



# Development of a Multi-objective Optimization Model under Uncertainty for Water and Energy nexus Management in the Sefidroud Irrigation and Drainage Network

Mahshid Ahmadipour Dogouri<sup>1</sup> | Somaye Janatrostami<sup>2✉</sup> | Afshin Ashrafzadeh<sup>3</sup> |  
Nader Pirmoradian<sup>4</sup>

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

[mahshidap.m@gmail.com](mailto:mahshidap.m@gmail.com)

2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: [janatrostami@guilan.ac.ir](mailto:janatrostami@guilan.ac.ir)

3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran and Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: [ashrafzadeh@guilan.ac.ir](mailto:ashrafzadeh@guilan.ac.ir)

4. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: [npirmoradian@guilan.ac.ir](mailto:npirmoradian@guilan.ac.ir)

## Article Info

**Article type:** Research Article

### Article history:

**Received:** July. 1, 2024

**Revised:** Sep. 30, 2024

**Accepted:** Oct. 16, 2024

**Published online:** Feb. 2025

### Keywords:

Fuzzy sets,  
NSGA-II Algorithm,  
Optimization,  
Uncertainty.

## ABSTRACT

This study investigates the optimal management of water and energy resources in the Sefidroud irrigation and drainage network of Guilan province. Given the critical role of these resources in agriculture, along with water scarcity and increasing food demands, the need for an integrated approach is becoming more evident. A multi-objective optimization model under uncertainty was developed for this study, aiming to minimize agricultural water shortages and maximize hydropower generation from the Sefidroud reservoir dam. The developed model was solved using the NSGA-II algorithm, and the irrigation requirements for rice and tea were calculated based on the soil-water balance method. The results indicate that water shortages vary across different confidence levels, with the central irrigation zone experiencing the highest deficit. Additionally, rice cultivation, especially in June and July, faces more significant water shortages, whereas tea cultivation does not encounter major water scarcity issues. This research highlights the necessity of optimal resource management and precise planning to prevent water shortages during critical months. The findings have the potential to inform effective decision-making aimed at sustainable agricultural development.

Cite this article: Ahmadipour Dogouri, M., Janatrostami, S., Ashrafzadeh, A., & Pirmoradian, N. (2025). Development of a Multi-objective Optimization Model under Uncertainty for Water and Energy nexus Management in the Sefidroud Irrigation and Drainage Network, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (12), 2289-2311. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378531.669747>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378531.669747>



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction:

Water and energy are important and crucial resources for agricultural production. Agriculture produces essential food and raw materials for other sectors such as livelihoods, manufacturing, and production services, supporting human survival and economic development. The development of agricultural and energy sectors may be constrained by limited access to water, especially in arid and semi-arid regions, leading to an expected fierce competition between food and energy in water consumption.

### Objective:

Various uncertainties exist in determining the different input parameters of the water and energy management model. These uncertainties, inherent in the overall system, are inevitable and complicate the decision-making process. The aim of this study is to propose a multi-objective planning approach for the Water and Energy nexus system under uncertainty conditions with agricultural and environmental objectives. This study focuses on the Sefidroud irrigation and drainage network located in northern Iran.

### Materials and methods:

In this study, the effective precipitation was first estimated to determine the net irrigation water requirements for rice and tea crops in the study area. Subsequently, the interactions between water and energy were formulated, and their optimal allocation in the agricultural and energy sectors was achieved using the NSGA-II metaheuristic algorithm. After identifying the parameters with uncertainties in the developed model, their values were quantitatively determined using fuzzy set theory. Finally, the optimization results for meeting water needs and electricity production under different confidence levels of the model constraints were examined.

