



Investigating the Nexus Dynamics of Water, Energy, Food in the Hirmand Basin with the approach of Water Diplomacy under Management Scenarios

Fazel Ghabaishavi¹ | Ali Sardar Shahraki^{2*} | Mahdi Safdari³ | Neda Ali Ahmadi⁴

1. PhD student in Agricultural Economics, Department of Agricultural Economics, Faculty of Management and Economics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.
2. Associate Professor of Agricultural Economics, Department of Agricultural Economics, Faculty of Management and Economics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. Email: a.s.shahraki@eco.usb.ac.ir.
3. Associate Professor of Agricultural Economics, Department of Agricultural Economics, Faculty of Management and Economics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.
4. PhD in Agricultural Economics, Department of Agricultural Economics, Faculty of Management and Economics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received April 06, 2024
Revised May 11, 2024
Accepted June 12, 2024

Keywords:
Water Diplomacy,
Irrigation Efficiency,
Vensim,
Area under cultivation,
System Dynamics.

ABSTRACT

The issue of water in the cross-border region of Hirmand has affected the relations between Iran and Afghanistan as a challenge, considering the wide-ranging effects on food, water, economic and environmental security. Using a proper management and policy in water diplomacy, in order to achieve security to security resources. Close to water, energy, food and the mutual influence that their combination has caused the formation of a conceptual concept called interrelated, which play an important role in achieving sustainable development. The purpose of this research is to investigate the dynamics of water, energy, and food correlation in the Hirmand watershed with water diplomacy studies under management scenarios that are not considered in other previous researches. In this research, using the dynamic system method, various relationships and feedbacks in subsystems have been defined using storages and flows. In the next step, after reviewing and evaluating the presented model, simulation has been done using statistical tests and historical scenarios related to the years 1379-1400. According to the results obtained from the ten-year simulation, by applying the scenario of increasing irrigation efficiency from 35% to 70% without increasing the cultivation area, agricultural production in Sistan region has increased compared to the base model. This increase in the production of agricultural products from 77.65 to 92.69 thousand tons shows an increase in the efficiency of water consumption. The implementation of the simulation and development of the cultivated area of Sanafeq 1404, in Hirmand catchment area, increases the security of agricultural products in 1410 compared to 1379 by the amount of 227,900 tons. Based on the results of the current research, improving water efficiency is one of the most important tools in the combined analysis of the scenario of increasing irrigation efficiency and the development of cultivated area in the horizon of 1404. Therefore, according to the obtained results, the use of water diplomacy along with the dynamic modeling of resources is related to the management of water issues and conflicts in the Hirmand watershed. Due to the Sistan region to the Hirmand Trans boundary River, the connection of water, energy and food with the strengthening of water diplomacy in order to reduce tension and sustainable management, the attention of policy makers and planners should be focused on the Hirmand watershed to protect the Sistan plain from serious damage from the future water crisis and disasters. Looked environmentally safe.

Cite this article: Ghabaishavi, F., Sardar Shahraki, A., Safdari, M., & Ali Ahmadi, N. (2024). Investigating the Nexus Dynamics of Water, Energy, Food in the Hirmand Basin with the approach of Water Diplomacy under Management Scenarios. *ECO HYDROLOGY*. 11 (2), 287-300. Doi: doi.org/10.22059/IJE.2024.374822.1810



© Fazel Ghabaishavi, Ali Sardar Shahraki, Mahdi Safdari, Neda Ali Ahmadi.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/IJE.2024.374822.1810>



بررسی دینامیک همبست آب، انرژی، غذا در حوزه آبخیز هیرمند با رویکرد دیپلماسی آب تحت سناریوهای مدیریتی

فاضل غبیشاوی^۱، علی سردار شهرکی^۲، مهدی صفدری^۳، ندا علی احمدی^۴

۱. دانشجوی دکتری اقتصاد کشاورزی، گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.
۲. دانشیار اقتصاد کشاورزی، گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.
a.s.shahraki@eco.usb.ac.ir
۳. دانشیار اقتصاد کشاورزی، گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.
۴. دکترا اقتصاد کشاورزی، گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۳

کلیدواژه‌ها:

دیپلماسی آب،

راندمان آبیاری،

ونسیم،

سطح زیر کشت،

سیستم پویا.

مسئله آب در حوضه رودخانه فرامرزی هیرمند، با توجه به تأثیرات گسترده بر امنیت غذایی، آبی، اقتصادی و محیط‌زیست، روابط بین ایران و افغانستان را به‌عنوان یک چالش اساسی تحت‌تأثیر قرار داده است. اتخاذ یک رویکرد مدیریتی و سیاست‌گذاری مناسب در دیپلماسی آب، به‌منظور دستیابی پایدار به امنیت منابع آبی ضروری است. از طرفی، ارتباط نزدیک آب، انرژی، غذا و تأثیر متقابلی که با یکدیگر دارند، باعث شکل‌گیری مفهوم جدیدی به نام همبست شده است که نقشی مهم در دستیابی به اهداف توسعه پایدار ایفا می‌کند. پژوهش حاضر به تحلیل دینامیک سیستم‌های مدیریت پایدار منابع آب مبتنی بر همبست منابع آب، انرژی و غذا در افق ۳۲ ساله (۱۳۷۹-۱۴۱۰) در حوزه آبخیز هیرمند با رویکرد دیپلماسی آب تحت سناریوهای مدیریتی به کمک نرم‌افزار ونسیم (DSS Vensim) پرداخته که در سایر تحقیقات پیشین مورد توجه نبوده است. نتایج پژوهش نشان داد با اعمال سناریو افزایش راندمان آبیاری از ۳۵ درصد به ۷۰ درصد بدون افزایش سطح کشت، تولید کشاورزی در منطقه سیستان به نسبت مدل پایه افزایش یافته است. این افزایش تولید محصولات کشاورزی از ۷۷/۶۵ به ۹۲/۶۹ هزار تن، نشان‌دهنده افزایش کارایی مصرف آب است. اجرای شبیه‌سازی سناریو توسعه سطح زیر کشت براساس افق ۱۴۰۴ در حوزه آبریز هیرمند، سبب افزایش امنیت محصولات کشاورزی در سال ۱۴۱۰ نسبت به سال ۱۳۷۹ به میزان ۲۲۷۹۰۰ تن می‌گردد. مطابق نتایج پژوهش حاضر، بهبود بهره‌وری آب، یکی از مؤثرترین ابزار در بررسی سناریوی ترکیبی، افزایش راندمان آبیاری و سناریو توسعه سطح زیر کشت براساس افق ۱۴۰۴ است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده پیشنهاد می‌شود به‌دلیل وابستگی منطقه سیستان به رودخانه فرامرزی هیرمند نیز، اتخاذ همبست آب، انرژی و غذا با تقویت دیپلماسی آبی به‌منظور کاهش تنش و مدیریت پایدار مورد توجه سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان در حوزه آبخیز هیرمند قرار گیرد تا دشت سیستان از آسیب جدی ناشی از بحران آبی آینده و فجایع زیست‌محیطی حفظ گردد.

استناد: غبیشاوی، فاضل، سردار شهرکی، علی، صفدری، مهدی، علی احمدی، ندا. (۱۴۰۳). بررسی دینامیک همبست آب، انرژی، غذا در حوزه آبخیز هیرمند با رویکرد دیپلماسی آب تحت سناریوهای مدیریتی. *اكو هيدرولوژی*، ۱۱(۲)، ۲۸۷-۳۰۰.

