Journal of Sustainable Energy Systems

Online ISSN: 2980-8693

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

The University of Tehran Press

Dynamic Modeling of Sustainable Water Security Based on Water, Environment, Food, and Energy Nexus (WEFEN) in an Energetic Dark Greenhouse (EDG)

Yeganeh Ghandriz[1] | Yazdan Alvari[2] | Sara Mahmoodian[3] | Abolghasem Mosayyebi[4] | Mohammad Mir Drikvand[5] | Ali Jahangiri[6] | Majid Zandi[7*]

1. Researcher, Energy Research Center (ERC), Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: y_ghandriz@sbu.ac.ir
2. Researcher, Energy Research Center (ERC), Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: y_alvari@sbu.ac.ir
3. Researcher, Energy Research Center (ERC), Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: s_mahmoodian@sbu.ac.ir
4. Researcher, Energy Research Center (ERC), Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: mosayyebi@ut.ac.ir
5. Assistant Professor, Faculty of Science and Technology, University of Tehran. Email: mohammad.mir@ut.ac.ir
6. Associate Professor, Department of Energy Conversion, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University. Email: a_jahangiri@sbu.ac.ir
7. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Renewable Energy Engineering, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: m_zandi@sbu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 23 May 2024
Revised 24 June 2024
Accepted 27 Augusr 2024
Published Online 04 October 2024

Keywords:
Nexus,
Sustainable development,
Sustainable water security,
WEFEN,
Energetic dark greenhouse (EDG),
Dynamic modeling.

ABSTRACT

Water, environment, food, and energy security are intertwined challenges to achieve sustainable development. The significance of this matter necessitates strategic and large-scale action for an outlook in various fields. The Water-Environment-Food-Energy nexus (WEFEN) approach, with a volumetric perspective, is a development model that drives the world toward sustainability. This approach is a solution to analyze the behavior of intertwined WEFEN parameters. Employing mathematical models in nexuses unravels the effects of parameters on the main components and their interactions in a dynamic system. In this research, based on the interactions between the main variables of WEFEN, the conceptual solution of the Energetic Dark Greenhouse (EDG) is proposed to achieve sustainable development. The analysis of each subsystem is crucial due to their mutual effects on other parameters. In this study, the dynamic modeling of the smart irrigation system in the EDG was conducted in a closed-loop system using Vensim® PLE 10.2.0 software. This modeling not only preserves the core concept of the EDG by reducing irrigation volume but also minimizes water consumption through environmental moisture condensation and the recycling of system waste. The results show that considering this method, 14.13% of water is supplied from the reuse of the entire network.

Cite this article: Ghandriz, Y.; Alvari, Y.; Mahmoodian, S.; Mosayyebi, A.; Mir Drikvand, M.; Jahangiri, A. & Zandi, M. (2024). Dynamic Modeling of Sustainable Water Security Based on Water, Environment, Food, and Energy Nexus (WEFEN) in an Energetic Dark Greenhouse (EDG). *Journal of Sustainable Energy Systems*, 3 (4), 361-379. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.381384.1090

© Yeganeh Ghandriz, Yazdan Alvari, Sara Mahmoodian, Abolghasem Mosayyebi, Mohammad MirDrikvand, Ali Jahangiri, Majid Zandi **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.381384.1090

1. Introduction

Sustainable development has emerged as a key concept attracting societies' attention in recent years. Sustainable development usually aims to meet the current needs of humanity without compromising the ability of future generations to meet their own needs. It provides a framework that ensures the proper use of resources and minimizes harm to them in the future.

Additionally, it presents a model that integrates various resources to improve the quality of life for both present and future generations. In other words, sustainable development is an approach that focuses on the proper use of human resources in a way that allows for their regeneration and use by future generations [1]. The world population is increasing, as the latest United Nations forecast shows, the current world population will rise from 1.8 billion people to 10.4 billion people in the year 2100, while the natural resources do not increase according to human needs and desires. Therefore, it is essential to support and expand up-to-date strategies that align with sustainable development alongside population growth [2].

Water, environment, food, and energy are among humanity's primary resources. Today, the consumption patterns related to these resources have become a focal point, and research on the nexus between these elements has seen significant growth [3], [4], [5]. Studying the performance of these sectors and their impact on each other is crucial for evaluating the security of these resources [6]. In the sustainable development programs of the International Renewable Energy Agency (IRENA), the Water-Environment-Food-Energy nexus (WEFEN) has been introduced as an effective solution to achieve sustainable security of water, environment, food, and energy [7]. By examining the water and energy sectors as well as their connection in IRENA reports, the issue of the aggravation of the water crisis in the coming years becomes more prominent [8], [9].

The issue related to urban areas focusing on sustainable development has greatly contributed to the growth of water, energy, and food-related research. The 2015 report by the United Nations Intergovernmental Panel identified the nexus approach as the only pathway to achieving the 17 Sustainable Development Goals [10]. Additionally, IRENA’s 2015 report emphasized that renewable energies are the optimal solution for addressing the interconnected challenges of water, food, and energy [11].

According to the report of the United States National Intelligence Council, the interconnections between water, food, and energy and climate change were introduced as the main parameters that will change the world by 2030. This perspective was analyzed as a goal in different scales by examining the impact of other parts outside the nexus framework and its possible risks [12].

The Global Risks Report, published by the World Economic Forum in 2016, analyzed the interdependencies between critical issues related to water, food, and energy with other global risks, and further explored the connection between irregular migration—a key global risk—and these critical issues [13]. The European Union’s Horizon 2020 program specifically highlighted the interconnectedness of food security, low-carbon energy extraction, sustainable water management, and climate change mitigation [14].

In the volumetric view of the WEFEN, the main parameters have equal weight and influence each other. Any positive or negative change in one parameter can impact other parameters. According to this theory, enhancing any one parameter can contribute to the stability of the others. Under this theory, the Energetic Dark Greenhouse (EDG) solution is proposed as a small-scale sustainable approach to achieve sustainable development and ensure the long-term security of water, environment, food, and energy. The EDG is a completely closed and isolated environment where the environmental conditions for plants are provided for their needs. Various smart subsystems are considered in the EDG, designed to manage the performance of each section with a specialized focus to achieve optimal conditions. In this research, the dynamic modeling of sustainable water security in EDG has been done assuming the ideality of other parameters.

The Dynamic Systems approach is a modeling and analysis approach that is used to simulate the interconnected and internal relationships so that a correct analysis of the system's performance can be obtained [15]. With the help of the Dynamic Systems, complex,

changing, and interdependent situations can be simulated. Scenario analysis using Dynamic Systems greatly helps in informing decision-making in interconnected sectors [16]. One crucial step in data analysis is gathering empirical data from experts and specialists in the field [17]. Generally, Dynamic Systems consider several core components, including inputs, variables, system development, and sub-models, each comprising various sections and elements [18].

2. Methodology

The current research is based on the Dynamic Systems approach for modeling and simulating optimal irrigation in EDG. The research was conducted using Vensim® PLE 10.2.0 software. This approach is a suitable method for ensuring sustainable water security as it models the interactions between different systems by applying dynamic feedback loops and differential equations.

The Dynamic Systems methodology in EDG includes the following steps:

- Defining the experimental subsystems
- Identifying variables, the main system, and subsystems
- Causal loop and flow diagrams
- Modeling and validating the model
- Selecting and introducing the desired scenarios

3. Conclusion

In this research, EDG is proposed to achieve sustainable water, environmental, food, and energy security. The focus of this study has been on increasing sustainable water security resulting from the use of EDG in meeting food needs. Sustainable water security is a crucial factor that, alongside other key parameters, can significantly impact the efficiency of a system. To model sustainable water security in EDG, three scenarios were proposed. This process ultimately led to the dynamic modeling of Scenario 3, which integrates Scenarios 1 and 2 simultaneously. EDG achieves considerable water savings by eliminating thermal and infrared spectrum light. In this study, alongside the main nature of this type of greenhouse, considering various scenarios, the amount of network water consumption is minimized to the required amount. The first scenario shows that 21.3% of the water consumption from the network can be supplied in EDG with water condensation. Scenario 2, by recycling water through the RO desalination system, can supply 11.01% of the network water needs. By simulating and modeling the dynamic system in the third scenario at EDG, it is possible to fulfill up to 14.13% of the network's water demand.

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار
سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir
شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰
انتشارات دانشگاه تهران

مدل‌سازی دینامیکی امنیت پایدار آبی براساس هم‌بست آب، محیط زیست، غذا و انرژی (وِفِن) در گل‌خانه تاریک انرژتیک (گُتا)

یگانه قندریز[۱] | یزدان الواری[۲] | سارا محمودیان[۳] | ابوالقاسم مسیبی[۴] | محمد میردریکوند[۵] | علی جهانگیری[۶] | مجید زندی[۷*]

۱. پژوهشگر، مرکز پژوهشی انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: y_ghandriz@sbu.ac.ir
۲. پژوهشگر، مرکز پژوهشی انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: y_alvari@sbu.ac.ir
۳. پژوهشگر، مرکز پژوهشی انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: s_mahmoodian@sbu.ac.ir
۴. پژوهشگر، مرکز پژوهشی انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: mosayyebi@ut.ac.ir
۵. استادیار، دانشکدهٔ علوم و فنون دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mohammad.mir@ut.ac.ir
۶. دانشیار، مرکز پژوهشی انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: a_jahangiri@sbu.ac.ir
۷. نویسندهٔ مسئول، دانشیار، مرکز پژوهشی انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m_zandi@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۶
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

کلیدواژه:
هم‌بست،
توسعهٔ پایدار،
امنیت پایدار آبی،
وِفِن،
گل‌خانهٔ تاریک انرژتیک (گُتا)،
مدل‌سازی دینامیکی.