### Results and discussion:

By employing multi-objective optimization between the two goals of maximizing energy production and minimizing agricultural water shortages, dam managers and planners can manage the water released from the dam for future planning in a way that simultaneously maximizes hydropower generation while meeting downstream needs. Evaluating the increase and decrease of  $\alpha$ -cut at both upper bound and lower bound of the fuzzy approach revealed that at the upper bound of the fuzzy approach, compared to the lower bound, the amount of agricultural water shortage in the three development zones was lower with increasing  $\alpha$ -cuts. Conversely, at the upper bound, the amount of water shortage increased with increasing  $\alpha$ -cuts, while the opposite occurred at the lower bound. This is because, due to the relationship of the triangular method in fuzzifying uncertain parameters, the difference between the upper and lower bounds decreases with increasing  $\alpha$ -cuts. Evaluating the results of examining the contribution of resources to meeting the region's water demands showed that the share of water allocated through water transfer channels for meeting the water needs of rice was greater than other surface sources. The Foumanat region, due to the reduced capacity of the Fouman water transfer tunnel, relied more on river sources than other regions.

### Conclusion:

This study shows that the optimal allocation of water is influenced by varying levels of confidence, and water scarcity differs across regions, especially in the central irrigation area. As the confidence level increases, water scarcity changes, decreasing at lower levels and increasing at higher levels. Water from the Sefidroud Dam is the primary source of water supply in the irrigation areas of Guilan. To optimally manage water resources, planning based on water needs and energy production during critical months is recommended to prevent water scarcity and enhance agricultural productivity.

### Author Contributions

Conceptualization, Mahshid Ahmadipour Dogouri and Somaye Janatrostami; methodology, Somaye Janatrostami and ; Mahshid Ahmadipour Dogouri software, Mahshid Ahmadipour Dogouri, Nader Pirmoradian and Afshin Ashrafzadeh; validation, Somaye Janatrostami; formal analysis and investigation, Mahshid Ahmadipour Dogouri, Somaye Janatrostami; resources, Mahshid Ahmadipour Dogouri; data curation, Mahshid Ahmadipour Dogouri, Nader Pirmoradian and Afshin Ashrafzadeh; writing—original draft preparation, Mahshid Ahmadipour Dogouri; writing—review and editing, Somaye Janatrostami; visualization, Somaye Janatrostami; supervision, Somaye Janatrostami; project administration, Somaye Janatrostami.

**Data Availability Statement**

Data available on request from the authors.

**Acknowledgements**

The authors would like to thank all participants of the present study.

**Ethical considerations**

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

**Conflict of interest**

The author declares no conflict of interest.

## توسعه مدل بهینه‌سازی چندهدفه تحت عدم قطعیت برای مدیریت همبست آب و انرژی در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود

مهشید احمدی پور دوگوری<sup>۱</sup> | سمیه جنت‌رستمی<sup>۲</sup> | افشین اشرف‌زاده<sup>۳</sup> | نادر پیرمردیان<sup>۴</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: [mahshidap.m@gmail.com](mailto:mahshidap.m@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: [janatrostami@guilan.ac.ir](mailto:janatrostami@guilan.ac.ir)

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران و گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه

تهران. رایانامه: [ashrafzadeh@guilan.ac.ir](mailto:ashrafzadeh@guilan.ac.ir)

۴. گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: [npirmordian@guilan.ac.ir](mailto:npirmordian@guilan.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

این مطالعه به بررسی مدیریت بهینه منابع آب و انرژی در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود در استان گیلان می‌پردازد. با توجه به نقش حیاتی این منابع در کشاورزی، کمبود آب و افزایش تقاضا برای غذا، نیاز به یک رویکرد یکپارچه بیشتر احساس می‌شود. یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه تحت عدم قطعیت برای این مطالعه توسعه داده شد که شامل کمینه‌سازی کمبود آب کشاورزی و حداکثرسازی تولید انرژی برقایی سد مخزنی سفیدرود است. مدل توسعه یافته با استفاده از الگوریتم NSGA-II حل شد و نیازهای آبیاری برنج و چای با روش بیلان آب و خاک محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد که کمبود آب در سطوح اطمینان مختلف متفاوت بوده و ناحیه آبیاری مرکزی بیشترین کمبود را دارد. همچنین، کشت برنج به‌خصوص در ماه‌های خرداد و تیر با کمبود آب بیشتری مواجه است، در حالی که کشت چای از نظر کمبود آب مشکل خاصی ندارد. این تحقیق بر لزوم مدیریت بهینه منابع و برنامه‌ریزی دقیق برای جلوگیری از کمبود آب در ماه‌های بحرانی تأکید کرده و نتایج آن می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های مؤثر در راستای توسعه پایدار کشاورزی کمک کند.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۴/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۷/۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۲۵

تاریخ انتشار: اسفند ۱۴۰۳

### واژه‌های کلیدی:

مجموعه‌های فازی،

الگوریتم NSGA-II،

بهینه‌سازی،

عدم قطعیت.

