



Investigation, modeling, and optimization nexus of water, energy, and food in paddy production in Rasht County

Sina Sharifi¹ | Abbas Asakereh² | Mostafa Kiani Deh Kiani³ |
Somaye Janatrostami⁴

1. Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

E-mail: si.na636@yahoo.com

2. Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

E-mail: a.asakereh@scu.ac.ir

3. Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

E-mail: m.kiani@scu.ac.ir

4. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail:

janatrostami@guilan.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type: Research Article

Article history:

Received: Jan. 9, 2025

Revised: Feb. 13, 2025

Accepted: Feb. 23, 2025

Published online: Winter 2024

Keywords:

*Energy,
Modeling,
NEXUS,
Optimization,
Paddy*

The growing population and increasing demand for natural resources present significant challenges. The nexus approach, which involves modeling and optimizing the consumption of water, energy, and food, enhances resource efficiency and ensures the sustainability of interconnected systems. This study focuses on investigating, modeling, and optimizing the water-energy-food nexus for paddy production in Rasht County. The objectives were pursued through two scenarios: high-yield paddy production and agricultural consolidation, utilizing the LEAP, WEAP, and MGP models. Data were collected from farmers, organizations, and library sources. Optimization was conducted using the NSGA-II algorithm. Inputs such as fuel, electricity, agricultural machinery, chemicals, organic materials, labor, and water were analyzed. The water resources considered included those for drinking, industrial, and agricultural purposes, as well as rivers, channels, ponds, and groundwater. The results revealed that the average energy consumption and production in the high-yield paddy variety scenario were higher compared to the agricultural consolidation scenario. The average water consumption in both scenarios showed no significant difference until 2040. Modeling results indicated that under ideal conditions, the RMSE, R², MAPE, and EF values were 353.110, 0.9032, 10.831, and 0.891, respectively. The optimization findings demonstrated that under ideal conditions, water and energy consumption, and paddy production were reduced by 0.94%, 0.53%, and 3.26%, respectively.

Cite this article: Sharifi, S., Asakereh, A., Kiani Deh Kiani, M., Janatrostami, S., (2024) Investigation, modeling, and optimization nexus of water, energy, and food in paddy production in Rasht County, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 55 (3),21-43. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.388507.665580>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.388507.665580>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The increasing population and growing demand for natural resources pose significant challenges. By 2030, water demand is expected to rise by 40%, and food and energy demands are projected to increase by 15% each. The agricultural sector, a major food provider, requires substantial water and energy, contributing to challenges such as droughts, global warming, and ecosystem damage. The nexus approach, focusing on sustainable use of limited resources, improves understanding of the interconnections between water, energy, and food. Modeling and optimizing this approach can improve resource efficiency and ensure sustainability in these interconnected systems.

Materials and Methods

This study aims to investigate, model, and optimize the water-energy-food nexus in paddy production in Rasht County, Iran. This objective was addressed through two scenarios using LEAP and WEAP software, along with the MGP model, and optimization was performed using the NSGA-II algorithm. Data were collected through questionnaires, documentary sources, and field interviews from a statistical population consisting of farmers and authorized fertilizer and pesticide distributors in Rasht County. Water consumption was simulated from 2020 to 2040 using the WEAP platform. The water resources supplying paddy production, household consumption, and industry in the study area, including channel irrigation, groundwater, ponds, and rivers, were examined. Model calibration was performed using the PEST Calibration plugin. The simulation in LEAP software involved energy resources and consumption data for households and paddy production in the study area. To calculate energy consumption, the usage of each input—such as electricity, fuel, agricultural machinery, labor, pesticides, chemical fertilizers, organic matter, and water—were collected and converted into their equivalent energy values using the relevant energy equivalence coefficients. The production of high-yield rice varieties, such as Fajr and Shiroodi, was considered the first scenario and compared with traditional local rice varieties. Paddy-field consolidation and its comparison with pre-consolidation conditions were considered as the second scenario. Since paddy fields face challenges such as traditional irrigation, irregular land shapes, lack of access paths, and reduced efficiency of agricultural machinery, the consolidation process has led to more uniform water distribution, reduced agricultural input consumption, and alleviated boundary-related issues. The WEAP-LEAP model output was presented in matrix form for the two scenarios. For analysis, the MGP model employed the latest branches of genetic programming. The predicted values (from the MGP model) and the observed values (from the integrated WEAP and LEAP models) were evaluated using EF, R^2 , RMSE, and MAPE. For optimization, three multi-objective functions were used to maximize paddy production, minimize water and energy consumption, with constraints applied.

Results and Discussion

A comparison of energy consumption and production in local and high-yield paddy varieties indicated that local varieties consumed more energy, while high-yield varieties produced higher energy. The energy ratio was found to be 0.53 for local varieties and 0.99 for high-yield varieties. In the second scenario, results showed that energy consumption and production were higher in consolidation fields compared to traditional fields, with an energy ratio of 1.06 for consolidation fields and 0.975 for traditional fields. The analysis of two scenarios revealed that the second scenario was more efficient in terms of water and energy consumption and paddy production. The MGP tree diagram includes 14 nodes, 4 levels, and a complexity of 44, representing potential solutions, evolutionary depth, and the alternatives required to reach feasible solutions. Under optimal conditions, the RMSE, R^2 , MAPE, and EF values were calculated as 110.353, 0.9032, 10.831, and 0.891, respectively. According to the optimization results for water consumption, water demand, cultivated area, and maximum rice production showed improvements of 17.91%, 1.42%, and 0.66%, respectively. Pareto optimization results indicated that under optimal conditions, it is possible to achieve a maximum rice production of 10.666 t/ha. In this case, the minimum water consumption is 652.32 MCM, and the energy consumption is 106223 MJ/ha. Furthermore, Pareto optimization results showed that under optimal conditions, it is possible to achieve a minimum water consumption of 633 MCM and a minimum energy consumption of 152,310 MJ/ha. Under these conditions, rice production was 10,120 and 10,360 t/ha, respectively.

Conclusion

This study investigated, modeled, and optimized the nexus between water, energy, and food in paddy production in Rasht County, Iran. The modeling and optimization results indicated improved results.

Credit authorship contribution statement

Sina Sharifi: Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Investigation,

Resources, Data curation, Writing – original draft, Visualization.

Abbas Asakereh: Conceptualization, Resources, Review and Editing, Supervision, Project administration, Funding acquisition.

Mostafa Kiani Deh Kiani: Review and Editing, Supervision.

Somaye Janatrostami: Supervision.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

All data utilized in this study are provided within the text, as well as in the form of tables and figures. Additional data are available from the authors on request.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the Vice Chancellor for Research and Technology of Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran, for providing financial support through the research grant (No. SCU.AA98.29747).

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

بررسی، مدل سازی و بهینه سازی همبست آب، انرژی و غذا در تولید شلتوک شهر رشت

سینا شریفی^۱ | عباس عساکره^۲ | مصطفی کیانی ده کیانی^۳ | سمیه جنت رستمی^۴۱. گروه مهندسی بیوسیستم کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: si.na635@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی بیوسیستم کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه:

a.asakereh@scu.ac.ir۳. گروه مهندسی بیوسیستم کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: m.kiani@scu.ac.ir

۴. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه:

janatrostami@guilan.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

افزایش جمعیت و تقاضا برای منابع طبیعی چالش‌های بزرگی به همراه دارد. رویکرد همبست منابع همراه با مدل سازی و بهینه سازی مصرف آب، انرژی و غذا، کارایی منابع را افزایش و پایداری سیستم‌های مرتبط را تضمین می‌کند. مطالعه کنونی به بررسی، مدل سازی و بهینه سازی همبست آب، انرژی و غذا در تولید شلتوک برنج در شهرستان رشت پرداخته است. این هدف در قالب دو سناریو کشت ارقام پرمحصول شلتوک برنج و تسطیح اراضی کشاورزی با استفاده از نرم افزارهای WEAP، LEAP و مدل MGP انجام شد و فرآیند بهینه سازی با الگوریتم NSGA-II صورت پذیرفت. داده‌ها از کشاورزان، سازمان‌ها و منابع کتابخانه‌ای به دست آمدند. نهاده‌های سوخت و برق، ماشین‌های کشاورزی، مواد شیمیایی و آلی، نیروی کار و آب مورد بررسی قرار گرفتند. منابع آب مورد بررسی در نیازهای شرب، صنعت و کشاورزی، رودخانه‌ها، کانال‌ها و آب‌بندان‌ها و آب‌های زیرسطحی بودند. نتایج نشان داد که میانگین انرژی مصرفی و میانگین انرژی حاصل از تولید شلتوک در سناریو ارقام پرمحصول شلتوک برنج نسبت به سناریو تسطیح اراضی کشاورزی بیشتر بوده است. میانگین آب مصرفی در دو سناریو تا افق ۱۴۱۹ تفاوت چندانی نسبت به یکدیگر نداشت. نتایج مدل سازی نشان داد که در شرایط ایده‌آل، مقادیر RMSE، MAPE، R² و EF به ترتیب برابر با ۰/۹۰۳۲، ۱۰/۸۳۱ و ۰/۸۹۱ می‌باشد. نتایج بهینه سازی نشان داد که در شرایط بهینه، مصرف آب، انرژی و تولید شلتوک به ترتیب برابر با ۰/۹۴، ۰/۵۳ و ۳/۲۶ درصد بهبود یافتند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۵

تاریخ انتشار: زمستان ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

انرژی،

بهینه سازی،

شلتوک،

مدل سازی،

نکسوس.

استناد: شریفی؛ سینا، عساکره؛ عباس، کیانی ده کیانی؛ مصطفی، جنت رستمی؛ سمیه، (۱۴۰۳) بررسی، مدل سازی و بهینه سازی همبست آب، انرژی و غذا در تولید شلتوک شهر رشت، مجله مهندسی بیوسیستم ایران/ ایران، ۵۵ (۳)، ۴۳-۲۱ <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.388507.665580>



© نویسنده‌گان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.388507.665580>

مقدمه

افزایش جمعیت و نیاز روزافزون به منابع طبیعی، روندی نگران‌کننده برای جمعیت فعلی و نسل‌های بعدی را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج تحقیقات، تا سال ۲۰۳۰، تقاضا برای آب ۴۰ درصد و برای غذا و انرژی هر کدام ۱۵ درصد افزایش خواهد یافت (Conti et al., 2016; Jenkins et al., 2017; Keating et al., 2014). این افزایش تقاضا، نه تنها فشار بیشتری بر منابع طبیعی وارد می‌کند، بلکه می‌تواند منجر به ناپایداری در تأمین غذا و انرژی، بروز بحران‌های آبی و افزایش آسیب‌پذیری جوامع در برابر تغییرات اقلیمی شود. در این راستا، نظام کشاورزی به عنوان بخش اصلی تأمین‌کننده مواد غذایی، نیازمند مصرف مقدار زیادی انرژی و آب است که پیامد آن، افزایش خشکسالی‌ها، گرمایش جهانی، تغییرات اقلیمی و در نتیجه وارد آمدن صدمات جبران‌ناپذیر به زیست‌بوم‌ها می‌باشد (Zarei et al., 2021). در سال‌های اخیر، رویکرد یکپارچگی منابع آب، انرژی و غذا به عنوان راهکاری نوآورانه برای دستیابی به امنیت این منابع مطرح شده است. این ایده نخستین بار در کنفرانس همبست در بن آلمان به رسمیت شناخته شد و بر تعاملات متقابل میان آب، انرژی و غذا تأکید دارد. این رویکرد، با دیدگاهی جامع و سیستماتیک به مسئله نگاه می‌کند و به جای بررسی جداگانه هر منبع، بر تعاملات و هم‌پوشانی‌های بین آن‌ها تأکید دارد. این امر باعث می‌شود که راهکارهای بهینه‌تری برای مدیریت منابع ارائه شود که منجر به پایداری بیشتر می‌شود. تحقیقات دهه اخیر بر بررسی این روابط و اثرات متقابل آن‌ها متمرکز بوده است. رویکرد همبست با هدف بهره‌برداری پایدار از منابع محدود بشری، به درک عمیق‌تر این ارتباطات کمک می‌کند. در بخش کشاورزی، که با عدم قطعیت‌های تولید و مصرف مواجه است، اتخاذ این رویکرد برای تحقق اهداف توسعه پایدار در این بخش حیاتی است. حدود ۸۵ درصد از آب شیرین و ۱۵ درصد از برق کشور در بخش کشاورزی مصرف می‌شود. این آمارها نشان‌دهنده وابستگی بالای بخش کشاورزی به منابع آب و انرژی است و لزوم بهبود بهره‌وری در این بخش را بیش از پیش نمایان می‌سازد. از سوی دیگر، بر اساس مدیریت ملی آب کشور، سهم مصارف آب کشاورزی در مقایسه با بخش‌های صنعت و خانگی باید کاهش یابد و همزمان، راندمان آبیاری و به دنبال آن بهره‌وری آب و تخصیص آب به محصولات استراتژیک افزایش و بازده آب در بخش کشاورزی به دو برابر افزایش یابد (کاراندیش و همکاران، ۱۴۰۱).

