Research Paper

Dynamic Analysis of Sustainable Management of Water Resources Based on the Correlation of Water, Food and Energy Resources (Case Study: Darmian and Sarbisheh Cities in South Khorasan Province)

Gholam Ahmad Goharshahi [1] **Javad Shahraki** [2], [*3] **Ali Sardar Shahraki** **Neda Ali Ahmadi** [4]

[1] PhD student, Department of Agricultural Economics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran Emai:goharshahi.azad@gmail.com
[2] Associate Professor of Economic, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran Email: j.shahraki1@eco.usb.ac.ir
[3] Associate Professor of Agricultural Economics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
[4] PhD in Agricultural Economics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran Email: ahmadi_15877@yahoo.com

10.22125/IWE.2023.415390.1747

Received:
September 8, 2023
Accepted:
December 31, 2023
Available online:
May 5, 2024

Keywords:
Systems Dynamics, Management of Water Resources, Water, Food and Energy Nexus, Southern Khorasan

Abstract

Today, human society is involved in fundamental threats in the field of production, supply and distribution of water, food and energy. South Khorasan province is located in the arid and semi-arid region of Iran and is highly vulnerable in terms of water resources. Due to the close relationship between the three sources of water, food and energy and their mutual influence on each other, a new concept called the linkage approach has been proposed, which refers to the integrated nature and mutual effects of these three sources. The present research has analyzed the dynamic analysis of sustainable water resource management systems based on the correlation of water, food and energy resources in a 21-year horizon (2011-2031) in Darmian and Sarbisheh cities in South Khorasan province (The scope of implementation of the carbon sequestration project) with the help of Vensim DSS software. This research has been done based on Monte Carlo sensitivity analysis as well as the development of the model under the title of 5 scenarios, and finally, the fifth scenario was selected for the sustainable management of water resources in the research area. In this situation, optimal consumption modeling in different sectors, compliance with limit conditions and culture based on consumption pattern modification are among the key issues in resources crisis management.

1. Introduction

Water is considered a vital resource for every biological and human phenomenon, and today, water management and protection are of great importance not only in developing countries, but also in developed countries. With the continuation of the current trend of water consumption in the absence of

* **Corresponding Author:** Ali Sardar Shahraki
Address Associate Professor of Economic, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
Email: a.s.shahraki@eco.usb.ac.ir
Tel: Number

correct policies, in 2030 the people of the world will have only 60% of the water they need available. The water crisis caused by the increase in population and economic development is one of the most important threats to human societies and a limit to sustainable development. Integrated management of water resources is a process that includes the coordinated development and management of water resources and other resources, including social and economic well-being. According to FAO estimates, the agricultural sector must increase its production to 60% by 2050 to meet the needs of population growth. Also, according to the report of the International Energy Agency, the amount of energy consumption will increase by 50% by 2035. With the growth of demand, the competition for resources also increases. Linking water, food and energy is a new approach towards sustainable management of resources with regard to economic-social development.

2. Materials and Methods

This study uses a simulation based on the systems dynamics approach, in which feedback concepts are used to express the social, economic and environmental processes of the South Khorasan International Carbon Sequestration Project. The system dynamics method was invented for the first time by J. W. Forrester for the strategic understanding of issues in dynamic complex systems. Vensim software was used for modeling and simulation of this research. Vansim software is a type of image simulation tool that makes it possible to create various samples in a simple and flexible way. This software allows the user to define, save, simulate, analyze and optimize dynamic system models.

3. Results

The calibration results show that most of the determination coefficient values between the simulated and observed data of all level variables are higher than 55% and the Nash-Sutcliffe criterion is close to 1 and the root mean square error value is less than 0.3. It is a relatively good basis for making predictions. Validation results in most of the desirable values of Nash-Sutcliffe criterion are more than 0.8, numerical square root error is about 0.2, and in most cases the coefficient of determination is more than 0.7 (except for surface and underground water sources, it is about 0.5). The results showed that the proposed combined policies of the agricultural and environmental sectors have the greatest effect in changing the state of the interdependence system (water, food and energy) and providing the environmental needs of the studied area. The combined implementation of policies to change the cultivation pattern and increase crop productivity and control underground water extraction, while increasing the security of surface and underground water and increasing environmental indicators (improving carbon sequestration), reducing water consumption for food production and Energy consumption for water extraction will be reduced.

4. Discussion and Conclusion

According to the presented results, in the coming years, with the current trend, the water demand of the studied area will face a serious crisis. Based on this, it is possible to use the proposed solutions with the aim of correct consumption management to bring the system status to an acceptable and reliable level. By using the system dynamics approach, it is possible to analyze the impact of various conditions in system management and their long-term effects and adopt appropriate policies. In the system dynamics model, by using policies to modify the consumption pattern by increasing irrigation efficiency, the aggravation of the water crisis can be prevented.

5. Six important references

1) Aliahmadi, N., Moradi, E. Hosseini, M. and Sardar Shahraki, A. (2021). Simulation and Dynamics of Hirmand Basin Water Resources System under management scenarios. Journal of water and soil conservation., 28(1), 23-43. doi: 10.22069/jwsc.2021.18451.3402 [in Persian].
2) Feng, K., Chapagain, A., Suh, S., Pfister, S. and Hubacek, K. (2011). Comparison of bottom-up and top-down approaches to calculating the water footprints of nations. *Economic Systems Research.*, 23(4), 371-385. https://doi.org/10.1080/09535314.2011.638276.

3) Feng, X., Fu, B., Piao, S., Wang, S., Ciais, P., Zeng, Z., Lu, Y., Zeng, Y., Li, J. X. and Wu, B. 2019. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*., 6, 1019–1022.
4) Song, C., Yan, J., Sha, J., He, G., Lin, X. and Ma, Y. (2018). Dynamic modeling application for simulating optimal policies on water conservation in Zhangjiakou City, China. *Journal of Cleaner Production.*, 201(10), 111-122. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.026.
5) Sterman, J. (2002). System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. Massachusetts Institute of Technology. Engineering Systems Division, 1-31.
6)Zhang, J., Elia Campana, P., Yao, T., Zhang, Y., Lundblad, A., Melton, F. and Yan, J. (2020). The water-food-energy nexus optimization approach to combat agricultural drought: a case study in the United States. *Applied Energy*., 227, 449-464. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.036.

Conflict of Interest

The authors of this article declare that they have no conflict of interest related to the authorship or publication of this article.

Acknowledgments

We thank the colleagues who helped us in the preparation of data in different departments.

تحلیل پویای مدیریت پایدار منابع آب مبتنی بر همبست منابع آب، غذا و انرژی (مطالعه موردی: شهرستان‌ها درمیان و سربیشه در استان خراسان‌جنوبی)

غلام‌احمد گوهرشاهی[۱]، جواد شهرکی[۲]، علی سردارشهرکی*[۳]، ندا علی احمدی[۴]

تاریخ ارسال:۱۴۰۲/۰۶/۱۷
تاریخ پذیرش:۱۴۰۲/۱۰/۱۰

مقاله پژوهشی

چکیده

امروزه جامعه انسانی درگیر تهدیدات اساسی در زمینه تولید، تأمین و توزیع آب، غذا و انرژی است. استان خراسان‌جنوبی در منطقه خشک و نیمه‌خشک ایران قرار گرفته و از لحاظ منابع آبی به شدت آسیب‌پذیر است. با توجه به ارتباط نزدیک سه منبع آب، غذا و انرژی و تأثیر متقابل آن‌ها بر یکدیگر، مفهوم جدیدی به نام رویکرد پیوندی یا همبست مطرح شده که اشاره به ذات یکپارچه و اثرات متقابل این سه منبع دارد. پژوهش حاضر به تحلیل پویای سیستم های مدیریت پایدار منابع آب مبتنی بر همبست منابع آب، غذا و انرژی در افق ۲۱ ساله (۱۴۱۰-۱۳۹۰) در شهرستان‌های درمیان و سربیشه در استان خراسان‌جنوبی (محدوده اجرای پروژه ترسیب کربن) به کمک نرم افزار ونسیم (DSS Vensim) پرداخته است. در این پژوهش براساس تحلیل حساسیت مونت کارلو و همچنین بسط مدل تحت عنوان ۵ سناریو انجام شده است. نتایج پژوهش نشان داد که سناریوی پنجم با افزایش۶۰٪ راندمان آبیاری، بهبود ۳۰٪ عملکرد محصولات و افزایش۵۰٪ بکارگیری انرژی‌های نو به‌عنوان یک سناریوی ترکیبی و بهینه از بین سناریوهای مختلف مورد بررسی، برای مدیریت پایدار منابع آب در قالب همبست منابع آب، غذا و انرژی در منطقه مورد پژوهش است. در این وضعیت مدل‌سازی مصرف بهینه در بخش‌های مختلف، رعایت شرایط حدی و فرهنگ‌سازی مبتنی بر اصلاح الگوی مصرف جزو مسائل کلیدی در مدیریت بحران منابع می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پویایی سیستم‌ها، مدیریت منابع آب، غذا و انرژی، همبست آب، خراسان‌جنوبی

[۱] دانشجوی دکتری اقتصاد کشاورزی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.ایمیل: goharshahi.azad@gmail.com
[۲] دانشیار اقتصاد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران ایمیل:j.shahraki1@eco.usb.ac.ir
[۳*] دانشیار اقتصاد کشاورزی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.(نویسنده مسول)a.s.shahraki@eco.usb.ac.ir
[۴] دکتری اقتصاد کشاورزی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران ایمیل:ahmadi_15877@yahoo.com

مقدمه

آب یک منبع حیاتی برای هر پدیده زیستی و انسانی محسوب می‌گردد و امروزه، مدیریت و حفاظت آب نه تنها در کشورهای درحال توسعه، بلکه در کشورهای توسعه یافته هم دارای اهمیت بالایی است. با ادامه روند کنونی مصرف آب در صورت عدم سیاست‌های صحیح، در سال ۲۰۳۰ مردم جهان تنها ۶۰ ٪ آب مورد نیاز خود را در دسترس خواهند داشت (Unesco, 2015, Zhang et al., 2020). افزایش رشد سریع جمعیت و افزایش تقاضا برای مواد غذایی همراه با سطح پایین فن‌آوری تولید محصولات کشاورزی، دامی و صنایع وابسته روستایی باعث شرایط دشوار زیست‌محیطی، محدودیت اراضی و سرمایه‌گذاری ناکافی همراه می‌شود که روند تخریب منابع پایدار را تشدید خواهد کرد (Jahanshahi, 2022). از طرفی، افزایش تقاضا برای منابع آب و کاهش سطح آب‌ها در اثر خشکسالی در اکثر مناطق جهان، احتمال تشدید وقوع منازعه را برای آب به‌عنوان عامل مهم به وجود آورده است (Khatri et al., 2018; Sweet et al. 2017). بحران آب ناشی از افزایش جمعیت و توسعه اقتصادی از جمله مهم‌ترین تهدیدها برای جوامع بشری و محدودیتی برای توسعه پایدار شناخته شده است (Yates and Harris, 2018, Aliahmadi et al., 2021). مدیریت یکپارچه منابع آب فرایندی است که شامل توسعه و مدیریت هماهنگ منابع آب و دیگر منابع، شامل رفاه اجتماعی و اقتصادی می‌شود (Mapani et al., 2019, Halbe, 2017).