چکیده

آب، محیط زیست، غذا و انرژی از عوامل مهم و درهم‌تنیده حال و آیندهٔ بشری برای نیل به توسعهٔ پایدار است. با روند رو به رشد جمعیت، حفظ و صیانت این منابع و استفادهٔ صحیح از آن‌ها موضوعی مهم خواهد بود. اهمیت این امر موجب می‌شود تا اقدام‌های کلان و راهبردی برای چشم‌انداز مثبت در آینده در زمینه‌های مختلف پیشنهاد شود. رویکرد هم‌بست آب، محیط زیست، غذا و انرژی (وِفِن) با نگرش حجمی، یک الگوی توسعه در جوامع بشری است که جهان را به سمت پایداری سوق می‌دهد. رویکرد هم‌بست یک راه‌حل برای تجزیه‌وتحلیل رفتار درهم‌تنیدهٔ پارامترهای حاکم در یک سامانه است. سامانه‌های مبتنی بر هم‌بست می‌توانند اثر پارامترهای متقابل را در یک نگرش به‌هم‌پیوسته مورد بررسی قرار دهند. از طرف دیگر، به‌کارگیری مدل‌های ریاضی در هم‌بست‌ها می‌تواند اثر پارامترهای دیگر را بر مؤلفه‌های اصلی و تقابل مؤلفه‌ها را در یک سامانهٔ پویا گسترش دهند و آن را قابل درک‌تر کنند. در این پژوهش، و براساس تعامل‌های بین متغیرهای اصلی آب، محیط زیست، غذا و انرژی راه‌حل مفهومی گل‌خانهٔ تاریک انرژتیک (گُتا) برای ایجاد امنیت پایدار آبی، محیط زیستی، غذایی و انرژی پیشنهاد شده است. تحلیل هر یک از این زیرسامانه‌ها به دلیل اثر متقابلی که بر سایر پارامترها دارد، بسیار مهم خواهد بود. در این پژوهش، مدل‌سازی دینامیکی سامانهٔ هوشمند آبیاری در گل‌خانهٔ تاریک انرژتیک (گُتا) و در یک سامانهٔ حلقه بسته با استفاده از نرم‌افزار Vensim®Ple 10.2.0 انجام شده است. در این مدل‌سازی علاوه بر حفظ ماهیت اصلی گل‌خانهٔ تاریک انرژتیک (گُتا) در کاهش چشم‌گیر حجم آبیاری، با روش کندانس رطوبت محیط و بازیافت آب خروجی از سامانه، مصرف آب در این سامانه به حداقل می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد با در نظر گرفتن این روش، ۱۴/۱۳ درصد آب از دوباره مصرف کل شبکه تأمین می‌شود.

استناد: قندریز، یگانه؛ الواری، یزدان؛ محمودیان، سارا؛ مسیبی، ابوالقاسم؛ میردریکوند، محمد؛ جهانگیری، علی و زندی، مجید (۱۴۰۳). مدل‌سازی دینامیکی امنیت پایدار آبی براساس هم‌بست آب، محیط زیست، غذا و انرژی (وِفِن) در گل‌خانه تاریک انرژتیک (گُتا). *فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار*، ۳ (۴) ۳۶۱-۳۷۹. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.381384.1090

© یگانه قندریز، یزدان الواری، سارا محمودیان، ابوالقاسم مسیبی، محمد میردریکوند، علی جهانگیری، مجید زندی
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.381384.1090

۱. مقدمه

امروزه، توسعهٔ پایدار یکی از مفاهیمی است که توجه جوامع مختلف را به خود جلب کرده است، توسعهٔ پایدار، به طور معمول به سمت برطرف کردن نیازهای فعلی بشر میل می‌کند بدون اینکه توانایی نسل‌های آینده را در تأمین نیازهای خود به خطر بیندازد.

توسعهٔ پایدار یک سازوکار بدون خطر آسیب به منابع را برای آینده فراهم می‌کند. همچنین، یک الگوی توسعه و مفهومی را که دربرگیرندهٔ منابع مختلف است، به منظور بهبود کیفیت زندگی انسان‌ها در حال و آینده ارائه می‌دهد. به معنای دیگر، توسعهٔ پایدار رویکردی است که تمرکز آن به استفادهٔ صحیح از منابع بشری اشاره دارد، به گونه‌ای که امکان حیات مجدد و استفاده از آن برای نسل‌های آینده باشد [۱]. جمعیت جهان رو به افزایش است، به طوری که آخرین پیش‌بینی سازمان ملل متحد نشان می‌دهد جمعیت کنونی جهان از ۸/۱ ملیارد نفر به ۱۰/۴ میلیارد نفر در سال ۲۱۰۰ میلادی می‌رسد، این در حالی است که منابع طبیعی متناسب با نیازها و خواسته‌های انسان افزایش پیدا نمی‌کند. به همین‌منظور، لازم است تا موازی با روند رو به رشد جمعیت راه‌کارها و بسترهایی به‌روز متناسب با توسعهٔ پایدار حمایت شود و گسترش پیدا کند [۲].

آب، محیط زیست، غذا و انرژی از منابع اصلی بشر هستند و امروزه الگوهای مرتبط با مصرف آب، محیط زیست، غذا و انرژی بسیار مورد توجه قرار گرفته و پژوهش‌های مرتبط با پیوند بین آن‌ها روند رو به رشدی را داشته است [۳]، [۴]، [۵]. مطالعهٔ عملکرد بخش‌های آب، محیط زیست، غذا و انرژی و تاثیری که این منابع می‌توانند بر یکدیگر داشته باشند، در ارزیابی امنیت این منابع حائز اهمیت است [۶]. در برنامه‌های توسعه پایدار ایرنا[1]، هم‌بست آب، محیط زیست، غذا و انرژی (وِفِن)[2]، یک راه‌کاری موثر در جهت نیل به امنیت پایدار آبی، محیط زیستی، غذایی و انرژی معرفی شده است [۷]. با بررسی زیرسامانه‌های آب و انرژی و همچنین هم‌بست آب و انرژی در گزارش‌های ایرنا موضوع تشدید بحران آبی در سال‌های آتی پررنگ‌تر می‌شود [۸]، [۹].

موضوع مربوط به مناطق شهری با محور توسعهٔ پایدار به رشد پژوهش‌های هم‌بست آب، انرژی و غذا بسیار کمک کرده است. در گزارش سال ۲۰۱۵ میلادی هیئت بین‌دولتی سازمان ملل متحد، اندیشهٔ هم‌بست را تنها راه رسیدن به ۱۷ هدف برنامهٔ توسعهٔ پایدار اعلام کرد [۱۰]. همچنین در سال ۲۰۱۵ میلادی آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر در گزارش انرژی‌های تجدیدپذیر در هم‌بست آب، غذا و انرژی، به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر را به عنوان بهترین راه‌کار هم‌بست معرفی و بررسی کرد [۱۱].

مطابق با گزارش شورای اطلاعات ملی ایالت متحده[3]، پیوند بین آب، غذا و انرژی و تغییر آب‌وهوا به عنوان پارامترهای اصلی که جهان را تا سال ۲۰۳۰ میلادی تغییر می‌دهند، معرفی شدند. این چشم‌انداز به عنوان یک هدف در مقیاس‌های مختلف با بررسی تأثیر سایر بخش‌های خارج از چارچوب هم‌بست و خطرات احتمالی آن تجزیه‌وتحلیل شد [۱۲].

در بررسی گزارش ریسک‌های جهانی، توسط مجمع جهانی اقتصاد آمریکا که در سال ۲۰۱۶ میلادی منتشر شد، ارتباط متقابل بین مسائل بحرانی آب، غذا و انرژی با سایر ریسک‌های جهانی مورد تحلیل قرار گرفت، در ادامه به ارتباط بین مهاجرت‌های غیرعادی که جز ریسک‌های اصلی جهانی معرفی شده بود با مسائل بحرانی پرداخته شد [۱۳]. در برنامهٔ افق اتحادیهٔ اروپا[4] در سال ۲۰۲۰ میلادی به طور اختصاصی به پیوند و امنیت غذایی، استحصال انرژی از منابع کم‌کربن، مدیریت پایدار آب و کاهش تغییر آب‌وهوا اشاره شد [۱۴].

در دیدگاه حجمی به وِفِن پارامترهای اصلی در این هم‌بست، دارای وزنی یکسان بوده است که به سایر پارامترها وابسته و تأثیرگذار است. در نگاه حجمی به وِفِن، هر تغییر مثبت و منفی در یک پارامتر می‌تواند تأثیر گسترده‌ای بر سایر پارامترها داشته باشد. با این نظریه، ارتقای هر پارامتر می‌تواند به پایداری سایر پارامترها کمک‌کند. گُتا یک محیط به طورکامل بسته و ایزوله است که در آن شرایط محیطی گیاه، متناسب با نیاز آن فراهم می‌شود. زیرسامانه‌های هوشمند مختلفی در گُتا در نظر گرفته شده‌اند. زیرسامانه‌های هوشمند در گُتا به گونه‌ای طراحی شده‌اند که تمرکز عمل‌کرد هر بخش را به طور تخصصی برای رسیدن به بهترین شرایط مدیریت کنند. در این پژوهش مدل‌سازی دینامیکی امنیت پایدار آبی در گُتا با فرض ایده‌آل بودن سایر پارامترها انجام شده است.

1. IRENA
2. Water, Environment, food and Energy Nexus (WEFEN)
3. The US National Intelligence Council
4. European Union’s Horizon 2020 program

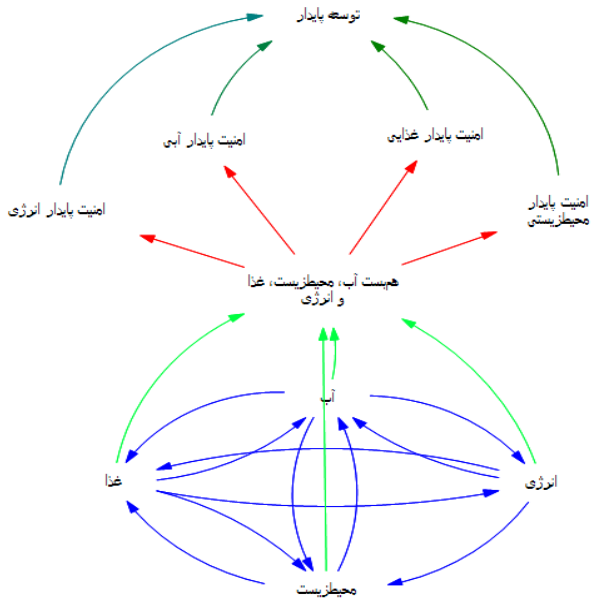
روش سیستم دینامیک[1] یک روی‌کرد مدل‌سازی و تحلیل است که برای شبیه‌سازی عناصر و رابطه‌های به‌هم‌پیوسته و درونی به کار می‌رود تا بتوان تحلیل درستی از عملکرد آن سامانه به دست آورد [۱۵]. به کمک سیستم دینامیک می‌توان موقعیت‌های پیچیده، درحال‌تغییر و به‌هم‌وابسته را شبیه‌سازی کرد. تحلیل سناریو از طریق سیستم دینامیک به اطلاع‌رسانی و تصمیم‌گیری در بخش‌های به‌هم‌پیوسته بسیار کمک می‌کند [۱۶]. یکی از مراحل بررسی داده، جمع‌آوری داده‌های تجربی از کارشناسان و متخصصان در این حیطه است [۱۷]. به طور کلی، برای سیستم دینامیک چند بخش اصلی در نظر گرفته شده که شامل ورودی‌ها، متغیرها، توسعهٔ سامانه و زیرمدل‌ها می‌شود که خود آن شامل بخش‌ها و موارد مختلفی است [۱۸].