DOI: <http://doi.org/10.22059/IJE.2024.374822.1810>

© فاضل غبیشاوی، علی سردار شهرکی، مهدی صفدری، ندا علی احمدی. ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/IJE.2024.374822.1810>



۱. مقدمه

در دیدگاه و چشم‌انداز جدید جهانی، آب کالایی اقتصادی-اجتماعی است که به عنوان اساسی‌ترین نیاز در تمامی فرایندها و اجزای اکوسیستم‌های طبیعی و جوامع انسانی، نقش حیاتی ایفا می‌کند [۱]. کمبود آب در بسیاری از کشورها در حال تشدید است و این روند به‌طور مستقیم بر آب کشاورزی و امنیت غذایی تأثیر می‌گذارد [۲]. طبق برآوردهای فائو، بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب، تولید خود را باید ۶۰٪ افزایش دهد تا بتواند نیازهای رشد جمعیت در سال ۲۰۵۰ را تأمین کند [۳]. همچنین براساس گزارش‌های آژانس بین‌المللی انرژی، مقدار مصرف انرژی در سال ۲۰۵۰ باید حدود ۸۰٪ افزایش یابد. با افزایش جمعیت در دهه‌های اخیر، تأمین منابع آب، غذا و انرژی برای حفظ زندگی و رفاه انسان‌ها مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفت که منجر به شکل‌گیری ایده همبست آب، غذا و انرژی (WEF) شد [۴]. ایده‌های جهانی همبست در راستای اجرای مدیریت پایداری منابع به‌صورت یکپارچه به‌جای بخشی‌نگری مطرح گردید که اشاره به ذات یکپارچه و اثرات متقابل آب، انرژی و غذا دارد [۵ و ۶]. دستیابی به چنین ادراکی، با شناسایی ارتباط منابع موجود در این حوزه‌ها منجر به ارائه راهکارهای مناسب برای تصمیم‌گیران سیاسی، مدیران و برنامه‌ریزان در جهت حفاظت از منابع موجود می‌شود و دستیابی به توسعه پایدار در مدیریت یکپارچه منابع را فراهم می‌کند [۷]. ونگ^۱ و همکاران (۲۰۲۳) یک مدل پویایی سیستم برای شبیه‌سازی و توسعه سیستم همبست (WEF) در استان هونان چین نشان دادند استان هونان در وضعیت خودکفایی در منابع آبی قرار خواهد گرفت، اما از منظر امنیت انرژی وضعیت مناسبی نخواهد داشت [۸]. دهقانی و همکاران (۲۰۱۹) در ارزیابی سناریوهای تغذیه مصنوعی و پخش سیلاب در راستای مدیریت یکپارچه منابع آب سطحی و زیرزمینی، با استفاده از مدل (WEAP) نشان دادند دشت ورامین با ادامه وضعیت فعلی در ۲۰ سال آینده قادر به تأمین ۲/۱۶ و ۴/۲۷ درصد از نیازهای آبی بخش کشاورزی و صنعت نیست [۹]. لیانی^۲ و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از رویکرد سیستم دینامیک به ارزیابی اثرات سیاست‌های مدیریت تقاضای آب در حوزه آبریز رودخانه خیرآباد پرداخته‌اند. نتایج پژوهش در دوره مورد مطالعه، احتمال عدم تأمین تقاضای فزاینده آب، در نتیجه افزایش جمعیت و سطح زیر کشت محصولات کشاورزی، با استفاده از منابع آب در دسترس را پیش‌بینی می‌کند [۱۰]. مساللی و قربانی (۲۰۲۲) به ارزیابی روش‌های مختلف آبیاری با استفاده از رویکرد همبست آب، انرژی، غذا و کربن در حوضه زاینده‌رود پرداخته‌اند. نتایج نشان‌دهنده آن است که با تغییر روش آبیاری کنونی به آبیاری قطره‌ای و بارانی، کاهش آب مصرفی از ۱۷ درصد به ۴/۸۴ درصد باعث وضعیت بهبود حوضه خواهد شد؛ اما در روش بارانی انرژی بیشتری برای آبیاری نیاز است [۱۱]. دولت‌آبادی و همکاران (۲۰۲۰) به مدل‌سازی تعاملات بین سیستم‌های منابع ایران، عراق و ترکیه در حوضه مشترک هورالعظیم/هورالهویزه با رویکرد پویایی سیستم پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که برای دو سناریوی تکمیل پروژه GAP و کاهش ۱۰ درصدی سطح زیر کشت، در هر سه کشور، نشان می‌دهد که آب ورودی به تالاب به‌ترتیب ۴۰۰ میلیون متر مکعب کاهش و ۱۹۰۰ میلیون متر مکعب نسبت به سال ۲۰۲۰ افزایش می‌یابد [۱۲]. لی و ما^۳ (۲۰۲۰) به بررسی زیست‌محیطی همبست آب و انرژی و غذا با استفاده از چرخه عمر در کشور تایوان پرداخته‌اند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که متغیر غذا تقریباً ۹۹ درصد منابع آب و انرژی را برای تولید مواد غذایی مصرف می‌کند [۱۳]. اسلامی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی تأثیر همبست آب، انرژی و غذا در مدیریت جامع منابع آب شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود واقع در استان گیلان پرداخته‌اند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد آب عرضه‌شده به شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود با رویکرد همبست به‌ترتیب ۸/۶ و ۸/۷ میلیون متر مکعب بیشتر از حالت بدون رویکرد همبست به دست آمده است [۱۴]. ژانگ^۴ و همکاران (۲۰۱۸) از مدل‌سازی پویا در پژوهشی درباره حفاظت از آب در شهر برای شبیه‌سازی سیاست‌های بهینه در زمینه حفاظت از آب استفاده کرده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۵، اهداف حفاظت از آب، از جمله حفظ آب و کنترل محیط آب، با نرخ کاهش سالانه انتشار گازهای گلخانه‌ای اکسیژن به میزان ۱۲/۶ درصد و نرخ سالانه ناخالص ثابت سالانه ۴/۳ درصد، بهبود می‌یابد [۱۵]. مروری بر مطالعات پیشین نشان می‌دهد که علاوه بر کاهش منابع آبی و افزایش میزان سطحی تحت تنش آبی، اختلالات در چرخه هیدرولوژیکی بر کیفیت آب و در دسترس بودن یا کمبود آب اثر داشته و به‌طور چشمگیری در تغییر سیاست‌ها تأثیر می‌گذارد. در این راستا، رودخانه هیرمند به‌عنوان یکی از منابع آبی مشترک در جنوب شرقی کشور، به‌دلیل تأثیرات گسترده‌اش بر امنیت غذایی، آبی، اقتصادی و محیط‌زیست در دشت سیستان، گاهی منجر به افزایش

