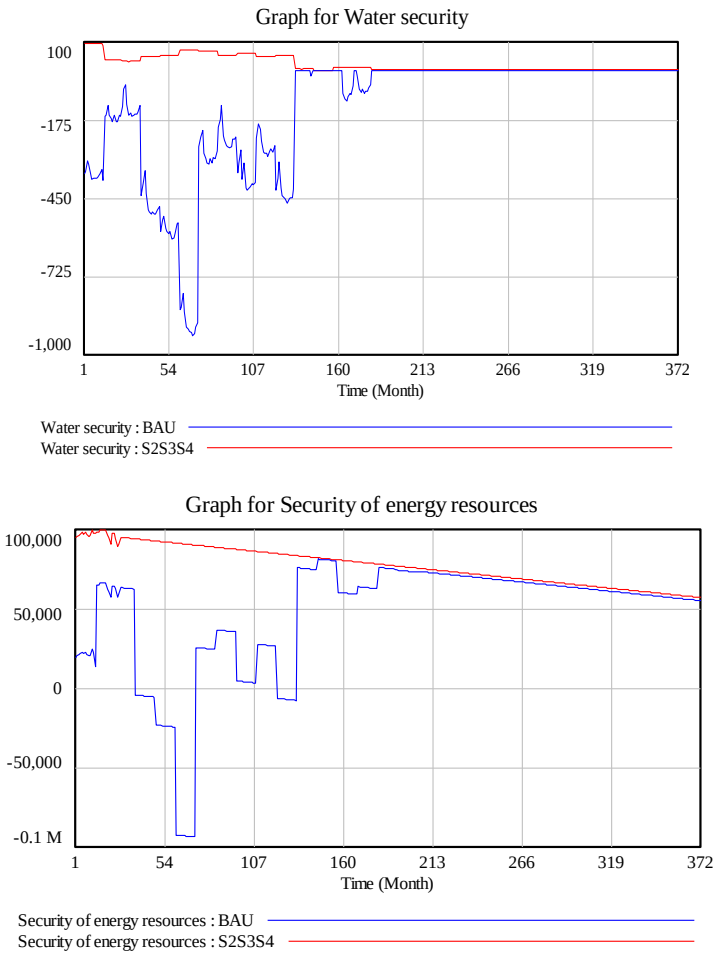
سناریو چهارم	۱۳۸۵	۱۴۰۲	۱۴۱۵
امنیت منابع آب (پایه)	-۴۳۳۶/۵۸	۰	۰
امنیت منابع آب (S4)	-۳۹۰۲/۹	۰	۰
امنیت منابع غذا (پایه)	-۶۲۰/۱۶	-۳۰۶۰/۱۷	-۳۳۵۵/۵۳
امنیت منابع غذا (S4)	-۵۵۸/۱۴	-۲۷۵۴/۱۴	-۳۰۱۹/۹۷
امنیت منابع انرژی (پایه)	۲۹۷۵۰۴	۱۱۷۶۴۶۸	۱۱۷۶۴۶۸
امنیت منابع انرژی (S4)	۲۹۷۵۰۴	۱۱۷۶۴۶۸	۱۱۷۶۴۶۸

۵. سناریو ترکیبی

بعد از اعمال هرکدام از سیاست‌های مدیریت تقاضا و عرضهٔ آب و مدیریت منابع غذا و انرژی به‌صورت مجزا بر روی مدل از بین آن‌ها بهترین سناریوها انتخاب و به‌صورت ترکیبی اعمال شد و نتایج با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. در سناریو ترکیبی حذف کشت محصولات آب‌بر مانند گندم و جو از الگوی کشت و جایگزینی محصولاتی با سودآوری بالا و نیاز آبی کمتر مانند خربزه و پیاز، تأمین حقابه از رودخانهٔ هیرمند وکاهش تعداد دام سنگین و افزایش تعداد دام سبک تا ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است. در زیرسیستم غذا، امنیت غذا در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۴۱۵ میزان ۶۲۰/۱۶- کیلوگرم در هکتار و ۵۰۹/۳۷- کیلوگرم در هکتار نسبت به سال پایه افزایش یافته است. در زیرسیستم عرضه و تقاضای آب، امنیت آب در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۴۱۵ برابر با ۴۳۳۶/۵۸- و ۱۷/۹۲۴ میلیون متر مکعب در سال بوده که امنیت منابع آب با اعمال این سناریو ترکیبی نسبت به سال پایه افزایش چشمگیر داشته است. در زیرسیستم عرضه و تقاضای انرژی، امنیت انرژی در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۴۱۵ برابر با ۲۹۷۵۰۴ و ۶۹۲۳۹۹ کیلووات در سال بوده که حدود ۳۹۴۸۹۵ کیلووات نسبت به سال پایه افزایش یافته است. آن‌هم در نتیجهٔ استفاده از تکنولوژی نیروگاه بادی در منطقه است. درنهایت با افزایش امنیت غذا، امنیت آب و امنیت انرژی سبب افزایش نسبی پایداری در منطقه شده است. بنابراین این سناریو ترکیبی هم می‌تواند به‌عنوان سیاست اثرگذار در منطقه اجرا شود.