براساس برآوردهای فائو، بخش کشاورزی برای تأمین نیاز افزایش جمعیت تا سال ۲۰۵۰ باید تولیدات خود را به ۶۰ ٪ افزایش دهد (FAO, 2011). همچنین، بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، مقدار مصرف انرژی تا سال ۲۰۳۵ حدود ۵۰ ٪ افزایش خواهد یافت (IEA, 2010). با رشد تقاضا، رقابت بر سر منابع نیز افزایش پیدا می‌کند. پیوند آب، غذا و انرژی رویکرد نوینی در جهت مدیریت پایدار منابع با توجه به توسعه اقتصادی- اجتماعی به شمار می‌رود (Al-saidi et al., 2017).

بانک جهانی در رابطه با وابستگی منابع آب و انرژی، عبارت انرژی تشنه[1] را تعریف کرد (WB 2012). متخصصان در مجمع جهانی اقتصاد، در جهت انجام اقداماتی با هدف ارتباط بین آب و توسعه اقتصادی به توافقاتی رسیدند که منجر به ارائه همبست آب، غذا و انرژی[2]شد (Hoff, 2011). با توجه به اهمیت بخش آب در توسعه اقتصادی و اجتماعی کشور، لازم است که مدیریت بخشی منابع آب به سمت مدیریت یکپارچه تغییر یابد. استان خراسان جنوبی با وسعت km^2 ۱۴۹۱۰۴ در شرق کشور در کمربند خشک و نیمه خشک جنب حاره‌ای واقع شده است و اقلیم آن به صورت خشک و سرد می‌باشد. علاوه بر این، کاهش بارندگی در سال‌های اخیر منجر به وقوع خشکسالی‌های شدید شده است. میانگین سالیانه بارندگی استان mm ۱۱۵ بوده که بیشترین بارندگی سالیانه به نواحی شمال استان و کمترین آن به نواحی غربی به دلیل همجواری با کویر می‌باشد (Jahanshahi, 2022). در ادامه به بررسی مطالعاتی که در زمینه امنیت آب، غذا و انرژی که اخیرا پرداخته شده، می‌پردازیم.

در مطالعه‌ای تحلیل سیستم منابع آب حوضه کارون از منظر پایداری با رویکرد پویایی سیستم‌ها از نگرش پویایی سیستم ها و نرم-افزار vensim به منظور ارزیابی وضعیت این حوضه استفاده گردیده است. نتایج حاکی از آن است که خطرات و سناریوی بیرونی در مقایسه با سیاست حاکم در کشاورزی، صنعت و خدمات تأثیر ناچیزی بر کیفیت آب رودخانه دارد و این مطلب بیانگر اینست که در راستای کاه ش آسیب‌پذیری حوضه باید تمرکز بیشتری بر نگرش حاکم و سیاست‌های اعمالی برای تامین غذا و انرژی در حوضه داشت (Arshadi and Bagheri, 2012). در تحقیقی که (Godarzi et al (2019 در بروجرد انجام دادند دریافتند که تغییرات پیش‌بینی شده حاکی از تغییرات آب و هوایی در۲۰ سال آینده می‌باشد و تغییرات در بارش و دما می‌تواند بر روی منابع آب، غذا و انرژی اثر بگذارد. سناریوهای مختلفی برای منابع آب موجود، مصارف انرژی

1 - Thirsty energy

2- WFE

و الگوی کشت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با در نظرگرفتن شاخص بهره‌وری نرمال شده آب مصرفی به تنهایی، بهترین سناریو، کاهش ۲۰ درصدی آورد رودخانه با حداکثر بهره‌وری ۵۴ درصدی برای شبکه آبیاری نکوآباد است. براساس شاخص بهره‌وری نرمال شده انرژی بهترین سناریو، انسداد چاه‌های غیر مجاز با حداکثر بهره‌وری ۴۹ درصدی برای شبکه آبیاری مهیار شمالی می‌باشد؛ در صورتیکه، با در نظر گرفتن شاخص ترکیبی اولویت‌بندی سناریوها در شبکه‌های مختلف تغییر کرده است. این تحقیق نشان داد که هر چند هر یک از شاخص‌های بهره-وری به تنهایی منعکس‌کننده اثرات تک بعدی هر یک از سیاست‌ها در شبکه‌ای مختلف می‌باشند، اما با استناد به تنها یک شاخص نمی‌توان در مورد اثربخشی سیاست‌ها تصمیم-گیری قطعی نمود. همچنین در مجموع می توان اظهار داشت که در نظر گرفتن همزمان پیوند آب، غذا و انرژی در تحلیل عملکرد شبکه‌های آبیاری و انتخاب سیاست‌های برتر امری ضروری است. در سند راهبردی آمایش استان خراسان جنوبی (2019) نسخه نهایی آن توسط سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان برای اجرا به دستگاههای اجرایی استان ابلاغ گردید در بخش اهداف بنیادین توسعه فضایی استان علاوه برحوزه های اجتماعی، فرهنگی و اقتصادی به حفاظت و مدیریت بهره‌برداری منابع طبیعی و منابع آب، کشاورزی پایدار و کم نهاده، تامین انرژی پایدار و پاک، تاکید گردیده است. نتایج پژوهش Alahmadi et al.(2021) در خصوص شبیه‌سازی سیستم منابع آب حوزه آبخیز هیرمند نشان می‌دهد که سیاستهای راندمان آبیاری۷۰ درصد در بخش کشاورزی و کاهش تلفات آب (کاهش تبخیر آب) به میزان ۵۰ درصد مبتنی بر سناریوهای پیشنهادی توسط مدل اجرا گردیده و نتایج بررسی نشان داد که هر یک از این راهکارها، باعث کاهش کمبود آب در سال‌های آتی می‌گردد ولی بهترین نتیجه در سناریوی اول (راندمان آبیاری۷۰ درصد) در بخش کشاورزی حاصل شده است.

آب محور اصلی درتحولات پیچیده تغییرات جهانی مانند تغییر اقلیم و توسعه آینده کشورهاست از این رو به دلیل فرایندهای پیچیده تغییرات در گستره وسیعی از فعالیت‌های محیطی و انسانی، مسایل مرتبط با آب، مانند تقاضای آب و دسترسی به آب آشامیدنی سالم باید با رویکردی بهم پیوسته تحلیل و ارزیابی گردد (Simonovic et al, 2004). در پژوهشی که (2016) Sun et alبرای استفاده پایدار از منابع آب در چین تحت مدل پویایی سیستم انجام دادند دریافتند که منابع آب نقش مهمی در توسعه جمعیتی، اجتماعی و اقتصادی دارد و با یک برنامه توسعه متوازن می‌توان به رشد اقتصادی ثابت، رشد جمعیتی و حفاظت از منابع زمین زراعی دست‌یافت بلکه می توان نرخ تصفیه فاضلاب را حداکثر نمود و کارایی استفاده مجدد از آب را بهبود بخشید. همچنین برای پر کردن شکاف بین عرضه و تقاضای منابع آب، بهبود عرضه آب به جای کنترل تقاضا راه حل موثراست در مطالعه ای که (2016).feng et al در زمینه رویکردهای Nexus[1] اتصالات بین سیستم‌های تأمین آب، تولید برق و محیط زیست (WPE) داشتند نتایج نشان داد که رویکرد دینامیک سیستم در مدل‌سازی پیوند WPE منطقه هوانگ کارآمد است. فرآیند تکامل همزمان به چهار مرحله چرخه-ای (یعنی مراحل بهره برداری، زوال، افسردگی و بهبودی) تقسیم می‌شود و پس از هزاران سال با یک چرخه ثابت خاتمه می‌یابد. مشاهدات به‌دست‌آمده با مدل‌سازی پیوند، روشن‌تر است و درک تعاملات بین سیستم‌های جفت شده را بهبود می‌بخشد.کمیسیون بین المللی آبیاری و زهکشی (ICID) در کنگره مکزیک (2017)، موضوع پیوند آب، غذا و انرژی نکسوس را به عنوان یکی از محورهای مورد بحث مطرح کرد و در این کنگره، چند مقاله در مورد نکسوس ارائه شد. Zhang et al (2017) درخصوص رویکرد بهینه‌سازی پیوند WFE[2] در کشاورزی برای مقابله با خشکسالی در ایالات متحده پژوهشی انجام دادندکه نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد آبیاری می‌تواند نقش کلیدی در توقف تلفات محصول داشته باشد لذا سرمایه‌گذاری قابل توجهی روی آب و انرژی برای محدود کردن اثرات منفی خشکسالی مورد نیاز است و مسئله بهینه‌سازی چند معیاره توسعه‌یافته در این مطالعه نشان می‌دهد که عملکرد بهینه محصول لزوماً با حداکثر عملکرد مطابقت ندارد و در نتیجه باعث صرفه‌جویی بالقوه آب و انرژی می‌شود.