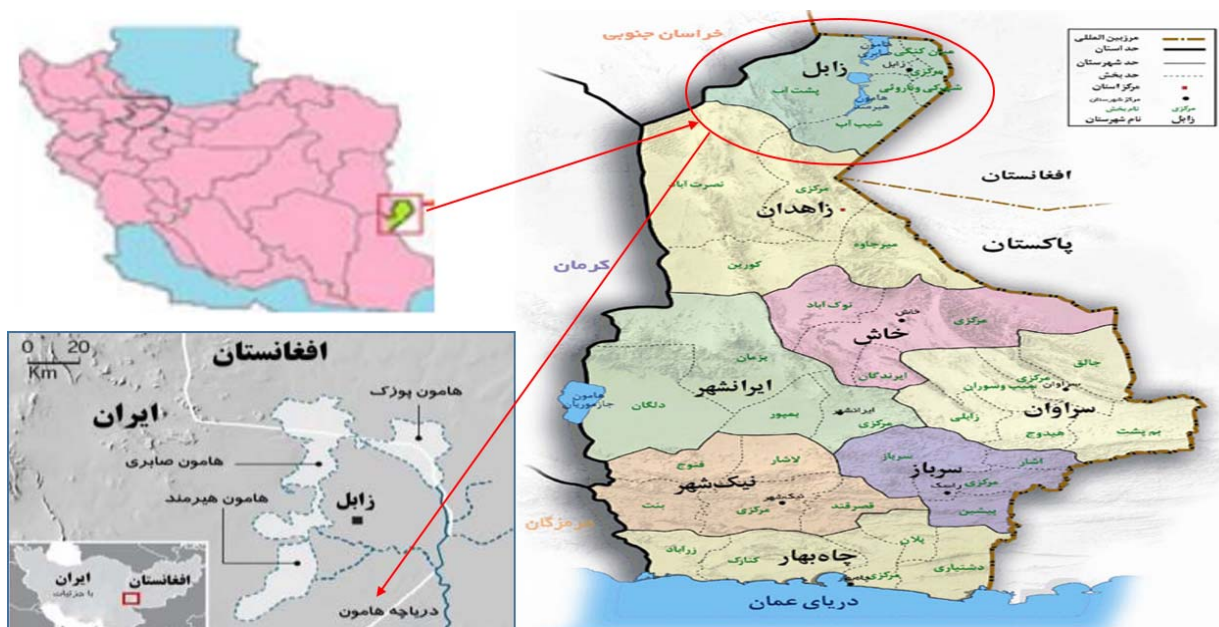
1. Wang
2. Layani
3. Li & Ma
4. Song

تنش‌ها در روابط سیاسی بین ایران و افغانستان می‌شود. یکی از علل تنش‌ها، کمبود منابع آب است. البته فقط کمبود منابع آب باعث این تنش‌ها نمی‌شوند؛ بلکه اتخاذ رویکرد دیپلماسی آب می‌تواند ضمن تعامل و تبادل اطلاعات از بروز تنش‌ها و درگیری‌ها جلوگیری کند و توسعه پایدار منابع آبی را ممکن سازد [۱۶]. در بررسی و تحلیل منابع آب مشترک بر مبنای نگرش سیستمی می‌توان از نظریه بازی‌ها و نظریه سیستم‌های دینامیک (پویا) استفاده کرد. مدل‌سازی پویایی سیستم‌ها می‌تواند اجزای هیدرولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی و همچنین اقدامات مدیریتی تحت سناریوهای مختلف را در یک مدل جامع برای درک رفتار سیستم‌های پیچیده و پاسخ آن‌ها در طول زمان ترکیب و تجزیه و تحلیل کند [۶ و ۱۷]. از این رو با توجه به اهمیت مطالعه حوضه هیرمند به‌عنوان یکی از عوامل مهم در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب در منطقه سیستان، هدف از این تحقیق، بررسی دینامیک همبست آب، انرژی و غذا در حوزه آبخیز هیرمند با رویکرد دیپلماسی آب تحت سناریوهای مدیریتی است که در سایر تحقیقات پیشین مورد توجه نبوده است.

۲. روش تحقیق

۲.۱. منطقه مطالعاتی

منطقه سیستان به‌لحاظ تقسیمات کشوری شامل پنج شهرستان (زابل، زهک، نیمروز، هیرمند و هامون)، هفت شهر، ۱۸ شهرستان و بیش از ۹۸۵ روستا و آبادی است. سیستان با طول جغرافیایی ۶۰ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۵ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی، در بخش شمال شرق استان سیستان و بلوچستان واقع شده و با جمعیتی بالغ بر ۳۹۴ هزار نفر و مساحت ۱۵۱۹۷ کیلومتر مربع، حدود ۸/۱ درصد از خاک این استان را به خود اختصاص داده است. به‌لحاظ شرایط اقلیمی، آب‌وهوای حاکم بر منطقه سیستان در تمام طبقه‌بندی‌های اقلیمی از نوع گرم و خشک است. میانگین دمای سالانه ۲۱ درجه سانتی‌گراد، میانگین رطوبت نسبی ۳۸ درصد و متوسط بارندگی در منطقه سیستان حدود ۵۸ میلی‌متر است؛ درحالی‌که میزان تبخیر و تعرق سالانه در دشت سیستان ۸۰ برابر میزان بارندگی در این منطقه است. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه سیستان را نشان می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه سیستان

۲.۲. داده‌ها و اطلاعات آماری

در این پژوهش، به تحلیل پویای سیستم‌های مدیریت پایدار منابع آب مبتنی بر همبست بین آب، غذا، و انرژی با استفاده از رویکرد دیپلماسی در یک افق ۳۲ ساله (۱۳۷۹-۱۴۱۰) پرداخته شده است. جمع‌آوری اطلاعات سری زمانی به استناد نتایج عملکرد و داده‌های سازمان جهاد کشاورزی شهرستان زابل و سازمان محیط‌زیست شهرستان زابل و سامانه هواشناسی شهرستان زابل و شرکت‌های آبفا و آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای داده‌های جمعیت، از سایت مرکز آمار ایران و برای به

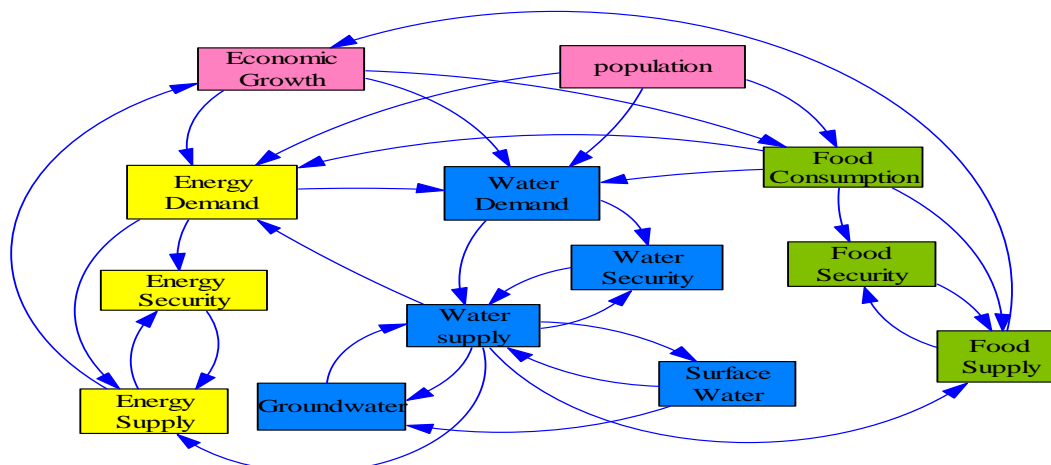
دست آوردن شدت مصرف انرژی در بخش کشاورزی، از تقسیم میزان مصرف نهایی انرژی در بخش کشاورزی بر ارزش افزوده این بخش استفاده گردید. در جدول ۱، مقادیر مهم متغیرهای پیوند آب، غذا و انرژی در منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.

جدول ۱: شناسایی مقادیر مهم متغیرهای پیوند آب، غذا و انرژی

متغیرها	مقادیر اولیه	واحد	منبع
کل جمعیت	۳۶۰۰۰	نفر	مرکز آمار ایران
سطح زیر کشت	۸۲۷۰۰	هکتار	آمارنامه جهاد کشاورزی
میزان عملکرد عمده محصولات زراعی و باغی	۷۱۵۴۵۰	تن	آمارنامه جهاد کشاورزی
دام سنگین	۱۳۲۳۴۴	رأس	آمارنامه جهاد کشاورزی
دام سبک	۸۹۰۷۸۴	رأس	آمارنامه جهاد کشاورزی
ذخایر چاه نیمه ۱ و ۲ و ۳	۳۳۰	میلیون متر مکعب	شرکت آب منطقه‌ای استان
سرانه نیاز آبی دام سنگین در هر روز	۰/۹۰	متر مکعب در روز	آمارنامه جهاد کشاورزی
سرانه نیاز آبی دام سبک در هر روز	۰/۰۱	متر مکعب در روز	آمارنامه جهاد کشاورزی
حجم کل آب در دسترس	۸۸۴/۴۹	میلیون متر مکعب	شرکت آب منطقه‌ای استان
سرانه نیاز آب جمعیت روستایی در هر روز	۰/۱۲	متر مکعب در روز	آمارنامه جهاد کشاورزی
شدت مصرف انرژی در بخش کشاورزی	۱/۵۴	بشکه معادل نفت خام به میلیون ریال	ترازنامه انرژی
میزان تبخیر سالانه	۴۱۰۰	میلی متر	اداره کل هواشناسی

۳.۲. مدل سازی پویایی سیستم

پویایی سیستم که به طور گسترده در مدل سازی و شبیه سازی سیستم های پیچیده برای درک روابط متقابل بین اجزا استفاده می شود (۱۸)، در سال های اخیر به عنوان یکی از توانمندترین ابزارهای مدل سازی در تجزیه و تحلیل سیستم های منابع آب در مقیاس حوزه آبریز مورد توجه قرار گرفته است [۱۹ و ۲۰]. پژوهش حاضر با استفاده از روش پویایی سیستم به مدل سازی و شبیه سازی مدیریت پایدار منابع آب با استفاده از نرم افزار DSS Vensim پرداخته است. منطبق با مبانی تئوری پویایی سیستم ها، فرضیه های دینامیکی مسئله مدیریت پایدار منابع آب در حوزه آبخیز هیرمند مبتنی بر همبست آب، انرژی و غذا (WEF) در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲: مدل مفهومی مدیریت پایدار منابع آب در حوزه آبخیز هیرمند براساس همبست (WEF)