در ایران، شلتوک (برنج) همراه با گندم، دو غله اساسی در تغذیه و معیشت مردم به شمار می‌روند. تولید سالانه شلتوک در ایران بیش از ۳/۶۳ میلیون تن است و سهم استان گیلان در تولید شلتوک کشور ۰/۹۷۴ میلیون تن می‌باشد. شهرستان رشت در استان گیلان با داشتن بیش از ۶۲ هزار هکتار اراضی شالیکاری، یکی از بزرگترین شهرستان‌های برنج‌کاری کشور است. کشاورزی و کشت شلتوک برنج برای ساکنین مناطق روستایی در این شهرستان از جایگاه ارزشمندی برخوردار است؛ به گونه‌ای که، بیش از ۵۰ درصد از ساکنین در حوزه مرتبط اشتغال دارند (کاووسی و همکاران، ۱۳۹۶). میانگین مصرف برنج در ایران حدود ۳۴ تا ۳۶ کیلوگرم است، در حالی که مردم گیلان با مصرف سرانه ۵۳ کیلوگرم، بالاترین میزان مصرف برنج را در کشور دارند. این امر اهمیت و جایگاه ویژه کشت شلتوک برنج را در این استان نشان می‌دهد. حدود ۹۴ درصد از سطح زیر کشت اراضی شهرستان رشت به تولید شلتوک اختصاص داده می‌شود. از آنجا که بوته برنج گیاهی آب‌بر است و این محصول در استان گیلان به‌طور کامل به صورت کشت غرقابی تولید می‌شود، کمبود آب به یک چالش جدی در این منطقه تبدیل شده است که می‌تواند امنیت غذایی را به خطر اندازد. علاوه بر این، جمعیت رو به رشد، افزایش روند شهرنشینی و تغییر کاربری اراضی شالیزاری، مسئله در هم تنیده منابع آب، انرژی و غذا را در حالت بحرانی قرار داده است و نقش پژوهشگران در نمایان‌سازی بیشتر این مسئله و جلب توجه ذی‌نفعان و تصمیم‌گیرندگان به اقدامات لازم اهمیت بیشتری یافته است. بنابراین، این تحقیق، به دنبال ارائه یک چارچوب جامع برای بررسی، مدل‌سازی و بهینه‌سازی همبست آب، انرژی و غذا در تولید شلتوک برنج در شهرستان رشت می‌باشد تا راهکارهایی برای دستیابی به توسعه پایدار در این منطقه ارائه دهد.

پیشینه پژوهش

در بخش پیشینه پژوهش، مطالعات مختلفی به بررسی رویکرد همبست آب، انرژی و غذا پرداخته‌اند. کیهان‌پور و همکاران (۲۰۲۱) با هدف ارزیابی تأثیر سناریوهای توسعه اقتصادی-اجتماعی بر امنیت آب، غذا و انرژی در استان خوزستان به شبیه‌سازی مدیریت پایدار منابع آب پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد که این رویکرد با افزایش ۱۵ درصدی راندمان آبیاری، بهبود قابل توجهی در مصرف آب ایجاد کرده است و همچنین منجر به بهبود الگوی کشت، کاهش ضایعات محصولات کشاورزی و بهبود عملکرد کشاورزی شده است (Keyhanpour et al., 2021). کریمیان و همکاران (۲۰۲۱) رویکرد همبست آب، انرژی و غذا را به عنوان یک دیدگاه مدیریتی و روش نوآورانه در سطح مزرعه

معرفی کردند. آن‌ها بیان داشتند که این رویکرد، با ارائه درک دقیق از فرآیندهای پیچیده مرتبط با آب، انرژی و غذا، می‌تواند به کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، بهینه‌سازی تولید محصولات کشاورزی و در نتیجه، تولید مواد غذایی پاک‌تر منجر شود (Karamian et al., 2021). در مطالعه‌ای با عنوان ارزیابی همبست آب، انرژی و غذا برای مزرعه‌ای در شمال غرب ایران، نتایج نشان داد که در وضعیت بهینه، مصرف آب، انرژی و تولید غذا به ترتیب ۳۳/۵، ۱۶ و ۵۸/۹ درصد بهبود یافته است (Hasanzadeh Saray et al., 2022). مطالعات دیگری نیز در این زمینه انجام شده است، از جمله مطالعه منعم و همکاران (۱۳۹۹) در حوضه آبریز زاینده‌رود اصفهان، پرون و همکاران (۱۳۹۹) در دو منطقه از استان هرمزگان، گودرزی و همکاران (۱۳۹۹) در شهر بروجرد استان لرستان، و بیات و همکاران (۱۴۰۰) در شبکه‌های آبیاری رودست اصفهان که در آن‌ها از رویکرد همبست برای تحلیل و مدیریت یکپارچه منابع آب، انرژی و غذا استفاده شده است. همچنین، در سطح بین‌المللی، در کشور چین، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه با هدف مشخص شدن اثرات زیست‌محیطی و مدیریت پایدار سیستم‌های آب، انرژی، زمین و کربن ارائه شد. در این مدل، تخصیص منابع با هدف کاهش انتشار کربن و افزایش بهره‌وری آب و انرژی با ترکیب الگوریتم NSGA-II^۱ و مدل MODM^۲ انجام شد. نتایج نشان داد تخصیص کل منابع آب و سطح زیر کشت شلتوک برنج، ذرت و کلزا کاهش یافته است (Feng et al., 2023). در پژوهشی دیگر، با هدف کاهش هزینه‌های اقتصادی-اجتماعی و اثرات زیست‌محیطی بخش کشاورزی، از یک مدل خطی تک‌هدفه برای توسعه شاخص مصرف منابع آب، انرژی و تولید غذا استفاده شد. تابع هدف این تحقیق بر کمینه‌سازی هزینه کل سیستم متمرکز بود که شامل مجموع هزینه‌های تأمین انرژی، تأمین آب، تولید برق، تولید مواد غذایی و کاهش انتشار CO₂ می‌شد. نتایج پژوهش نشان داد که مدل ارائه‌شده می‌تواند به مدیران و تصمیم‌گیران در برنامه‌ریزی‌های آینده کمک شایانی کند (Zhang & Vesselinov, 2017). در یک مطالعه دیگر، عملکرد سه کارخانه تولید شکر از مزارع نیشکر کشور اتیوپی به وسیله بررسی شاخص همبست آب، انرژی و غذا مقایسه شدند تا شیوه مدیریتی کارآمدتر شناسایی شود. این شاخص بر اساس تلفیق سودمندی اقتصادی و مصرف هر منبع توسعه داده شد و نتایج مطالعات نشان داد که بهبود شاخص همبست وابسته به استفاده از شیوه‌های نوین آبیاری است. این روش‌ها باعث افزایش سودمندی اقتصادی آب و کاهش مصرف آن می‌شوند (Hailemariam et al., 2019).

در یک جمع‌بندی، می‌توان بیان کرد که مرور تحقیقات گذشته نشان‌دهنده این است که پژوهشگران به‌طور گسترده از رویکرد همبست به عنوان یک روش جامع برای حل مسائل مربوط به مدیریت پایدار منابع طبیعی در سطوح مختلف شامل شهری، منطقه‌ای و استانی استفاده کرده‌اند. این رویکرد با توجه به اهداف توسعه پایدار در زمینه‌های آب، انرژی و غذا مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال، تعداد محدودی از تحقیقات به طور تخصصی به بررسی تولید برنج پرداخته‌اند. بنابراین، به دلیل اهمیت تولید شلتوک برنج در شهرستان رشت، تحقیق حاضر به بررسی، مدل‌سازی و بهینه‌سازی همبست آب، انرژی و غذا در تولید شلتوک برنج در این شهرستان می‌پردازد. این هدف در قالب دو سناریو با استفاده از نرم‌افزارهای LEAP^۳، WEAP^۴ و مدل MGP^۵ انجام می‌شود و فرآیند بهینه‌سازی با الگوریتم NSGA-II^۶ صورت می‌پذیرد. این تحقیق با بررسی دقیق این موضوع، می‌تواند به ارائه راهکارهای عملی و بومی برای مدیریت بهینه منابع در این منطقه کمک کند.

روش‌شناسی پژوهش

این تحقیق در حوضه آبریز سد سفید رود، نواحی شهری، صنعتی و کشاورزی رشت و چهار بخش کوچصفهان، لشت‌نشاء، خشکبیجار و سنگر در طول جغرافیایی ۴۹/۵۹۲۱° تا ۴۹/۸۶۱۱° و عرض جغرافیایی ۳۷/۱۷۹۶° تا ۳۷/۳۷۳۰° در بازه زمانی ۱۳۹۸-۱۴۰۳ انجام شده است. موقعیت جغرافیایی تحقیق در شکل ۱ آمده است.

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش گردآوری اطلاعات، تحلیلی-محاسباتی است. بر اساس اطلاعات پرسشنامه‌ای، منابع اسنادی سازمان‌های مربوطه و مصاحبه‌های میدانی جمع‌آوری شده‌اند. جامعه آماری شامل ۱۶۰ هزار کشاورز و مالک مزرعه، و ۲۰۰ فروشنده و توزیع‌کننده مجاز کود و سم شیمیایی است. نمونه‌های آماری بر اساس رابطه ۱ (Cochran, 1977) با احتمال یکسان برای انتخاب شدن در هر دو گروه (گروه ۱ کشاورز و مالک مزرعه، و گروه ۲ توزیع‌کننده مجاز کود و سم شیمیایی)، به روش نمونه‌گیری تصادفی

1- Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II
2- Multi-objective Decision Making
3- Long-range Energy Alternatives Planning
4- Water Evaluation and Planning system
5- Multi-gene Genetic Programming
6- Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

ساده تعیین شدند و به ترتیب شامل ۳۸۵ کشاورز و مالک مزرعه و ۱۳۲ فروشنده و توزیع‌کننده کود و سم شیمیایی انتخاب شدند.

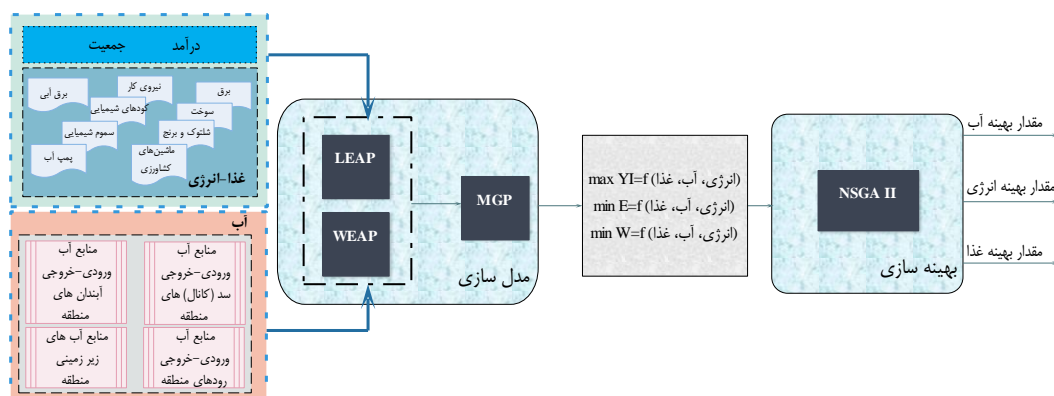
$$n = \frac{Z^2 \times p \times q}{d^2} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$1 + \frac{1}{N} \left(\frac{Z^2 \times p \times q}{d^2} - 1 \right)$$

جاییکه $N =$ جامعه آماری، $q = 0/5$ و $p =$ به ترتیب احتمال بهینه‌بودن و نبودن متغیرها، $Z^2 = 3/8416$ سطح اطمینان ۹۵ درصد و $d = 0/05$ حداکثر دقت نمونه‌گیری بود و $n =$ حجم نمونه بود. جهت بررسی پایایی پرسشنامه‌ها از آزمون ضریب آلفای کرونباخ استفاده شد که برابر با $0/92$ به دست آمد که قابل قبول است. همچنین، شاخص CVI برابر با $0/89$ به دست آمد که کیفیت مناسب سوالات از نظر ارتباط، وضوح و سادگی را تأیید می‌کند. چارچوب کلی تحقیق در شکل ۲ نمایش داده شده است که در ادامه توضیح داده شده‌اند.



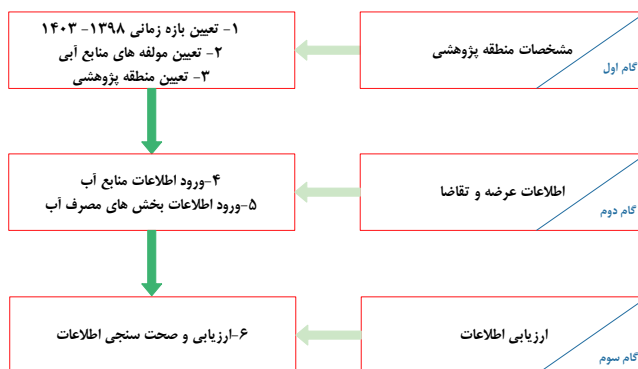
شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. چارچوب تحقیق

ورود اطلاعات به نرم‌افزار WEAP

در نرم‌افزار WEAP معادله توازن جرمی آب برای هر گره و اتصال در سامانه به صورت ماهانه و سالانه حل می‌شود. هدف از این فرآیند، تأمین نیازهای مصرف‌کنندگان آب با توجه به اولویت و ارجحیت تقاضا، و بیلبان جرمی است. در تحقیق حاضر ارجحیت به ترتیب به کشاورزی، صنعت و خانگی تخصیص داده شد. نرم‌افزار WEAP دارای دو بخش داده ورودی اصلی است که شامل منابع تأمین آب (بخش عرضه) و سایت‌های مصرفی (بخش تقاضا) می‌باشد. در بخش عرضه میزان منابع تأمین آبی از جمله رودخانه‌ها، کانال‌ها و آب‌بندان‌ها و منابع آب‌های زیر سطحی در منطقه مورد مطالعه به مدل وارد شدند. در بخش تقاضا نقاط مصرف آب به مدل وارد شدند. روند کلی مدل ساز WEAP در شکل ۳ آمده است.