استناد: احمدی پور دوگوری؛ مهشید، جنت رستمی؛ سمیه، اشرف‌زاده؛ افشین، پیرمردیان؛ نادر، (۱۴۰۳)، توسعه مدل بهینه‌سازی چندهدفه تحت عدم قطعیت برای مدیریت همبست آب و انرژی در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵ (۱۲)، ۲۲۸۹-۲۳۱۱.



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378531.669747>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378531.669747>

## مقدمه

منابع آب، انرژی و غذا مدت‌ها بدون در نظر گرفتن تعاملات بین آن‌ها به‌طور جداگانه مدیریت می‌شدند (Tan and Zhang, 2018; Zhang et al., 2019; Opejin et al., 2020). آب و انرژی از منابع مهم و کلیدی برای تولید محصولات کشاورزی هستند، کشاورزی نیز مواد غذایی اساسی و مواد خام را برای سایر بخش‌ها از جمله زندگی و خدمات تولید می‌کند و از بقا و توسعه اقتصادی بشر حمایت می‌کند (Fernandez et al., 2020; Guan et al., 2020; Zuo et al., 2021). با این وجود، تضاد شدید بین تقاضای غذا و عرضه کشاورزی در بسیاری از مناطق به ویژه در مناطق کم آب مشاهده شده است، با توجه به گزارش اخیر فائو، ۷۰ درصد از منابع آب شیرین جهان برای آبیاری کشاورزی استفاده می‌شود که این نسبت در کشورهای کمتر توسعه یافته حتی تا ۹۵ درصد گزارش شده است (FAO, 2017). بر اساس تجربه بسیاری از کشورها، کاهش آب به‌طور قابل توجهی بر عملکرد محصول تأثیر می‌گذارد (Daher et al., 2019, Bhattarai et al., 2021). بر اساس گزارش IEA<sup>1</sup>, 2016، به‌طور کلی بخش صنعت نیز ۲۲ درصد از منابع آب را مصرف می‌کند که بخش عمده این آب صرف خنک کردن فرآیندهای حرارتی در تولید برق می‌شود. بنابراین، توسعه بخش‌های کشاورزی و انرژی ممکن است به دلیل محدودیت دسترسی به آب محدود شود (D'Odorico et al., 2018). بررسی مطالعات گذشته نشان داد که تاکنون در مطالعات زیادی وابستگی تولید کشاورزی و تامین انرژی در یک منطقه مورد بررسی قرار گرفته است (Arizpe et al., 2011; Ghisellini et al., 2016; Buko et al., 2021).