در روش سیستم پویایی، تصمیم گیری ها سیستمی بوده و پیامدهای تصمیم ها با استفاده از روش های پیش بینی ریاضی پیش از اجرا برآورد می شوند. مبناى اصلی روش پویایی سیستم، در نظر گرفتن ویژگی های اساسی نظام های پیچیده برای درک بهتر آن ها و ایجاد تغییرهای مطلوب است. یک سیستم پویا در قالب متغیرهای انباشت و جریان ارائه می شود که متغیرهای انباشت، حالت سیستم و

متغیرهای جریان، نرخ تغییر متغیرهای انباشت را نشان می‌دهند. به صورت ریاضی، متغیرهای انباشت از انباشته شدن خالص جریان ورودی ناشی می‌شوند و به صورت انتگرال، جریان‌های خالص ورودی نشان داده می‌شوند [۲۱].

$$Stok(t) = \int_{t_0}^t [Inflow(s) - Outflow(s)] ds + Stok(t_0) \quad (1)$$

که $S(t)$ متغیره انباره در زمان t ، $inflow(s)$ و $outflow(t)$ به ترتیب مقدار جریان ورودی و خروجی در هر زمان S بین زمان اولیه t_0 و زمان جاری t می‌باشد. به طور همانند نرخ‌های جریان در هر زمان به صورت نرخ تغییر متغیرهای انباشت تعریف می‌شوند:

$$d(stok)/dt = Inflow(t) - Outflow(t) \quad (2)$$

دیگر متغیرهای مورد استفاده در مدل پویایی سیستم به ترتیب شامل متغیرهای کمکی و پارامترها هستند. متغیرهای کمکی تابع‌هایی از دیگر متغیرها بوده و مقدار آن‌ها مستقل از مقدار متغیرها در دوره‌های زمانی پیش است. مقدار پارامترها نیز ثابت‌اند [۲۲].

۴.۲. کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل

مدل‌ها نمایشی از واقعیت‌ها یا تصور و شناخت بشر از حقیقت هستند. به منظور مفید بودن یک مدل باید ببینیم آیا چیزهایی که در واقعیت مشاهده می‌شود، در مدل وجود دارند یا خیر. از آزمون‌های صحت‌سنجی مدل به منظور بررسی نزدیک بودن یک مدل با واقعیت استفاده می‌شود. از رایج‌ترین آزمون‌های اعتبارسنجی، مقایسه نتایج مدل با اطلاعات مشاهده‌شده و آزمون شرایط حدی است. در آزمون تکرار رفتار، به بررسی نتایج مدل از طریق مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده پرداخته می‌شود؛ سپس، آزمون خطا به صورت رابطه‌های (۳) تا (۵) با استفاده از ضریب تعیین (R^2)، معیار نش-ساتکلیف (NSE) که دامنه تغییرات آن از منفی بی‌نهایت تا ۱ را شامل می‌شود، صورت می‌گیرد. هرچه این معیار به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، صحت‌سنجی مدل دقیق‌تر خواهد بود. مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۵ حاکی از عملکرد قابل قبول مدل است و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برای ارزیابی عملکرد مدل انجام می‌شود که مقادیر این شاخص باید کوچک و نزدیک به صفر باشد [۲۳].

$$R^2 = \frac{\left[\sum (y_{m,i} - \bar{y}_{m,i})(y_{s,i} - \bar{y}_{s,i}) \right]^2}{\sum (y_{m,i} - \bar{y}_{m,i})^2 \sum (y_{s,i} - \bar{y}_{s,i})^2} \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum (y_{m,i} - y_{s,i})^2}{\sum (y_{s,i} - \bar{y}_{s,i})^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \right]^{0.5} \quad (5)$$

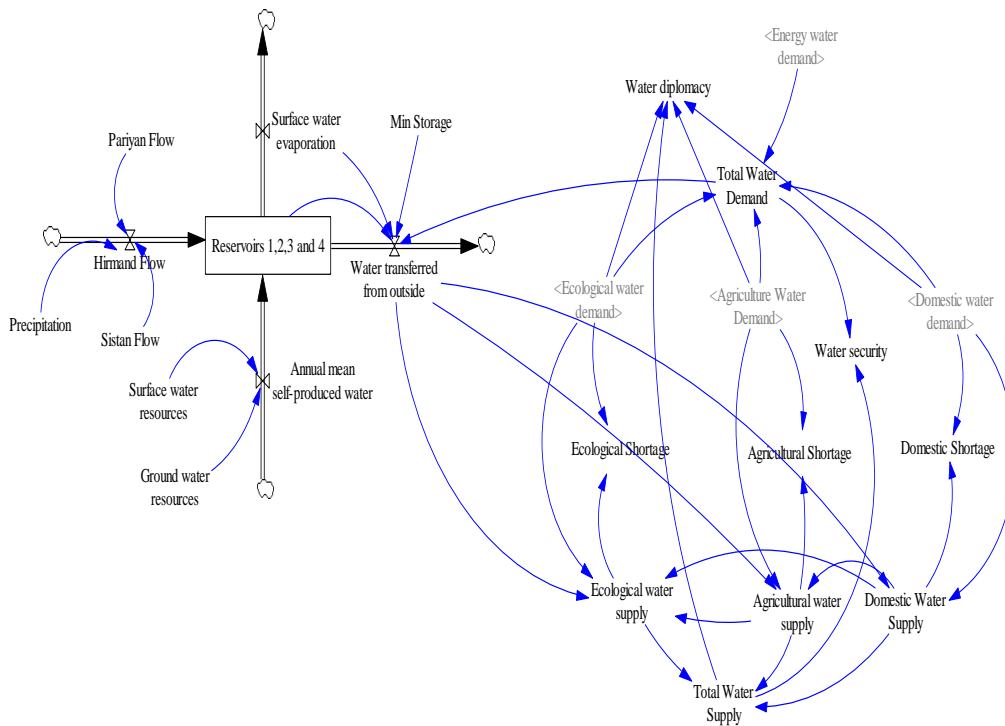
۳. یافته‌ها و بحث

زیرسیستم‌های مدل براساس نمودارهای حلقه‌های علی و معلولی توسعه یافته‌اند تا سبب توصیف بهتر تجمع متغیرها شوند و روند جریان مواد در سیستم را تعیین کنند. نمودارهای ذخیره و جریان حوزه آبخیز هیرمند از نمودارهای زیرسیستم آب، غذا و انرژی تشکیل شده که به ترتیب در شکل‌های (۳) تا (۵) نشان داده شده است. متغیرهای ذخیره سیستم شامل جمعیت، آب‌های سطحی، مخازن طبیعی چاه‌نیمه‌ها (مورد استفاده به منظور ذخیره بخشی از آب مازاد رودخانه هیرمند و استفاده از این ذخیره در فصول کم‌آبی و خشک)، منابع غذایی، کشاورزی و دامی است. این متغیرهای ذخیره با تغییر در نرخ ورودی یا خروجی متغیرها افزایش یا کاهش می‌یابند.