[1] . پیوند

[2] . Water, Food and Energy Nexus

Song et al.(2018) به کاربرد مدل سازی پویا برای شبیه سازی سیاست‌های بهینه در مورد حفاظت از آب در شهر zhangjiakou در کشور چین پرداختند و نتایج شبیه سازی نشان می دهدکه از سال۲۰۱۳ تا ۲۰۲۵ اهداف حفاظت از آب، با نرخ کاهش سالانه انتشار گازهای گلخانه ای به میزان ۱۲.۶٪ محقق می شود. نتایج مطالعه‌ای که Ravar et al (2019) انجام دادند، یک مدل شبیه‌سازی تفکیک‌شده مکانی-زمانی براساس رویکرد پیوندی آب، غذا، انرژی (WFE) برای ارزیابی امنیت منابع انجام شد نشان داد که سیاست‌های ترکیبی پیشنهادی بخش کشاورزی و محیط زیست بیشترین تأثیر را در تغییر وضعیت سیستم WFEو تأمین نیاز زیست‌محیطی تالاب گاوخونی داشته و اجرای ترکیبی سیاست‌های تغییر الگوی کشت و افزایش بهره‌وری محصول و کنترل برداشت آب زیرزمینی علاوه بر امنیت آب‌های سطحی (۴٪) و امنیت آب های زیرزمینی (۵٪) را افزایش داد، باعث کاهش آب برای تولید غذا (۱۸٪) شد و کاهش انرژی برای استحصال آب (۲۶٪) گردید. در پژوهشی که Keyhanpour et al.(2020) به بررسی شبیه‌سازی مدیریت پایدار منابع آب برای ارزیابی تأثیر توسعه اجتماعی- اقتصادی بر امنیت منابع WFE در استان خوزستان در ایران پرداخته پس از شبیه‌سازی مدل دینامیک سیستم آب، غذا، انرژی و با در نظر گرفتن نتایج تحلیل حساسیت، ترکیبی از استراتژی‌های تقاضای آب و مدیریت منابع غذایی به‌عنوان بهترین سیاست‌ها انتخاب شدند. از این رو ۱۶ درصد افزایش راندمان آبیاری، ۱۰ درصد بهبود الگوی کشت، ۶ درصد کاهش تلفات محصولات کشاورزی، ۵ درصد کاهش تقاضای غذا به دلیل تلفات غذایی و ۵ درصد افزایش سالانه در عملکرد کشاورزی به عنوان سیاست های مدیریت پایدار منابع آب انتخاب شده است.

مطالعات گذشته نشان می‌دهد که سطح آب‌های سطحی و زیر زمینی دچار تغییراتی شده است. لذا، بایستی تمهیدات لازم را در سال‌های آتی جهت مقابله با این تغییرات برای تأمین آب مورد نیاز بخش کشاورزی و به دنبال آن بخش غذا و انرژی و همچنین محیط‌زیست در قالب سیاست‌های مختلف سیستمی و میان سیستمی و سناریوهای ترکیبی اتخاذ نمود تا امنیت منابع آب، امنیت منابع غذا و انرژی و محیط زیست فراهم گردد. همچنین فقدان برنامه‌ریزی جامع، تصمیم‌گیری‌های بخشی و فرابخشی و ناهماهنگی در سیاست‌گذاری منابع آب، مشکل کم آبی را در دو دهه گذشته تشدید کرده است.

لذا، در این پژوهش با پویایی سیستم تأمین منابع آب، غذا و انرژی در پروژه بین المللی ترسیب‌کربن و ابعاد مختلف توسعه پایدار منطقه مورد نظر مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین، تأثیر فاکتورهایی چون بهبود الگوی مصرف آب شرب و یا اجرای طرح‌های آبیاری قطره‌ای در مزارع، اصلاح الگوی مصرف غذا و یا تولید محصولات با عملکرد بالاتر و ارقام مرغوب و سازگار در منطقه و بکارگیری پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی برای تولید انرژی-های نو در قالب سناریوهای سیاستی بررسی خواهد شد.

مواد و روش‌ها

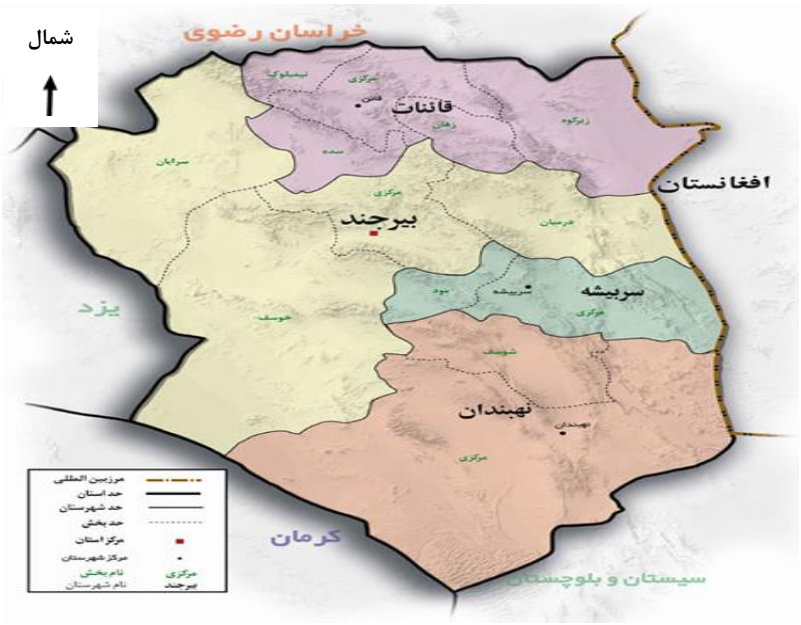
در پژوهش حاضر از مدل‌سازی پویایی سیستم برای بررسی وضعیت آب در منطقه سربیشه و درمیان (خراسان-جنوبی) استفاده شده است. در این مدل‌سازی از پیوند بین آب، غذا و انرژی استفاده شده است که پویایی بین سیستم-های متفاوت قابل درک با استفاده از حلقه‌های بازخورد پویا و غیرخطی معادلات دیفرانسیل بوده است (Feng et al., 2011). این مطالعه از یک شبیه‌سازی بر پایه رویکرد پویایی سیستم‌ها استفاده شده است که در این رویکرد از مفاهیم بازخوردها برای بیان فرایندهای اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی پروژه بین المللی ترسیب کربن خراسان جنوبی استفاده شده است. روش پویایی سیستم‌ها، برای نخستین بار توسط جی‌دبلیوفارستر، برای درک استراتژیک مسائل در سیستم‌های پیچیده پویا ابداع شد (Sterman, 2002; Song et al., 2018).

برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی این پژوهش از نرم افزار ونسیم (Vensim) استفاده شد. نرم افزار ونسیم نوعی ابزار شبیه‌سازی تصویری است که بصورتی ساده و انعطاف‌پذیر ساخت نمونه‌های گوناگون را ممکن می‌سازد. این نرم افزار به کاربر امکان تعریف، ذخیره، شبیه‌سازی، تحلیل و بهینه-سازی مدل‌های سیستم داینامیک را می‌دهد.

پژوهش حاضر در استان خراسان جنوبی در شهرستان‌های درمیان و سربیشه (محدوده اجرای پروژه ترسیب‌کربن)

انجام شده است. که در مجاورت منطقه حفاظت شده درمیان و سربیشه با وسعت ۵۸۷۷۶ هکتار بین طول‌های جغرافیائی ۵۹ درجه و۴۰ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۲ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیائی ۳۲ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۵۸ دقیقه شمالی که در شمال شهرستان سربیشه و غرب شهرستان درمیان واقع گردیده است. آب و هوای منطقه گرم و خشک است که در ارتفاعات به آب و هوای معتدل و نیمه خشک تغییر می‌کند. در شکل (۱)، موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود

.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه

در این پژوهش به تحلیل پویایی سیاست‌های مدیریت پایدار منابع آب مبتنی بر همبست منابع آب، غذا و انرژی با توجه به تغییرات رشد جمعیت و تغییر اقلیم در یک افق ۲۱ ساله (۱۳۹۰-۱۴۱۰) با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها پرداخته شده است. جمع‌آوری اطلاعات سری زمانی به استناد نتایج عملکرد و داده‌های سازمان جهادکشاورزی استان خراسان جنوبی و محیط زیست استان خراسان جنوبی، منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان جنوبی و شرکت‌های برق، گاز، آبفا و آب منطقه استان خراسان جنوبی و سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان خراسان جنوبی مورد استفاده قرار گرفت(Anonymous 2021, Anonymous 2022). همچنین، برای داده‌های جمعیت و نرخ‌های رشد از سایت مرکز آمار ایران استفاده شده است (Anonymous 2020). 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 مورد استفاده	واحد	منبع
متغیر ذخیره	کل جمعیت	۹۴۵۶۷ نفر	سازمان مدیریت و برنامه ریزی
	منابع آب سطحی	۱.۱۴۵ میلیون مترمکعب	شرکت آب منطقه استان
	منابع آب زیر زمینی	۱۲.۹۱۴میلیون مترمکعب	آمارنامه جهادکشاورزی
	منابع غذای کشاورزی	۴۷۱۸.۵ تن	آمارنامه جهادکشاورزی
	منابع غذای دام	۳۲۳۰.۸ تن	آمارنامه جهادکشاورزی
	تعداد دام (سبک/سنگین)	۴۱۳۵۰۰ راس	آمارنامه جهادکشاورزی
	سطح زیر کشت	۲۶۲۱۲.۷ هکتار	آمارنامه جهادکشاورزی
	سطح مراتع و جنگلها	۲۷۵۰۰۰هکتار	منابع طبیعی و آبخیزداری
متغیر ثابت	سرانه مصرف غذا (انسان)	۴۰۰کیلو گرم	آمارنامه جهادکشاورزی
	سرانه مصرف علوفه دام (سبک)	۴۴۸ کیلوگرم	آمارنامه جهادکشاورزی
	سرانه مصرف علوفه دام (سنگین)	۷۲۶۲کیلوگرم	آمارنامه جهادکشاورزی
	سرانه نیاز آبی دام سبک	۷۹۵ مترمکعب	آمارنامه جهادکشاورزی
	سرانه نیاز آبی دام سنگین	۵۲۵۸ متر مکعب	آمارنامه جهادکشاورزی

کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل

مدل‌ها نمایشی از واقعیت‌ها یا تصور و شناخت ما ازحقیقت هستند به منظور مفید بودن یک مدل باید ببینیم آیا چیزهایی که در واقعیت مشاهده می‌شود در مدل وجود دارند. صحت‌سنجی مدل با استفاده از مقایسه نتایج مدل با اطلاعات مشاهده شده و آزمون شرایط حدی می‌باشد. در آزمون تکرار رفتار به بررسی نتایج مدل از طریق مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده مدل با داده‌های مشاهده شده پرداخته می‌شود. سپس، تست خطا به‌صورت رابطه های (۱) تا (۳) با استفاده از ضریب تعیین (R^2)، معیار نش-ساتکلیف (NSE[1]) که دامنه تغییرات آن از منفی بینهایت تا ۱ را شامل می شود. هر چه این معیار به ۱ نزدیک تر باشد صحت سنجی مدل دقیق تر خواهد بود. مقادیر بزرگ تر از ۰/۵ حاکی از عملکرد قابل قبول مدل می باشد. و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE[2]) برای ارزیابی عملکرد مدل انجام می‌شود که مقادیر این شاخص باید کوچک و نزدیک به صفر باشد.(Aliahmadi et al., 2021).

$$R^2 = \frac{[\Sigma(y_{m,i} - \bar{y}_{m,i})(y_{s,i} - \bar{y}_{s,i})]^2}{\Sigma(y_{m,i} - \bar{y}_{m,i})^2 \Sigma(y_{s,i} - \bar{y}_{s,i})^2} \quad (۱)$$

$$NSE = 1 - \frac{\Sigma(y_{m,i} - y_{s,i})^2}{\Sigma(y_{s,i} - \bar{y}_{s,i})^2} \quad (۲)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2\right]^{0.5} \quad (۳)$$