مصرف آب، انرژی و غذا به دلیل توسعه روزافزون اجتماعی-اقتصادی، رشد جمعیت و افزایش سطح رفاه و استانداردهای زندگی در حال افزایش است. به‌منظور مدیریت منابع و تقاضاهای موجود و بررسی مسائل در این زمینه نمی‌توان تنها یک منبع را به‌صورت جداگانه در نظر گرفت، زیرا ممکن است حل مسئله از یک بعد باعث بروز مشکل از دیدگاه منابع دیگر شود (Liu et al., 2015). بنابراین بهتر است به‌صورت دیدگاه پیوندی، منابع مختلف مورد بررسی قرار گیرد (Perrone et al., 2011, Yu et al., 2019). با توجه به اطلاعات و داده‌های گسترده و متنوع در هنگام مدیریت دیدگاه همبست در یک سیستم کشاورزی واقعی، تصمیم‌گیرندگان به‌دلیل دانش و اطلاعات ناکافی از اتصالات بین مؤلفه‌ها، تغییرات شرایط طبیعی و محیط اجتماعی-اقتصادی، مانند نوسانات عرضه آب و انرژی، تغییرات کاربری زمین اغلب با عدم قطعیت در تعیین پارامترها مواجه می‌شوند (Li et al., 2019). این عدم قطعیت‌هایی که در کل سیستم ایجاد می‌شود اجتناب‌ناپذیر هستند و روند تصمیم‌گیری را مختل می‌کند. بنابراین، داده‌های مورد استفاده در مدل‌سازی همیشه دقیق نیستند و به‌صورت تخمینی ارائه می‌شوند. به‌عنوان مثال، قضاوت‌های ذهنی افراد در مورد پارامترها ممکن است منجر به اطلاعات فازی آن‌ها شود یا اینکه نوسانات تصادفی بارش ممکن است منجر به احتمالاتی شدن حجم آب در دسترس شود (Namany et al., 2019; Sun et al., 2020). در برخورد با مسائلی که دارای عدم قطعیت هستند برای انعکاس بهتر شرایط واقعی، معمولاً از روش‌های بهینه‌سازی غیردقیق<sup>۲</sup> مانند برنامه‌ریزی فازی یا برنامه‌ریزی مقید به شانس استفاده می‌شود (Yu et al., 2020; Ji et al., 2020).

اخیراً، تعدادی از مطالعات پیشنهاد شده است که از روش‌های بهینه‌سازی غیردقیق در سیستم همبست آب، انرژی و غذا که با عدم قطعیت‌های متعددی همراه هستند، استفاده می‌کنند (Perrone et al., 2011; Georgiou et al., 2018; Tsolas et al., 2018; Liu et al., 2019; Yu et al., 2019; Zhang et al., 2018). برنامه‌ریزی ریاضی فاصله‌ای، برنامه‌ریزی تصادفی و روش مجموعه‌های فازی سه رویکرد اصلی برای انعکاس عدم قطعیت‌ها در سیستم‌های همبست هستند که هر رویکرد دارای ویژگی‌ها و کاستی‌های منحصر به فرد خود در برخورد با عدم قطعیت‌ها است. روش برنامه‌ریزی ریاضی فاصله‌ای در صورتی که داده‌ها کافی نباشد می‌تواند تنها با مشخص بودن مرز بالا و پایین داده‌ها با عدم قطعیت‌ها مقابله کند (Xu et al., 2022). رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی به‌طور موثر با متغیرهای تصادفی کمی شده با توزیع‌های احتمال برخورد می‌کند که برای فرمول‌بندی آن نیاز به توزیع‌های احتمالاتی است. بنابراین این روش، زمانی که داده‌های محدودی در دسترس باشد، قابل اجرا نیست (Gholizadeh et al., 2020). روش مجموعه‌های فازی زمانی که در دانش یا اطلاعات و یا در آرمان‌های تصمیم‌گیرندگان ابهام وجود داشته باشد قادر به کمی کردن پارامترها است. به‌عنوان مثال، Xie et al., 2018 یک مدل بهینه‌سازی تصادفی-فازی غیردقیق برای تخصیص آب کشاورزی و مدیریت بهره‌برداری از منابع زمین با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های چندگانه توسعه دادند که تحت سناریوهای مختلف فعل و انفعالات بین سود سیستم و احتمال شکست سیستم را جستجو می‌کند. نتایج نشان داد که تخصیص آب کشاورزی تحت تأثیر عدم قطعیت‌هایی است که به‌صورت تصادفی و فازی بیان می‌شوند نتایج