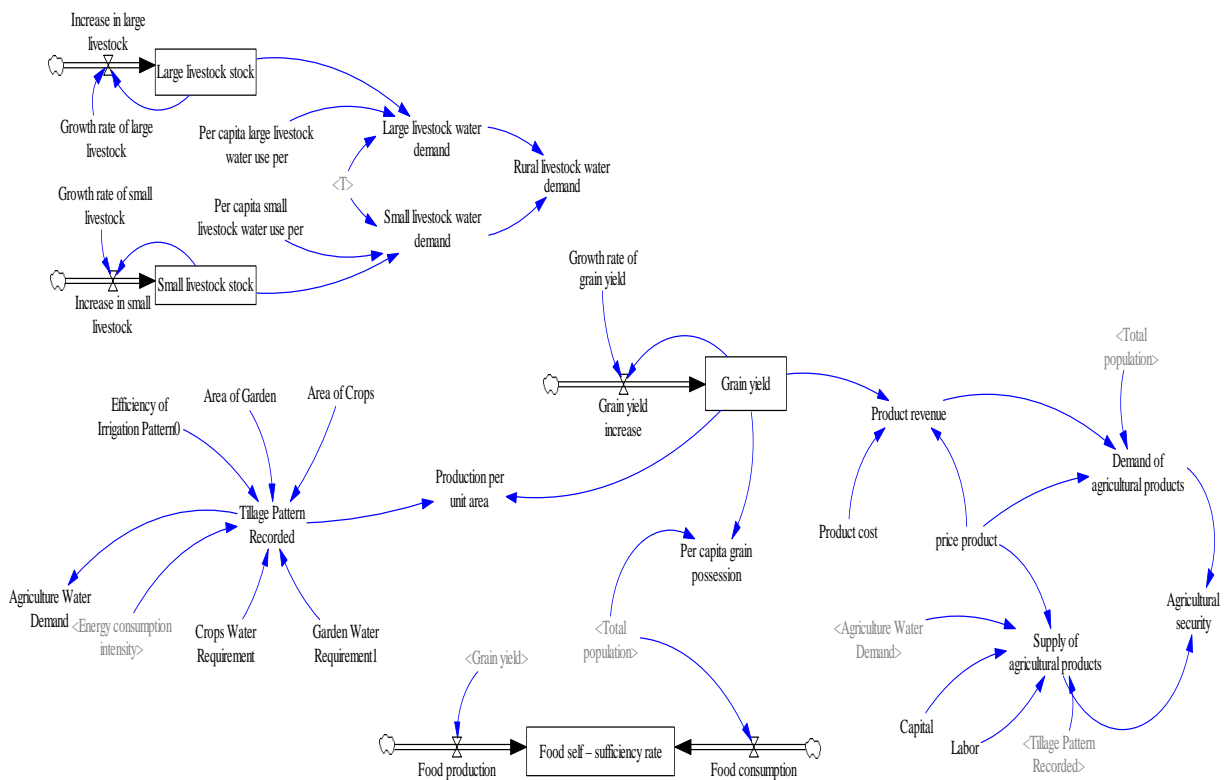
۱.۳. زیرسیستم منابع آب

حلقه جریان - ذخیره زیرسیستم عرضه منابع آب، متغیرهای چرخه عرضه و تقاضای آب، تأمین آب و اکوسیستم حوزه آبخیز هیرمند در منطقه سیستان را نشان می‌دهد. طرح‌های انتقال آب، روابط متقابل آب‌های سطحی، هیدرولوژی منطقه و تأمین آب در منطقه، اجزای اصلی این زیرسیستم را تشکیل می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ویژگی‌های اقلیمی و عرضه و تقاضای آب منطقه از

قبیل بارندگی، دما و تبخیر در حوزه آبخیز هستند. در نمودار حلقه جریان - ذخیره دینامیک بین اجزا با استفاده از فلش های علامت دار، روابط علی و معلولی نشان داده شده است.



شکل ۳: نمودار ذخیره و جریان زیرسیستم منابع آب



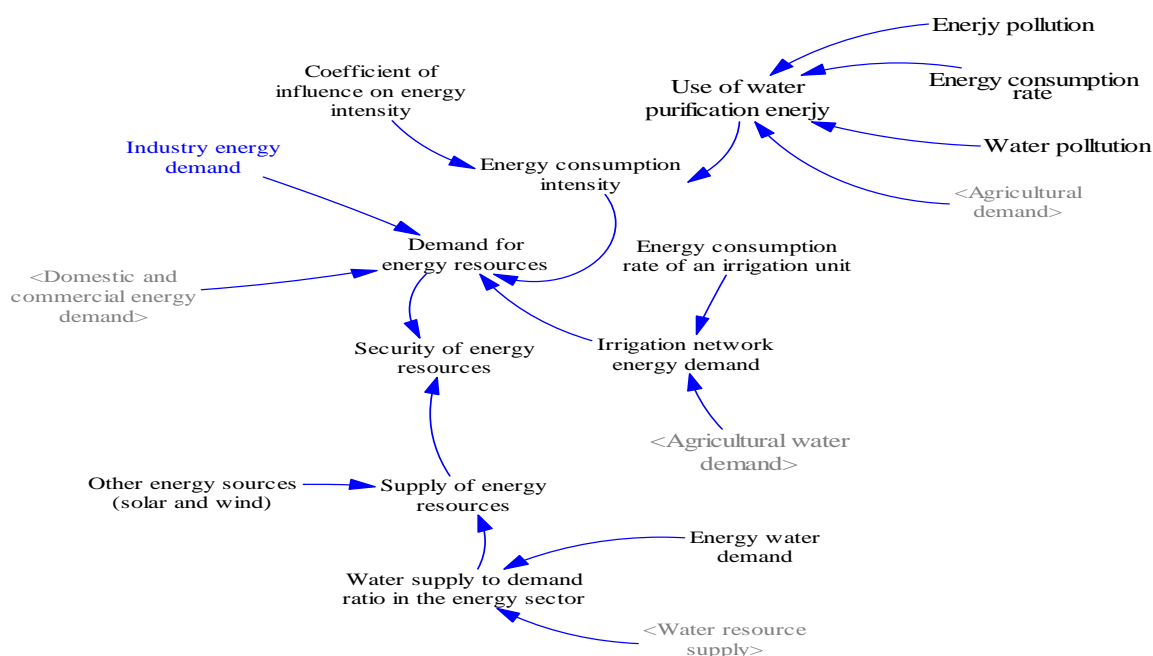
شکل ۴: نمودار ذخیره و جریان زیرسیستم منابع غذا

۲.۳. زیرسیستم منابع غذا

حوزه آبخیز هیرمند دارای الگوی کشت متنوعی از انواع گوناگون محصولات آبی است. عرضه محصولات کشاورزی شامل یونجه، باغی، گوجه، پیاز، کنجد، هندوانه، آفتابگردان، ذرت، گندم، جو، خربزه، خیار، سورگوم، حبوبات و گیاهان دارویی است که به دو دسته زراعی و باغی طبقه‌بندی شده است. بخش کشاورزی به‌عنوان عمده‌ترین تقاضای آب است و تقاضای آب در این بخش ناشی از میزان تولید منابع غذایی بخش کشاورزی و نیاز آبی محصولات و شدت مصرف آب در بخش کشاورزی است. شدت مصرف آب در کشاورزی، ناشی از سه عامل الگوی کشت، راندمان آبیاری و نیاز آبی در این بخش در نظر گرفته شده است. عرضه غذا از منابع غذایی بخش کشاورزی، بخش شیلات و دام و طیور تأمین می‌گردد. از سوی دیگر، تقاضای کل آب غذا از مجموع تقاضای آب هر سه بخش کشاورزی به‌عنوان عمده‌ترین تقاضای آب است.

۳.۳. زیرسیستم منابع انرژی

شکل ۵ بیانگر عرضه انرژی از طریق شبکه برق ملی، نیروگاه‌های برق آبی، منابع انرژی (خورشیدی و بادی) و سایر است. تقاضای انرژی، شامل میزان تقاضای مصارف برق صنعت، کشاورزی و خدمات بوده که ناشی از جمعیت و شدت مصرف انرژی است. امنیت منابع انرژی به‌صورت تفاوت عرضه و تقاضای انرژی در نظر گرفته شده است.



شکل ۵: نمودار ذخیره و جریان زیرسیستم منابع انرژی

برای ارزیابی بهتر عملکرد مدل، کل سری زمانی به دو مجموعه داده تقسیم شد. بخش اول، شامل داده‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۰ که برای مدل کالیبره‌سازی استفاده می‌شود و داده‌های سال ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ که برای اعتبار سنجی مدل استفاده می‌شود. نتایج کالیبراسیون، مطابق جدول (۲) نشان می‌دهد که اغلب مقادیر ضریب تعیین (R^2) بین داده‌های شبیه‌سازی شده بیشتر از ۷۰ درصد است و تمامی مقادیر در معیار نش-ساتکلیف (NSE) بیش از ۰/۵ و مقدار خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) عددی نزدیک به صفر دارد که این نتایج مبنای نسبتاً خوبی برای اعتبار سنجی مدل و پیش‌بینی‌های ساخته‌شده است. همچنین نتایج اعتبار سنجی در اکثر مقادیر مطلوب معیار نش-ساتکلیف (NSE) بیش از ۰/۵ و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) عددی نزدیک به صفر دارد و موارد ضریب تعیین (R^2) بیش از ۰/۸۰ است.