شکل ۳. روند کلی مدل ساز WEAP

بر اساس شکل ۳ برای معرفی منطقه مورد مطالعه در گام اول و پیش از شروع مدل سازی باید مولفه های منابع آب منطقه در نرم افزار WEAP تعریف شود و مقداری مولفه های اصلی صورت گیرد (جدول ۱). اراضی کشت شلتوک در منطقه مورد پژوهش، شامل اراضی کشت ارقام پرمحصول و محلی، اراضی سنتی و اراضی تجهیز و نوسازی شده است که در مجموع ۶۲۳۳۶ هکتار را پوشش می دهد. تعداد مصرف کنندگان آب شرب، شامل جمعیت شهری و روستایی، حدود یک میلیون نفر در نظر گرفته شده است. شاخص درصد نیاز ماهانه آب در هر یک از سایت های نیاز نشان می دهد که هر سایت (مانند یک مزرعه، یک بخش صنعتی یا یک منطقه خاص) در هر ماه چه مقدار از نیاز آب خود را نسبت به کل نیاز آن سایت در طول سال مصرف می کند. اگر نیاز سال زراعی یک مزرعه ۸۰۰۰ مترمکعب بر هکتار باشد و در ماه تیر ۳۰۰۰ مترمکعب بر هکتار آب نیاز داشته باشد، درصد نیاز این ماه برابر خواهد بود با ۳۷/۵ درصد. شاخص درصد مصرف آب در سیستم تقاضا نشان می دهد که چه درصدی از آب قابل دسترس (تخصیص داده شده) در واقع مصرف می شود. این مقدار نشان دهنده کارایی مصرف آب در یک سیستم است. شاخص های ذکر شده جزء مهم ترین مولفه های مدل ساز WEAP می باشند که تعیین کمیته هر یک از اطلاعات بایگانی شده سازمان های ذی ربط انجام شد.

جدول ۱. تعیین مولفه های منابع آب در منطقه پژوهشی

سطح زیر کشت ارقام پرمحصول و محلی	۶۲,۳۳۶ هکتار
تعداد افراد مصرف کننده آب شرب	۱,۰۰۰,۰۰۰ نفر
درصد نیاز ماهانه آب در هر یک از سایت های نیاز	۳۷/۵ درصد
درصد مصرف آب در سیستم تقاضا	۸۰ درصد
درصد تلفات در سایت های تقاضا یا نیازهای برآورده نشده در سایت	یک در صد

در منطقه مطالعاتی، منابع آب برای تأمین نیازهای شرب، صنعت و کشاورزی، به دو بخش آب های سطحی و زیرزمینی تقسیم شده اند. رودخانه ها، کانال ها و آب بندان ها از منابع سطحی هستند. در این تحقیق، از روش متداول تخصیص منابع آبی رودخانه ای تنانت^۱ (مونتانا)^۲ که بر اساس درصدی از دبی متوسط سالانه^۳ (MAF) است، استفاده شد. آب بندان ها یکی دیگر از منابع مهم آب سطحی در شمال کشور هستند که به صورت طبیعی یا مصنوعی ایجاد می شوند. مجموع حجم آب قابل برداشت کشت شلتوک برنج، مصارف شرب و استفاده در صنعت پس از کسر از تلفات رودخانه ای، زهکش آبخوان و تبخیر لحاظ شد.

در این پژوهش، واسنجی مدل با بهره گیری از افزونه PEST Calibration انجام شد. این فرآیند از طریق تطبیق مقادیر دبی جریان مشاهده شده در ایستگاه هیدرومتری با مقادیر شبیه سازی شده توسط نرم افزار صورت گرفت. به منظور واسنجی مدل، ایستگاه هیدرومتری پیربازار که در مجاورت شهر رشت قرار دارد، به عنوان نقطه خروجی حوضه انتخاب شد.

ورود اطلاعات به نرم افزار LEAP

داده های مورد نیاز بخش انرژی از سازمان آمار و اطلاعات، شرکت آب منطقه ای شهر رشت، شرکت توانیر و موسسه تحقیقات برنج رشت

1 - Tennant
2 - Montana
3- Mean Annual Flow

جمع‌آوری شد. داده‌های مورد نیاز در بخش شبیه‌سازی با نرم‌افزار LEAP مربوط به منابع انرژی و مصارف می‌باشد که شامل داده‌های مربوط به خانوار و تولید شلتوک منطقه می‌باشد. در این مطالعه، داده‌های ورودی به مدل LEAP به دو بخش عرضه و تقاضا تقسیم شدند. در بخش عرضه (تأمین) انرژی، اطلاعات مربوط به غذای تولیدی، شامل محتوای انرژی شلتوک تولیدی، به مدل LEAP وارد گردید. به‌طور مشابه، در بخش تقاضا (مصرف)، منابع انرژی موجود در مزرعه با توجه به محتوای انرژی منابع مصرفی وارد مدل LEAP شدند. علاوه بر این، با ورود اطلاعات مربوط به مفروضات کلیدی، مصرف انرژی و همچنین تولید غذا را در چارچوب تولید انرژی شبیه‌سازی شد. در جدول ۲ مفروضات کلیدی شبیه‌سازی در نرم‌افزار LEAP آمده است.

جدول ۲. مفروضات کلیدی شبیه‌سازی

درآمد	۸۴ میلیون ریال	تولید ناخالص داخلی	۵۳۹ هزار میلیارد ریال
جمعیت	۱,۰۰۰,۰۰۰ نفر	نرخ رشد درآمد	۳/۵ درصد
تعداد اعضای خانوار	۳	نرخ رشد جمعیت	۰/۶۲ درصد
تعداد خانوار	۳۳۳,۳۳۳	سال پایانی شبیه‌سازی	۱۴۱۹

سناریوها

کشت ارقام پرمحصول شلتوک برنج مانند فجر و شیرودی به عنوان یک راهبرد خوداتکایی محصول استراتژیک کشور و مقایسه آن با کشت رقم هاشمی (رقم محلی) به عنوان سناریو اول در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که ارقام محلی در بازار از مرغوبیت و بازاریابی بیشتری برخوردار می‌باشند. سناریوی دوم شامل تسطیح اراضی کشاورزی و مقایسه آن با شرایط پیش از تسطیح می‌باشد. این دو سناریو با میانگین مصرف در پنج بخش رشت، کوچصفهان، خشکبیجار، سنگر و لشت نشاء با ادامه شرایط موجود در استفاده از ارقام محلی و عدم تسطیح مقایسه شدند. برای بررسی و مقایسه سناریوها با توجه به مقادیر نهاده‌های انرژی و انرژی شلتوک تولیدی با استفاده از شاخص راندمان انرژی (نسبت انرژی)، کارایی هر یک از سناریوها در تبدیل انرژی مصرفی به محصول نهایی شلتوک تحلیل شدند.

$$ER = \frac{E_{Out}}{E_{In}} \quad \text{رابطه ۲}$$

جاییکه، E_{Out} انرژی خروجی (تولیدی) (MJ/ha)، E_{In} انرژی ورودی (مصرفی) (MJ/ha) و ER بیانگر نسبت انرژی (بدون بعد) می‌باشند.

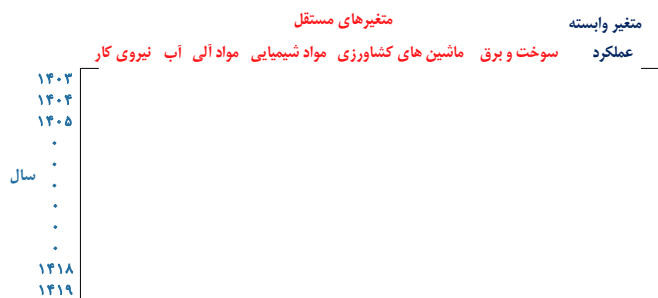
برای محاسبه انرژی مصرفی میزان استفاده از هر یک نهاده‌های برق، سوخت، ماشین‌های کشاورزی، نیروی کار، سموم، کود شیمیایی و آبی، پمپ آب و آب در محدوده مورد مطالعه، جمع‌آوری و با استفاده از ضرایب هم‌ارز انرژی (جدول ۳) مربوط به انرژی معادل خود تبدیل شدند.

جدول ۳. معادل‌های انرژی متغیرهای مصرفی

متغیر مصرفی	هم‌ارز انرژی (منبع)	متغیر مصرفی	هم‌ارز انرژی (منبع)	متغیر مصرفی	هم‌ارز انرژی (منبع)	متغیر مصرفی	هم‌ارز انرژی (منبع)
پمپ آب	MJ/h (۱) ۰/۲۱	دروگر	MJ/h (۱) ۵/۵	سولفات روی	MJ/kg (۱) ۲۰/۹	علف‌کش	MJ/kg (۴) ۱۲۰
کمباین	MJ/h (۱) ۱۷۱	خرمنکوب	MJ/h (۱) ۷/۵	نیترات	MJ/kg (۱) ۶۰	بذر	MJ/kg (۱) ۱۴/۷
تیلر	MJ/h (۱) ۱۷/۴	برق	MJ/kWh (۱) ۱۱/۹۳	پتاس	MJ/kg (۱) ۶/۷	گازوئیل	MJ/lit (۱) ۵۶/۳۱
تراکتور	MJ/h (۱) ۱۰/۹	نیروی کار	MJ/labor-h (۱) ۱/۹۶	فسفات	MJ/kg (۱) ۱۱/۱	بنزین	MJ/lit (۱) ۴۸/۲۳
روتواتور	MJ/h (۱) ۱۰/۳	کود حیوانی	MJ/kg (۲) ۰/۳	حشره‌کش	MJ/kg (۴) ۱۲۰	آب	MJ/lit (۳) ۱/۰۲
نشاء کار	MJ/h (۱) ۹/۴	قارچ‌کش	MJ/kg (۴) ۱۲۰				

1-(Nassiri & Singh, 2009), 2- (Singh, J. M. 2002), 3- (Acaroglu, M. 1998), 4- (Chauhan, Mohapatra & Pandey, 2006), 5- [Kitani, Jungbluth, Peart, & Ramdani, 1999](#)

با بهره‌گیری از ابزار تعبیه‌شده در نرم‌افزارهای WEAP و LEAP، فرآیند همگام‌سازی و ادغام این دو نرم‌افزار انجام شد تا ارتباطات و تعاملات میان بخش‌های آب، انرژی و تولید شلتوک به صورت جامع بررسی شود. این همگام‌سازی امکان تحلیل همزمان منابع و ارزیابی سناریوهای مختلف را فراهم کرده است. نتایج حاصل از تلفیق WEAP-LEAP، عملکرد شلتوک، براساس ماتریس شکل ۴ به مدل MGP وارد شد و مدل MGP مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۴. شمای ماتریس ورودی به مدل MGP

خروجی مدل تلفیقی LEAP-WEAP، به صورت ماتریس ارائه گردید که برای تحلیل بهتر، از مدل MGP، از جدیدترین شاخه‌های برنامه‌نویسی ژنتیک استفاده شده است. تفاوت و مزیت اصلی مدل MGP نسبت به الگوریتم ژنتیک در نحوه ارائه مدل متمرکز شده است. به دلیل توانایی MGP در تولید ساختارهای متنوع و انعطاف‌پذیر، این روش می‌تواند راه‌حل‌های خلاقانه‌تر و نوآورانه‌تری ارائه دهد. ابتدا یک جمعیت اولیه به طور تصادفی تولید می‌شود تا ساختار اولیه نمودار درختی ساخته شود. در ادامه با تلاقی اطلاعات دو عضو (در گره‌ها) اطلاعات جدیدی ایجاد می‌شود که این دو عضو نقش والد و فرزند را در ژنتیک دارند. برگ‌های درخت شامل متغیرهای مستقل و مقدار ثابت هستند که به آن‌ها ترمینال گفته می‌شود. نمودار درختی از نقاط انتهایی (متغیرهای تصمیم و مقادیر ثابت) و گره‌های عملیاتی (علائم ریاضی) تشکیل شده است. عملگرهای محاسباتی مانند گره‌های داخلی محسوب شده و مجموعه توابع را تشکیل می‌دهند. ترکیب توابع و ترمینال‌ها، جمعیت اولیه‌ای برای مدل غیرخطی برنامه ژنتیکی را ایجاد می‌کند (هوشیار و اشرف‌طالش، ۱۳۹۵). در این تحقیق، جمعیت اولیه به طور تصادفی برابر با ۵۰ در نظر گرفته شد. جدول ۴ تنظیمات پارامترهای مختلف در برنامه‌نویسی ژنتیک را نشان می‌دهد که برای افزایش دقت و کاهش خطا مدل از روش آزمون و خطا استفاده شد.