پویایی سیستم‌ها

با تبدیل عنوان پویایی صنعت به پویایی سیستم‌ها، این پدیده در واقع به روش درک و شناخت انواع معینی از مباحث ساختاری، ماهیتی، سازوکاری و عملکردی و همچنین، مسئله‌های پیچیده در یک سیستم، حل، برنامه-ریزی، نظارت و هماهنگی اجزای آن تبدیل شد. مباحث موجود در یک سیستم شامل سه خصوصیت: پویایی، رفتار

1 - Nash-Sutcliffe criterion

2 - Root Mean Square Error

تعاملی و ساختار بازخوردی می‌باشد. بر مبنای خصوصیت پویایی ابعاد کمی و کیفی سیستم در طی زمان دستخوش تغییر است و برمبنای رفتار تعاملی، مؤلفه‌ها و متغیرهای مختلف جنبه علی- معلولی دارند که شبکه‌های خاص رفتاری را تشکیل می‌دهند. به‌عبارت دیگر، از این علم جهت درک و تجزیه و تحلیل نحوه شکل‌گیری و پیکربندی، رفتار و حرکات اجزاء سیستم بکار گرفته می‌شود تا امکان پیش-بینی رفتارهای آینده آن ایجاد شود. قدرت این علم به حدی می‌باشد که می‌توان با استفاده از آن، موضوعات گوناگون، ساده و پیچیده را مدل‌سازی نمود و ارتباطات حاصل از تعامل متغیرها را تشخیص و تا حد لازم هدایت کرد، پس از آن رفتارهای آینده آن‌ها را در دوره‌های زمانی گوناگون مورد بررسی قرار داد. با شناخت مراحل نظری تدوین مدل در پویایی‌های سیستم و آشنایی با انواع آن مدل‌ها، مدلسازی را می‌توان در سه مرحله انجام داد:

الف) تشکیل و ترسیم نمودارهای علی- معلولی

ب) تدوین و ترسیم نمودارهای جریان

ج) نوشتن معادلات برنامه‌نویسی (ریاضی)

پویایی سیستم‌ها بر ساختار، رفتار و عملکرد سیستم‌ها، متکی می‌باشد و از حلقه‌های معنادار و بازخوردی مرتبط با هم تشکیل شده است. نمودارهای علی- معلولی و نمودارهای جریان که در مدل‌سازی پویا، روشی آسان جهت نمایش ساختارهای حلقوی تعاملات متغیرهای تشکیل-دهنده در یک چارچوب نظری و کاربردی در یک سیستم می‌باشد.

پروژه ترسیب کربن[1]

ترسیب کربن، فرایند تسهیل جذب دی‌اکسیدکربن اضافی موجود در جو (اتمسفر) توسط اندام‌های هوایی و زیرزمینی گیاه از طریق کاشت گونه‌های مقاوم مرتعی در مراتع تخریب شده می‌باشد. پروژه بین المللی ترسیب کربن برای اولین بار در کشور، سال ۱۳۸۵ در استان خراسان-جنوبی اجرا گردید و آثار مثبت این پروژه (تاثیرات مثبت اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی) شامل حفظ و احیاء مراتع، کنترل رواناب و سیلاب، بهره‌گیری از انرژی‌های نو (خورشیدی و بادی)، کاهش گازهای گلخانه ای، اشتغال-زایی، درآمدزایی و مدیریت پایدار منابع می‌باشد (Yari et al., 2013). بدون شک اهداف و چشم‌انداز این پروژه همسو با برنامه های مدیریت پایدار منابع است که در بخش یافته ها و بحث، تاییدگردید.

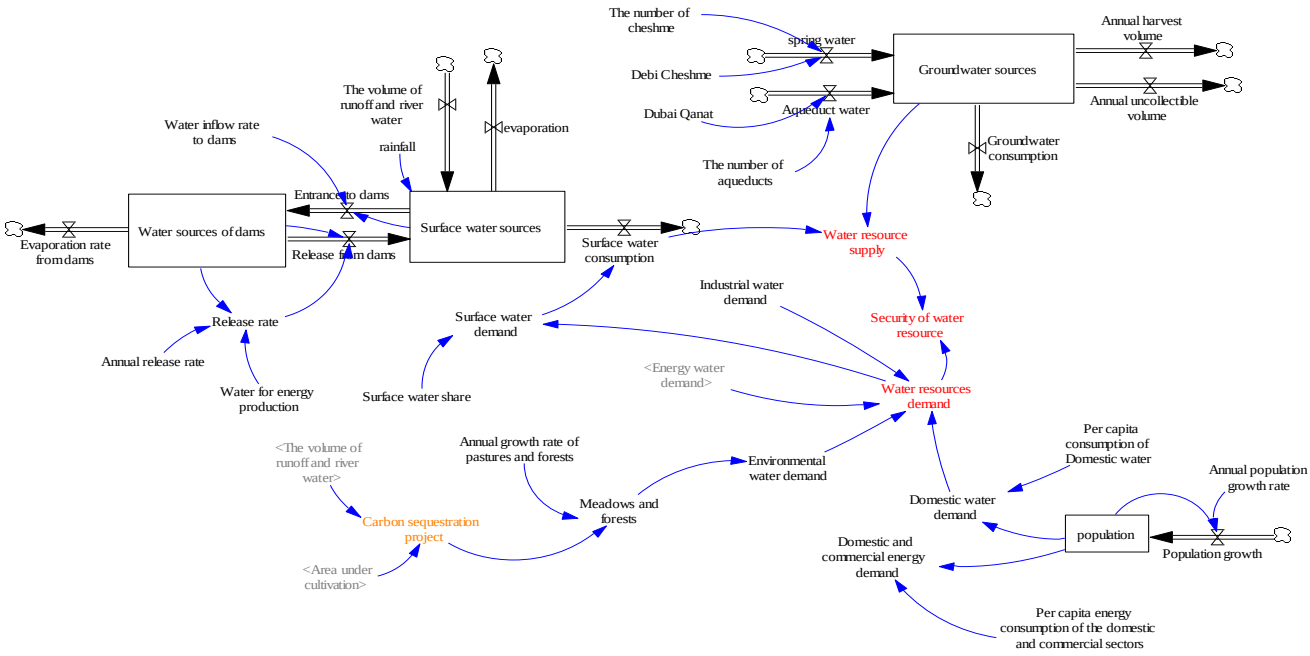
یافته‌ها و بحث

زیرسیستم‌های مدل براساس نمودارهای حلقه‌های علی و معلولی آن‌ها توسعه یافته‌اند تا سبب توصیف بهتر تجمع متغیرها شده و روند جریان مواد در سیستم را تعیین نمایند. نمودار ذخیره و جریان منطقه مورد مطالعه از نمودارهای ذخیره و جریان زیرسیستم‌های آب، غذا، انرژی تشکیل شده است که به ترتیب در شکل‌های (۲) تا (۴) نشان داده شده است. متغیرهای ذخیره سیستم شامل جمعیت، آب‌های سطحی و زیرزمینی، منابع آب سدها، منابع غذایی کشاورزی و دامی می‌باشد. این متغیرهای ذخیره با تغییر در نرخ ورودی یا خروجی متغیرها افزایش یا کاهش می‌یابند.

زیر سیستم منابع آب

حلقه جریان- ذخیره زیرسیستم عرضه و تقاضا آب، متغیرهای چرخه عرضه و تقاضای آب، تأمین آب و اکوسیستم منطقه سربیشه و درمیان را نشان می‌دهد. طرح-های انتقال آب، روابط متقابل آب‌های سطحی، زیرزمینی، سدها، هیدرولوژی منطقه و تأمین آب در منطقه اجزای اصلی این زیر سیستم را تشکیل می‌دهد (شکل۲). همانگونه که در شکل (۲)، مشاهده می‌شود، ویژگی‌های اقلیمی و عرضه و تقاضای آب منطقه از قبیل میزان بارندگی و تبخیر در منطقه را نمایش می‌دهد. در نمودار حلقه جریان- ذخیره ، دینامیک بین این اجزا با استفاده از پیکان-های علامت‌دار نشان داده شده است که بصورت روابط علی و معلولی مثبت و یا منفی علامت‌گذاری شده است. علاوه بر این نمودار حلقه علی و معلولی، مداخلات انسانی که به منظور تأمین آب صورت می‌گیرد (انتقال آب بین حوضه-ای) را نشان می‌دهد که این امر سبب افزایش قابلیت دسترسی به آب به منظور تأمین نیاز آب شرب، صنعت، کشاورزی و در نهایت محیط‌زیست شده است(Aliahmadi et al.,2021)