1 International Energy Agency

2 Inexact optimization

نشان داد که تخصیص آب کشاورزی به صراحت تحت تاثیر عدم قطعیت‌هایی است که به صورت تصادفی و فازی بیان می‌شوند و نتایج برای پشتیبانی از توجیه طرح‌های مدیریت منابع آب موجود و بهره‌برداری مطلوب از زمین برای توسعه اجتماعی-اقتصادی مناطق، تحت عدم قطعیت ارزشمند هستند. Liu et al., 2017، برای بهینه‌سازی همبست انرژی-آب در سیستم‌های برقایی از روش برنامه‌ریزی فازی-استوکستیک استفاده کردند. مدل توسعه‌یافته، عدم قطعیت‌های سیستم را با روش توزیع احتمالاتی و مقادیر فاصله‌ای<sup>۱</sup> بررسی می‌کند. نتایج آن‌ها نشان داد که برای انعکاس روابط بین تامین آب، تولید برق، هزینه سیستم و احتمال شکست سیستم از سطوح اطمینان مختلف استفاده شد که می‌تواند منجر به تغییر هزینه سیستم، میزان برق وارداتی، تولید برق و تامین آب شوند.

Lv et al., 2018، در سیستم همبست آب و انرژی از توزیع احتمال فازی برای تعیین کمیت عدم قطعیت آب در دسترس استفاده کردند. آن‌ها این روش را در منطقه‌ای در شمال چین که وابسته به سوخت‌های فسیلی مانند زغال سنگ و نفت بود، به کار بردند. نتایج نشان داد که هر دو عامل آب در دسترس و عدم قطعیت‌ها اثرات قابل توجهی بر استراتژی‌های برنامه‌ریزی سیستم همبست انرژی-آب دارند. Ren et al., 2018 یک مدل برنامه‌ریزی فازی چندهدفه برای بهینه‌سازی همزمان آب آبیاری و زمین در شرایط عدم قطعیت با استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی<sup>۲</sup> ارائه کرد که می‌تواند عدم قطعیت‌های موجود را به صورت مجموعه‌های فازی بررسی کند و طرح‌های بهینه متفاوتی را با درجه عضویت‌های متفاوت برای تصمیم‌گیرندگان ارائه کند. Zhang et al., 2018، با ادغام روش فازی و یک روش حل معمولی به همراه روش تحلیل سلسله‌مراتبی، مدل بهینه تخصیص آب منطقه‌ای تحت عدم قطعیت را توسعه دادند. مدل توسعه‌یافته توانست منابع آبی محدود را بین مصارف مختلف با توجه به سه هدف حداکثر کردن سود خالص سیستم، حداقل کردن مجموع COD<sup>۳</sup> و حداقل کردن کمبود آب تخصیص دهد. Sanchis et al., 2019، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی را برای بهینه‌سازی انتخاب منابع آب و حجم در شبکه‌های آب با حداقل کردن هزینه‌های فازی پیشنهاد کرد. Ji et al., 2020، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی فازی-تصادفی چند مرحله‌ای برای مدیریت همبست آب، غذا و انرژی تحت عدم قطعیت پیشنهاد کرد. آن‌ها برای انتخاب منابع آب و حجم آب تخصیص یافته از حداقل کردن هزینه‌های فازی استفاده کردند. علاوه بر این، سرگزی (۱۳۹۶)، برای برنامه‌ریزی و تخصیص بهینه منابع آب و زمین در بخش کشاورزی شهرستان صومعه سرا از روش برنامه‌ریزی فازی استفاده کردند. نتایج نشان داد که در تخصیص بهینه زمین، سطح زیر کشت باقلا مازندرانی و لوبیا نسبت به وضعیت موجود بایستی افزایش و برنج کاهش یابد ولی در تخصیص بهینه منابع آب، دو محصول برنج و باقلا در تمامی الگوهای برآوردی، بیشترین تخصیص را نشان دادند. اسعدی و همکاران (۱۳۹۷)، از مدل برنامه‌ریزی خطی-فازی برای بهینه‌سازی الگوی کشت در حوضه زرنینه رود استفاده کردند. عدم قطعیت‌های موجود در تدوین بهینه‌ترین الگوی کشت، با استفاده از روش فازی لحاظ گردیده است و همچنین به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ناشی از محدودیت مقدار آب در دسترس، سه وضعیت هیدرولوژیکی حداقل، متوسط و حداکثر مقادیر در بهینه‌سازی فازی در نظر گرفته شد.