جدول ۴. تنظیم پارامترها در مدل MGP

تنظیمات	پارامترها
۱۰۰۰ و ۸۰۰، ۴۰۰، ۲۰۰	اندازه جمعیت
۷۰۰ و ۵۰۰، ۳۰۰، ۱۰۰	تعداد نسل
... و sqrt، log، tanh، cos، sin، ^، ×، ÷، +، -	مجموعه توابع

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - P_i)^2} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A}_i)^2} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - P_i}{A_i} \right|}{n} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{P}_i)^2} \quad \text{رابطه ۶}$$

در رابطه‌های ۳ تا ۶، P_i, A_i, \bar{A}_i و \bar{P}_i به ترتیب مقادیر پیش‌بینی (توسط مدل MGP)، محاسباتی و مشاهده شده (توسط مدل تلفیقی WEAP و LEAP)، میانگین مقدار محاسباتی و میانگین مقدار پیش‌بینی برای i -داده می‌باشد. بهترین عملکرد مدل‌ها برای تخمین مجموعه داده‌ها، زمانی به دست می‌آید که معیار خطا^۱ MAPE و^۲ RMSE حداقل و نزدیک به صفر و معیارهای عملکردی شامل EF و R^2 حداکثر و نزدیک به یک باشد. ایجاد حداقل اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه شده (در این تحقیق مدل تلفیقی WEAP و LEAP) و مقادیر پیش‌بینی شده (در این تحقیق مدل MGP) دقت مدل برنامه‌نویسی ژنتیک را نشان می‌دهد.

در این مطالعه از روش بهینه‌سازی NSGA-II برای بهینه‌سازی همبست آب، انرژی، و غذا در شهرستان رشت استفاده شد. این روش بر شبیه‌سازی تکامل طبیعی برای حل مسائل استوار است. ابتدا یک جمعیت اولیه از راه‌حل‌های ممکن تولید می‌شود که در این مطالعه برابر با ۵۰ در نظر گرفته شد و براساس چندین تابع هدف ارزیابی می‌شود که رابطه‌های ۷، ۸ و ۹ توضیح داده شده است. راه‌حل‌ها با استفاده از مفهوم تسلط پارتو مرتب شده و جبهه‌های نامغلوب تشکیل می‌شوند. برای حفظ تنوع، از معیار فاصله^۳ استفاده می‌شود. سپس، عملگرهای ژنتیکی مانند ترکیب^۴ و جهش^۵ برای تولید نسل جدید به کار می‌روند. در هر نسل، ترکیبی از جمعیت والدین و فرزندان براساس تسلط و تنوع انتخاب شده و فرایند تا همگرایی یا دستیابی به شرایط توقف ادامه می‌یابد. خروجی نهایی مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه پارتو است.

اجرای بهینه همبست آب، انرژی و غذا در تولید شلتوک برنج در شهرستان رشت به منظور دستیابی به کمترین مصرف آب، کمترین مصرف انرژی و بیشترین تولید غذا با استفاده از الگوریتم NSGA-II اجرا شد که توابع هدف مساله را بیان می‌کند. اولین هدف بیان می‌دارد که به ازای مصرف چه میزان آب آبیاری، تولید شلتوک برنج بیشینه و مصرف انرژی کمینه خواهد شد، که به صورت رابطه ۷ نشان داده شده است.

$$W = \frac{\sum IqTa \times (\sum Em + \sum Ew + \sum Ec + \sum Eo + \sum Ef + \sum El)}{\sum YcTa} \quad \text{رابطه ۷}$$

در رابطه ۷، W میزان مصرف آب، Yc عملکرد شلتوک برنج، Ta سطح زیرکشت ارقام شلتوک برنج، Em انرژی کاربرد ماشین‌های کشاورزی، Ewp انرژی مصرفی پمپ‌های تأمین آب، Ec انرژی مصرفی نهاده‌های شیمیایی (سموم و کودهای شیمیایی)، Eo انرژی مصرفی نهاده‌های آلی (کمپوست و بذر)، Ef انرژی مصرفی سوخت و برق، El انرژی مصرفی نیروی کار و Iq : سهمیه میزان آبیاری (به عبارت دیگر تقاضای آبیاری سالانه) می‌باشد (Niu et al., 2019). اهداف ارائه شده در رابطه‌ها، مشروط به محدودیت‌های خاص خود تعیین خواهند شد. این محدودیت‌ها شامل: دسترس بودن نیروی کار، ماشین‌های کشاورزی، پمپ‌های تأمین آب، کودهای شیمیایی، آلی و سوخت و برق می‌باشند

دومین هدف بیان می‌کند که به ازای مصرف چه میزان انرژی، میزان تولید شلتوک برنج بیشینه و میزان مصرف آب کمینه می‌شود که به صورت رابطه ۸ نشان داده شده است.

$$E = \frac{\sum Eco \times (\sum Cw + \sum Uw + \sum Pw + \sum Rw)}{\sum YcTa} \quad \text{رابطه ۸}$$

جائیکه، Eco مجموع انرژی مصرفی و Cw حجم آب تأمین برای مزارع از کانال‌ها، Uw حجم آب تأمین برای مزارع از آب‌های زیرزمینی، Pw حجم آب تأمین برای مزارع از آب‌بندان‌ها، Rw حجم آب تأمین برای مزارع از رودخانه‌ها و E میزان مصرف انرژی می‌باشند. محدودیت‌ها در این تابع در دسترس بودن آب و زمین (سطح زیر کشت) بودند.

هدف سوم نشان می‌دهد که به ازای تولید چه میزان شلتوک، مصرف آب آبیاری کمینه و مصرف انرژی نیز کمینه خواهد شد (رابطه ۹).

$$YI = \frac{\sum YcTa}{(\sum Cw + \sum Uw + \sum Pw + \sum Rw) \times (\sum Em + \sum Ew + \sum Ec + \sum Eo + \sum Ef + \sum El)} \quad \text{رابطه ۹}$$

که در آن YI ، بیانگر مجموع مقدار شلتوک برنج تولیدی می‌باشد و محدودیت آن عبارت است از: دسترس بودن نیروی کار، ماشین‌های

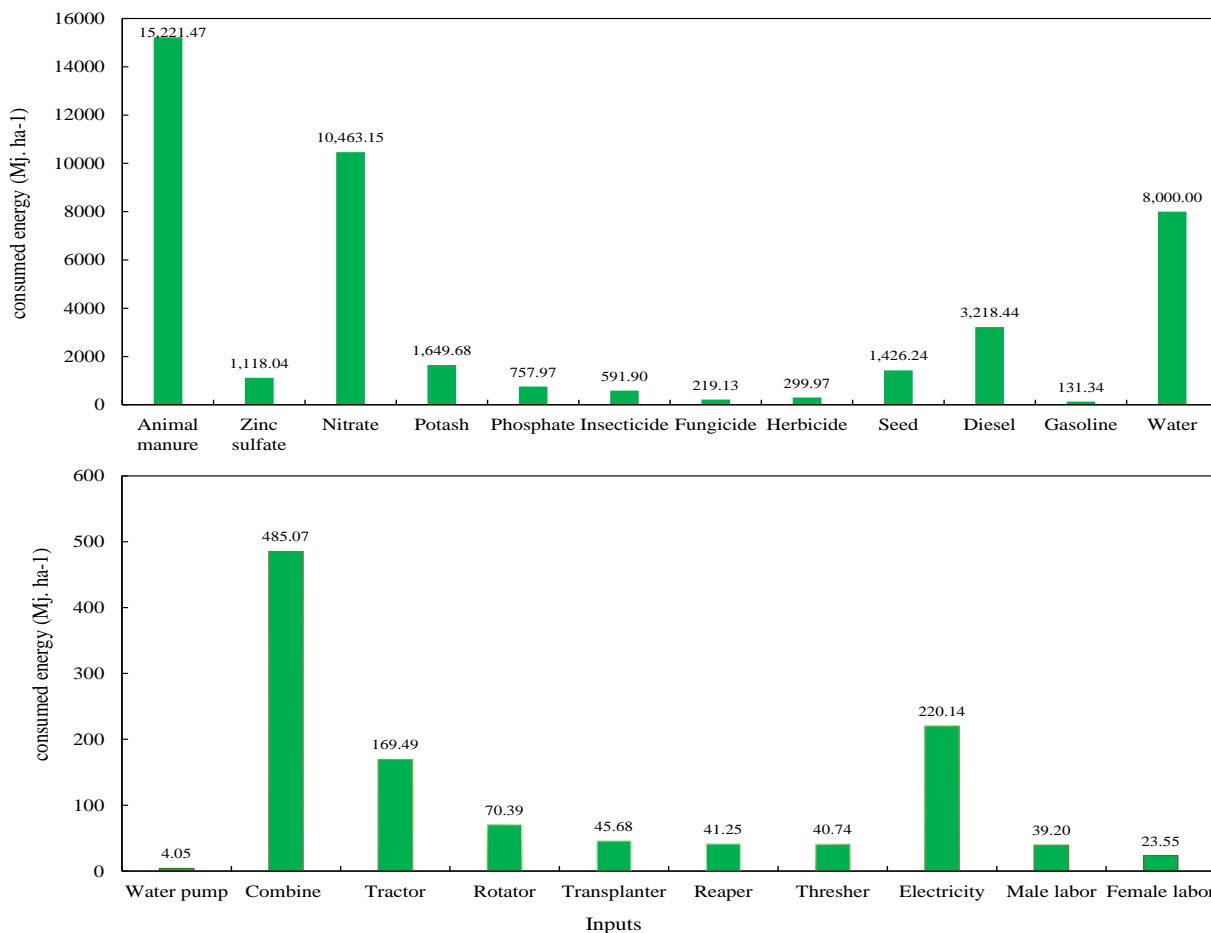
- 1 - Mean Absolute Percentage Error
- 2 - Root Mean Square Error
- 3 - Crowding Distance
- 4 - Crossover
- 5 - Mutation
- 6 - Pareto Front

کشاورزی، پمپ‌های تأمین آب، کودهای شیمیایی، آلی، سوخت و برق. بعد از مشخص شدن متغیرهای تصمیم، توابع هدف (۳ تابع چندهدفه) و قیدها برای تعیین الگوی بهینه در قالب الگوریتم ژنتیک، چندهدفه در منطقه مورد مطالعه اجرا شد.