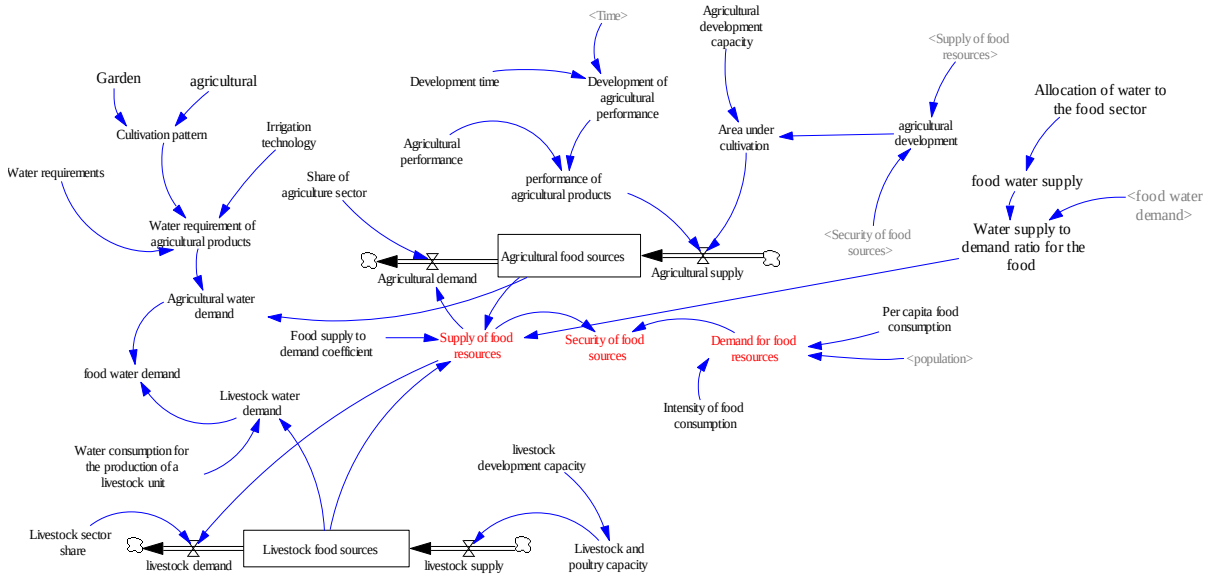
1. Carbon sequestration project



شکل (۲): نمودار ذخیره و جریان زیر سیستم منابع آب

زیر سیستم منابع غذا

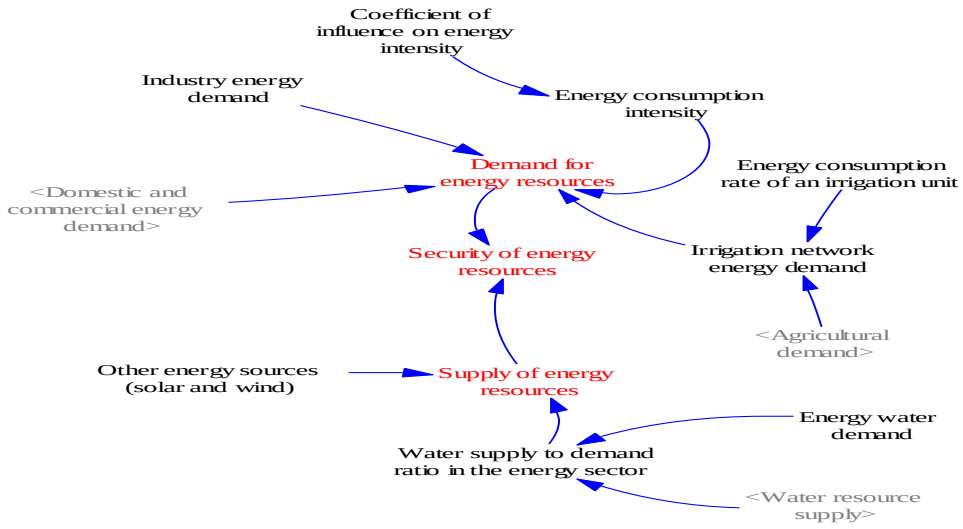
بیشترین مصرف آب در منطقه سربیشه و درمیان مربوط به بخش کشاورزی می‌باشد. زیر سیستم غذا تعریف شده در این مدل به دو دسته زراعی و باغی طبقه‌بندی شده است. حلقه‌های علی و معلولی زیرسیستم غذا برای کل محصولات کشاورزی در شکل (۳)، نشان داده شده است. میزان سطح زیرکشت مربوط به کل سطح زیر کشت محصولات باغی و زراعی می‌باشد. تأمین و نیاز آب در بخش کشاورزی ارتباط مثبت با کل سطح زیرکشت در این بخش دارد. اگر مصرف آب در بخش کشاورزی با راندمان بالای آبیاری همراه شود موجب به حداقل رسیدن اتلاف آب و افزایش مصرف آب خالص می‌شود. استفاده از زمین به عنوان یک عنصر کلیدی در سیستم‌های منابع آب در نظر گرفته می‌شود. تغییر در سطح زیرکشت مربوط به نیاز آب برای کشاورزی است و بر عملکرد محصول تأثیر می‌گذارد. بنابراین، چهار شاخص، سطح زیر کشت، عملکرد محصول، عملکرد در واحد سطح ، عرضه و تقاضای غذا برای این زیرسیستم طراحی شده است (Aliahmadi et al., 2021).



شکل (۳): نمودار ذخیره و جریان زیر سیستم منابع غذا

زیر سیستم منابع انرژی

شکل (۴)، بیانگر عرضه انرژی شامل منابع ورودی از طریق شبکه سراسری توزیع برق کشور و برق تولیدی نیروگاه سیکل ترکیبی قاینات و انرژی‌های نو (خورشیدی و بادی) که در حال توسعه در منطقه است می‌باشد. همچنین، تقاضای انرژی، شامل میزان مصارف برق برای بخش‌های مختلف صنعت، کشاورزی و خدمات می‌باشد و امنیت منابع انرژی به‌صورت اختلاف بین عرضه و تقاضای انرژی در زیر سیستم منابع انرژی در نظر گرفته شده است (Aliahmadi et al., 2021)



شکل (۴): نمودار جریان زیر سیستم منابع انرژی

برای ارزیابی بهتر عملکرد مدل، کل سری زمانی به دو مجموعه داده تقسیم می‌گردد. بخش اول، شامل داده‌های سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵ که برای مدل کالیبره‌سازی استفاده می‌شود و داده های سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰ که جهت اعتبارسنجی مدل استفاده می‌شود.

نتایج کالیبراسیون، مطابق جدول (۲) نشان میدهد، اغلب مقادیر ضریب تعیین بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده تمامی متغیرهای سطح بالاتر از ۵۵ ٪ است و معیار نش- ساتکلیف نزدیک به ۱ و مقدار خطای جذر میانگین مربعات کمتر از ۰/۳ می‌باشد که مبنای نسبتاً خوبی برای پیش‌بینی‌های ساخته شده است. نتایج اعتبارسنجی در اکثر مقادیر مطلوب معیار نش- ساتکلیف بیشتر از ۰/۸، خطای جذر مربعات عددی حدود ۰/۲ و اغلب موارد ضریب تعیین بیشتر از ۰/۷ (بجز منابع آب سطحی و زیر زمینی حدود ۰/۵) می‌باشد.

جدول(۲): آزمون‌های مدل پارمترهای آماری

متغیر		کالیبراسیون						اعتبارسنجی					
سال		۹۰	۹۱	۹۲	۹۳	۹۴	۹۵	R^2	۹۶	۹۷	۹۸	۹۹	۱۴۰۰	R^2
جمعیت	NSE	۰.۹۹	۰.۹۹	۰.۹۹	۰.۹۲	۱.۲	۰.۹۹	۰.۷۴	۰.۶۲	۱.۶	۱.۲۸	۱.۳۶	۱.۵۷	۰.۹۳
	RMSE	۰.۲۸	۰.۲۸	۰.۲۸	۰.۱۲	۰.۳۱	۰.۲۸		۰.۲۲	۰.۲۹	۰.۳۲	۰.۳۳	۰.۳۶	
منابع غذایی دامی	NSE	۰.۵۸	۰.۶۹	۰.۷۷	۰.۹۶	۰.۹۴	۰.۹۹	۰.۹۴	۰.۹۹	۰.۹۹	۰.۹۸	۰.۹۹	۰.۹۶	۰.۷
	RMSE	۰.۲۲	۰.۲۳	۰.۱۷	۰.۲۸	۰.۰۶	۰.۲۸		۰.۲۸	۰.۲۸	۰.۲۸	۰.۲۸	۰.۲۸	
منابع غذایی کشاورزی	NSE	۰.۹۹	۰.۸۴	۰.۶۸	۰.۴۶	۰.۹۶	۰.۷۵	۰.۹۹	۰.۸۶	۰.۱۵	۰.۸۲	۰.۹۹	۰.۹۷	۰.۷۴
	RMSE	۰.۲۸	۰.۲۶	۰.۲۳	۰.۱۹	۰.۲۸	۰.۲۵		۰.۰۷	۰.۱۱	۰.۲۶	۰.۲۸	۰.۲۸	
منابع آب سطحی	NSE	۰.۵۴	۰.۵۵	۰.۶۹	۰.۲۸	۰.۸۹	۰.۵۶	۰.۷۶	۰.۹۳	۰.۸۸	۰.۷۵	۰.۹۸	۰.۹۱	۰.۶۵
	RMSE	۰.۲۱	۰.۲۱	۰.۱۵	۰.۱۵	۰.۱۸	۰.۲۱		۰.۱۶	۰.۱۵	۰.۲۵	۰.۲۸	۰.۲۷	
منابع آب زیرزمینی	NSE	۱	۰.۳۹	۰.۸۲	۰.۷۲	۰.۱۲	۰.۵۴	۰.۸۷	۰.۹۱	۰.۸۸	۰.۵۴	۰.۵۵	۰.۲۹	۰.۸۵
	RMSE	۰.۲۸	۰.۱۸	۰.۰۱۴	۰.۲۴	۰.۱	۰.۲۱		۰.۰۹	۰.۰۸	۰.۲۱	۰.۲۱	۰.۱۵	
منابع آب سدها	NSE	۰.۱۲	۰.۵۴	۰.۱۱	۰.۰۸۹	۰.۵۴	۰.۵۵	۰.۹۲	۰.۲۹	۰.۲۸	۰.۷۵	۰.۹۸	۰.۹۱	۰.۸۴
	RMSE	۰.۱	۰.۲۱	۰.۰۹	۰.۰۸۶	۰.۲۱	۰.۲۱		۰.۱۵	۰.۱۵	۰.۲۵	۰.۲۸	۰.۲۷	

منبع: یافته‌های پژوهش

سناریوهای پیشنهادی

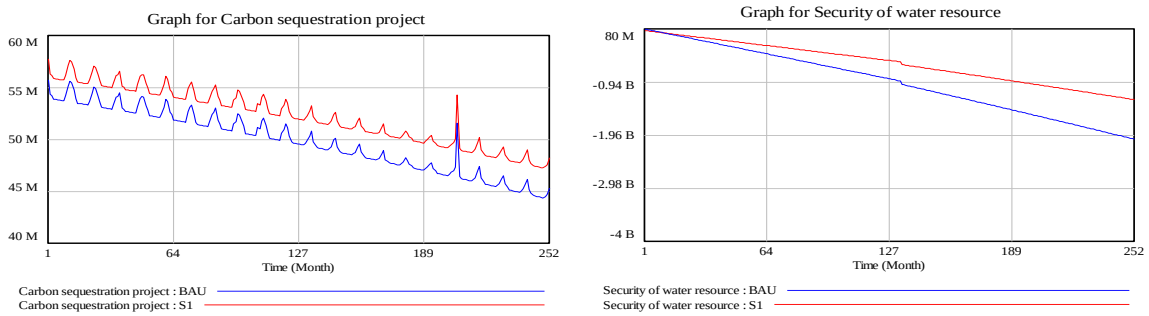
در ادامه نتایج بدست امده از سناریوهای پیشنهادی (اولیه و ترکیبی) تشریح شده است. این سناریوها و اهداف پیش بینی شده براساس داده‌های آمایش سرزمین استان خراسان‌جنوبی از سایت سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان خراسان‌جنوبی، استخراج‌گردید (Anonymous, 2022).