هدف این مطالعه پیشنهاد یک رویکرد برنامه‌ریزی چندهدفه برای مدیریت همبست آب و انرژی در شرایط عدم قطعیت با اهداف کشاورزی و برقایی است که در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود واقع در شمال ایران مورد بررسی قرار گرفت. رویکرد پیشنهادی می‌تواند تعاملات بین آب و انرژی را فرمول‌بندی کند و با استفاده از الگوریتم فراکاوشی NSGAIII تخصیص بهینه آن‌ها را در بخش کشاورزی و انرژی بدست آورد. با توجه به ماهیت تصادفی پارامترهای مورد استفاده در مدل بهینه‌سازی همبست آب و انرژی، پس از مشخص کردن پارامترهای دارای عدم قطعیت در مدل توسعه‌یافته، مقادیر آن‌ها با استفاده از روش مجموعه‌های فازی به صورت کمی تعیین شد. به این ترتیب، با گنجانیدن این مقادیر در چارچوب مدل سعی شد عدم قطعیت‌های هر یک از بخش‌های آب و انرژی به طور کامل منعکس شود. در نهایت نتایج بهینه‌سازی تامین نیاز آبی و تولید برق در سطح اطمینان‌های مختلف محدودیت‌های مدل، توسعه داده شد که تجزیه و تحلیل این نتایج می‌تواند برای افزایش درک تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان نواحی آبیاری موجود در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود در مورد برقراری تعادل بین تولید انرژی و تامین آب مفید باشد.

## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه مورد مطالعه

استان گیلان با مساحت ۱۴۰۴۴ کیلومترمربع از استان‌های شمالی ایران است، که از شمال به دریای خزر وصل بوده و از طریق آستارا نیز دارای مرز خاکی با جمهوری آذربایجان است، از غرب به استان اردبیل، از جنوب به استان زنجان و قزوین و از شرق به استان مازندران