جدول (۲): آزمون‌های مدل همبست آب، انرژی، غذا

سال	متغیر	کالیبراسیون										اعتبارسنجی			
		۷۹	۸۱	۸۳	۸۵	۸۷	۸۹	R ²	۹۲	۹۴	۹۶	۹۸	۰۰	R ²	
جمعیت	NSE RMSE	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۹
دام سنگین	NSE RMSE	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۸
دام سیک	NSE RMSE	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۸
میزان محصول	NSE RMSE	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۲۸
ذخایر چاه‌نیمه	NSE RMSE	۰/۲۱	۰/۲۹	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۲۳	۰/۲۸	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۹
غذای کشاورزی	NSE RMSE	۰/۲۸	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۲۰	۰/۲۸	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۲۰	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۲۷

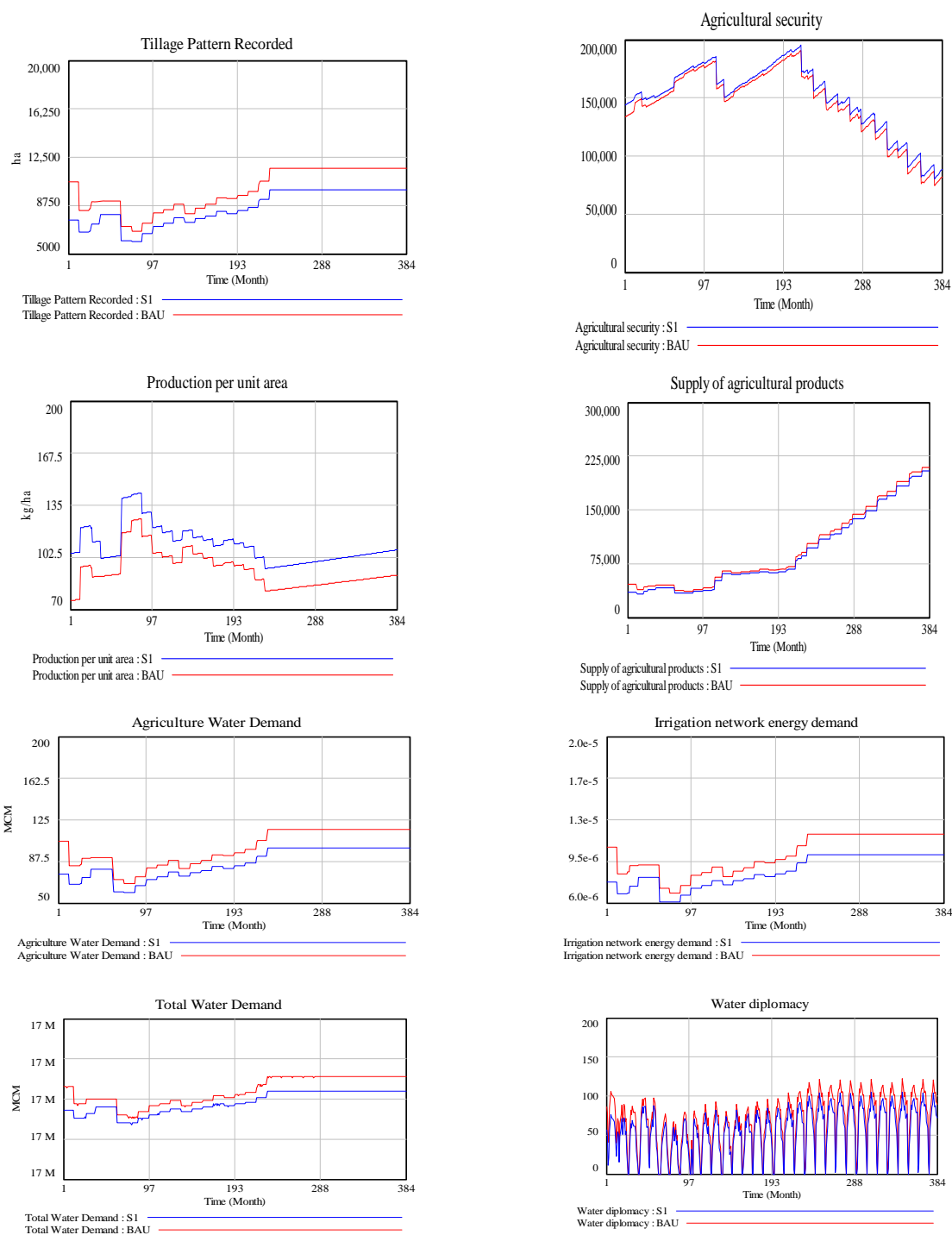
۴. سناریوهای پیشنهادی مدیریت منابع آبی حوزه آبخیز هیرمند

در ادامه، نتایج به‌دست‌آمده از سناریوهای پیشنهادی (اولیه و ترکیبی) تشریح شده است. این سناریوها و اهداف پیش‌بینی‌شده براساس داده‌های آمایش سرزمین استان سیستان و بلوچستان از سایت سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استخراج گردید.

۴.۱. سناریو اول (S1)

اقتصاد هر دو کشور ایران و افغانستان به‌شدت آب‌محور است. در ایران به‌ویژه دشت سیستان به‌دلیل کمبود بارندگی و محدودیت منابع آب در بخش کشاورزی و از طرفی وابستگی شدید به جریان‌های رودخانه هیرمند، لزوم بهینه‌سازی آبی در راستای افزایش راندمان آبیاری بسیار ضروری است. بنابراین اعمال سیاست‌های مدیریتی تقاضامحور در جهت پایداری منابع آب باید صورت گیرد. کشاورزی بیشترین مصرف آب را دارد و این یک چالش اصلی در حوزه آبخیز هیرمند است. رودخانه هیرمند در منطقه ساکنان ایران و افغانستان را در بر می‌گیرد و بخش کشاورزی برای هر دو طرف، منبع اصلی درآمد است. اما هنوز در بخش کشاورزی، از روش‌های سنتی و بهره‌وری کمتر برای آبیاری استفاده می‌شود؛ به طوری که راندمان آبیاری در منطقه سیستان تا ۷۰ درصد قابل بهبود است (وزارت نیرو، ۱۳۹۷). در زیرسیستم تأمین و نیاز آبی، مقدار شبیه‌سازی‌شده کل تقاضای آب در سال ۱۳۷۹ از ۴۳۳/۵۶۲ میلیون متر مکعب به ۵۸۲/۵۲۷ میلیون متر مکعب در سال ۱۴۱۰ می‌رسد و از طرفی تقاضای آب در سال ۱۳۷۹ از ۱۳۵۰/۰۱ میلیون متر مکعب به ۱۵۱۵/۹۳ میلیون متر مکعب در سال ۱۴۱۰ می‌رسد. از طرفی در این منطقه، شبکه مدرن آبیاری به‌صورت کامل احداث نشده و آبیاری اراضی کشاورزی به‌طور سنتی صورت می‌گیرد؛ به طوری که براساس مطالعات موجود، ۳۵٪ فرض شده است؛ که طبق سیستم آبیاری مدرن دو حالت راندمان ۵۰ درصد و ۷۰ درصد برای افزایش بهره‌وری مصرف آب در بخش کشاورزی در نظر گرفته شده است (وزارت نیرو، ۱۳۹۷). لذا یکی از سناریوهای ممکن با توجه به اوضاع منطقه، افزایش راندمان آبیاری براساس سیستم آبیاری مدرن از ۳۵٪ به ۷۰٪ برای بهبود بخش کشاورزی است. سناریوی راندمان آبیاری در منطقه سیستان افزایش یافته است. طبق نتایج به‌دست‌آمده در این سناریو براساس مدل سیستم دینامیک در زیرسیستم آب، تولید محصولات کشاورزی از ۷۷/۶۵ هزار تن در سال ۱۳۷۹ به ۹۲/۶۹ هزار تن در سال ۱۴۱۰ مربوط به افزایش کارایی مصرف آب و امنیت غذایی است. همچنین، همان‌طور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود، این سناریو نسبت به سناریوی پایه، رشد بیشتری داشته است. بنابراین افزایش راندمان آبیاری بر کاهش تقاضای آب این بخش و همچنین کاهش کمبود آب در سیستم اثرگذار است. پس با توجه به اینکه در شرایط حاضر بخش کوچکی از اراضی منطقه با استفاده از سیستم‌های آبیاری مدرن آبیاری می‌شود، افزایش بهره‌وری مصرف نیازمند برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری مناسب است. اعمال سیاست‌های تشویقی و حمایتی از طرح‌های بهینه مصرف آب می‌تواند در افزایش راندمان تأثیرگذار واقع گردد. همچنین تقاضای انرژی در شبکه آبیاری یک عامل مهم است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، می‌توان با مدیریت بهینه و بهره‌برداری از انرژی در شبکه آبیاری به‌میزان قابل توجهی صرفه‌جویی نمود. با به‌کارگیری فناوری‌ها و روش‌های صرفه‌جویی در مصرف انرژی، مانند استفاده از