سناریوهای اولیه

سناریوی اول (S1)

راندمان آبیاری را براساس سیستم آبیاری مدرن (آبیاری تحت فشار قطره‌ای) در منطقه سربیشه و درمیان می‌توان به میزان ۶۰ ٪ در بخش کشاورزی افزایش داد (Anonymous, 2022). طبق نتایج بدست آمده در این

سناریو براساس مدل سیستم داینامیک، در زیر سیستم آب، امنیت آب از m^3 ۱۰^۱۲ ×۲۳/۸۳- به m^3 ۱۰^۱۲ ×۱۶/۴۱- افزایش خواهد یافت. همان‌طور که، در شکل (۵)، ملاحظه می‌گردد این سناریو نسبت به سناریوی پایه رشد بیشتری داشته است. بنابراین، افزایش راندمان آبیاری بر کاهش تقاضای آب این بخش و همچنین کاهش کمبود در سیستم اثرگذار است. اگر چه در حالت کلی دچار کمبود منابع آبی در منطقه هستیم. اما، با بکارگیری این سناریو کمبود آب کمتر می‌شود. در شرایط حاضر بخش کوچکی از اراضی منطقه با استفاده از سیستم‌های آبیاری مدرن آبیاری می‌گردد. افزایش بهره‌وری مصرف نیازمند برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری مناسب می‌باشد. اعمال سیاست‌های تشویقی و حمایتی از طرح‌های بهینه مصرف آب می‌تواند در افزایش راندمان تأثیرگذار واقع گردد. همچنین، مطابق جدول (۳)، پیش بینی می‌شود تحت این سناریو در سال ۱۴۱۰ پروژه ترسیب کربن از ۵۳۷/۳۸ واحد به ۷۴۲/۳۰ واحد و امنیت غذا از ۷۱/۱۴ kg به ۷۵/۷۴ kg و امنیت انرژی با صرفه جویی۱۱۶۱۶ kw انرژی الکتریسیته افزایش می‌یابد که می‌تواند دلیل این تاثیرات مثبت و افزایشی، بالا بردن راندمان آبیاری در بخش کشاورزی باشد



شکل (۵): امنیت منابع آب و ارتباط آن با پروژه ترسیب کربن در سناریوی اول

جدول(۳): مقایسه امنیت منابع آب، غذا، انرژی و پروژه ترسیب کربن بین شرایط فعلی با شرایط سناریوی اول

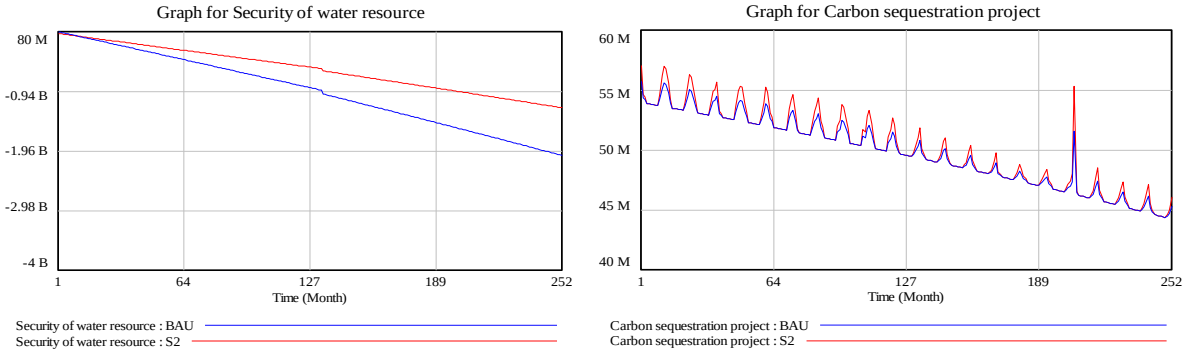
سناریوی اول(S1)	سال ۱۳۹۰	سال ۱۴۱۰
امنیت آب(شرایط فعلی)	۴۳۵.۳۷۱ (MM3)	-۲۳.۸۳۱ (BM3)
امنیت آب (تحت سناریوS1)	۲۶۱.۱۴۳ (MM3)	-۱۶.۴۱ (BM3)
وضعیت پروژه ترسیب کربن(شرایط فعلی)	۶۵۱.۷۹ واحد	۵۳۷.۳۸ واحد
وضعیت پروژه ترسیب کربن(تحت سناریوS1)	۸۷۶.۵۵ واحد	۷۴۲.۳ واحد
امنیت غذا(شرایط فعلی)	۹۳.۲۲۹(KG)	۷۱.۱۴۶ (KG)
امنیت غذا(تحت سناریوS1)	۸۹.۲۳۷ (KG)	۷۵.۷۴۳ (KG)
امنیت انرژی(شرایط فعلی)	۳۴.۵ (KW)	۳۵۰.۵۰۰(KW)
امنیت انرژی(تحت سناریوS1)	۳۴.۵ (KW)	-۳۸.۸۸۴ (KW)

سال ۱۴۱۰	سال ۱۳۹۰	سناریوی اول(S1)
-۲۳.۸۳۱ (BM3)	۴۳۵.۳۷۱ (MM3)	امنیت آب(شرایط فعلی)
-۱۶.۴۱ (BM3)	۲۶۱.۱۴۳ (MM3)	امنیت آب (تحت سناریوS1)
۵۳۷.۳۸ واحد	۶۵۱.۷۹ واحد	وضعیت پروژه ترسیب کربن(شرایط فعلی)
۷۴۲.۳ واحد	۸۷۶.۵۵ واحد	وضعیت پروژه ترسیب کربن(تحت سناریوS1)
۷۱.۱۴۶ (KG)	۹۳.۲۲۹(KG)	امنیت غذا(شرایط فعلی)
۷۵.۷۴۳ (KG)	۸۹.۲۳۷ (KG)	امنیت غذا(تحت سناریوS1)
۳۵۰.۵۰۰(KW)	۳۴.۵ (KW)	امنیت انرژی(شرایط فعلی)
-۳۸.۸۸۴ (KW)	۳۴.۵ (KW)	امنیت انرژی(تحت سناریوS1)

منبع: یافته‌های پژوهش

سناریوی دوم (S2)

کنترل ۵۰ درصدی رواناب و سیلاب، با توجه به بارش-های شدید لحظه‌ای سالیانه در این مناطق (به خصوص در فصول بهار و تابستان) با احداث بندهای خاکی و با تغییر مسیر رواناب و سیلاب به سمت سدها، بندها و مخازن در چند سال اخیر مورد توجه بوده است (Anonymous 2022). به‌طوری که، با اعمال سناریوی حاضر با توجه به شکل (۶)، و جدول (۴)، پیش‌بینی می‌گردد در زیر سیستم آب، امنیت آب از $۲۳/۸۳ \times ۱۰^{۱۲} m^3$- به $۱۴/۳۰ \times ۱۰^{۱۲} m^3$- و همچنین پروژه ترسیب‌کربن از ۵۳۷/۳۸ واحد به ۵۴۰/۰۴ واحد افزایش پیدا کند و دیگر موارد (امنیت غذا و انرژی) تغییر نکند



شکل (۶): امنیت منابع آب و ارتباط آن با پروژه ترسیب کربن در سناریوی دوم

سناریوی دوم(s2)	سال ۱۳۹۰	جدول ۴- مقایسه امنیت منابع آب، غذا، انرژی و پروژه ترسیب کربن بین شرایط فعلی با شرایط سناریوی دومسال ۱۴۱۰
امنیت آب(شرایط فعلی)	۴۳۵.۳۷۱ (MM3)	-۲۳.۸۳۹ (BM3)
امنیت آب(سناریوی دوم)	۲۶۱.۱۹۶ (MM3)	-۱۴.۳۰۱ (BM3)
وضعیت پروژه ترسیب کربن(شرایط فعلی)	۶۵۱.۷۹ واحد	۵۳۷.۳۸ واحد
وضعیت پروژه ترسیب کربن(سناریوی دوم)	۶۵۶.۳۴ واحد	۵۴۰.۰۴ واحد
امنیت غذا(شرایط فعلی)	۸۶.۰۴ (KG)	۷۱.۱۴۶ (KG)
امنیت غذا(سناریوی دوم)	۸۶.۰۴ (KG)	۷۱.۱۴۶ (KG)
امنیت انرژی(شرایط فعلی)	۳۴.۵ (KW)	۳۵۰.۵۰۰(KW)
امنیت انرژی(سناریوی دوم)	۳۴.۵ (KW)	۳۵۰.۰۰(KW)

منبع: یافته‌های پژوهش

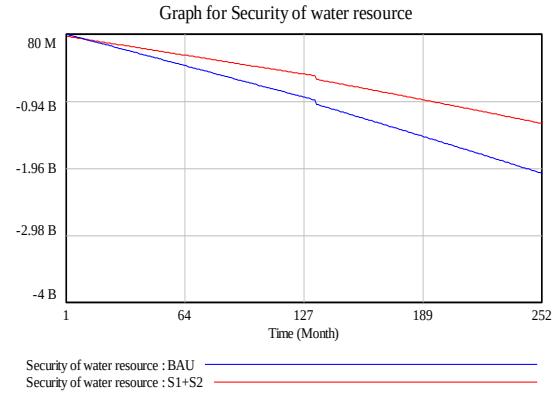
سناریوهای ترکیبی

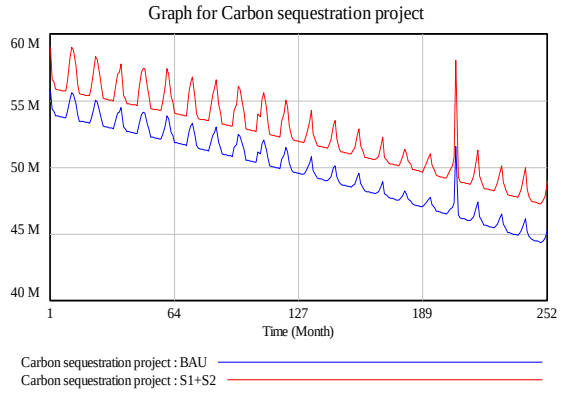
سناریوی سوم (S1S2)

این سناریو با اعمال همزمان افزایش راندمان آبیاری به میزان ۶۰ ٪ و کنترل رواناب و سیلاب به میزان ۵۰ ٪، اجرا شده‌است (Anonymous 2022). براساس نتایج بدست آمده در این سناریو براساس مدل سیستم داینامیک، در زیر سیستم آب در سال ۱۴۱۰، امنیت آب از $۲۳/۸۳ \times ۱۰^{۱۲} m^3$- به $۱۴/۹۴ \times ۱۰^{۱۲} m^3$- افزایش خواهدیافت. همان طور که، در شکل (۷)، ملاحظه می‌گردد، این سناریو نسبت به سناریوی پایه رشد بیشتری داشته است، بنابراین افزایش راندمان آبیاری و کنترل رواناب بر کاهش تقاضای آب این

بخش و همچنین، کاهش کمبود در سیستم اثرگذار است. مطابق جدول (۵)، پیش‌بینی می‌شود در سال ۱۴۱۰پروژه ترسیب‌کربن از ۵۳۷/۳۸ واحد به ۵۷۴/۵۲ واحد و امنیت غذا از ۷۱/۱۴ kg به ۷۵/۷۴ kg و امنیت انرژی با صرفه-جویی ۱۱۶۱۶ kw در پمپاژ آب افزایش می‌یابد که می‌تواند بدلیل بالا بردن راندمان آبیاری و کنترل رواناب و سیلاب باشد

.