نتایج حاصل از اجرای سیاست‌ها نشان می‌دهد که رعایت حقابه در کنار دیگر سیاست‌های کشاورزی و انرژی می‌تواند راهکار مناسبی برای رسیدن به پایداری در منطقه باشد.





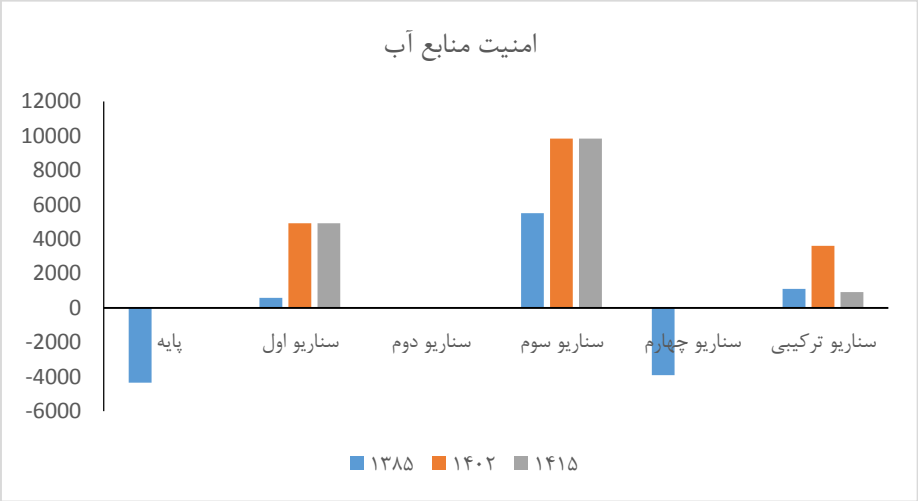
شکل ۹. نمودارهای سیاست اعمالی ترکیبی

جدول ۷. مقایسهٔ امنیت منابع آب، غذا، انرژی بین شرایط فعلی با شرایط سناریوی ترکیبی

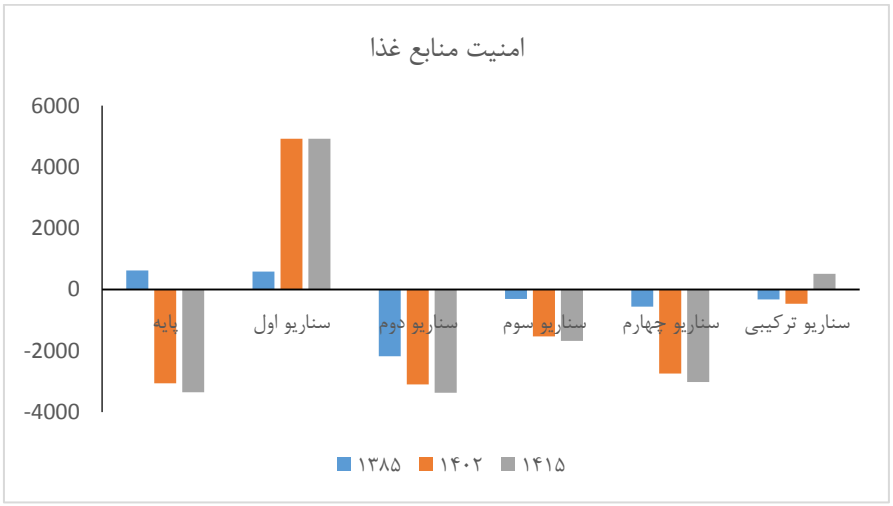
سناریو ترکیبی	۱۳۸۵	۱۴۰۲	۱۴۱۵
امنیت منابع آب (پایه) (متر مکعب)	-۴۳۳۶/۵۸	۰	۰
امنیت منابع آب (S2S3S4) (متر مکعب)	۱۱۱۲/۳۴	۳۶۱۳/۱۳	۹۲۴/۱۷
امنیت منابع غذا (پایه) (تن)	-۶۲۰/۱۶	-۳۰۶۰/۱۷	-۳۳۵۵/۵۳
امنیت منابع غذا (S2S3S4) (تن)	-۳۲۷/۲۱	-۴۶۵/۱	-۵۰۹/۳۷
امنیت منابع انرژی (پایه) (کیلو وات)	۲۹۷۵۰۴	۱۱۷۶۴۶۸	۱۱۷۶۴۶۸
امنیت منابع انرژی (S2S3S4) (کیلو وات)	۱۱۶۱۶۶۲	۸۹۹۶۷۲	۶۹۲۳۹۹