داده‌های اصلی براساس آزمایش تجربی در پایلوت آزمایشگاهی گُتا واقع در مرکز پژوهشی دانشگاه شهید بهشتی به دست آمده است. در این پژوهش، سیستم دینامیک زیرسامانهٔ هوشمند آبیاری در گُتا با معرفی سناریوهایی متناسب با شرایط محیطی، مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل براساس داده‌های تجربی در زیرسامانهٔ هوشمند آبیاری انجام شده است. همچنین، زیرسامانه‌های دخیل در این سامانه به‌تفکیک تعیین و ارتباط بین آن‌ها مشخص شده است. مدل‌سازی سیستم دینامیک امنیت پایدرار آبی برای گُتا در نرم‌افزار Vensim®Ple 10.2.0 انجام شده است.

۲. هم‌بست آب، محیط زیست، غذا و انرژی (وِفِن)

هرچه اجزای هم‌بست بیشتر باشد، پیچیدگی و درهم‌تنیدگی آن بیشتر است. اجزای هم‌بست می‌تواند شامل دوجزئی، سه‌جزئی، چهارجزئی یا چندجزئی باشد. هم‌بست می‌تواند از منظر دوبعدی و یا سه‌بعدی (با نگرش حجمی) نیز مورد بررسی قرار گیرد. در منظر هم‌بست دوبعدی به دو پارامتر توجه بیشتری و در منظر سه‌بعدی یا نگرش حجمی، به سه پارامتر توجه بیشتری می‌شود و اثر متقابل آن پارامترها بر همدیگر مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد [۹].

اجزای هم‌بست وِفِن شامل قدیمی‌ترین موضوع‌هایی است که در حوزهٔ هم‌بست در پژوهش‌های مرکز پژوهشی دانشگاه شهید بهشتی، مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۹]. هم‌بست چهارجزئی وِفِن چارچوبی است که از مسیر توسعهٔ امنیت پایدار آبی، غذایی و انرژی و با حفظ محیط زیست به توسعهٔ پایدار منجر می‌شود. وِفِن با محوریت توسعهٔ پایدار، پیش‌بردی برای رسیدن به اهداف و پیوندهای جهانی است [۲۰]. شکل ۱ هم‌بست وِفِن را با دیدگاه حجمی و ارتباط متقابلی که عناصر با یکدیگر دارند را نشان می‌دهد که از مسیر امنیت پایدار آبی، محیط زیستی، غذایی و انرژی به توسعهٔ پایدار ختم می‌شود.



شکل ۱. هم‌بست آب، محیط زیست، غذا و انرژی با نگاه حجمی برای ایجاد توسعهٔ پایدار

1. Dynamic system

۳. گل‌خانهٔ تاریک انرژتیک (گُتا) سامانهٔ مورد مطالعه

گُتا محیطی نمونه است که از نگرش حجمی به وِفِن برای حل چالش‌های امنیت پایدار آب، محیط زیست، غذا و انرژی طراحی شده است. گیاه برای رشد در شرایط متعارف به چندین پارامتر فیزیکی اصلی شامل نور، دما، رطوبت، حرکت هوا، آبیاری، محیط منطقهٔ ریشه و دی‌اکسیدکربن وابسته است. گُتا یک محیط بسته و تاریک است که با استفاده از نور مصنوعی شبیه‌سازی شده است. از شیوه‌های کشت صنعتی مدرن برای کاشت محصول‌های غذایی استفاده و تأمین انرژی آن با راه‌کارهای سبز از طریق منابع تجدیدپذیر تأمین می‌شود. این محیط به طور کامل ایزوله می‌شود و با تمرکز بر پارامترهای اصلی مورد نیاز گیاه، محیطی مناسب را برای رشد بهینهٔ هر محصول غذایی فراهم می‌کند.

گُتا می‌تواند شرایط محیطی کنترل‌شده‌ای را متناسب با نیاز گیاه به صورت مصنوعی برای رشد بهینهٔ گیاه با دست‌کاری شرایط محیطی، متناسب با نیاز هر نوع محصول گیاهی، فراهم کند. گُتا دارای ۵ زیرسامانهٔ اصلی است که نیازهای گیاه در این زیرسامانه‌ها به تفکیک فراهم می‌شود. زیرسامانه‌های اصلی گُتا شامل زیرسامانهٔ هوشمند روشنایی مصنوعی، زیرسامانهٔ هوشمند تزریق دی‌اکسیدکربن، زیرسامانهٔ هوشمند تهویهٔ مطبوع، زیرسامانهٔ هوشمند آبیاری محلول غذایی و زیرسامانهٔ هوشمند کنترلی است.

زیرسامانهٔ هوشمند روشنایی مصنوعی: نور پارامتر محیطی حیاتی برای رشد گیاه و مهم‌ترین منبع انرژی برای فتوسنتز و دیگر فرایندهای زیستی گیاه است. نور خورشید شامل سه طیف اصلی فرابنفش، مرئی و مادون قرمز است. در این پژوهش، به کمک طیف مرئی نور برای رشد گیاه و حذف نور مادون قرمز از افزایش دمای گیاه جلوگیری شده و درنهایت از تعریق بیشتر و به تبع آن، مصرف آب بیشتر توسط گیاه جلوگیری به عمل می‌آید. این روش مصرف آب گیاه را می‌تواند تا حدود ۹۰ درصد کاهش دهد [۲۱].

گیاه برای انجام فتوسنتز به دامنهٔ نور مرئی نیاز دارد. گیاهان، نور با طول موج حدود ۴۰۰ تا حدود ۷۰۰ نانومتر (محدودهٔ تابش مرئی) که به عنوان تابش فعال فتوسنتزی شناخته می‌شود را جذب می‌کنند [۲۲]. در گُتا نور مورد نیاز گیاه جهت فتوسنتز توسط ال‌ای‌دی‌ها به دلیل عملکرد خوب، طول موج متنوع، مصرف انرژی کم و تولید حرارت کم برای گیاهان فراهم می‌شود. همچنین، با به‌کارگیری ال‌ای‌دی‌ها، شدت و کیفت نور در گُتا قابل‌کنترل است. با به‌کارگیری ترکیب انواع لامپ‌های ال‌ای‌دی با طول موج‌های مختلف، می‌تواند نور مورد نیاز برای رشد انواع گیاهان را در مناسب‌ترین وضعیت فراهم کرد.

زیرسامانهٔ هوشمند تزریق دی‌اکسیدکربن: گیاهان طی فتوسنتز گاز دی‌اکسیدکربن را جذب می‌کنند و هنگام تنفس آزاد می‌کنند. تغییر میزان غلظت گاز دی‌اکسیدکربن، می‌تواند تأثیر معناداری بر میزان فتوسنتز گیاهان داشته باشد. به همین‌منظور در گُتا با توجه به نوع گیاه کاشته‌شده، می‌توان غلظت دی‌اکسیدکربن را تا حد مشخصی کنترل کرد. درنهایت، می‌توان از گاز دی‌اکسیدکربن که یک تهدید برای محیط زیست است، به عنوان یک فرصت جهت رشد گیاه بهره‌مند شد. در گُتا، دی‌اکسیدکربن به میزان مورد نیاز از طریق یک شیر برقی که به کپسولی با غلظت ۹۹/۹۹ درصد متصل است، به محیط تزریق می‌شود.

زیرسامانهٔ هوشمند آبیاری محلول غذایی: گیاه برای رشد به آب کافی نیاز دارد. از طرف دیگر، مواد غذایی مورد نیاز گیاه به صورت محلول در آب، از طریق ریشه‌ها به گیاه قابل انتقال است. در گُتا و برای تأمین این نیاز اصلی، زیرسامانهٔ هوشمند آبیاری محلول‌غذایی در نظر گرفته شده است. موادغذایی مورد نیاز گیاه از طریق نمک‌های آلی (مواد معدنی) محلول در آب تأمین می‌شود. ترکیب نمک‌های معدنی با حلال آب در غلظت‌های معین با توجه به دورهٔ رشد گیاه تهیه و تزریق می‌شوند. در این پژوهش، محلول‌غذایی درنظرگرفته‌شده، استا هوگلند است که این محلول درواقع فرمول اصلاح‌شده هوگلند است که توسط پژوهشگران شرکت مهندسی دانش‌بنیان اِستا مستقر در مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه شهید بهشتی ابداع شده است. در این پژوهش، برای محصول صیفی مراحل رشد در چهار مرحلهٔ مختلف شامل سینی نشا (مرحلهٔ اول)، نشا تا گل‌دهی (مرحلهٔ دوم)، گل‌دهی تا میوه (مرحلهٔ سوم)، میوه تا محصول (مرحلهٔ چهارم) تعریف شد. روش آبیاری محلول غذایی در این چهار مرحله، به صورت قطره‌ای از درون یک مخزن توسط پمپ‌ها انجام شد.

زیرسامانهٔ هوشمند تهویهٔ مطبوع: دما و رطوبت از پارامترهای محیطی اولیه است که رشد و پرورش گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. دما هم به صورت مستقیم و هم غیرمستقیم بر گیاه تأثیر دارد. تأثیر دما به صورت مستقیم، روی برگ‌های گیاه و

دمای هوای محیط گُتا است. دما به صورت غیرمستقیم، روی جذب و انتقال آب و مواد غذایی در ریشهٔ گیاه تأثیر می‌گذارد. در مراجع مختلف، مقادیر متفاوتی برای دمای روز و شب برای کشت انواع محصول‌ها در گل‌خانه در نظر گرفته شده است. تأثیر رطوبت روی رشد گیاه، با توجه به شرایط محیطی، رقم گیاه و طول دورهٔ کشت متفاوت است.

زیرسامانهٔ هوشمند کنترلی: زیرسامانهٔ هوشمند کنترلی گُتا، به عنوان مغز هدایت‌کننده و کنترل‌کننده، وظیفهٔ اندازه‌گیری، کنترل و تنظیم تمامی پارامترهای محیطی برای فراهم کردن شرایط مساعد رشد گیاه را به عهده دارد. زیرسامانهٔ کنترلی از یک پردازنده و تعدادی عملگر و حسگر تشکیل شده است. سامانهٔ کنترلی گُتا، شرایط محیطی گل‌خانه را به روش حلقه‌بسته کنترل می‌کند. در این روش کنترلی و در لحظهٔ شروع به کار سامانه، پردازنده تعدادی پارامتر اولیهٔ محیطی را به عنوان داده‌های مبنا در نظر می‌گیرد و سپس، داده‌های حسگرهای محیطی را می‌خواند و با داده‌های ابتدایی مقایسه می‌کند. عملگرهایی که به سامانه‌های هوشمند اصلی متصل هستند فرمان را از رله‌ها دریافت می‌کنند و شرایط محیطی را متناسب با آن فرمان کنترل می‌کنند.