شکل(۷): امنیت منابع آب و ارتباط آن با پروژه ترسیب کربن در سناریوی سوم

سناریوی سوم(S1S2)	سال ۱۳۹۰	جدول ۵- مقایسه امنیت منابع آب، غذا، انرژی و پروژه ترسیب کربن بین شرایط فعلی با شرایط سناریوی سومسال ۱۴۱۰
امنیت آب(شرایط فعلی)	۴۳۵.۳۷۱ (MM3)	-۲۳.۸۳۹ (BM3)
امنیت آب(سناریوی سوم)	۲۶۱.۱۸۷ (MM3)	-۱۴.۹۴۵ (BM3)
وضعیت پروژه ترسیب کربن(شرایط فعلی)	۶۵۱.۷۹ واحد	۵۳۷.۳۸ واحد
وضعیت پروژه ترسیب کربن(سناریوی سوم)	۶۸۰.۳۱ واحد	۵۷۴.۵۲ واحد
امنیت غذا(شرایط فعلی)	۸۶.۰۴ (KG)	۷۱.۱۴۶ (KG)
امنیت غذا(سناریوی سوم)	۸۹.۲۳۷ (KG)	۷۵.۷۴۳ (KG)
امنیت انرژی(شرایط فعلی)	۳۴.۵ (KW)	۳۵۰.۵۰۰ (KW)
امنیت انرژی(سناریوی سوم)	۳۴.۵ (KW)	۱۱.۶۱۴ (KW)

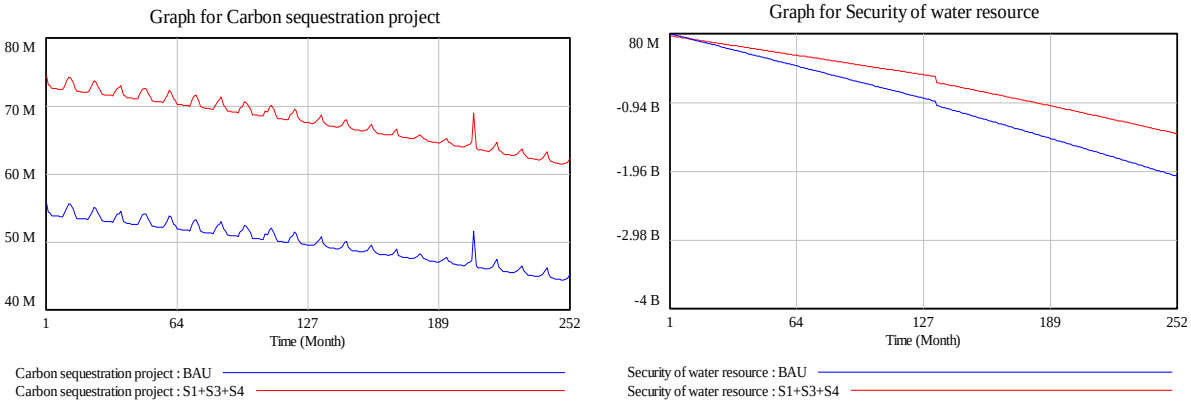
منبع: یافته‌های پژوهش

سناریوی چهارم (S1S3S4)

این سناریو با اعمال همزمان افزایش راندمان آبیاری به میزان ۶۰ ٪، کنترل رواناب و سیلاب به میزان ۵۰ ٪ و بهبود عملکرد محصولات به میزان ۳۰ ٪، اجرا شده است (Anonymous 2022). طبق نتایج بدست آمده در این سناریو براساس مدل سیستم داینامیک، در زیر سیستم آب، امنیت آب از $۲۳/۸۳ \times ۱۰^{۱۲} m^3$ به $۱۶/۴۱ \times ۱۰^{۱۲} m^3$- افزایش خواهد یافت. همان‌طور که، در شکل (۸)، ملاحظه می‌گردد این سناریو نسبت به سناریوی پایه رشد بیشتری داشته است. بنابراین، افزایش راندمان آبیاری، کنترل رواناب و افزایش عملکرد محصولات کشاورزی در بخش غذا بر کاهش تقاضای آب این بخش و همچنین، کاهش کمبود منابع آب در سیستم اثرگذار است. همچنین، مطابق جدول (۶)، پیش‌بینی می‌شود در سال ۱۴۱۰، پروژه ترسیب کربن از ۵۳۷/۳۸ واحد به ۵۷۴/۵۲ واحد و امنیت غذا از ۷۱/۱۴kg به ۷۵/۷۴ kg و امنیت انرژی با صرفه‌جویی ۱۱۶۱۶kw افزایش یابد. بنابراین، با اعمال همزمان افزایش راندمان آبیاری وکنترل رواناب و سیلاب و همچنین، افزایش عملکرد تولید محصولات از طریق اصلاح بذر و کود و اجرای

روش‌های نوین کشاورزی می‌توان به راهکارهای پایدار
امنیت منابع دست‌یافت

.



شکل (۸): امنیت منابع آب و ارتباط آن با پروژه ترسیب کربن در سناریوی چهارم

جدول (۶): مقایسه امنیت منابع آب، غذا و انرژی و پروژه ترسیب کربن بین شرایط فعلی با سناریوی چهارم

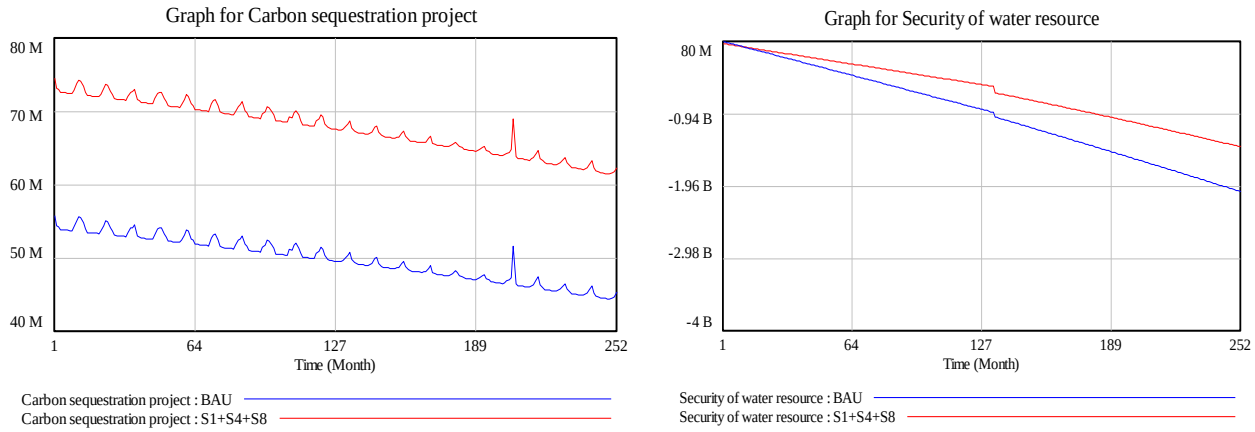
سناریوی چهارم(S1S3S4)	سال ۱۳۹۰	سال ۱۴۱۰
امنیت آب(شرایط فعلی)	۴۳۵.۳۷۱ (MM3)	-۲۳.۸۳۹ (BM3)
امنیت آب(سناریوی چهارم)	۲۶۱.۱۴۳ (MM3)	-۱۶.۴۱ (BM3)
وضعیت پروژه ترسیب کربن(شرایط فعلی)	۶۵۱.۷۹ واحد	۵۳۷.۳۸ واحد
وضعیت پروژه ترسیب کربن(سناریوی چهارم)	۸۷۶.۵۵ واحد	۷۴۲.۳ واحد
امنیت غذا(شرایط فعلی)	۹۳.۲۲۹ (KG)	۷۱.۱۴۶ (KG)
امنیت غذا (سناریوی چهارم)	۸۹.۲۳۷ (KG)	۷۵.۷۴۳ (KG)
امنیت انرژی(شرایط فعلی)	۳۴.۵ (KW)	۳۵۰.۵۰۰ (KW)
امنیت انرژی (سناریوی چهارم)	۳۴.۵ (KW)	-۳۸.۸۸۴ (KW)

منبع: یافته‌های پژوهش

سناریوی پنجم (S1S4S8)

این سناریو با اعمال همزمان افزایش راندمان آبیاری به میزان ۶۰ ٪، بهبود عملکرد محصولات به میزان ۳۰ ٪ و افزایش۵۰ ٪ بکارگیری انرژی های نو، اجرا شده است (Anonymous 2022). طبق نتایج بدست آمده در این سناریو براساس مدل سیستم داینامیک در زیر سیستم آب، امنیت آب از $-۲۳/۸۳ \times ۱۰^{۱۲} m^3$ به $-۱۶/۴۱ \times ۱۰^{۱۲} m^3$ افزایش خواهد یافت و همانطور که در شکل (۹)، ملاحظه می‌گردد، این سناریو نسبت به سناریوی پایه رشد بیشتری داشته است. همچنین، مطابق جدول (۷)، پیش‌بینی می‌شود در سال ۱۴۱۰ پروژه ترسیب‌کربن از ۵۳۷/۳۸ واحد به ۷۴۲/۳۰ واحد افزایش یابد که بیش‌ترین افزایش ترسیب کربن را در بین ۵ سناریوی پیش‌بینی شده در این پژوهش به خود اختصاص می‌دهد. امنیت غذا از ۷۱/۱۴ kg به ۹۸/۴۶kg نیز بیش‌ترین روند افزایشی را داشته و امنیت انرژی نیز با صرفه جویی۱۱۶۱۶ kw افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان با بکارگیری شیوه‌های نوین آبیاری هم‌زمان با بهبود عملکرد محصولات و بهره‌گیری از ظرفیت انرژی‌های خورشیدی و بادی بعنوان انرژی‌های نو در این

مناطق ضمن افزایش عملکرد ترسیب کربن و بهبود شاخص‌های محیط زیست منطقه به راهکارهای پایدار امنیت منابع و همچنین، مدیریت پایدار بهینه منابع آب در قالب همبست منابع آب، غذا و انرژی دست یافت.