منبع: یافته‌های پژوهش

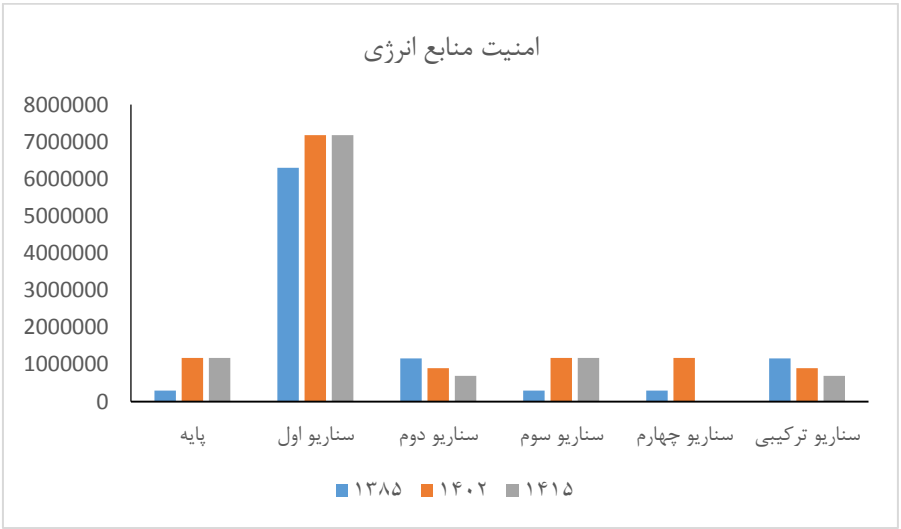
نمودارهای ۱، ۲ و ۳ به‌ترتیب تغییرات شاخص امنیت منابع آب، غذا و انرژی را طی سال‌های ۱۳۸۵، ۱۴۰۲ و ۱۴۱۵ در سناریوهای مختلف نمایش می‌دهند. این نمودارها با استفاده از نتایج شبیه‌سازی مدل پویایی سیستم تهیه شده‌اند و تأثیر پنج سناریوی مدیریتی مختلف را در بهبود یا وخامت وضعیت منابع بررسی می‌کنند. در ادامه، عملکرد هریک از سناریوها به‌تفکیک و در مقایسه با وضعیت پایه تحلیل شده است.



نمودار ۱. روند تغییرات امنیت منابع آب در سناریوهای مختلف طی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۴۱۵



نمودار ۲. روند تغییرات امنیت منابع غذا در سناریوهای مختلف طی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۴۱۵



نمودار ۳. روند تغییرات امنیت منابع انرژی در سناریوهای مختلف طی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۴۱۵

یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی مدل پویایی سیستم در حوزهٔ امنیت منابع آب، غذا و انرژی در منطقهٔ سیستان نشان می‌دهد که سناریوهای مختلف اعمال‌شده، تأثیرات متفاوتی بر پایداری منابع سه‌گانه دارند. در سناریوی پایه که در آن هیچ‌گونه سیاست اصلاحی اعمال نشده است، شاخص امنیت در هر سه حوزه به‌ویژه منابع آب و غذا، به مرور زمان روندی نزولی و بحرانی را تجربه کرده و در افق ۱۴۱۵ به مقادیر منفی شدید رسیده است. این امر مؤید ناپایداری فزایندهٔ منابع حیاتی در صورت تداوم روند فعلی است. در مقایسهٔ بین سناریوها، سناریوی اول که بر پایل صادرات برق بادی و دریافت حقابه از افغانستان استوار است، بیشترین بهبود را در هر سه بخش به همراه داشته است. در این سناریو، شاخص امنیت منابع آب و غذا در سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۱۵ به مقدار مثبت ۴۹۲۰ رسیده و امنیت انرژی نیز با جهشی چشمگیر از ۱/۱ میلیون کیلووات به حدود ۷/۱ میلیون کیلووات افزایش یافته است. این نشان می‌دهد که سیاست‌های مبتنی‌بر تعاملات فرامرزی و بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توانند اثربخشی بالایی در ارتقای امنیت منابع داشته باشند. درمقابل، سناریوی دوم که بر تغییر ترکیب دام از دام سنگین به دام سبک تمرکز دارد، نه‌تنها بهبود محسوسی ایجاد نکرده بلکه در برخی موارد ازجمله امنیت منابع غذا، وضعیت را نسبت به سناریوی پایه نیز وخیم‌تر کرده است. این یافته نشان‌دهندهٔ آن است که مداخلات جزئی و تک‌بعدی نمی‌توانند راهکار مؤثری در بهبود امنیت منابع باشند. سناریوی سوم (تأمین حقابه از رودخانهٔ هیرمند) و سناریوی چهارم (اصلاح الگوی کشت با حذف محصولات آب‌بر) هر دو منجر به بهبود نسبی در شاخص‌های آب و غذا شده‌اند؛ بااین‌حال همچنان در سطح منفی باقی مانده و به‌تنهایی پاسخگوی چالش‌های موجود نیستند. درنهایت، سناریوی ترکیبی که مجموعه‌ای از سیاست‌های موفق شامل تأمین حقابه، اصلاح الگوی کشت و تغییر ترکیب دام را به‌صورت هم‌افزا به کار گرفته، عملکردی متعادل و پایدار در هر سه حوزه از خود نشان داده است. این سناریو توانسته امنیت منابع آب و غذا را به محدودهٔ مثبت و پایداری در افق ۱۴۱۵ برساند و درعین‌حال امنیت منابع انرژی را نیز در سطح قابل قبول نگه دارد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که اتخاذ رویکردهای تلفیقی و چندبعدی با در نظر گرفتن پیوندهای بین منابع، اثربخش‌ترین راهکار برای دستیابی به امنیت پایدار منابع در منطقه به شمار می‌آید.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

وضعیت مدیریت و مصرف ناصحیح منابع آب در کشور در حال حاضر نگران‌کننده است، به‌طوری‌که مصرف بی‌رویهٔ منابع آب و افزایش روزافزون سرانه‌های مصرفی آب و بهره‌برداری بی‌ضابطه از منابع آبی باعث کاهش حجم مخزن آب بسیاری از نقاط کشور به‌خصوص منطقهٔ سیستان شده و باعث شرایط تنش آبی در این مناطق گردیده است. به‌دلیل افزایش تقاضا برای آب، غذا و انرژی و پیوند میان آن‌ها، ایجاد تعادل بین اجزای مختلف اصلی تشکیل‌دهنده در قالب رویکرد همبست آب، غذا و انرژی از ارکان مهم مدیریت منابع آب تلقی می‌شود. این رویکرد به‌منظور تقویت توسعهٔ پایدار و بهبود کیفیت زندگی جوامع در مقیاس حوزهٔ آبخیز هیرمند در منطقهٔ سیستان علاوه‌بر محافظت از سرمایه‌های طبیعی و اجتماعی، زمینه‌ساز پایداری منابع آب در درازمدت خواهد بود.
بر این اساس لازم دانسته شد که در این مطالعه به بررسی مدیریت منابع آب با کاربرد مدل همبست آب–غذا–انرژی در منطقهٔ سیستان با مدل‌سازی سیستم‌های پویا پرداخته شود.