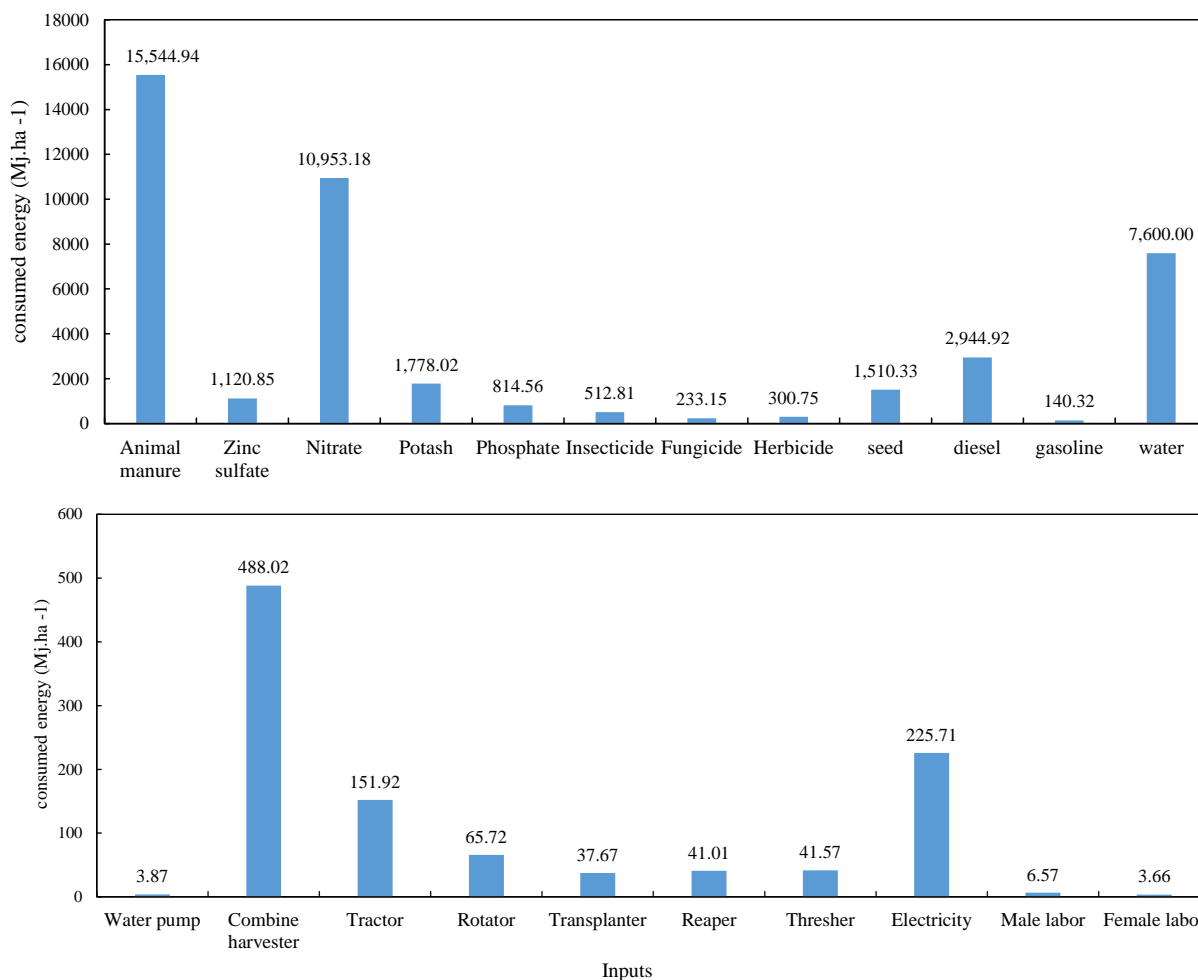
یافته‌های پژوهش

نتایج بررسی سناریوها

میانگین انرژی نهاده‌های کشاورزی در مزارع رقم محلی و پرمحصول به ترتیب در شکل ۵ و ۶ آمده است. بر اساس شکل ۵ در مزارع مورد بررسی، میزان انرژی مصرفی مربوط به کود حیوانی به‌عنوان منبعی غنی از ترکیبات ازت (نیترات)، فسفات و پتاس، سهم قابل توجهی از کل انرژی مصرفی نهاده‌ها را به خود اختصاص داده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این سهم در میان مجموع نهاده‌های مصرفی، با مقدار ۳۴/۴۰ درصد، بالاترین میزان را در مزارع تحت کشت ارقام محلی داشته است. در مزارع ارقام پرمحصول نیز کود حیوانی همچنان جایگاه مهمی در میان نهاده‌های مصرفی دارد، به طوری که سهم انرژی مصرفی آن به ۳۴/۹۱ درصد رسیده است. پس از کود حیوانی، کود شیمیایی نیترات در ارقام محلی و ارقام پرمحصول به ترتیب به میزان ۲۳/۶۵ و ۲۴/۶۰ درصد بوده است. این مقادیر نشان می‌دهد که کود شیمیایی نیترات به‌عنوان یک نهاده مهم مصرفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج حاکی از آن بود که در مزارع تحت کشت ارقام سنتی، میزان آب مصرفی در رقم محلی ۸۰۰۰ مترمکعب بر هکتار و در رقم پرمحصول ۷۶۰۰ مترمکعب بر هکتار بوده است. استفاده از کودهای پتاس، سولفات روی و فسفات به ترتیب ۳/۷۲، ۲/۵۲ و ۱/۷۱ درصد از مجموع انرژی مصرفی در رقم محلی و به ترتیب ۳/۹۹، ۲/۵۱ و ۱/۸۲ درصد از مجموع انرژی مصرفی در رقم پرمحصول را به خود اختصاص داده‌اند. میزان مصرف بذر و استفاده از ماشین‌های کشاورزی به ترتیب ۳/۲۲ و ۱/۹۲ درصد در رقم محلی و ۳/۳۹ و ۱/۸۵ درصد انرژی ورودی کل در رقم پرمحصول بوده است. در رقم سنتی مجموع انرژی مصرفی سموم شیمیایی برابر با ۲/۵۱ درصد کل انرژی ورودی مشاهده شد. این میزان در رقم پرمحصول برابر با ۲/۳۵ درصد بود.



شکل ۵. میانگین انرژی نهاده‌های کشاورزی در مزارع رقم محلی (مگاژول بر هکتار)



شکل ۶. میانگین انرژی نهاده‌های کشاورزی در مزارع شلتوک رقم پرمحصول (مگاژول بر هکتار)

در بررسی انرژی مصرفی و انرژی حاصل از تولید شلتوک در مزارع ارقام محلی و پرمحصول، نتایج نشان‌دهنده تفاوت قابل توجهی بین دو نوع رقم مورد مطالعه بود. در مزارع کشت ارقام محلی، میانگین انرژی مصرفی برابر با ۴۴۲۳۶/۸۹ مگاژول بر هکتار بوده است، در حالی که میانگین انرژی حاصل از تولید شلتوک در این مزارع به ۲۳۷۷۱/۹ مگاژول بر هکتار می‌رسد. در مقابل، میانگین انرژی مصرفی در مزارع ارقام پرمحصول ۴۴۵۱۹/۵۵ مگاژول بر هکتار برآورد شده است، در حالی که میانگین انرژی حاصل از شلتوک تولیدی در این مزارع برابر با ۴۲۲۲۰/۰۴ مگاژول بر هکتار بوده است. در مزارع ارقام محلی نسبت انرژی ۰/۵۳ و در مزارع ارقام پرمحصول این نسبت برابر با ۰/۹۹ بود. این اختلاف بیانگر بهره‌وری پایین‌تر در مصرف انرژی در ارقام محلی می‌باشد و نتیجه عملکرد بالای ارقام پرمحصول در تولید شلتوک و مدیریت بهینه منابع باشد. میانگین انرژی نهاده‌ها در هر هکتار مزارع شلتوک برنج در شهرستان رشت، به تفکیک اراضی تجهیز شده و اراضی سنتی در منطقه مود مطالعه، در جدول ۵ ارائه شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، از جدول ۵ می‌توان بیان کرد که شالیکاران دارای اراضی تجهیز و نوسازی شده نسبت به شالیکاران مزارع سنتی، کود حیوانی بیشتری مصرف می‌کنند. این تفاوت ممکن است به دسترسی آسان‌تر به ماشین‌آلات و سهولت حمل و نقل این نهاده به مزارع مربوط باشد. در اراضی تجهیز طراحی و ابعاد زمین به طور معمول به صورت قطعات بزرگتر و منظم طراحی می‌شوند.

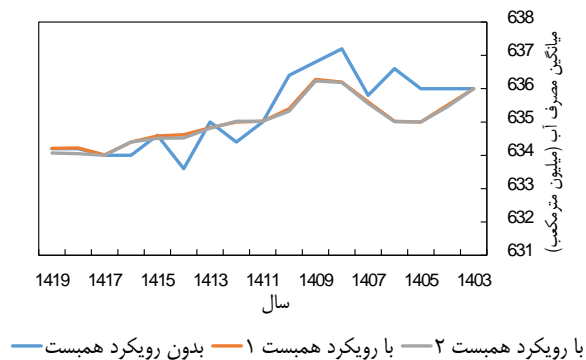
در مزارع سنتی، به دلیل وجود قطعات کوچک، پراکنده و با مرزهای نامنظم، ورود و خروج دشوار، و میزان ساعات تردد ماشین‌های کشاورزی طولانی است. همچنین، در اراضی تجهیز، امکان صرفه‌جویی در زمان و کاهش استفاده از سوخت و نیروی انسانی را فراهم می‌شود. علاوه بر این، در اراضی تجهیز سیستم‌های آبیاری و کانال‌های آبرسانی نوسازی شده و استفاده از منابع آب بهتر می‌شود. در اراضی تجهیز شده، کشاورزان به دلیل آموزش‌های بهتر و دسترسی آسان‌تر به کودهای شیمیایی، تمایل بیشتری به استفاده از آن‌ها دارند. تجهیز اراضی به طور معمول منجر به بهبود کیفیت زیرساخت‌ها مانند سیستم‌های آبیاری می‌شود که می‌تواند کشاورزان را به مصرف بیشتر کودها برای دستیابی به بازدهی بالاتر شلتوک ترغیب کند. همچنین، در اراضی تجهیز شده از سیستم‌های کشت فشرده‌تر با مصرف بذر

بیشتر استفاده می‌شود که به کود بیشتری برای حفظ عملکرد مطلوب محصولات نیاز دارد. ویژگی‌های خاک، شیوه‌های کاربرد و خواص کود ممکن است به کاهش کارایی کودها منجر شود و در نتیجه کشاورزان را به مصرف بیشتر سوق دهد. بررسی مصرف سم در اراضی تجهیز و نوسازی شده نشان می‌دهد که میانگین مصرف سم در هر هکتار در این اراضی کمتر از مزارع سنتی است. این کاهش می‌تواند بیانگر مدیریت بهینه‌تر و پایدارتر زراعت برنج در این مزارع باشد.

جدول ۵. میانگین انرژی نهاده‌های کشاورزی در اراضی تجهیز شده و سنتی (مگاژول بر هکتار)

ردیف	نهاده‌های کشاورزی	تجهیز شده	سنتی	ردیف	نهاده‌های کشاورزی	تجهیز شده	سنتی
۱	کود حیوانی	۱۶۸۰۲/۱	۱۵۹۲۰/۲۱	۹	نیترات	۱۱۲۰۳/۱۲	۱۰۹۸۴/۴۱
۲	ماشین‌های کشاورزی	۳۹۰/۸۵	۳۹۹/۲	۱۰	پتاس	۱۸۱۰/۰۲	۱۶۹۲/۳۶
۳	گازوئیل	۴۹/۲۲	۶۱/۰۵	۱۱	فسفات	۸۱۶/۶۶	۸۱۴/۲۳
۴	بنزین	۱۳۱/۶	۱۴۴/۲	۱۲	حشره‌کش	۶۰۹/۴۶	۶۱۴/۱۱
۵	پمپ آب	۳/۰۵	۳/۱۲	۱۳	قارچ‌کش	۲۵۰/۵۶	۲۵۵/۱۱
۶	نیروی کار مرد	۲۰/۷	۲۷/۲	۱۴	علف‌کش	۳۱۰/۵۵	۳۱۳/۲
۷	نیروی کار زن	۱۳/۳	۱۳/۳	۱۵	بذر	۱۴۷۰/۳۵	۱۴۱۰/۳۳
۸	سولفات روی	۱۱۴۲/۳۶	۱۱۲۰/۴۱	۱۶	آب	۷۵۰۰	۸۰۰۰

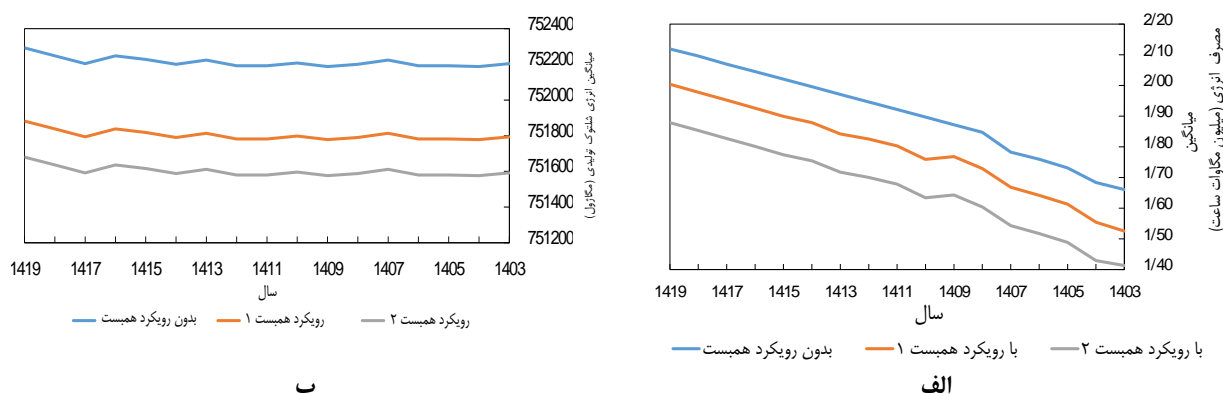
در مجموع میانگین انرژی مصرفی در اراضی تجهیزاتی برابر با ۴۲۵۲۳/۹ مگاژول بر هکتار و میانگین انرژی تولیدی شلتوک معادل ۴۵۲۰۳/۴ مگاژول بر هکتار بود. در اراضی سنتی، میانگین انرژی مصرفی معادل ۴۱۷۷۲/۴۴ مگاژول بر هکتار و میانگین انرژی تولیدی شلتوک برابر با ۴۰۷۵۲/۶ مگاژول بر هکتار بود. در اراضی تجهیزاتی نسبت انرژی، ۱/۰۶ و این نسبت در اراضی سنتی، ۰/۹۷۵ بود (جدول ۵). بررسی میانگین انرژی مصرفی و تولیدی نشان می‌دهد که نسبت انرژی در اراضی تجهیزاتی بیشتر است که می‌تواند ناشی از بهبود زیرساخت‌ها و کاهش اتلاف انرژی باشد. در اراضی سنتی، با وجود مصرف انرژی کمتر، تولید شلتوک کاهش نشان داد. این موضوع ممکن است به دلیل استفاده از روش‌های قدیمی، ناکارآمدی در سیستم تولید، یا کیفیت پایین نهاده‌ها باشد. نتایج یکپارچه‌سازی مدل‌های WEAP و LEAP برای پنج شهرستان شامل میزان مصرف آب، مصرف انرژی، و تولید غذا (شلتوک) در شکل‌های ۷ تا ۹ ارائه شده است. در تحلیل روند مصرف آب، عواملی مانند سطح زیر کشت ارقام پرمحصول و محلی، درصد نیاز ماهانه آب در هر یک از سایت‌های تقاضا (پنج بخش) و درصد مصرف آب در سیستم تقاضا، سهم مجموع بخش‌های کشاورزی، صنعتی و خانگی را از منابع آب در بر گرفته و الگوهای مصرف را مشخص کرده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص شده دو رویکرد همبست از مصرف واقعی بدون رویکرد همبست پیروی می‌کنند و در مجموعه سال‌های مشخص این روند افزایشی یا کاهش‌یافته است که می‌توان علت روند افزایشی را در عدم اعمال مدیریت مناسب در بخش‌های ذی‌ربط با بخش آب دانست؛ هر چند این روند به مرور زمان با رعایت مدیریت مناسب از سوی ذی‌نشان و ذی‌نفعان کاهشی و به ثبات رسیده است.