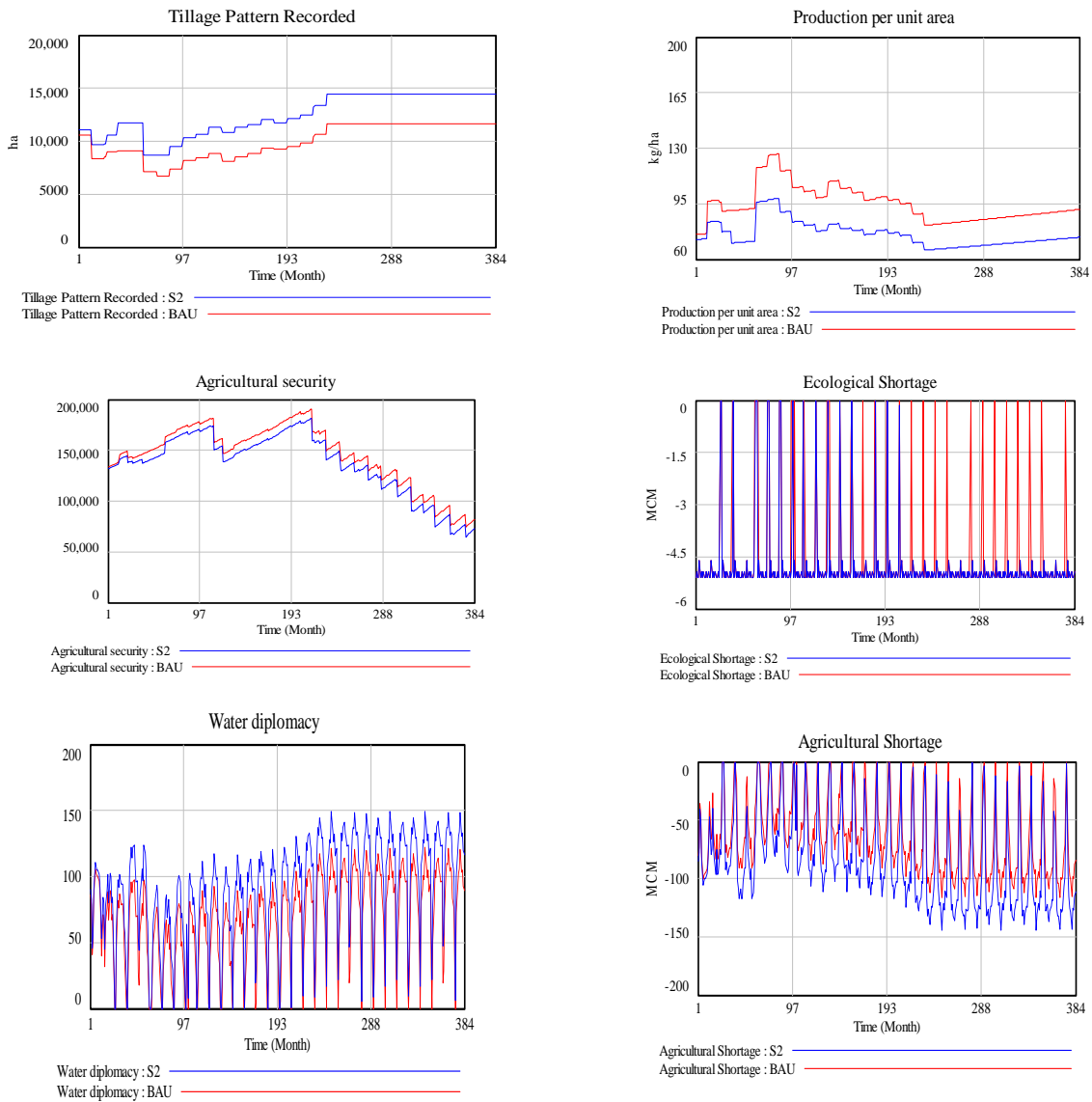
پمپ‌های با کارایی بالا و بهینه‌سازی برنامه‌های آبیاری، تقاضای کلی انرژی در شبکه کاهش می‌یابد. این علاوه بر کمک به حفظ منابع انرژی، هزینه‌های عملیاتی برای کشاورزان را نیز کاهش می‌دهد. علاوه بر این، در حال حاضر افغانستان وابستگی مطلق به واردات انرژی دارد و با کمبود مواد غذایی مواجه است. لذا می‌توان با بررسی منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی یا استقرار توربین‌های بادی در دشت سیستان برای تأمین نیازهای انرژی شبکه آبیاری به‌منظور کاهش تقاضای انرژی و ترویج شیوه‌های کشاورزی پایدار و مذاکره برای تأمین انرژی در مقابل حبابه مورد نیاز به این کشور کمک نمود.



شکل ۶: رفتار همبست آب، انرژی و غذا در افق شبیه‌سازی ۱۴۱۰

۲.۴. سناریوی دوم (S2)

در سناریوی توسعه سطح زیر کشت طبق سند چشم‌انداز ۱۴۰۴ (۲۰۲۵ میلادی)، سطح زیر کشت باید از ۱۳۵ هزار هکتار به ۲۰۰ هزار هکتار افزایش یابد. لذا براساس این سناریو، ۴۵٪ هرساله به سطح زیر کشت افزایش داده شود (وزارت نیرو، ۱۳۹۰). باتوجه به نتایج ارائه شده در شکل ۶ در نتیجه اجرای شبیه‌سازی طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری، در حوزه آبخیز هیرمند، پیش‌بینی می‌گردد در زیرسیستم امنیت غذا، میزان تولید نسبت به سال ۱۳۷۹ به میزان ۲۲۷۹۰۰ تن در سال ۱۴۱۰ افزایش یابد. همچنین در زیرسیستم آب، باتوجه به تأمین آب برای طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری، کمبود تقاضای آب در بخش کشاورزی و محیط‌زیست تشدید می‌شود.



شکل ۷: رفتار شبکه آب، انرژی و امنیت غذایی در افق شبیه‌سازی ۱۴۱۰

۳.۴. سناریوهای ترکیبی (S1S2)

این سناریو با اعمال هم‌زمان افزایش راندمان آبیاری به میزان ۶۰٪ و توسعه سطح زیر کشت براساس افق ۱۴۰۴، اجرا شده است. در این سناریو براساس مدل سیستم دینامیک، اعمال سیاست ترکیبی، نشان‌دهنده آن است که بهبود بهره‌وری آب، مؤثرترین ابزار در بررسی سناریوی ترکیبی است (شکل ۸). این سناریو نسبت به سناریو پایه رشد بیشتری داشته است. بنابراین افزایش راندمان آبیاری و توسعه سطح زیر کشت بر کاهش تقاضای آب این بخش و همچنین، کاهش کمبود در سیستم اثرگذار است.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق، با بررسی نتایج و روند مقایسه داده‌های ارائه‌شده در سال‌های پیش رو با روند مصرف فعلی و برداشت از منابع آب با همین روند مشخص شد که تأمین نیاز آبی منطقه سیستان با بحران جدی روبه‌روست و تأثیرات نامطلوبی در زمینه منابع آب و تولید غذا به همراه خواهد داشت. در این وضعیت مدل‌سازی مصرف بهینه در بخش‌های مختلف، رعایت شرایط حدی و فرهنگ‌سازی مبتنی بر اصلاح الگوی مصرف جزء مسائل کلیدی در مدیریت بحران منابع است. همچنین باید از ارائه راهکارهای قابل اجرا با هدف مدیریت صحیح مصرف برای رساندن وضعیت سیستم به یک سطح قابل قبول و مطمئن استفاده کرد. به‌کارگیری تفکر سیستمی کلی‌نگر همبست به‌جای بخشی‌نگر، نقش مؤثری برای سیاسی‌زدایی از مسئله آب‌های فرامرزی داشته که می‌تواند تأثیر شرایط مختلف در مدیریت سیستم و اثرات طولانی‌مدت آن‌ها را برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد و مفید واقع شود. از طرفی، هدف رویکرد دیپلماسی آب حل یا کاهش اختلاف و درگیری‌ها بر سر منابع آبی مشترک برای ارتقای همکاری، ثبات منطقه‌ای و صلح است. بر این مبنا در این پژوهش به بررسی دینامیک همبست آب، انرژی و غذا (WEF) در حوزه آبخیز هیرمند با رویکرد دیپلماسی آب تحت ارزیابی سناریوهای مدیریتی پرداخته شد و رفتار سیستم در موقعیت مسئله در افق ۳۲ ساله شبیه‌سازی شد. با استفاده از نتایج تحلیل حساسیت مدل مونت کارلو و بسط مدل در راستای سیاست‌های پایدار، منابع استخراج و تجزیه و تحلیل گردید.