۴. سیستم دینامیک آبیاری در گُتا

پژوهش حاضر مبتنی بر رویکرد سیستم دینامیک برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی آبیاری مناسب در گُتا است. این پژوهش با نرم‌افزار Vensim®Ple10.2.0 انجام شده است. این رویکرد برای ایجاد امنیت پایدار آبی روشی مناسب است، زیرا پویایی بین سامانه‌های مختلف را با به‌کارگیری حلقه‌های بازخورد پویا و معادله‌های دیفرانسیل مدل‌سازی می‌کند.

روش‌شناسی سیستم دینامیک در گُتا شامل موارد زیر می‌شود.

۱. تعریف زیرسامانه‌های آزمایش
۲. شناسایی متغیرها، سامانهٔ اصلی و زیرسامانه‌ها
۳. نمودارهای حلقهٔ علّی ـ معلولی و جریان‌ها
۴. مدل‌سازی و اعتبارسنجی مدل
۵. انتخاب و معرفی سناریوهای مورد نظر

پایلوت اولیه آزمایشگاهی گُتا در محیطی به ابعاد ۳/۰×۲/۵×۲/۴ متر در مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه شهید بهشتی طراحی و ساخته شده است. شکل ۲ محیطی از این پایلوت اولیه آزمایشگاهی گُتا را نشان می‌دهد. در آن محیط برای کنترل دقیق‌تر و نظارت مستقیم اپراتورها محیطی شیشه‌ای به ابعاد ۱/۵×۱/۵×۲/۴ تعبیه شد. اسکلت سازه گُتا در محیط اصلی این پایلوت اولیه به ابعاد ۲/۳×۰/۸۵×۲/۳ متر در سه طبقه به ارتفاع ۰/۷۵ متر ساخته شده است. در هر طبقه ۶ جعبه کشت و هر یک به ابعاد ۰/۶×۰/۴×۰/۲ متر قرار گرفته است. مجموع مساحت زیر کشت با توجه به اندازهٔ سبدها برای هر طبقه ۱/۴۴ مترمربع و برای سه طبقه در مجموع ۴/۳۲ مترمربع است.

در این پژوهش، برای زیرسامانهٔ تهویهٔ مطبوع در گُتا از یک واحد دستگاه اسپیلت[1] مدل اسمارت اینورتر[2] با ظرفیت BTU/h ۲۴ هزار برای تأمین دما و رطوبت مورد نیاز، استفاده شد. همچنین، برای ایجاد جریان هوا و یکنواخت کردن دما در محیط گُتا، یک فن سقفی با سرعت جریان هوا در محدودهٔ ۰/۵ متر بر ثانیه به کار رفته است. انرژی مورد نیاز اسپیلت از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر (پنل‌های فتوولتاییک) تأمین می‌شود.

آزمایش انجام‌شده در محیط پایلوت اولیهٔ آزمایشگاهی گُتا، روی سه محصول صیفی گوجه‌فرنگی چری، فلفل و خیار در سه طبقه انجام شده است. در این پایلوت، دو نوع لامپ وال‌واشر با توان‌های ۲۴ وات (۲۸ چراغ) و ۷۲ وات (۸ چراغ) استفاده شده است. مشخصهٔ شدت نوری طبقهٔ اول به گونه‌ای است که دارای انتگرال نور روزانه[3] $\left(\mu mol.m^{-2}.d^{-1}\right)$ ۱۱/۵، طبقهٔ دوم دارای انتگرال نور روزانه $\left(\mu mol.m^{-2}.d^{-1}\right)$ ۱۴/۴ و شدت نور در طبقهٔ سوم دارای انتگرال نور روزانه $\left(\mu mol.m^{-2}.d^{-1}\right)$ ۱۷/۳ است.

1. Split
2. Smart Inverter 24,000 BTU Heating & Cooling Split Air conditioner
3. Daily light Integral

دورهٔ نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت خاموشی در شبانه‌روز برای محصول‌ها انتخاب شده است. همچنین، شبیه‌سازی طلوع و غروب خورشید با تنظیم روشنایی یک سوم در دو بازهٔ یک‌ساعته قبل و بعد از دورهٔ روشنایی و خاموشی انجام می‌شود. شرایط محیطی برای رشد گیاهان نیز طی آزمایش و در جدول ۱ نشان داده شده است.

قبل از کاشت گیاهان در هر مرحلهٔ آزمایش، ابتدا این محیط به طور کامل ضد عفونی می‌شود. ابتدای هر دورهٔ کشت معادل ۴۰ لیتر آب با نسبت ۰/۲ آب اکسیژنه با هم ترکیب می‌شوند که ۵ لیتر آن در محیط برای ضد عفونی محیط دیوارها، سقف‌ها و سازهٔ فلزی مه‌پاش می‌شود. ۳۵ لیتر دیگر برای ضد عفونی محیط و بستر به کار رفته است. سپس، گیاهان در سینی نشا آمادهٔ کاشت شده‌اند. در بستر نگه‌دارندهٔ گیاهان از ترکیب کوکوپیت، پرلیت و پیت‌ماس با درصد حجمی به‌ترتیب ۵۰، ۳۰، ۲۰ استفاده شده است که ابتدا در سینی نشا کاشته شدند و سپس، در زمان معین به بسترهای اصلی انتقال پیدا کردند.

در جعبه‌های بستر کشت با انتخاب نوع محصول با توجه به نیاز آبیاری و خاصیت بسترهای نگه‌دارنده، ۲۰ لیتر از ترکیب یادشده به‌کار رفته است. هدف مهم، دقت بر میزان حجم آبیاری، میزان نگه‌داری آب و محلول‌غذایی در مدت زمان مناسب، ایجاد تخلخل به اندازهٔ کافی برای اکسیژن‌رسانی به ریشه و خروج آب زهکش بوده است. هنگام کاشت بذرها در سینی نشا، گیاهان در حجم ۴ لیتر آب و محلول غذایی متناسب با دورهٔ رشد، به مدت ۲ دقیقه (تا میزان رطوبت بسترهای نگه‌دارنده به ۶۰ درصد برسد) و در فاصلهٔ زمانی دوروزه با روش آبیاری از کف، در سینی نشا محلول‌دهی می‌شدند. بعد از گذشت ۳۹ روز، نشاها در روز ۴۱ به بسترهای اصلی در گُتا منتقل شدند.

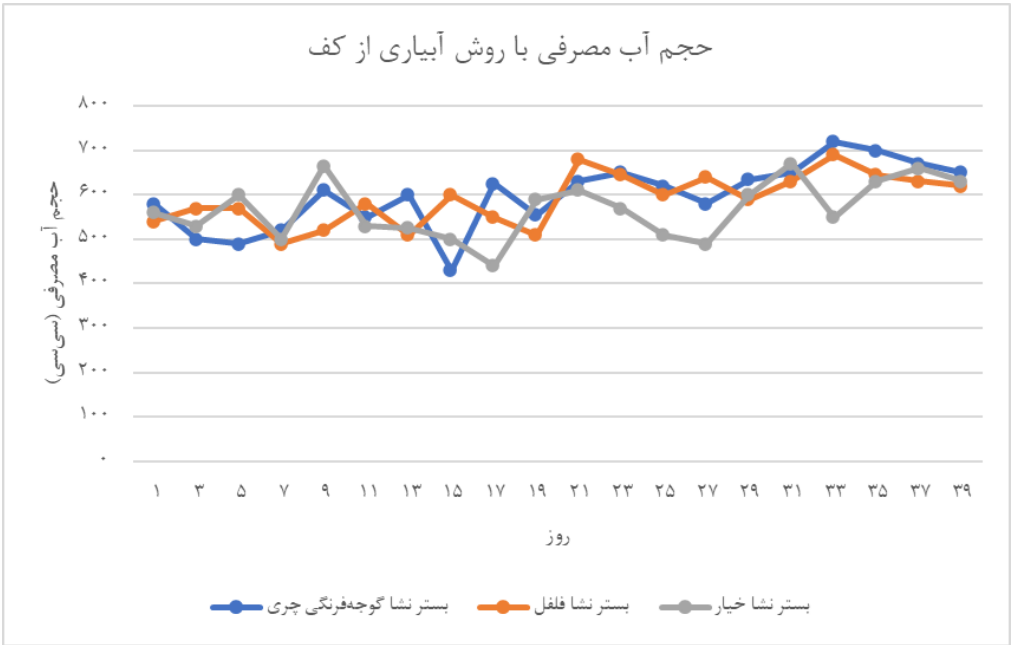
شکل ۲. پایلوت اولیه آزمایشگاهی گُتا در مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه شهید بهشتی

جدول ۱. شرایط محیطی برای رشد گیاهان گوجه‌فرنگی چری، فلفل و خیار در پایلوت اولیه آزمایشگاهی گُتا

شرایط محیطی	مقادیر
دمای روز	۲۵°C
دمای شب	۱۸ °C
میزان رطوبت نسبی	۸۰–۵۵ درصد
اسیدیته محلول‌غذایی	۵/۹۵
اسیدیتهٔ بستر	۶
غلظت دی‌اکسیدکربن	۱۰۰۰ ppm
طول دورهٔ روشنایی طی شبانه‌روز	۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت خاموشی
تعداد طبقه‌های گُتا	۳

شکل ۳. کاشت نشاهای صیفی در پایلوت اولیه آزمایشگاهی گُتا در مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه شهید بهشتی

میزان مصرف آب نشاها در سینی نشا طی دورهٔ ۳۹ روزهٔ رشد گیاهان اندازه‌گیری شد. شکل ۴ میزان مصرف آبیاری محلول غذایی مصرفی سه گیاه گوجه‌فرنگی چری، فلفل و خیار را تا زمان انتقال نشا به بسترهای اصلی نشان می‌دهد. میزان آبیاری محلول غذایی در گیاه‌های گوجه‌فرنگی چری ۱۱/۹۶۵ لیتر، گیاه‌های فلفل ۱۱/۸۱۰ لیتر و گیاه‌های خیار ۱۱/۳۶۰ لیتر از زمان بذر تا نشا (۳۹ روز) بوده است. هر سینی نشا ۷۲ حفرهٔ کشت نشا دارد که به طور میانگین هر بوته گوجه‌فرنگی چری، فلفل و خیار به‌ترتیب مقدار ۰/۱۶۶۲، ۰/۱۶۴۰ و ۰/۱۵۷۸ لیتر محلول‌غذایی تا زمان انتقال نشاها به بسترهای اصلی مصرف کرده است.