شکل (۹): امنیت منابع آب و ارتباط آن با پروژه ترسیب کربن در سناریوی پنجم

با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعه این سناریو (**S1S4S8**)، بهترین گزینه موجود برای مدیریت پایدار منابع آب و گزینه مطلوب همبست آب، غذا و انرژی و همچنین وضعیت مطلوب برای پروژه ترسیب کربن، شناخته شد.

جدول (۷): مقایسه امنیت منابع آب، غذا، انرژی و پروژه ترسیب کربن بین شرایط فعلی با سناریوی پنجم

سناریوی پنجم(S1S4S8)	سال۱۳۹۰	سال۱۴۱۰
امنیت آب(شرایط فعلی)	۴۳۵.۳۷۱ (MM3)	**-۲۳.۸۳۹ (BM3)**
امنیت آب (سناریوی پنجم)	۲۶۱۱۴۳ (MM3)	**-۱۶.۴۱ (BM3)**
وضعیت پروژه ترسیب کربن(شرایط فعلی)	۶۵۱.۷۹ واحد	**۵۳۷.۳۸ واحد**
وضعیت پروژه ترسیب کربن (سناریوی پنجم)	۸۷۶.۵۵ واحد	**۷۴۲.۳ واحد**
امنیت غذا(شرایط فعلی)	۸۶.۰۴ (KG)	**۷۱.۱۴۶ (KG)**
امنیت غذا (سناریوی پنجم)	۱۱۶.۰۱ (KG)	**۹۸.۴۶۹ (KG)**
امنیت انرژی(شرایط فعلی)	۵۱.۷۴۷ (KW)	**-۵۸.۳۲۷ (KW)**
امنیت انرژی (سناریوی پنجم)	۳۴.۵ (KW)	**۳۵۰.۵۰۰ (KW)**

منبع: یافته‌های پژوهش

مطابق جدول (۷)، در سناریوی پنجم، امنیت آب در سال ۱۴۱۰ نسبت به ادامه روند فعلی چالش کمتری دارد و وضعیت پروژه ترسیب کربن، امنیت غذایی و امنیت انرژی وضعیت مطلوبی داشته است. لذا، به‌عنوان بهترین سناریو معرفی می‌شود.

نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر با نتایج مطالعاتی Feng et al. (2016)، Ravar et al. (2019) ، (2020)

.Keyhanpour et al همخوانی دارد. نتایج نشان داد که سیاست‌های ترکیبی پیشنهادی بخش کشاورزی و محیط-زیست بیشترین تأثیر را در تغییر وضعیت سیستم همبست (آب، غذا و انرژی) و تأمین نیاز زیست‌محیطی منطقه مورد مطالعه دارد. اجرای ترکیبی سیاست‌های تغییر الگوی کشت و افزایش بهره‌وری محصول و کنترل برداشت آب زیرزمینی، ضمن افزایش امنیت آب‌های سطحی و زیرزمینی و افزایش شاخص های زیست‌محیطی (بهبود ترسیب کربن)، باعث کاهش مصرف آب برای تولید غذا و کاهش مصرف انرژی برای استحصال‌آب خواهدگردید.

۴-نتیجه‌گیری

طبق نتایج ارائه شده، در سال‌های پیش‌رو با روند فعلی، تأمین نیاز آبی منطقه مورد مطالعه با بحران جدی مواجه می‌گردد. بر این اساس، می‌توان از راهکارهای پیشنهادی قابل اجرا با هدف مدیریت صحیح مصرف برای رساندن وضعیت سیستم به یک سطح قابل قبول و مطمئن استفاده نمود. با استفاده از رویکرد پویایی سیستم می‌توان تأثیر شرایط مختلف را در مدیریت سیستم و اثرات طولانی‌مدت آنها را مورد تحلیل قرار داده و سیاست‌های مناسب را اتخاذ نمود. در مدل پویایی سیستم با استفاده از سیاست‌های اصلاح الگوی مصرف از طریق افزایش راندمان آبیاری می توان از تشدید بحران آب جلوگیری نمود.

با توجه به نتایج مدل‌سازی پیشنهاداتی جهت مدیریت پایدار منابع آب، در منطقه مورد مطالعه، بدین شرح ارائه شده است:

۱- اصلاح الگوی مصرف آب با افزایش راندمان آبیاری (اجرای طرح های آبیاری تحت فشار قطره ای)
۲- کنترل رواناب و سیلاب از طریق احداث بندها و آبگیرهای کوچک جهت افزایش ذخیره آبی و کاهش فرسایش خاک
۳- بهبود عملکرد محصولات کشاورزی با استفاده از اصلاح بذر، تناوب زراعی، مصرف کودهای زیستی و روش‌های نوین کشت
۴- توسعه انرژی‌های نو (نصب پنل‌های خورشیدی و توربین-های بادی) جهت تولید برق و جایگزینی سوخت های فسیلی

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها حسب درخواست، از طرف نویسنده مسئول از طریق ایمیل قابل ارسال می‌باشند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که، هیچگونه تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

منابع

جهانشاهی، ح.، خانی نژاد، ع.، احمدی، ج.، موسوی، س.، ملکی، ف.، رضایی گزیک، ع. سرزهی، ف. وف، ملایی.(۱۳۹۹). گزارش اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی خراسان جنوبی در سال ۱۳۹۹. سازمان مدیریت و برنامه ریزی خراسان جنوبی، ص ۱-۳۹۳.

علی احمدی، ن، مرادی، ا، حسینی، س. م و ع سردارشهرکی. ۱۴۰۰. شبیه سازی و پویایی سیستم منابع آب حوضه آبریز هیرمند تحت سناریوهای مدیریتی. پژوهش های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۸(۱)، ص ۲۳-۴۳ .

یاری، ع.، کارگر، ع.، فخر، ف.، عبدالحسینی، م.، پوراسد، ح و ا، پویافر. (۱۳۹۱). گزارش عملکرد سالانه پروژه بین المللی ترسیب کربن. انتشارات چهار درخت، ص ۱-۳۵۱.

Abbasian, M., Sardar Shahraki, A and Ali Ahmadi, N. 2022. Economic Management of Water by Using Valuation Policy in Mango Orchards with an Emphasis on Environmental Inputs in Chabahar County, Iranian Economic Review, 26 (4): 727-738.

Ali Ahmadi, N., Moradi, E., Hoseini, S. M and Ali Sardar Shahraki. 2023. Simulation of the dynamics of water resources in the Hirmand watershed under economic and environmental scenarios, Environment, Development and Sustainability, 25 (12): 15091-15117.

Al-Saidi, M., Elagib, N.A. (2017). Towards understanding the integrative approach of the water, energy and food nexus. Sci. Total Environ., 574: 1131–1139.

Anonymous, (2020). Statistical Center of Iran. Available at: https://www.amar.org.ir/.

Anonymous, (2021). Jihad Agricultural Organization of South Khorasan Province. Available at: https://kj-agrijahad.ir/index.html.

Anonymous, (2022). Management and Planning Organization of South Khorasan Province. Available at: https://khj.mporg.ir/Portal/View/Page.aspx.

FAO. (2011). Land and plant nutrition management service. Available online at: http://www.fao.org/ag/agl/agll/spush/.

Farrokhzadeh, S., Hashemi Monfared, S. A., Azizyan, GH., Sardar Shahraki, A., Ertsen, M. W and Abraham, E. 2020. Sustainable water resources management in an arid area using a coupled optimization-simulation modeling, Water, 12 (13): 885.

Feng, K., Chapagain, A., Suh, S., Pfister, S. and Hubacek, K. (2011). Comparison of bottom-up and top-down approaches to calculating the water footprints of nations. Economic Systems Research., 23(4): 371-385.

Feng, X., Fu, B., Piao, S., Wang, S., Ciais, P., Zeng, Z., Lu, Y., Zeng, Y., Li, J. X. and Wu, B. 2019. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. Nature Climate Change., 6: 1019–1022.

Haghjoo.R.. Choobchian.Sh.. Morid.S. and Abbasi.E. (2022). Development and validation of management assessment tools considering water, food, and energy security nexus at the farm level. Environmental and Sustainability Indicators., 16: 100206.

Halbe, J., Pahl Wostl, C. and Adamowski, J. (2017). A methodological framework to support the initiation. design and institutionalization of participatory modeling processes in water resources management. Journal of Hydrology., 556: 701-716.

Hoff, H. (2011). Understanding the NEXUS. Background paper for the Bonn 2011 nexus conference: The water, energy and food security nexus solutions for the green economy. Stockholm Environment Institute. Stockholm.

IEA. (2010). World Energy Outlook 2010. Paris: OECD/ International Energy Agenc.

Keyhanpour, M. J., Musavi Jahromi, H. and 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. https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.029

Khatri, K. B., Strong, C., Kochanski, A. K., Burian, S., Miller, C. and Hasenyager, C. (2018). Water Resources Criticality Due to Future Climate Change and Population Growth: Case of River Basins in Utah. USA. Journal of Water Resources Planning and Management., 144 (8): 04018041.

Norouzi.N. (2022). Presenting a conceptual model of water-energy-food nexus in Iran. Current Research in Environmental Sustainability., 4: 100119.

Ravar, Z., Zahraie, B., Sharifinejad, A., Gozini, H. and Jafari, S. (2020). System dynamics modeling for assessment of water–food–energy resources security and nexus in Gavkhuni basin in Iran. Ecological Indicators., 108: 1-18.

Sardar Shahraki, A., Ali Ahmadi, N and Safdari, M. 2018. A New Approach to Evaluate the Economic Efficiency and Productivity of Agriculture Sector: The Application of Window Data Envelopment Analysis (WDEA), Environmental Energy and Economic Research (EEER), 2 (3): 145-160.

Song, C., Yan, J., Sha, J., He, G., Lin, X. and Ma, Y. (2018). Dynamic modeling application for simulating optimal policies on water conservation in Zhangjiakou City, China. Journal of Cleaner Production., 201(10): 111-122.

Sterman, J. (2002). System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. Massachusetts Institute of Technology. Engineering Systems Division, 1-31.

UNESCO (the United Nations World Water Development Report). (2015). Water for a Sustainable World. Paris. 2015.

WEF (World Economic Forum). (2011) Global risks 2011. 6th Edition. World Economic Forum, Cologne/Genev.

Zhang, J., Elia Campana, P., Yao, T., Zhang, Y., Lundblad, A., Melton, F. and Yan, J. (2020). The water-food-energy nexus optimization approach to combat agricultural drought: a case study in the United States. Applied Energy., 227, 449-464.