باتوجه به محدودیت فیزیکی منابع آب قابل عرضه در منطقه سیستان، سرمایه‌گذاری بیشتر در بخش عرضه آب قادر به پاسخ‌گویی به افزایش تقاضای آب نیست؛ از این رو، مدیریت صحیح تقاضا به‌عنوان مهم‌ترین راهکار مقابله با شرایط بحرانی در منطقه ضروری است. یافته‌های تحقیق نشان داد که حوزه آبخیز هیرمند با محدودیت جدی منابع آب مواجه بوده و مقدار تقاضای آبیاری محصولات کشاورزی بیشتر منابع آب موجود است. بنابراین سیاست‌های اصلاح الگوی مصرف از طریق افزایش راندمان آبیاری در مدل پویایی سیستم می‌تواند سبب افزایش تأمین آب در بخش کشاورزی و محیط‌زیست شود. پس افزایش بازده آبیاری می‌تواند یکی از مؤثرترین ابزارها در راستای کاهش تلفات آب در بخش کشاورزی باشد و در نتیجه کاهش تقاضای آب در حوضه آبریز هیرمند ضروری است. نتایج مطالعه شاه‌محمدی و همکاران (۲۰۲۴)، کیهان‌پور و همکاران (۲۰۲۱) نیز نشان داد بهبود راندمان آبیاری نقش قابل توجهی در کاهش برداشت از منابع و افزایش ذخیره آب خواهد داشت [۲۴ و ۲۵].

باتوجه به نتایج شبیه‌سازی سناریوها در راستای رویکرد همبست در دیپلماسی آب، راه‌کارهای عملیاتی مدیریت پایدار منابع آب به شرح زیر پیشنهاد می‌شوند:

- ✓ اصلاح الگوی مصرف آب با افزایش راندمان آبیاری؛
- ✓ توسعه سیستم‌های بادی و خورشیدی به‌منظور تأمین نیاز انرژی؛
- ✓ اولویت‌بندی کشت محصولات با میزان مصرف آب و انرژی کمتر.

یافته‌های مدل نشان داد سیاست ترکیبی به‌عنوان بهترین راهکار امنیت منابع آب منطقه سیستان در راستای مدیریت پایدار منابع آب خواهد بود. در مطالعات آتی می‌توان مدل را با افزودن متغیرهایی نظیر آب مجازی، تغییرات اقلیم، گسترش مبادلات تجاری در امنیت منابع آب توسعه داد.

منابع

- [1] Ghorbani F, Behboudi D, Zarghami M. Evaluating adaptive capacity and identifying climate change barriers to adaptation (case study: Qarranqu Basin, Iran). *Sustainable Water Resources Management*. 2024; 10(1): 1.
- [2] Safavian N, Mohammadi A, Mosleh Shirazi AN, Alimohammadlo M. Water resources management in Food-Energy-Water Nexus: The application of system dynamics in Iran's Maharlu Lake Basin. *Iranian journal of management sciences*. 2022; 17(67): 1-26.
- [3] Index FFP. *World Food Situation*. FAO: Rome, Italy. 2021.
- [4] Allam MM, Eltahir EA. Water-energy-food nexus sustainability in the Upper Blue Nile (UBN) Basin. *Frontiers in Environmental Science*. 2019; 7: 5.

- [5] Hoolohan C, Soutar I, Suckling J, Druckman A, Larkin A, McLachlan C. Stepping-up innovations in the water–energy–food nexus: A case study of anaerobic digestion in the UK. *The Geographical Journal*. 2019; 185(4): 391-405.
- [6] Phan TD, Smart JC, Sahin O, Capon SJ, Hadwen WL. Assessment of the vulnerability of a coastal freshwater system to climatic and non-climatic changes: A system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 183: 940-55.
- [7] Benson D GA, JJ. R. Water governance in a comparative perspective: from IWRM to a'nexus' approach? *Water alternatives*. 2015; 8:756-73.
- [8] Wang X, Dong Z, Sušnik J. System dynamics modelling to simulate regional water-energy-food nexus combined with the society-economy-environment system in Hunan Province, China. *Science of The Total Environment*. 2023; 863: 160993.
- [9] Dehghani B, Farahani M, Aminnejad B. Evaluation of artificial recharge and flood spreading scenarios for integrated surface and groundwater resources management using weap model case study (Varamin Plain). *Iran-Water Resources Research*. 2019; 15(4): 242-58.
- [10] Layani G, Bakhshoodeh M, Zibaei M, Viaggi D. Sustainable water resources management under population growth and agricultural development in the Kheirabad river basin, Iran. *Bio-based and Applied Economics*. 2021; 10(4): 305-23.
- [11] Masaeli H, Gohari A, Shayannejad M. Evaluation of different irrigation methods using water, energy, food and carbon nexus approach. *Water and Irrigation Management*. 2022; 12(3): 511-25.
- [12] Dowlatabadi N, Banihabib ME, Roozbahani A. Modeling of the water resources system of Hoor-Al-Azim/Hawizeh wetland using system dynamics approach. *Iran-Water Resources Research*. 2020; 16(2): 18-34.
- [13] Li P-C, Ma H-w. Evaluating the environmental impacts of the water-energy-food nexus with a life-cycle approach. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020; 157: 104789.
- [14] Eslami Z, Janatrostami S, Ashrafzadeh A, Pourmohamad Y. Water, energy, food nexus approach impact on integrated water resources management in sefid-rud irrigation and drainage network. *Water and Soil*. 2020; 34(1): 11-25.
- [15] Song C, Yan J, Sha J, He G, Lin X, Ma Y. Dynamic modeling application for simulating optimal policies on water conservation in Zhangjiakou City, China. *Journal of cleaner production*. 2018;201:111-22.
- [16] Zareie S, Bozorg-Haddad O, Loáiciga HA. A state-of-the-art review of water diplomacy. *Environment, Development and Sustainability*. 2021; 23: 2337-57.
- [17] Sun B, Yang X. Simulation of water resources carrying capacity in Xiong'an New Area based on system dynamics model. *Water*. 2019; 11(5): 1085.
- [18] Forrester JW. Industrial dynamics. *Journal of the Operational Research Society*. 1997; 48(10): 1037-41.
- [19] Xing L, Xue M, Hu M. Dynamic simulation and assessment of the coupling coordination degree of the economy–resource–environment system: Case of Wuhan City in China. *Journal of Environmental Management*. 2019; 230: 474-87.
- [20] Shao Z, Wu F, Li F, Zhao Y, Xu X. System dynamics model for evaluating socio-economic impacts of different water diversion quantity from transboundary river basins—A case study of Xinjiang. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020; 17(23): 9091.
- [21] Ledenyov D, Ledenyov V. Multivector strategy vs quantum strategy by Apple Inc. Available at SSRN 2707662. 2015.
- [22] Safaei B, Mosleh Shirazi AN, Mohamadi A, Alimohammadlou M. A systematic model for the diffusion of commercial soft technology in Iran's oil industry. *Journal of Technology Development Management*. 2018; 6(3): 41-70.
- [23] Chen Z, Wei S. Application of system dynamics to water security research. *Water resources management*. 2014; 28(2): 287-300.
- [24] Shahmohammadi A, Khoshbakht K, Veisi H, Nazari MR. Investigating of Water, Energy, and Food Nexus with the Systems Dynamics Approach; a Case Study of Varamin Plain. *Environmental Sciences*. 2024; 22(1): 1-20.

- [25] Keyhanpour MJ, Musavi Jahromi SH, Ebrahimi H. System dynamics model of sustainable water resources management using the Nexus Water-Food-Energy approach. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021; 12(2): 1267-81.