بر طبق نتایج مدل شبیه‌سازی انجام‌شده، در سناریو صادرات انرژی برق به‌ازای دریافت حقابه امنیت آب به میزان ۴۹۲۰ میلیون متر مکعب افزایش خواهد یافت و به‌دنبال آن امنیت انرژی به میزان ۲۹۷۵۰۴ کیلووات افزایش می‌یابد. همچنین با اعمال سناریو حذف محصولات آب‌بر چون گندم و جو جایگزینی آن با دیگر محصولات سبب بالا رفتن امنیت آب می‌شود و همچنین امنیت انرژی به میزان ۶۹۲۳۹۹ کیلووات در ساعت نسبت به سال پایه افزایش می‌یابد ولی امنیت غذا به‌دلیل حذف کامل این محصولات در منطقه کاهش می‌یابد. با اعمال سیاست رعایت حقابه از جانب کشور همسایه (افغانستان) امنیت آب به میزان ۹۸۴۰ میلیون متر مکعب افزایش خواهد یافت که این سناریو نسبت به سناریوی پایه، رشد خیلی بیشتری داشته است. همچنین در این سناریو امنیت غذا به‌طور کامل تأمین نشده است و آن‌هم به‌دلیل خشکسالی‌های پی‌درپی در چندین سال اخیر بوده است. در سناریو سیاست کاهش ۱۰ درصدی دام بزرگ و افزایش ۱۰ درصدی دام کوچک امنیت آب به صفر افزایش یافته است و دیگر منطقه ازنظر عرضهٔ آب در بخش‌های مختلف دچار مشکل نیست. بعد از اعمال هرکدام از سیاست‌های مدیریت تقاضا و عرضهٔ آب و مدیریت منابع غذا و انرژی به‌صورت مجزا بر روی مدل از بین آن‌ها بهترین سناریوها انتخاب و به‌صورت ترکیبی اعمال شد و نتایج با یکدیگر مورد

مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از اجرای سیاست‌ها نشان می‌دهد که رعایت حقابه در کنار دیگر سیاست‌های کشاورزی و انرژی می‌تواند راهکار مناسبی برای رسیدن به پایداری در منطقه باشد.

با توجه به نتایج آورده‌شده در مدل‌سازی پویایی سیستم مدیریت منابع آب با کاربرد مدل همبست آب–غذا–انرژی در منطقهٔ سیستان با رویکرد پایداری پیشنهادات ذیل ارائه می‌گردد:

- ✓ احداث و توسعهٔ نیروگاه بادی در منطقهٔ سیستان با هدف صادرات به کشورهای همسایه در ازای دریافت حقابه به‌طوری‌که به‌ازای هر ۱۰۰ مگاوات تولید انرژی تجدیدپذیر سالیانه بیش از ۲۵۰ میلیون لیتر آب و ۳۰ میلیون لیتر گازوئیل صرفه‌جویی می‌شود؛
- ✓ اصلاح الگوی کشت و جایگزینی کشت محصولات کم‌آب درعین‌حال با سوددهی بالا با محصولاتی با نیاز آبی بالا؛
- ✓ مدیریت اصولی و بهینه در واحدهای دام‌پروری.

سپاسگزاری

این مقاله با حمایت مالی پژوهشگاه زابل در قالب طرح تحقیقاتی با کد PR-RIOZ-1402-0702-1 تهیه شده است.

Refrences

Bani Habib, M., & Ghafouri Kharanagh, S. (2019). Evaluation of Traditional Aquifer Governance Features Using the Principles of Groundwater Governance. *Iranian Indigenous Knowledge*, *6*(12), 307–331.

Cabrera, E., Pardo, M. A., Cobacho, R., & Cabrera Jr, E. (2010). Energy audit of water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *136*(6), 669-677.

Del Borghi, A., Moreschi, L., & Gallo, M. (2020). Circular economy approach to reduce water–energy–food nexus. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, *13*, 23-28.

Du, B., Zhen, L., De Groot, R., Long, X., Cao, X., Wu, R., & Wang, C. (2015). Changing food consumption patterns and impact on water resources in the fragile grassland of Northern China. *Sustainability*, *7*(5), 5628-5647.

El-Gafy, I. (2014). System dynamic model for crop production, water footprint, and virtual water nexus. *Water resources management*, *28*, 4467-4490.

Francisco, É. C., de Arruda Ignácio, P. S., Piolli, A. L., & Dal Poz, M. E. S. (2023). Food-energy-water (FEW) nexus: Sustainable food production governance through system dynamics modeling. *Journal of Cleaner Production*, *386*, 135825.

Goharshahi, Gh., Sardarshahraki, A., Shahraki, J. & Aliahmadi, N. (2024). Dynamic analysis of sustainable water resources management based on the interrelationship of water, food and energy resources (Case study: Darmin and Sarbisheh counties in South Khorasan Province). *Journal of Irrigation and Water Engineering*, *14*(3), 154-174. 10.22125/IWE.2023.415390.1747. (In persian)

Karnib, A., & Alameh, A. (2020). Technology-oriented approach to quantitative assessment of water–energy–food nexus. *International Journal of Energy and Water Resources*, *4*, 189-197.