شکل ۷. میزان مصرف آب در سناریوهای مختلف

در شکل ۸ روند مصرف انرژی در بخش‌های مورد مطالعه با وجود رویکردهای همبست و عدم وجود آن آورده شده است. همان‌طور

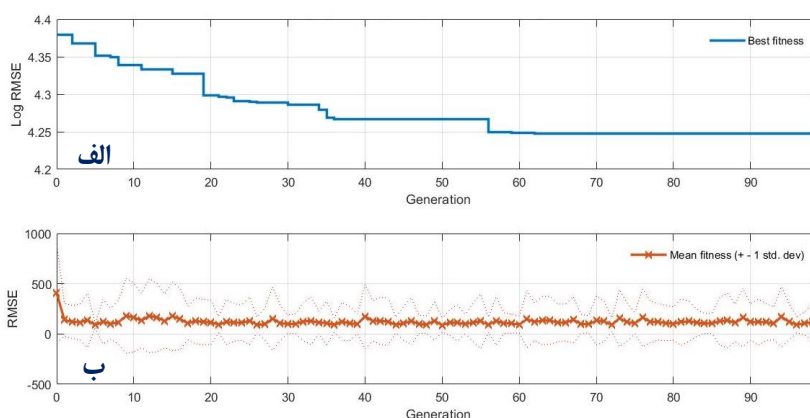
که مشاهده می‌شود (شکل ۸ الف) روند مصرف انرژی تحت سناریو دوم یعنی به کارگیری تسطیح و یکپارچه‌سازی اراضی کمترین مصرف انرژی را به همراه داشته است. پس از آن کمترین مصرف انرژی در سناریو استفاده از ارقام پرمحصول مشاهده شد. در شکل ۸ ب میانگین انرژی حاصل از تولید شتوک رویکرد اول و دوم و بدون آن دو به ترتیب ۷۵۱۸۰۰، ۷۵۱۶۰۰ و ۷۵۲۲۰۰ وجود داشته است. بر اساس شکل ۸ ب هر چند میانگین انرژی شلتوک تولیدی در سناریو اول (استفاده از ارقام پرمحصول) و سناریو دوم (اجرای تسطیح و یکپارچه‌سازی اراضی) به تنهایی از حالت بدون رویکرد (مجموع استفاده از ارقام محلی در اراضی تجهیز نشده) کمتر شده، ولی در مجموع استفاده از ارقام پرمحصول و اجرای تسطیح و یکپارچه‌سازی اراضی موجب افزایش میانگین انرژی شلتوک تولیدی شده است. عدم اطلاع برخی کشاورزان و مالکان مزارع از مزایای استفاده از ارقام پرمحصول و اجرای تسطیح و یکپارچه‌سازی اراضی در سال‌های اولیه یا برخی از دوره‌ها می‌تواند موجب کاهش استقبال از این روش‌ها شده و در مقاطع زمانی خاص، روند تولید را دچار نوسان یا حتی نزولی کند. بنابراین، ترویج آگاهی و آموزش کشاورزان در کنار توسعه زیرساخت‌ها، نقش کلیدی در تضمین پایداری تولید برنج دارد.



شکل ۸. میزان مصرف انرژی (الف) و میزان انرژی تولیدی شلتوک (ب) در سناریوهای مختلف

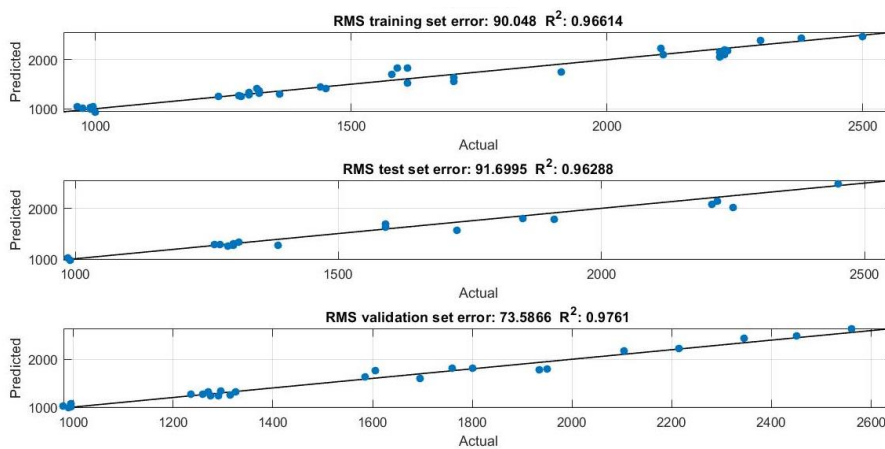
نتایج مدل‌سازی

با اجرای مدل MGP، همگرایی و دستیابی به جواب بهینه پس از ۱۰۰ تکرار (نسل) حاصل شد که در شکل ۹ (الف و ب) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است مقدار خطا (Log RMSE و RMSE) مدل بدست آمده با استفاده از MGP با افزایش تکرار الگوریتم کاهش یافته است و در نهایت ثابت یا به عبارتی همگرا شده است. این روند نشان‌دهنده بهبود تدریجی مدل در طی فرآیند آموزش و تنظیم پارامترها است، به طوری که با افزایش تعداد تکرارها با رسیدن به ۱۰۰ تکرار، مدل به یک وضعیت پایدار می‌رسد که در آن تغییرات خطا ناچیز شده و عملکرد مدل تثبیت می‌شود. در مدل خروجی، مقدار شاخص خطا Log RMSE به ازای بهترین تناسب مدل همگرا شده (شکل ۹ الف) برابر است با ۴/۲۳۹۸، که در این وضعیت مقدار شاخص خطا RMSE به ازای میانگین تناسب مدل همگرا شده (شکل ۹ ب) برابر با ۷۰/۲۳ است.

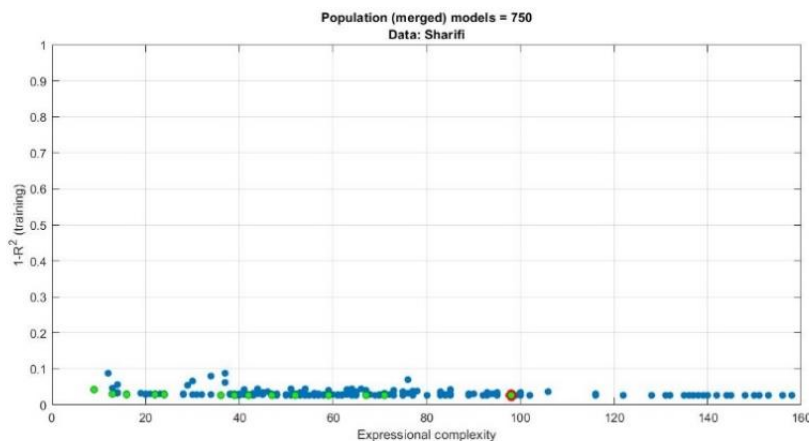


شکل ۹. مقدار خطای مدل

در شکل ۱۰ به طور معمول ۷۰ تا ۸۰ درصد از داده‌های حاصل از پرسشنامه، مصاحبه، و آمار و اطلاعات اسنادی به مرحله آموزش اختصاص می‌یابد. ۲۰ تا ۳۰ درصد باقی مانده به تناسب بین مراحل آزمون و اعتبارسنجی تقسیم می‌شوند. ضریب R^2 (تبیین) نشان دهنده میزان بالای توضیح و توجیه داده‌های اندازه‌گیری شده توسط مدل می‌باشد. بدین معنا که بیشتر از ۹۶/۶۱ درصد از داده‌ها توسط مدل در مرحله آموزش توضیح، توجیه و پوشش داده شده است. این مقدار برای مراحل آزمون و اعتبارسنجی به ترتیب ۹۶/۲۹ و ۹۷/۶۱ درصد مشاهده شد. علاوه بر این مقدار RMS (ریشه میانگین مربعات) معادل $۹۰/۰۴۸$ نشان‌دهنده دقت مدل در پیش‌بینی است. این معیار کمک می‌کند تا میزان انحراف پیش‌بینی‌ها از مقادیر واقعی ارزیابی شود. به عبارتی، مقدار RMS پایین‌تر نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل است، زیرا به معنای کاهش خطا در پیش‌بینی‌ها می‌باشد. شکل ۱۱، رابطه بین پیچیدگی بیانی مدل‌ها و خطای مدل‌ها (با استفاده از معیار $1-R^2$ بر اساس داده‌های آموزش) را برای یک مجموعه جمعیت از مدل‌ها (تعداد ۷۵۰ مدل) نشان می‌دهد. مقادیر کمتر $1-R^2$ و نقاط پایین‌تر در نمودار بیانگر دقت بالاتر و عملکرد بهتر مدل بر اساس داده‌های آموزشی هستند.

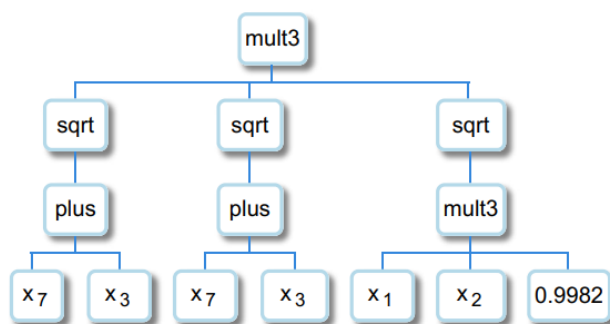


شکل ۱۰. پراکندگی داده‌های پیش‌بینی در برابر داده‌های واقعی



شکل ۱۱. رابطه بین پیچیدگی بیانی مدل‌ها و خطای مدل‌ها

در شکل ۱۲ نمودار درختی حاصل از برنامه نویسی ژنتیک نشان داده است. که دارای ۱۴ گره ۴ سطح و پیچیدگی برابر با ۴۴ می‌باشد. ۱۴ گره نشان‌دهنده تعداد وضعیت‌ها و راه‌حل‌های ممکن در MGP است، در حالی که ۴ سطح عمق درخت و مراحل تکامل MGP را مشخص می‌کند. پیچیدگی برابر با ۴۴ نیز بیانگر تعداد فرآیندها و مقایسه‌های مورد نیاز برای دستیابی به راه‌حل نهایی است و به عنوان معیاری برای ارزیابی کارایی MGP محسوب می‌شود. در بهترین شرایط، مقدار $RMSE$ برابر با $۱۱۰/۳۵۳$ ، R^2 برابر با $۰/۹۰۳۲$ ، $MAPE$ برابر با $۱۰/۸۳۱$ و EF برابر با $۰/۸۹۱$ به دست آمد که معادله ریاضی آن به این صورت است: $(\sqrt{x_7 + x_3}) \times (\sqrt{x_7 + x_3}) \times (\sqrt{x_1 \times x_2 \times 0.9982})$



شکل ۱۲. نمودار درختی در مدل MGP

نتایج بهینه‌سازی

نتایج بهینه‌سازی مصرف آب در جدول ۶ با وجود محدودیت دسترسی به نیروی کار، ماشین‌های کشاورزی، پمپ‌های تأمین آب، کودهای شیمیایی و آلی، سوخت و برق نشان داده شده است.

جدول ۶. نتایج بهینه پار تو مصرف آب در تکرار ۱۰۰

ردیف	تقاضای آب (میلیون متر مکعب)	سطح زیر کشت (هکتار)	کمینه مصرف انرژی (مگاژول بر هکتار)	بیشینه تولید شلتوک (کیلوگرم بر هکتار)
۱	۱۵۱	۲۳۸۰۱	۱۶۵۲۳۲	۹۶۰۸
۲	۱۴۹	۲۳۸۰۲	۱۶۵۲۳۰	۱۰۲۸۰
۳	۱۵۸	۲۳۸۰۰	۱۶۵۳۳۲	۱۰۲۷۴
۴	۱۵۸	۲۳۸۰۰	۱۶۶۳۲۰	۱۰۱۹۶
۵	۱۳۵	۲۳۵۲۰	۱۵۲۲۰۰	۱۰۲۱۴
۶	۱۳۴	۲۳۵۲۱	۱۵۱۲۹۸	۱۰۲۲۰
۷	۱۳۵	۲۳۵۳۰	۱۵۱۴۵۰	۱۰۲۲۹
۸	۱۳۴	۲۳۵۲۱	۱۵۲۱۴۲	۱۰۲۲۹
۹	۱۳۴	۲۳۵۲۳	۱۵۳۲۰۰	۱۰۲۲۹
۱۰	۱۵۸	۲۳۸۵۶	۱۶۶۳۵۶	۱۰۲۲۲
۱۱	۱۵۸	۲۳۸۵۶	۱۶۶۳۵۲	۱۰۲۸۷
۱۲	۱۵۷	۲۳۸۵۵	۱۶۶۳۵۶	۱۰۲۱۹
۱۳	۱۳۳	۲۳۶۶۰	۱۵۲۲۰۰	۱۰۲۲۰
۱۴	۱۵۹	۲۳۸۵۰	۱۶۶۳۵۶	۱۰۲۲۰
۱۵	۱۶۹	۲۳۸۵۰	۱۶۶۳۳۳	۱۰۲۷۴
۱۶	۱۴۹	۲۳۸۵۰	۱۶۶۲۳۰	۱۰۲۷۴
۱۷	۱۵۰	۲۳۸۵۰	۱۶۶۳۱۱	۱۰۲۱۹
۱۸	۱۵۸	۲۳۸۵۶	۱۶۶۳۵۵	۱۰۲۱۹
۱۹	۱۵۱	۲۳۸۴۴	۱۶۶۳۳۳	۱۰۲۱۹
۲۰	۱۵۲	۲۳۸۴۵	۱۶۶۳۴۵	۱۰۲۲۰
۲۱	۱۵۱	۲۳۸۵۰	۱۶۶۳۰۱	۱۰۲۲۰
۲۲	۱۵۴	۲۳۸۵۶	۱۶۶۳۰۰	۱۰۲۲۰
۲۳	۱۵۲	۲۳۸۵۴	۱۶۶۵۲۰	۱۰۲۲۰
۲۴	۱۵۱	۲۳۸۵۲	۱۶۶۵۲۱	۱۰۲۲۰
۲۵	۱۵۱	۲۳۸۵۲	۱۶۶۵۲۶	۱۰۲۲۴
۲۶	۱۵۱	۲۳۸۵۱	۱۶۶۵۲۸	۱۰۲۲۰
۲۷	۱۵۱	۲۳۸۵۱	۱۶۶۵۲۷	۱۰۲۱۹
۲۸	۱۵۲	۲۳۸۵۶	۱۶۶۵۲۹	۱۰۲۱۹
۲۹	۱۵۴	۲۳۸۵۲	۱۶۶۵۲۳	۱۰۲۲۰
۳۰	۱۵۱	۲۳۸۵۲	۱۶۶۵۲۱	۱۰۲۲۰



نتایج بهینه‌سازی پارتو (جدول ۶) نشان داد که در شرایط بهینه امکان رسیدن به بیشینه میزان شلتوک ۱۰۲۸۷ کیلوگرم بر هکتار وجود دارد. در این شرایط، کمینه مصرف انرژی ۱۶۶۳۵۲ مگاژول بر هکتار، سطح زیر کشت ۲۳۸۵۶ هکتار و تقاضای آب ۱۵۸ میلیون متر مکعب به دست آمد. در شرایط بهینه، از لحاظ کمینه مصرف انرژی برابر با ۱۵۱۲۹۸ مگاژول بر هکتار، میزان تقاضای آب ۱۷/۹۱ درصد، سطح زیر کشت ۱/۴۲ درصد و بیشینه تولید شلتوک ۰/۶۶ درصد از خود بهبود نشان داد. براساس جدول ۶ می‌توان استنباط کرد پتانسیل صرفه‌جویی در مصرف آب، انرژی و بهبود تولید شلتوک به ترتیب به میزان ۲۶/۱۱، ۱۰/۰۶ و ۷/۰۶ درصد می‌باشد.