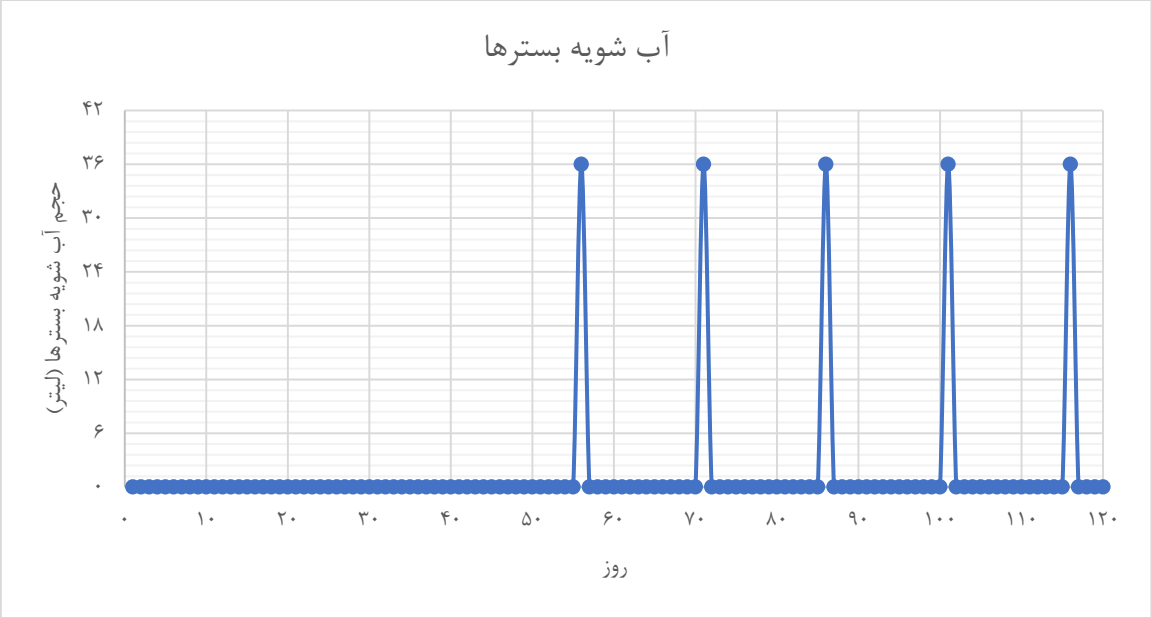
شکل ٤. حجم آب مصرفی از زمان بذر تا نشا در پایلوت اولیه آزمایشگاهی گُتا مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه شهید بهشتی

با انتقال نشاها به بسترهای اصلی، میزان حجم آبیاری محلول غذایی 0/750 لیتر به هر بستر در حجم ۲۰ لیتر بستر نگه‌دارنده و در فاصلهٔ زمانی سه‌روزه (تا رطوبت ۶۰ درصد) انجام می‌شد. در هر بستر ۴ بوته کاشته می‌شد. کل دورهٔ کشت (تا زمان برداشت محصول) برای سه محصول صیفی گوجه‌فرنگی چری، فلفل و خیار ۱۲۰ روز بوده است. میزان آبیاری محلول غذایی صیفی‌ها از زمان انتقال نشا تا روز برداشت برای هر بوته به طور میانگین معادل ۷/۵ لیتر بوده است. از هر محصول ۲۴

بوته در گُتا وجود دارد که به‌ترتیب میزان مصرف آبیاری محلول غذایی از زمان انتقال نشاها به گُتا ۱۸۰ لیتر برای هر گیاه صیفی گوجه‌فرنگی چری، فلفل و خیار بوده است. کل آبیاری محلول غذایی برای سه محصول از زمان انتقال نشاها با توجه به ماهیت گُتا ۵۴۰ لیتر بوده است.

طی دورهٔ کشت، با توجه به نوع کاشت و شرایط مورد نظر، در این زیرسامانه برای جلوگیری از تجمع نمک‌های آلی در بازه‌های زمانی مشخص آب‌شویه می‌شد. آب‌شویه اول زمانی اتفاق می‌افتد که بعد از انتقال نشاها به بستر، تجمع نمک در سطح بستر مشاهده می‌شد. سپس، در بازه‌های زمانی مشخص که از آزمایش‌های تجربی به دست آمده است، آب‌شویه انجام می‌شد.

اولین تجمع نمک در روز پنجاه‌وششم طول دورهٔ کشت مشاهده شد. هر بستر با حجم ۲ لیتر آب با تنظیم ph به میزان مورد نظر شست‌وشو شد. کل حجم آب مصرفی برای آب‌شویه در روزهای مشخص ۳۶ لیتر بوده است. شکل ۵ حجم آب مصرفی برای آب‌شویه را در کل دورهٔ کشت نشان می‌دهد.



شکل ۵. حجم آب مصرفی برای آب‌شویه طی دورهٔ کشت پایلوت اولیه آزمایشگاهی گُتا در مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه شهید بهشتی

زیرسامانهٔ هوشمند آبیاری در گُتا مانند تمامی زیرسامانه‌های هوشمند به بخش‌های مختلفی تقسیم می‌شود. در بررسی سیستم دینامیک در یک سامانه ابتدا باید متغیرهای اصلی شناسایی شوند. سپس، بعد از شناسایی این متغیرها لازم است تا ورودی و خروجی‌های سیستم مشخص شود.

متغیرهای اصلی در این پژوهش آب مازاد نامطلوب سامانه، آب مصرفی از شبکهٔ آب، آب مورد نیاز برای رشد گیاه، آب مورد نیاز برای ضد عفونی، آب مورد نیاز برای آب‌شویه و میزان آب کندانس‌شده از محیط است. سپس، باید جریان ورودی‌ها و خروجی‌ها مشخص شوند. مخزن[1] اصلی آب مازاد نامطلوب سامانه است که آب شبکه به آن وارد می‌شود. خروجی‌های این سامانه، آب مورد نیاز برای رشد گیاه، آب مورد نیاز برای آب‌شویه، آب مورد نیاز برای ضد عفونی و آب کندانس‌شده از محیط است.

برای مدل‌سازی در نرم‌افزار، ابتدا باید بازهٔ زمانی مشخص شود. مقیاس روز در شبیه‌سازی به عنوان دقت زمان مبنا قرار گرفت. در مدل‌سازی سیستم دینامیک پس از مشخص شدن دقت زمان مبنا، ورودی، خروجی و جریان‌ها معلوم شدند. برای دادهٔ هر متغیر رابطهٔ علّی ـ معلولی آن مشخص شد. سپس، فرمول هر متغیر با توجه به رابطهٔ علّی آن نوشته شد. در مرحلهٔ بعد، ارتباط بین متغیرهای هر سامانه و زیرسامانه مشخص شدند. در ادامه، ۲ سناریو برای سامانهٔ مورد نظر تعریف شد تا میزان آب دورریز و

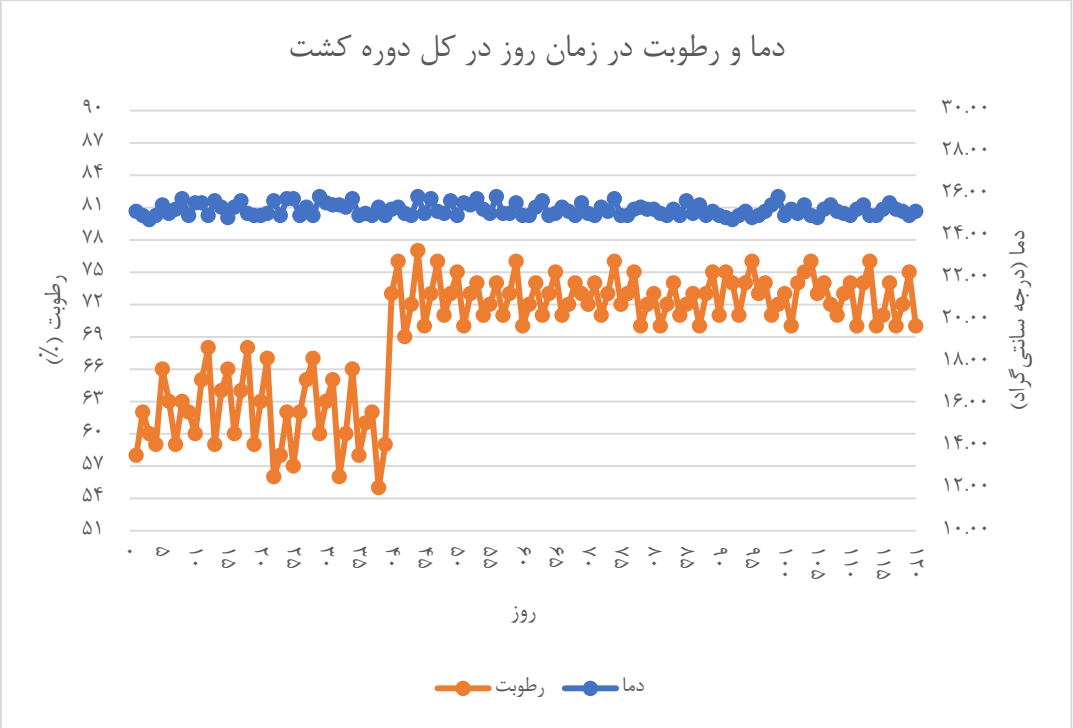
1. Stock

هدررفت آب را در هر سناریو به طور جداگانه به حداقل برسانند. درنهایت در سناریوی سوم، سناریوهای اول و دوم، به طور هم‌زمان با هم پیاده‌سازی شدند.

۴-۱. سناریوی ۱

در سناریوی اول، آب اضافی از محیط در گُتا کندانس می‌شود و حجم آب کندانس‌شده از محیط، از مقدار آب مورد نیاز شبکه که باید تأمین شود، کم می‌شود. برای کندانس مقدار رطوبت در گُتا، با به‌کارگیری داده‌های تجربی دما، رطوبت و حجم محیط محاسبه‌های ریاضی مدل‌سازی انجام شده است.

میزان آب کندانس‌شده در فضای مورد نظر با مقادیر مشخصی از دما و رطوبت که از داده‌های تجربی به دست آمده است با استفاده از روابط ریاضی محاسبه شد. مقادیر مشخص دما و رطوبت داده‌برداری‌شده در کل دورهٔ کشت در شکل ۶ مشخص است.