Keyhanpour, M. J., Jahromi, S. H. M., & Ebrahimi, H. (2021). System dynamics model of sustainable water resources management using the Nexus Water-Food-Energy approach. *Ain Shams Engineering Journal*, *12*(2), 1267-1281.

Khiareddine, A., Salah, C. B., Rekioua, D., & Mimouni, M. F. (2018). Sizing methodology for hybrid photovoltaic/wind/hydrogen/battery integrated to energy management strategy for pumping system. *Energy*, *153*, 743-762.

Kolahzar Moghaddam, F., & Ketabchi, H. (2019). Feasibility study of using simulation-optimization model to evaluate decisions based on water-food-energy nexus considering environmental damages. Ecohydrology, *7*(2), 313-329. (in Persian).

Li, P. C., & Ma, H. W. (2020). Evaluating the environmental impacts of the water-energy-food nexus with a life-cycle approach. *Resources, Conservation and Recycling*, *157*, 104789.

Mirzaei, A., Saghafian, B., Mirchi, A., & Madani, K. (2019). The groundwater–energy–food nexus in Iran's agricultural sector: implications for water security. *Water*, *11*(9), 1835.

Pacetti, T., Lombardi, L., & Federici, G. (2015). Water–energy Nexus: a case of biogas production from energy crops evaluated by Water Footprint and Life Cycle Assessment (LCA) methods. *Journal of Cleaner Production*, *101*, 278-291.

Plappally, A. K. (2012). Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(7), 4818-4848.

Ravar, Z., Zahraie, B., Sharifinejad, A., Gozini, H., & Jafari, S. (2020). System dynamics modeling for assessment of water–food–energy resources security and nexus in Gavkhuni basin in Iran. *Ecological Indicators*, *108*, 105682.

Safavian, N., Mohammadi, A., Mosleh Shirazi, A. N., & Alimohammadlo, M. (2022). Water resources management in Food-Energy-Water Nexus: The application of system dynamics in Iran's Maharlu Lake Basin. *Iranian journal of management sciences*, *17*(67), 1-26.

Samavatean, N., Rafiee, S., & Mobli, H. (2011). An analysis of energy use and estimation of a mechanization index of garlic production in Iran. *Journal of Agricultural Science*, *3*(2), 198.

Schull, V. Z., Daher, B., Gitau, M. W., Mehan, S., & Flanagan, D. C. (2020). Analyzing FEW nexus modeling tools for water resources decision-making and management applications. *Food and Bioproducts Processing*, *119*, 108-124.

Shahmohammadi, A., Khoshbakht, K., Veisi, H., & Nazari, M. R. (2024). Investigating of Water, Energy, and Food Nexus with the Systems Dynamics Approach; a Case Study of Varamin Plain. *Environmental Sciences*, *22*(1), 1-20.

Simpson, G. B., & Jewitt, G. P. (2019). The development of the water-energy-food nexus as a framework for achieving resource security: a review. *Frontiers in Environmental Science*, *7*, 8.

Sterman, J. (2002). System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world.

Sušnik, J., Masia, S., Indriksone, D., Brēmere, I., & Vamvakeridou-Lydroudia, L. (2021). System dynamics modelling to explore the impacts of policies on the water-energy-food-land-climate nexus in Latvia. *Science of The Total Environment*, *775*, 145827.

Wen, C., Dong, W., Zhang, Q., He, N., & Li, T. (2022). A system dynamics model to simulate the water-energy-food nexus of resource-based regions: A case study in Daqing City, China. *Science of the Total Environment*, *806*, 150497.

Yang, H., Reichert, P., Abbaspour, K. C., & Zehnder, A. J. (2003). A water resources threshold and its implications for food security.

Zeng, Y., Liu, D., Guo, S., Xiong, L., Liu, P., Yin, J. & Wu, Z. (2022). A system dynamic model to quantify the impacts of water resources allocation on water–energy–food–society (WEFS) nexus, *Hydrology and Earth System Sciences*, *26*(15), 3965-3988.

Zhao, J., Liu, W., & Deng, H. (2005). The potential role of virtual water in solving water scarcity and food security problems in China. *The International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, *12*(4), 419-428.