نتایج بهینه‌سازی مصرف انرژی در جدول ۷ با وجود محدودیت دسترسی آب و زمین (سطح زیر کشت) نشان داده شده است. نتایج بهینه‌سازی پارتو نشان داد که در شرایط بهینه امکان رسیدن به بیشینه میزان شلتوک ۱۰/۶۶۶ تن بر هکتار وجود دارد. در این صورت کمینه مصرف آب ۶۵۲/۳۲ میلیون مترمکعب و مصرف انرژی برابر با ۱۰۶/۲۲۳ هزار مگاژول بر هکتار است. در شرایط بهینه از لحاظ کمینه مصرف آب، ۶۵۲/۳۰ میلیون مترمکعب مصرف می‌شود که در این صورت انرژی، ۱۶۰/۲۲۰ هزار مگاژول بر هکتار مصرف و شلتوک ۱۰/۵۸۸ تن تولید می‌شود. همچنین، براساس جدول ۷ می‌توان دریافت پتانسیل صرفه‌جویی در مصرف آب، انرژی و بهبود تولید شلتوک به ترتیب به میزان ۰/۰۰۹، ۰/۵۳۰ و ۶/۴۰۴ درصد می‌باشد.

جدول ۷. نتایج بهینه پارتو مصرف انرژی در تکرار ۱۰۰

ردیف	کمینه مصرف آب (میلیون متر مکعب)	مصرف انرژی (هزار مگاژول بر هکتار)	بیشینه تولید شلتوک (تن بر هکتار)
۱	۶۵۲/۳۳	۱۰۶/۵۵۶	۱۰/۵۲۳
۲	۶۵۲/۳۴	۱۰۶/۲۲۳	۱۰/۵۱۲
۳	۶۵۲/۳۴	۱۰۶/۲۵۴	۱۰/۵۱۴
۴	۶۵۲/۳۳	۱۰۶/۲۱۵	۱۰/۵۲۶
۵	۶۵۲/۳۲	۱۰۶/۲۲۲	۱۰/۵۰۲
۶	۶۵۲/۳۱	۱۰۶/۲۱۳	۱۰/۵۲۳
۷	۶۵۲/۳۶	۱۰۶/۲۱۳	۱۰/۵۴۱
۸	۶۵۲/۳۱	۱۰۶/۲۱۲	۱۰/۶۲۶
۹	۶۵۲/۳۲	۱۰۶/۲۲۳	۱۰/۶۶۶
۱۰	۶۵۲/۳۶	۱۰۶/۲۵۶	۱۰/۲۳۰
۱۱	۶۵۲/۳۱	۱۰۶/۱۲۰	۱۰/۲۸۵
۱۲	۶۵۲/۳۲	۱۰۶/۱۲۰	۱۰/۲۱۴
۱۳	۶۵۲/۳۱	۱۰۶/۱۲۴	۱۰/۲۹۸
۱۴	۶۵۲/۳۰	۱۰۶/۲۲۰	۱۰/۵۸۸
۱۵	۶۵۲/۳۰	۱۰۶/۲۲۳	۱۰/۳۶۶
۱۶	۶۵۲/۳۱	۱۰۶/۲۵۸	۱۰/۰۲۵
۱۷	۶۵۲/۳۵	۱۰۶/۲۴۷	۱۰/۰۲۵
۱۸	۶۵۲/۳۴	۱۰۶/۲۴۹	۱۰/۰۳۳
۱۹	۶۵۲/۳۴	۱۰۶/۳۳۶	۱۰/۰۴۱
۲۰	۶۵۲/۳۴	۱۰۶/۵۵۰	۱۰/۰۲۴
۲۱	۶۵۲/۳۰	۱۰۶/۵۴۱	۱۰/۰۳۳
۲۲	۶۵۲/۳۰	۱۰۶/۵۵۲	۱۰/۰۹۹
۲۳	۶۵۲/۳۰	۱۰۶/۵۱۲	۱۰/۰۲۵
۲۴	۶۵۲/۳۰	۱۰۶/۵۱۲	۱۰/۰۸۸
۲۵	۶۵۲/۳۶	۱۰۶/۵۱۳	۱۰/۱۲۲
۲۶	۶۵۲/۳۵	۱۰۶/۵۵۲	۱۰/۲۰۱
۲۷	۶۵۲/۳۰	۱۰۶/۶۶۵	۱۰/۰۲۹
۲۸	۶۵۲/۳۰	۱۰۶/۱۰۲	۱۰/۱۲۵
۲۹	۶۵۲/۳۱	۱۰۶/۱۰۲	۱۰/۰۴۵
۳۰	۶۵۲/۳۰	۱۰۶/۱۰۲	۱۰/۰۴۸

نتایج بهینه‌سازی تولید شلتوک در جدول ۸ با وجود محدودیت دسترسی به نیروی کار، ماشین‌های کشاورزی، پمپ‌های تأمین آب، کودهای شیمیایی و آلی، سوخت و برق نشان داده شده است. نتایج بهینه‌سازی پارتو نشان داد که در شرایط بهینه امکان رسیدن به کمینه مصرف آب و کمینه مصرف انرژی به ترتیب به میزان ۶۳۳ میلیون متر مکعب و ۱۵۲۳۱۰ مگاژول بر هکتار وجود دارد. در این شرایط تولید شلتوک به ترتیب برابر با ۱۰۱۲۰ و ۱۰۳۶۰ تن بر هکتار بود. در شرایط بهینه مصرف آب، مصرف انرژی و تولید شلتوک به ترتیب ۰/۹۴، ۱/۹۱ و ۲/۳۷ درصد بهبود نشان دادند. جدول ۸ نشان می‌دهد پتانسیل صرفه‌جویی در مصرف آب، انرژی و بهبود تولید شلتوک به ترتیب به میزان ۰/۹۴۷، ۳/۲۷۶ و ۳/۲۶۰ درصد می‌باشد.

در مجموع نتایج بهینه‌سازی نشان داد که در خوشبینانه‌ترین حالت صرفه‌جویی در تقاضای مصرف آب، انرژی و تولید شلتوک به میزان ۲۶/۱۱، ۱۰/۰۶ و ۷/۰۶ درصد می‌باشد؛ این در حالی است که در بدترین حالت پتانسیل صرفه‌جویی در مصرف آب، انرژی و بهبود تولید شلتوک به ترتیب به میزان ۰/۰۰۹، ۰/۵۳۰ و ۳/۲۶۰ درصد می‌باشد.

جدول ۸. نتایج بهینه پارتو تولید شلتوک در تکرار ۱۰۰

ردیف	کمینه مصرف آب (میلیون متر مکعب)	کمینه مصرف انرژی (مگاژول بر هکتار)	تولید شلتوک (تن بر هکتار)
۱	۶۳۳	۱۵۵۲۳۰	۱۰۱۲۰
۲	۶۳۴	۱۵۶۳۲۰	۱۰۱۳۰
۳	۶۳۵	۱۵۶۳۳۰	۱۰۱۲۰
۴	۶۳۶	۱۵۶۳۴۵	۱۰۱۳۰
۵	۶۳۶	۱۵۶۳۲۰	۱۰۱۲۰
۶	۶۳۶	۱۵۶۳۳۰	۱۰۲۲۰
۷	۶۳۸	۱۵۶۳۳۰	۱۰۲۶۰
۸	۶۳۷	۱۵۶۳۴۰	۱۰۲۷۰
۹	۶۳۸	۱۵۶۲۵۰	۱۰۲۵۰
۱۰	۶۳۸	۱۵۶۲۷۰	۱۰۲۹۰
۱۱	۶۳۶	۱۵۶۳۰۰	۱۰۳۴۰
۱۲	۶۳۶	۱۵۶۳۴۰	۱۰۳۶۰
۱۳	۶۳۸	۱۵۶۳۶۰	۱۰۳۵۰
۱۴	۶۳۷	۱۵۷۳۰۰	۱۰۳۶۰
۱۵	۶۳۸	۱۵۴۲۳۰	۱۰۴۰۰
۱۶	۶۳۶	۱۵۳۱۵۰	۱۰۴۵۰
۱۷	۶۳۶	۱۵۶۲۹۰	۱۰۳۳۰
۱۸	۶۳۸	۱۵۴۱۲۰	۱۰۳۶۰
۱۹	۶۳۶	۱۵۶۲۳۰	۱۰۲۴۰
۲۰	۶۳۹	۱۵۲۳۱۰	۱۰۳۶۰
۲۱	۶۳۶	۱۵۶۲۰۰	۱۰۳۵۰
۲۲	۶۳۶	۱۵۶۳۲۰	۱۰۳۶۰
۲۳	۶۳۸	۱۵۳۲۱۰	۱۰۳۸۰
۲۴	۶۳۶	۱۵۶۲۱۰	۱۰۳۹۰
۲۵	۶۳۶	۱۵۴۲۱۰	۱۰۳۷۰
۲۶	۶۳۹	۱۵۶۳۳۰	۱۰۳۶۰
۲۷	۶۳۸	۱۵۴۲۰۰	۱۰۳۶۰
۲۸	۶۳۶	۱۵۴۲۳۰	۱۰۳۵۰
۲۹	۶۳۵	۱۵۳۲۶۰	۱۰۳۶۰
۳۰	۶۳۶	۱۵۴۵۲۰	۱۰۳۵۰