شکل ٦. داده‌های تجربی دما و رطوبت طی دورهٔ کشت پایلوت اولیه آزمایشگاهی گُتا در مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه

در این مدل‌سازی ریاضی، ابتدا فشار بخار اشباع از طریق جدول فشار بخار آب در دمای مورد نظر برای هر مورد استخراج شد. فشار بخار فعلی با توجه به رطوبت نسبی از رابطهٔ ۱ محاسبه شده است.

$$\frac{RH}{100} \times p_{sat} = P_{act}$$ رابطهٔ (۱)

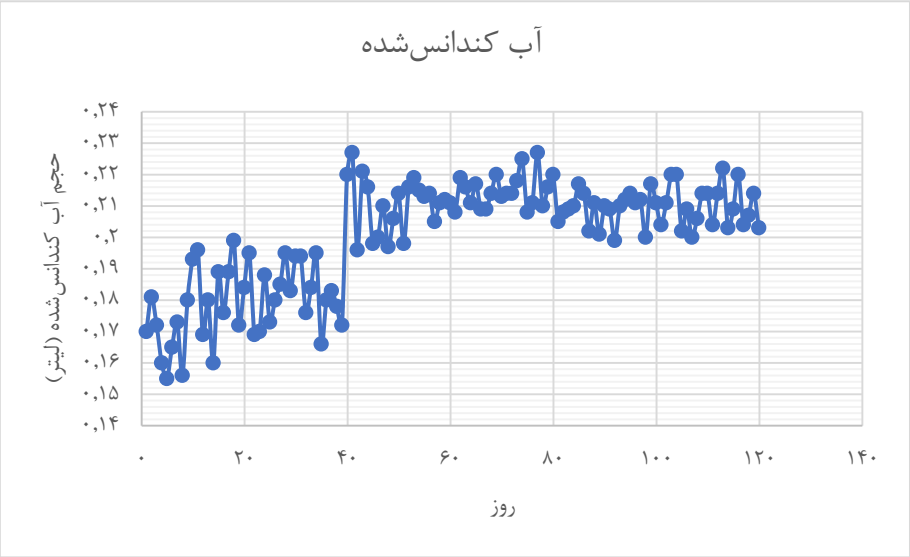
در این معادله، P_{act} مقدار فشار بخار فعلی، P_{sat} فشار اشباع بر حسب پاسکال، RH درصد رطوبت نسبی است. آب موجود در هوا با استفاده از رابطهٔ گاز ایده‌آل مطابق رابطهٔ ۲ محاسبه می‌شود.

$$\frac{P_{act}V}{RT} = n$$ رابطهٔ (۲)

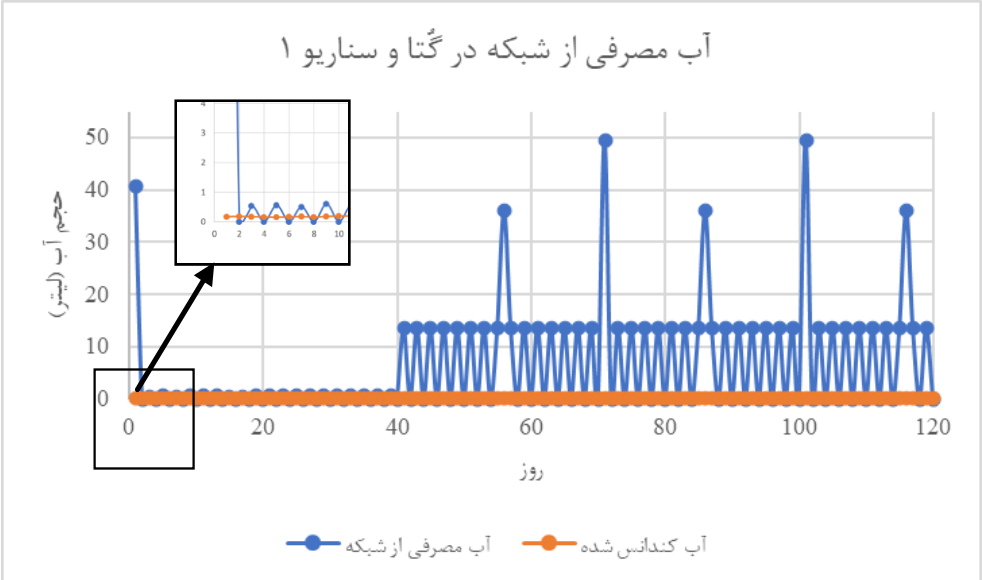
در این معادله، V حجم محیط بر حسب مترمکعب، R ثابت گاز برحسب ژول بر مول درجهٔ کلوین و T دمای مطلق بر حسب کلوین است. سپس، جرم مولی آب با توجه به تعداد مول‌ها محاسبه می‌شود و درنهایت، جرم آب به حجم تبدیل می‌شود. شکل ۷ میزان آب کندانس‌شده را در کل طول دورهٔ کشت نشان می‌دهد. از زمان بذر تا نشا، به دلیل حجم کم آب مصرفی در سینی نشا و تبخیر سطحی کمی که در تقابل با محیط قرار دارد، میزان رطوبت محیط کمتر است. با توجه به افزایش سطح زیرکشت، میزان

تبخیر سطحی در زمان نشاکاری تا پایان طول دورهٔ کشت نسبت به حالت اول بذر تا نشا، افزایش داشته است. همین امر منجر به افزایش رطوبت نسبت به بازهٔ ۳۹ روز اول شده است. حجم کل آب کندانس‌شده طی ۱۲۰ روز معادل ۲۴/۰۸ لیتر بوده است.

شکل ۸ سناریوی اول را با توجه به سامانهٔ طراحی‌شده، نسبت به آب مصرفی از شبکه برای آب مورد نیاز گیاه، ضد عفونی و آب‌شویه نشان می‌دهد. آب کندانس‌شده از محیط گُتا ۳/۲۱ درصد از آب مصرفی شبکه را تأمین کند.



شکل ۷. میزان آب کندانس‌شده از محیط طی دورهٔ کشت پایلوت اولیه آزمایشگاهی گُتا در مرکز پژوهشی انرژی



شکل ۸. آب مصرفی از شبکه و سناریوی ۱ پایلوت اولیه آزمایشگاهی گُتا در مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه

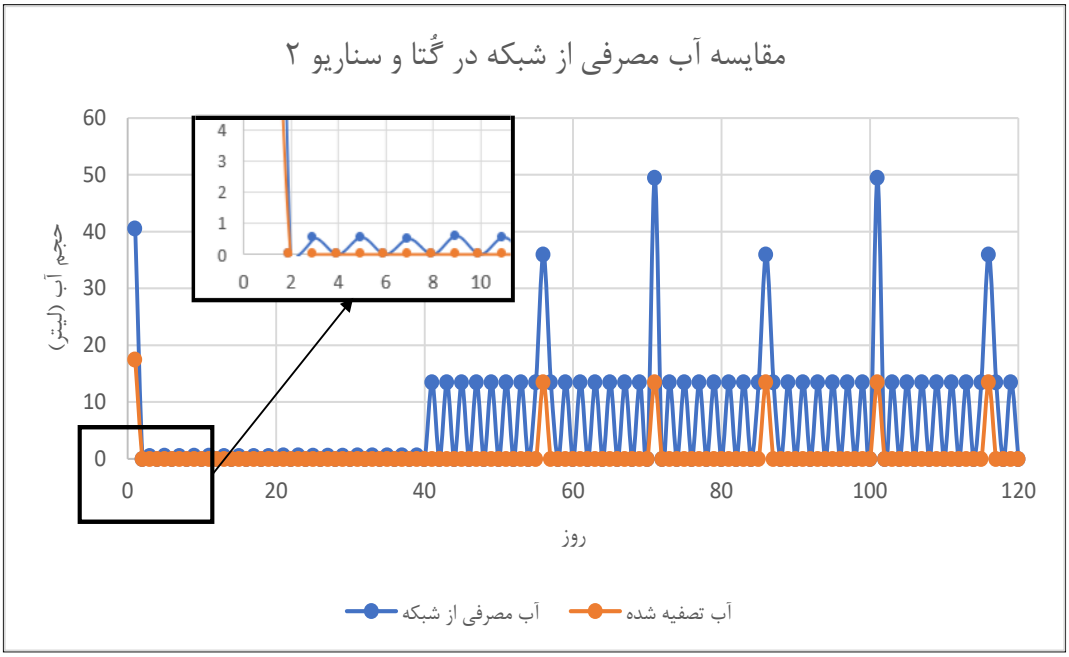
۴-۲. سناریوی ۲

سناریوی دوم، با دیدگاه بازیافت آب از خروجی زیرسامانه‌ها طراحی شده است. در زیرسامانهٔ هوشمند آبیاری با در نظر گرفتن سامانهٔ آب‌شیرین‌کن RO می‌توان آب خروجی از زیرسامانه‌ها را به سامانهٔ اصلی که آب مصرفی از شبکه است، بازگرداند. میزان آب قابل تصفیه از هر سامانه به طور جداگانه مشخص شده است. آب خروجی قابل تصفیه از سامانه‌های اصلی آب‌شویه و ضد عفونی به عنوان ورودی برای سامانهٔ آب‌شیرین‌کن RO در نظر گرفته شده است. مقادیر مشخصی از آن تصفیه و به سامانهٔ اصلی آب (آب

مصرفی از شبکه) باز شده است. مقدار دیگری از آن هم به عنوان دورریز از سامانهٔ آب‌شیرین‌کن RO خارج می‌شود. با توجه به کیفیت و کارایی سامانهٔ آب‌شیرین‌کن RO مقدار تولید آب مقطر به دورریز ۵۰ درصد در نظر گرفته شده است [۲۳].

برای مقادیر ضد عفونی سامانه، به طور کلی ۴۰ لیتر محلول آب و آب اکسیژنه با مقادیر مشخصی از ترکیب در نظر گرفته شده است. ۵ لیتر از آن در محیط روی سازهٔ فلزی، دیواره‌ها، کف و سقف مه‌پاش شده است. ۳۵ لیتر دیگر حجم آب برای ضد عفونی، به عنوان ورودی، وارد سامانهٔ آب‌شیرین‌کن RO شده، تصفیه و به سامانهٔ اصلی که آب مورد نیاز از شبکه است، وارد شده است.