بحث

در این تحقیق دو سناریو استفاده از ارقام پرمحصول و تسطیح اراضی کشاورزی و مقایسه آن با رقم محلی و عدم تسطیح اراضی، مدل سازی و بهینه سازی مصرف آب، انرژی و تولید شلتوک مورد بررسی قرار گرفت. در مزارع ارقام محلی نسبت انرژی ۰/۵۳ و در مزارع ارقام پرمحصول این نسبت برابر با ۰/۹۹ بود. در اراضی تجهیزاتی نسبت انرژی، ۱/۰۶ و این نسبت در اراضی سنتی، ۰/۹۷۵ بود. در تحقیقات مشابه نسبت انرژی در تولید هلو در استان البرز ۰/۰۷ و تولید نخود دیم در استان آذربایجان غربی ۱/۲۲ و تولید انگور در استان خراسان شمالی ۵/۳۹ به دست آمده است (داوودالموسوی و همکاران، ۱۴۰۲؛ قادرپور و رفیعی، ۱۳۹۵). مقایسه نتایج نشان می دهد که مصرف کود حیوانی، بالاترین میزان را در مزارع تحت کشت، داشته است. طرح تجهیز و نوسازی اراضی شالیکاری نقش مؤثری در افزایش مصرف کود حیوانی داشته است که با نتایج تحقیق مشابه ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۰) همسو بود. علاوه بر این این افزایش مصرف می تواند در مزارع مورد بررسی به جهت آشنایی بیشتر کشاورزان و مالکین مزارع از فواید کود حیوانی بوده باشد. از مزایای کود حیوانی می توان به بهبود ساختار خاک، افزایش حاصلخیزی خاک، پایداری زیست بوم زراعی، بهبود خصوصیات بیولوژیکی خاک و کنترل فرسایش خاک اشاره کرد (Rinasoa et al., 2023). پس از کود حیوانی، کود شیمیایی نیترا بیشترین مصرف را به خود اختصاص داد. در تحقیق (Gu & Yang, 2022) نیز اشاره شده کود نیترا به عنوان یکی از ارکان مدیریت مدرن کشاورزی، نقش مهمی در افزایش عملکرد محصول دارد و در زراعت برنج راهکاری کلیدی برای افزایش محصول محسوب می شود. عملکرد شلتوک، راندمان مصرف آب، و بهره‌وری نیتروژن در کشت شلتوک برنج به طور قابل توجهی تحت تأثیر مقدار و نحوه و مدیریت آبیاری، و تأثیر متقابل با میزان نیتروژن مصرفی قرار می گیرد (Wang et al., 2016). در رقم سنتی مجموع میزان مصرف سموم شیمیایی برابر با ۲/۵۱ درصد مشاهده شد این میزان در رقم پرمحصول برابر با ۲/۷۲ درصد بود که نشان از مصرف بیشتر ۸/۳۶ درصدی در ارقام پرمحصول نسبت به ارقام محلی دارد. در تحقیق مشابه در استان گلستان، مصرف سموم قارچ کش در ارقام پرمحصول رشد مصرف ۵/۱۷ درصدی نسبت به ارقام محلی نشان داده است (طاهری راد، ۱۳۹۶). تحقیقی در استان مازندران نشان داد که ارقام پرمحصول به سموم بیشتری نیاز دارند، اما به دلیل اثرات منفی زیست محیطی استفاده بی رویه از نهاده‌های شیمیایی، تأکید بر کاهش مصرف سموم، بهبود مدیریت مزرعه، و آموزش کشاورزان از طریق سیاست‌های هدفمند و برنامه‌های مشاوره‌ای برای دستیابی به مدیریت پایدار ضروری است (Gava et al., 2024). انرژی نیروی انسانی مورد نیاز برای تولید شلتوک در سطح مزارع مورد بررسی کمتر از یک درصد از کل انرژی مصرفی و به میزان ۶۶ تا ۷۴ مگاژول بر هکتار بود. انرژی مصرفی نیروی انسانی در تحقیقات مشابه در تایلند و مالزی به ترتیب ۱۳/۱ و ۳۱/۸ مگاژول بر هکتار بوده است (Chaichana et al., 2014; Elsoragaby et al., 2019). روند مصرف آب و انرژی در دوره زمانی ۱۴۰۳ تا ۱۴۱۹ به طور مستقیم با نرخ رشد جمعیت مرتبط است. در شهرهای مورد بررسی، رشد مثبت جمعیت باعث افزایش تقاضای آب شده، در حالی که در بسیاری از روستاهای حوضه به دلیل نرخ رشد منفی جمعیت، تقاضای آب کاهش یافته است که از این لحاظ نتایج تحقیق صفایی و همکاران (۱۳۹۹) را تأیید می کند. رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی، پیشرفت فناوری، تغییرات اقلیمی و رقابت اقتصادی از عوامل اصلی افزایش مصرف انرژی در کشاورزی، صنعت و خانگی هستند (Wang & Azam, 2024). این عوامل نیازمند مدیریت بهینه و افزایش بهره‌وری انرژی برای کاهش اثرات زیست محیطی هستند که به تبع به روند با ثبات انرژی حاصل از تولید شلتوک می انجامد. نتایج مدل سازی نشان داد که در بهترین شرایط، مقادیر RMSE، MAPE، R^2 و EF به ترتیب برابر با ۱۱۰/۳۵۳، ۱۰/۸۳۱، ۰/۹۰۳۳ و ۰/۸۹۱ می باشد. این مقادیر بیانگر دقت بالای مدل در شبیه سازی و تحلیل سناریوهای مختلف است و توانایی آن را در کاهش زمان اجرا و کاهش ریسک‌های ناشی از تصمیم‌های نادرست را نشان می دهد. نتایج بهینه سازی نشان داد که در شرایط بهینه، مصرف آب ۰/۹۴ درصد، مصرف انرژی ۰/۵۳ و تولید شلتوک ۳/۲۶ درصد از خود بهبود نشان می دهد. همچنین، میزان تقاضای آب و سطح زیر کشت به ترتیب ۱۷/۹۱، ۱/۴۲ درصد بهبود داشتند که توانایی و پتانسیل صرفه جویی را نشان می دهد.

نتیجه گیری و پیشنهادها

با افزایش جمعیت، تقاضا برای منابع طبیعی به طور قابل توجهی رشد کرده و این منابع با چالش‌های جدی مواجه شده‌اند. در این میان، کشاورزی که نقشی کلیدی در تأمین مواد غذایی دارد، به مصرف بالای آب و انرژی وابسته است. این وابستگی، علاوه بر کاهش منابع آبی و انرژی، پیامدهای زیست محیطی گسترده‌ای مانند تشدید خشکسالی‌ها، افزایش گرمایش جهانی، تغییرات اقلیمی و آسیب‌های جبران ناپذیر به اکوسیستم‌ها را به دنبال دارد. از این رو، ایجاد تعادل میان تولید کشاورزی و حفاظت از منابع طبیعی از اهمیت بالایی برخوردار است. در



کاوسی کلاشمی، محمد؛ ظنی پور علیجانی، معصومه؛ یوری، غلامرضا و ادیبی، شایگان. (۱۳۹۶). ارزیابی اثر اجرای طرح ملی افزایش تولید برنج بر کارایی فنی مزارع شالیکاری (مطالعه موردی: منطقه پیربازار شهرستان رشت). تحقیقات غلات، ۷(۲)، ۲۴۶-۲۳۵.

گودرزی، محمدرضا؛ پیریائی، رضا، و موسوی، میررحیم (۱۳۹۹). درک پیوند آب-غذا-انرژی و مدیریت برای بهره‌وری از منابع آب موجود. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۴(۲)، ۲۶۸-۲۵۵.

منعم، محمد جواد؛ دلاور، مجید و حسینی، سید معین (۱۳۹۹). کاربرد و ارزیابی پیوند آب، غذا و انرژی (نکسوس) در مدیریت شبکه‌های آبیاری: مطالعه موردی شبکه آبیاری زاینده‌رود. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۴(۱)، ۲۷۵-۲۸۵.

هوشیار، نیما و اشرف‌طالش، سید سیامک (۱۳۹۵). پیش‌بینی بهینه رفتار مخزن اختلاط T شکل براساس برنامه‌نویسی ژنتیکی چند هدفی. مهندسی مکانیک مدرس، ۱۶ (۱۲)، ۶۱۲-۶۱۶.

REFERENCES

- Acaroglu, M. (1998). Energy from biomass, and applications. *University of Selcuk, Graduate School of Natural and Appl Sciences*, University of Selcuk.
- Chaichana, T., Phethuayluk, S., Tepnual, T., & Yaibok, T. (2014). Energy Consumption Analysis for SANGYOD Rice Production. *Energy Procedia*, 52, 126–130. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.062>
- Chauhan, N. S., Mohapatra, P. K. J., & Pandey, K. P. (2006). Improving energy productivity in paddy production through benchmarking—An application of data envelopment analysis. *Energy Conversion and Management*, 47(9–10), 1063–1085. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.07.004>
- Cochran, W. G. (1977). *Sampling Techniques*. New York: John Wiley and Sons Publishing.
- Conti, J, Holtberg, P, Diefenderfer, J, LaRose, A, Turnure, J. T., & Westfall, L. International Energy Outlook 2016 With Projections to 2040. United States. <https://doi.org/10.2172/1296780>
- Elsoragaby, S., Yahya, A., Mahadi, M. R., Nawi, N. M., & Mairghany, M. (2019). Analysis of energy use and greenhouse gas emissions (GHG) of transplanting and broadcast seeding wetland rice cultivation. *Energy*, 189, 116160. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116160>
- Feng, T., Liu, B., Ren, H., Yang, J., & Zhou, Z. (2023). Optimized model for coordinated development of regional sustainable agriculture based on water–energy–land–carbon nexus system: A case study of Sichuan Province. *Energy Conversion and Management*, 291, 117261. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117261>
- Gava, O., Ardakani, Z., Delalic, A., & Monaco, S. (2024). Environmental Impacts of Rice Intensification Using High-Yielding Varieties: Evidence from Mazandaran, Iran. *Sustainability*, 16(6), 2563. <https://doi.org/10.3390/su16062563>
- Gu, J., & Yang, J. (2022). Nitrogen (N) transformation in paddy rice field: Its effect on N uptake and relation to improved N management. *Crop and Environment*, 1(1), 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.crope.2022.03.003>
- Hailemariam, W. G., Silalertruksa, T., Gheewala, S. H., & Jakrawatana, N. (2019). Water–Energy–Food Nexus of Sugarcane Production in Ethiopia. *Environmental Engineering Science*, 36(7), 798–807. <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0549>
- Hasanzadeh Saray, M., Baubekova, A., Gohari, A., Eslamian, S. S., Klove, B., & Torabi Haghighi, A. (2022). Optimization of Water-Energy-Food Nexus considering CO2 emissions from cropland: A case study in northwest Iran. *Applied Energy*, 307, 118236. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118236>
- Karamian, F., Mirakzadeh, A. A., & Azari, A. (2021). The water-energy-food nexus in farming: Managerial insights for a more efficient consumption of agricultural inputs. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1357–1371. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.03.008>
- Keating, B. A., Herrero, M., Carberry, P. S., Gardner, J., & Cole, M. B. (2014). Food wedges: Framing the global food demand and supply challenge towards 2050. *Global Food Security*, 3(3–4), 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2014.08.004>
- Keyhanpour, M. J., Musavi Jahromi, S. H., & 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>
- Kitani, O., Jungbluth, T., Peart, R. M., & Ramdani, A. (1999). CIGR handbook of agricultural engineering. Energy and biomass engineering, 5, 330.
- Nassiri, S. M., & Singh, S. (2009). Study on energy use efficiency for paddy crop using data envelopment analysis (DEA) technique. *Applied Energy*, 86(7–8), 1320–1325.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.10.007>

- Niu, G., Zheng, Y., Han, F., & Qin, H. (2019). The nexus of water, ecosystems and agriculture in arid areas: A multiobjective optimization study on system efficiencies. *Agricultural Water Management*, 223, 105697. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105697>
- Rinasoa, S., Rakotoson, T., Rabeharisoa, L., Tsujimoto, Y., & Nishigaki, T. (2023). Farmyard manure application increases lowland rice yield in phosphorus-deficient soils, but not in soils with high pH and phosphorus-fixing capacity. *Field Crops Research*, 296, 108906. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108906>
- Singh, J. M. (2002). On farm energy use pattern in different cropping systems in Haryana, India. International Institute of Management University of Flensburg, Sustainable Energy Systems and Management. Master of Science, Germany.
- Wang, J., & Azam, W. (2024). Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. *Geoscience Frontiers*, 15(2), 101757. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101757>
- Wang, Z., Zhang, W., Beebout, S. S., Zhang, H., Liu, L., Yang, J., & Zhang, J. (2016). Grain yield, water and nitrogen use efficiencies of rice as influenced by irrigation regimes and their interaction with nitrogen rates. *Field Crops Research*, 193, 54–69. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.03.006>
- Zhang, X., & Vesselinov, V. V. (2017). Integrated modeling approach for optimal management of water, energy and food security nexus. *Advances in Water Resources*, 101, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.12.017>
- Bayat, F., Roozbahani, A., & Hashemy Shahdany, M. (2022). Improving the Performance of Agricultural Water Distribution Systems in Irrigation Networks Using Water-Food-Energy Nexus. *Water and Irrigation Management*, 11(4), 669-986 (In Persian)..
- Davodalmosavi, S. O., Rafiee, S., & Jafari, A. (2023). Modeling of peach production energy using machine learning in Nazarabad township, Alborz province. *Iranian journal of Biosystem Engineering*, 54 (1), 53-71 (In Persian).
- Ebrahimi, M.S., Kalantri, K., Asadi, A., Movahed Mohammadi, S. H., & Saleh, I. (2012). The Comparison of Inputs Consumption Sustainability in Traditional and Developed Paddy Fields in Iran (Case Study of Gilan Province). *Environmental Sciences*, 9(2), 53-64 (In Persian).
- Ghaderpour, O., & Rafiee, S. (2017). Analysis and modeling of energy and production of dryland chickpea in the city of Bukan. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 47(4), 720-711 (In Persian).
- Goodarzi, M. R., Piryaei, R., & Moosavi, M. R. (2020). Understanding Water-Food-Energy Nexus and their Management for the Utilization of the Existing Water Resources. 34(2), *Journal of Water and Soil*, 255-268(In Persian).
- Hoseini, S. M., & Delavar, M. (2020). Application and Evaluation of Water, Food and Energy (NEXUS) in Irrigation Networks Management Case Study of Zayandehrud Irrigation Network. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 14(1), 275-285(In Persian).
- Karandish, F., Darzi Naftchali, A., Omidi, F., & Hosseininia, M (2012). Strategic document on water efficiency; efficiency indicators in the agricultural, drinking and industrial sectors. Research project. Iranian Resources Management Company (In Persian).
- Kavoosi Kalashami, M., Zanipoor, M., Yavari, G., & Adibi, S. (2017). Evaluation of the effect of national plan implementation of increasing rice production on technical efficiency of paddy farms (A case study: Pirbazar region of Rasht city). *Cereal Research*, 7(2), 235-246 (In Persian).
- Paroon, S., Yavari, G. R., & Reza zadeh, M. (2020). Forecasting the Consequences of Climate Change for Wheat Crop in Hormozgan Province. *Environment and development Journal*, 11(21), 111-126 (In Persian).
- Safaei, V., Pourmohamad, Y., & Davari, K. (2021). Integrated Approach of Water, Energy and Food in Water Resources Management (Case Study: Mashhad Catchment). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 14(5), 1708-1721 (In Persian).
- Taheri-Rad, A., Khojastehpour, M., Rohani, A., & Khoramdel, S. (2017). Assessing the energy consumption efficiency of different long grain rice varieties in Golestan province. *Cereal Research*, 7(1), 51-66 (In Persian).