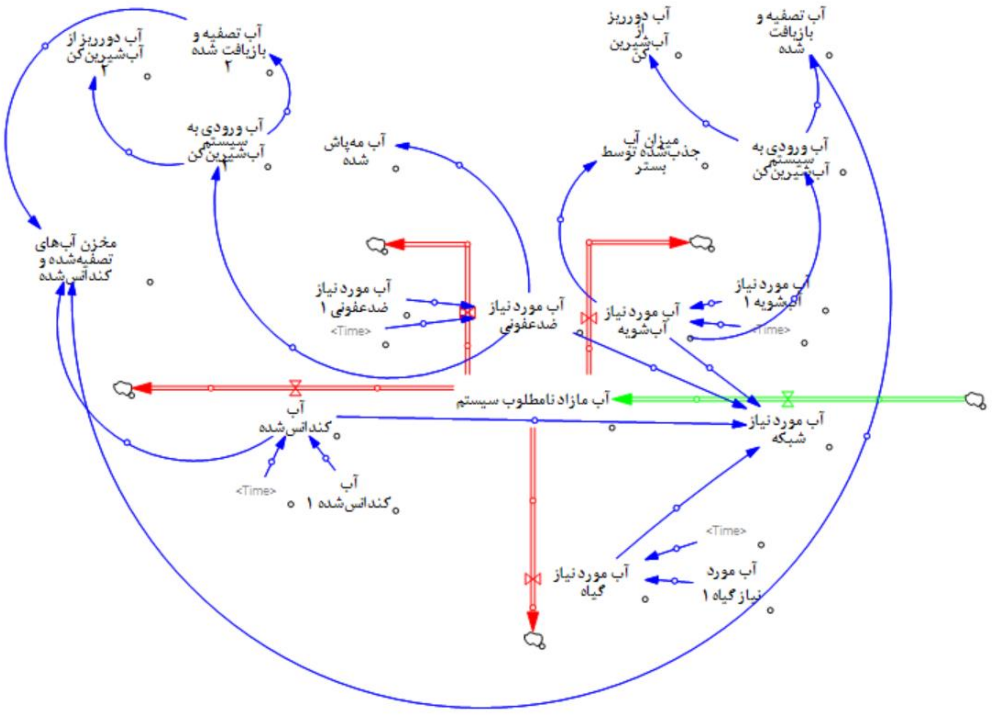
همچنین، هنگام آب‌شویه مقادیری از آب جذب بسترها می‌شود و سپس، آب خروجی از بسترها، به عنوان ورودی، وارد سامانهٔ آب‌شیرین‌کن RO می‌شود و مقادیر مشخصی از آن تصفیه و به سامانهٔ اصلی (آب مورد نیاز از شبکه) باز می‌گردد. میزان آب خروجی از بسترها در آب‌شویه به طور میانگین ۲۷ لیتر است. این مقدار به عنوان ورودی برای سامانهٔ آب‌شیرین‌کن RO در نظر گرفته شده است. شکل ۹ نتایج آب خروجی از سامانهٔ آب‌شیرین‌کن RO را از دو سامانهٔ آب‌شویه و ضد عفونی نسبت به آب مصرفی از شبکه که برای کل دورهٔ کشت مورد نیاز است، نشان می‌دهد. این سناریو می‌تواند ۱۱/۰۱ درصد از نیاز آب شبکه را برای کل دورهٔ کشت برطرف سازد.



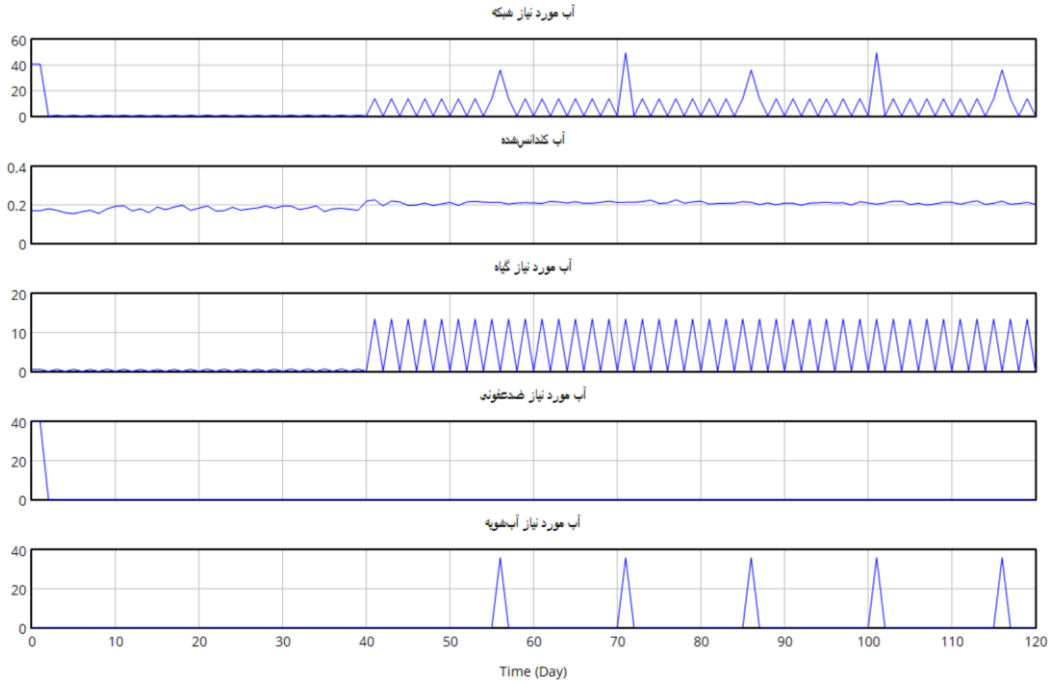
شکل ۹. آب مصرفی از شبکه و سناریوی ۲ پایلوت اولیه آزمایشگاهی گُتا در مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه

۴-۳. سناریوی ۳

سناریوی سوم، ترکیبی از سناریوهای اول و دوم است که به صورت هم‌زمان پیاده‌سازی می‌شود. با توجه به ماهیت گُتا، میزان آب خروجی از کل سامانه به حداقل ممکن خود می‌رسد. مدل‌سازی سیستم دینامیک سناریوی سوم، با مقادیر واقعی از سناریوهای اول و دوم شبیه‌سازی می‌شود. تأثیر هر یک از جریان‌ها به‌تفکیک تحلیل و درنهایت، تأثیر کلی سناریوی سوم بر مدل‌سازی قابل مشاهده است. شکل ۱۰، مدل‌سازی سیستم دینامیک را بر اساس سناریوی سوم نشان می‌دهد. در شکل ۱۱ نمودارهای خروجی حاصل از مدل‌سازی، نشان داده شده است. نمودار آب خروجی از شبکه به عنوان جریان ورودی در این مدل‌سازی نسبت به خروجی‌های این سامانه مشخص شده است. اجرای این سناریو در مقیاس بزرگ می‌تواند اثر مثبتی بر فشار منابع آب منطقه‌ای و درنهایت، جهانی جهت نیل به امنیت پایدار آبی در تأمین مواد غذایی داشته باشد.



شکل ۱۰. مدل‌سازی سیستم دینامیک سناریوی سوم در پایلوت اولیه آزمایشگاهی گُتا در مرکز پژوهشی انرژی



شکل ۱۱. نتایج مدل‌سازی سیستم دینامیک سناریوی سوم در پایلوت اولیه آزمایشگاهی گُتا در مرکز پژوهشی انرژی

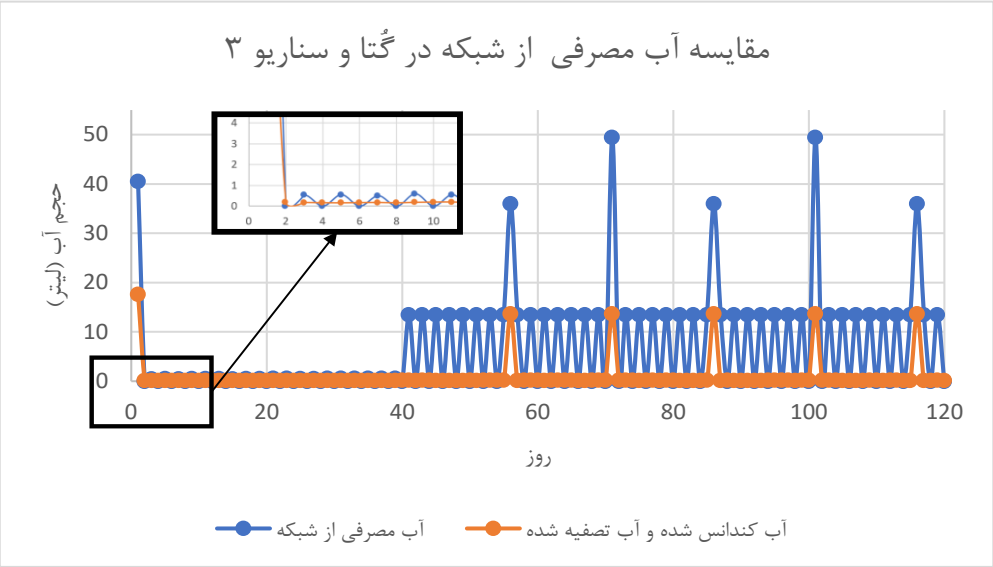
مقادیر آبی که از طریق کندانس و بازیافت آب از طریق سامانهٔ آب‌شیرین‌کن RO انجام شده نسبت به مقادیر مورد نیاز آب مصرفی از شبکه در شکل ۱۲ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد سناریوی سوم در گُتا می‌تواند ۱۴/۱۳ درصد از آب مصرفی از شبکه را برای یک دورهٔ کشت تأمین کند.

شکل ۱۳ مقایسه‌ای از سناریوهای اول، دوم و سوم را با آب مورد نیاز مصرفی از شبکه در کل طول دورهٔ کشت نشان

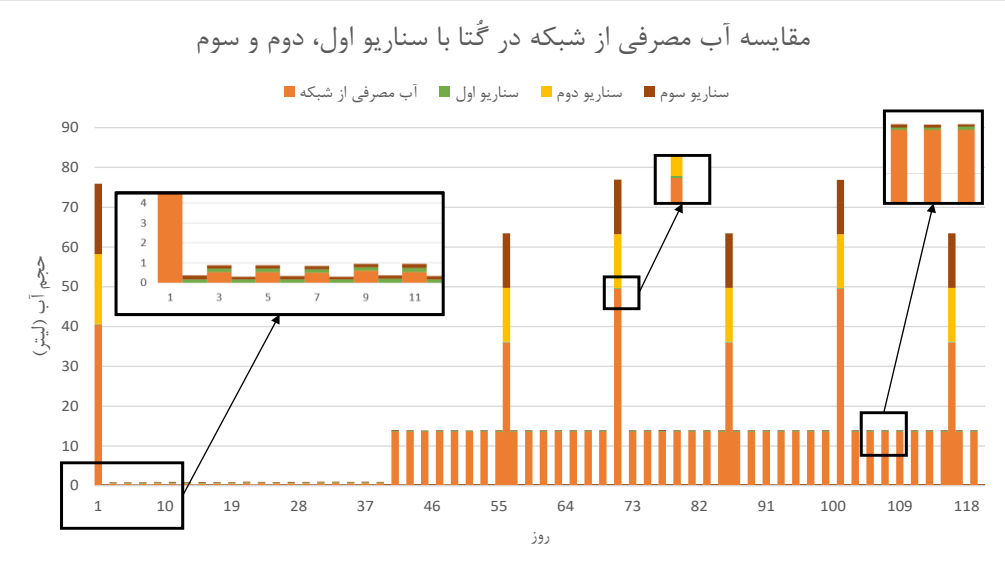
می‌دهد. این مقایسه نشان می‌دهد نمودار سناریوی اول که با رنگ سبز مشخص شده است، به میزان ۳/۲۱ درصد از آب مصرفی از شبکه را در کل دورهٔ کشت تأمین می‌کند. سناریوی دوم نیز که با رنگ زرد مشخص شده است، ۱۱/۰۱ درصد از آب مصرفی از شبکه را تأمین می‌کند. با در نظر گرفتن سناریوهای اول و دوم به طور هم‌زمان، سناریوی سوم شکل می‌گیرد. سناریوی سوم که با رنگ قرمز مشخص شده نشان می‌دهد ۱۴/۳ درصد از نیاز آب مصرفی از شبکه در این سامانه می‌تواند خود تأمین، شود. این عدد با توجه به ماهیت گُتا مقدار قابل توجهی است که بهتر است در زیرسامانهٔ هوشمند آبیاری در نظر گرفته شود.

سناریوی دوم وابستگی به کارایی سامانهٔ RO دارد که به طور کلی در این سامانه مناسب‌ترین حالت ممکن در نظر گرفته شده است که می‌تواند درنهایت بر سناریوی سوم اثرگذار باشد.

سناریوی سوم با در نظر گرفتن ماهیت گُتا در کاهش مصرف آب، اثر به‌سزایی در امنیت پایدار آبی در گُتا دارد. این اثر به دلیل ارتباط‌های پیچیده‌ای که بین سامانه‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی وجود دارد، اهمیت هم‌پوشانی آن‌ها در مدیریت منابع آب به وجود می‌آید.



شکل ۱۲. آب مصرفی از شبکه و سناریوی سوم پایلوت اولیه آزمایشگاهی گُتا در مرکز پژوهشی انرژی



شکل ۱۳. مقایسهٔ آب مصرفی از شبکه با سناریوهای اول، دوم و سوم در پایلوت اولیه آزمایشگاهی گُتا در مرکز پژوهشی انرژی

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، گُتا با هدف نیل به امنیت پایدار آبی، محیط زیستی، غذایی و انرژی پیشنهاد شده است. تمرکز اصلی این پژوهش افزایش امنیت پایدار آبی ناشی از استفادهٔ گُتا در تأمین نیاز غذایی بوده است. امنیت پایدار آبی یکی از موضوع‌های اصلی است که در کنار سایر پارامترهای اصلی می‌تواند تأثیر به‌سزایی در کارایی یک سامانه داشته باشد. برای مدل‌سازی امنیت پایدار آبی در گُتا سه سناریو معرفی شده است که درنهایت سناریوی سوم مدل‌سازی دینامیکی است که از ترکیب سناریوهای اول و دوم به طور هم‌زمان پیشنهاد شده است.

در گُتا، با حذف نور طیف‌های حرارتی و مادون قرمز به مقدار قابل توجهی در مصرف آب صرفه‌جویی می‌شود. در این پژوهش، در کنار ماهیت اصلی این نوع گل‌خانه، با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف، میزان مصرف آب از شبکه به حداقل مقدار مورد نیاز خود می‌رسد. سناریوی اول نشان می‌دهد با کندانس آب می‌توان ۳/۲۱ درصد از آب مورد نیاز مصرفی از شبکه را در گُتا تأمین کرد. سناریوی دوم با بازیافت آب از طریق سامانهٔ آب‌شیرین‌کن RO می‌تواند ۱۱/۰۱ درصد از نیاز آب شبکه را تأمین کند و در مجموع، با شبیه‌سازی و مدل‌سازی سیستم دینامیک سناریوی سوم در گُتا می‌توان تا ۱۴/۱۳ درصد از نیاز آب مصرفی از شبکه را در کل دورهٔ رشد گیاهان تأمین کرد.

پیاده‌سازی این سناریو استراتژی مناسبی برای مدیریت منابع آب محلی، منطقه‌ای و جهانی در تأمین امنیت پایدار غذایی است. همچنین، این سناریو تأثیر مثبتی بر تاب‌آوری در برابر تغییرهای اقلیمی دارد. این تاب‌آوری‌ها طی زمان می‌توانند به شکل غیرمستقیم اثر مثبتی بر امنیت آبی جهانی داشته باشند. سرمایه‌گذاری و توجه به پروژه‌های پایدار آبی در سامانه‌های کوچک و بزرگ کشاورزی، یک راه‌حل برای بخشی از چالش‌های جهانی مرتبط با منابع آب است. با وجود نگرش هم‌بست آب، محیط زیست، غذا و انرژی (وِفِن)، با تغییر در پارامتر آب، سایر پارامترهای وِفِن (محیط زیست، غذا و انرژی) نیز به دلیل اثر متقابلی که بر یکدیگر دارند، تغییر می‌کنند. همین‌طور برقراری امنیت پایدار آبی در یک سامانه با نگرش وِفِن، امنیت پایدار محیط زیستی، غذایی و انرژی را نیز به دنبال خواهد داشت.

۶. تشکر و قدردانی

این پژوهش در مجموعه آزمایشگاهی مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه شهید بهشتی انجام گرفته است. تمامی هزینه‌های این پژوهش اعم از نرم‌افزاری و سخت‌افزاری توسط این مرکز حمایت شده است. به این‌وسیله مراتب تشکر و قدردانی نویسندگان از این حمایت اعلام می‌شود.

منابع

[1] M. Gandomzadeh, S. M. Younesi, A. Mosayyebi, and M. Zandi, "Development scenarios for electrical energy storage in Iran with Cross-Impact Balance method," *J. Sustain. Energy Syst.*, vol. 1, 2022.

[2] United Nations, *World Population Prospects 2022: Summary of results*.

[3] É. C. Francisco, P. S. de A. Ignácio, A. L. Piolli, and M. E. S. Dal Poz, "Food-energy-water (FEW) nexus: Sustainable food production governance through system dynamics modelling journal of cleaner production," *J. Clean. Prod.*, vol. 386, no. December 2022, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135825.

[4] D. C. Moreno Vargas, C. del P. Quiñones Hoyos, and O. L. Hernández Manrique, "The water-energy-food nexus in biodiversity conservation: A systematic review around sustainability transitions of agricultural systems," *Heliyon*, vol. 9, no. 7, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17016.

[5] M. B. Ledari, Y. Saboohi, and S. Azamian, "Water- food- energy- ecosystem nexus model development: Resource scarcity and regional development," *Energy Nexus*, vol. 10, no. May 2022, p. 100207, 2023, doi: 10.1016/j.nexus.2023.100207.

[6] L. Hao, P. Wang, J. Yu, and H. Ruan, "An integrative analytical framework of water-energy-food security for sustainable development at the country scale: A case study of five Central Asian countries," *J. Hydrol.*, vol. 607, no. June 2021, p. 127530, 2022, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.127530.

[7] International Renewable Energy Agancy (IRENA), "RENEWABLE ENERGY IN THE WATER, ENERGY & FOOD NEXUS," 2015.

[8] P. Rajput, S. Singh, T. B. Singh, and R. K. Mall, "The nexus between climate change and public health: a global overview with perspectives for Indian cities," *Arab. J. Geosci.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–19, 2023, doi: 10.1007/s12517-022-11099-x.

[9] M. Zandi, M. Allaedini, Y. Alvari, and S. mahmudian yunesi, "Solar energy nexus of water, environment, food and energy (WEFEN)," 2021.

[10] H. Hoff, "Understanding the Nexus. Background paper for the Bonn2011 Nexus Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus," 2011.

[11] R. Ferroukhi *et al.*, "Renewable energy in the water, energy and food nexus," Int. Renew. Energy Agency, no. January, pp. 1–125, 2015.," *Int. Renew. Energy Agency*, pp. 1–125, 2015.

[12] World Economic Forum, "Global Risks 2015: 10th Edition," p. 69, 2015, doi: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_2015_Report15.pdf.

[13] World Economic Forum, "Global Risks 2016: 11th Edition," 2016.

[14] L. L. B. Lazaro, L. L. Giatti, L. S. V. de Macedo, and J. A. P. de Oliveira, *Water-Energy-Food Nexus and Climate Change in Cities*. 2022.

[15] S. Pirebabi, A. Mosayebi, and M. Zandi, "Development scenarios for electric vehicles in Iran with Dynamic System method," *J. Sustain. Energy Syst.*, vol. 2, 2023.

[16] M. Ling, T. Qi, W. Li, L. Yu, and Q. Xia, "Simulating and predicting the development trends of the water–energy–food–ecology system in Henan Province, China," *Ecol. Indic.*, vol. 158, no. January, 2024, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.111513.

[17] H. Gao, X. Liu, L. Wei, X. Li, and J. Li, "Dynamic simulation of the water-energy-food nexus (WEFN) based on a new nexus in arid zone: A case study in Ningxia, China," *Sci. Total Environ.*, vol. 898, no. March, p. 165593, 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.165593.

[18] X. Wang, Z. Dong, and J. Sušnik, "System dynamics modelling to simulate regional water-energy-food nexus combined with the society-economy-environment system in Hunan Province, China," *Sci. Total Environ.*, vol. 863, no. December 2022, pp. 1–15, 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160993.

[19] R. A. Bellezoni, D. Sharma, A. A. Villela, and A. O. Pereira Junior, "Water-energy-food nexus of sugarcane ethanol production in the state of Goiás, Brazil: An analysis with regional input-output matrix," *Biomass and Bioenergy*, vol. 115, pp. 108–119, 2018.

[20] T. Shah, "Water-energy-food-environment nexus in action: Global review of precepts and practice," *Cambridge Prism. Water*, vol. 1, 2023, doi: 10.1017/wat.2023.6.

[21] Y. Ghandriz, "Control of Irrigation and Injection of CO2 systems to the Energetic Dark Greenhouse (EDG) based on volumetric overview of Water, Environment,Food & Energy Nexus (WEFEN)," 2019.
[22] T. Kozai, "Sustainable plant factory: Closed plant production systems with artificial light for high resource use efficiencies and quality produce," *Acta Hortic.*, vol. 1004, pp. 27–40, 2013.
[23] V. S. Saji, A. A. Meroufel, and A. A. Sorour, *Corrosion and fouling control in desalination industry*. 2020. doi: 10.1007/978-3-030-34284-5.