1 Interval values

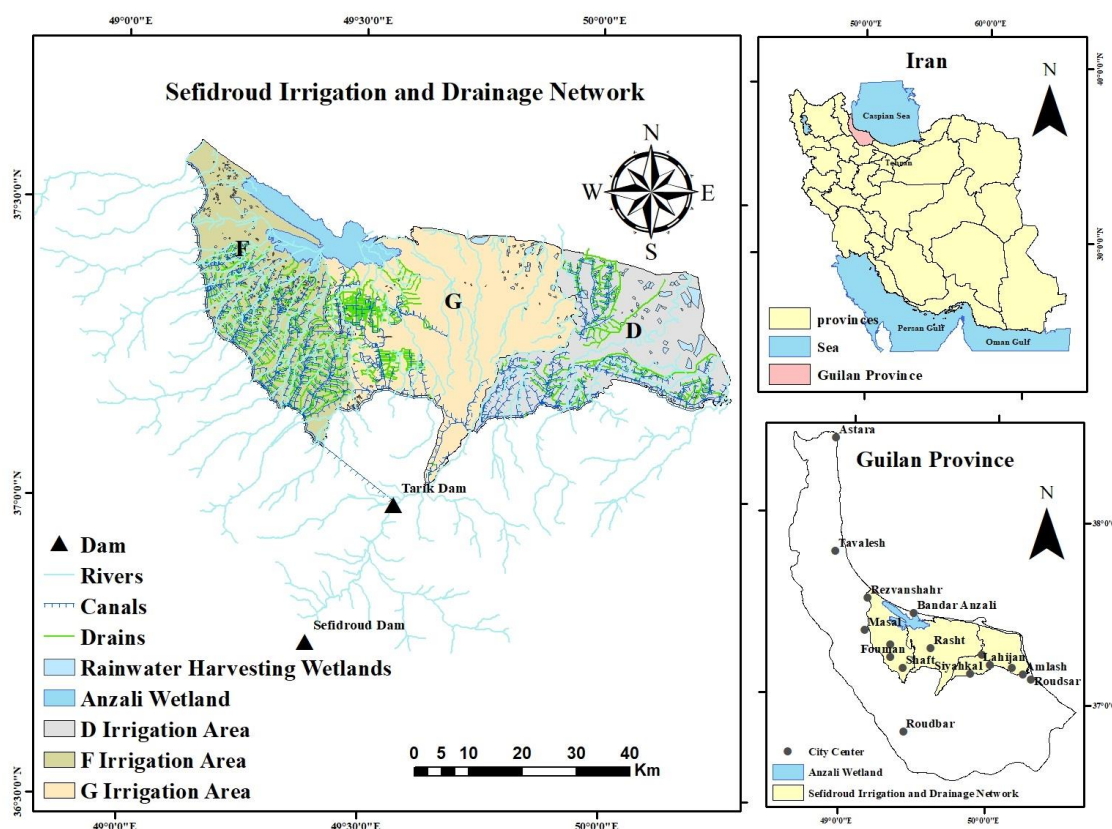
2 Fuzzy sets theory

3 Chemical Oxygen Demand

محدود می‌شود. این استان در زمینه تولید چای، زیتون، فندق و بادام زمینی مقام اول و به لحاظ تولید برنج دارای مقام دوم در ایران است از این رو، مهم‌ترین محصول کشاورزی منطقه برنج بوده و اکثر اراضی قابل آبیاری جزء زمین‌های شالیزاری به حساب می‌آیند. در بخش حوضه داخلی استان، رودخانه‌های متعددی وجود دارند که به تالاب انزلی و دریای خزر می‌ریزند. از مزیت‌های این استان وجود تالاب، رودخانه و دریا است.

شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود در ساحل غربی دریای خزر در استان گیلان با احداث سد مخزنی سفیدرود به گنجایش ۱۸۰۰ میلیون مترمکعب از سال ۱۳۴۰ اجرایی شد. در منطقه منجیل سد سفیدرود بر روی این رودخانه ساخته شده که دریاچه‌ای با وسعت ۵۶ کیلومتر مربع در پشت آن پدید آمده، این سد در دست بهره‌برداری بوده و آب قابل تنظیم آن به میزان ۲۰۹۰ میلیون متر مکعب و ظرفیت تولید انرژی سالانه ۱۲/۵ تا ۱۵ گیگاوات ساعت می‌باشد (شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان، ۱۳۸۴) نواحی تحت پوشش شبکه‌های آبیاری سفیدرود در قالب ۱۷ واحد عمرانی شکل گرفته استواز سه ناحیه آبیاری فومنات (F)، مرکزی (G) و شرق گیلان (D) تشکیل شده است (بی نام، ۱۳۸۴).

رودخانه سفیدرود به عنوان منبع اصلی تامین آب شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود بوده که آب رها شده از سد سفیدرود توسط سدهای انحرافی و همچنین کانال‌های منشعب از آن‌ها، به نواحی مختلف شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود منتقل می‌شود. موقعیت نواحی آبیاری منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. آب مورد نیاز اراضی واقع در شبکه از منابع آب‌های زیرزمینی و سطحی تامین می‌شود. آب‌های زیرزمینی از طریق پمپاژ از چاه‌های حفر شده در این مناطق بدست می‌آید و آب‌های سطحی علاوه بر رودخانه‌های محلی و آب‌بندان‌ها از طریق سد مخزنی سفیدرود با استفاده از سدهای انحرافی و همچنین کانال‌های منشعب از آن‌ها، به نواحی مختلف شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود انتقال داده می‌شود.



شکل ۱- موقعیت شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود در استان گیلان

### روش تحقیق

در این مطالعه، با استفاده از رویکرد همبست آب و انرژی در بهره‌برداری از سد مخزنی سفیدرود یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه غیرخطی برای مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب کشاورزی در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود توسعه داده شد. در این مدل، مقادیر نیاز آبیاری با در نظر گرفتن مقادیر بارش موثر در منطقه با استفاده از برآورد تبخیر- تعرق در مدل‌های مبتنی بر بیلان آب خاک محاسبه شد. با بررسی

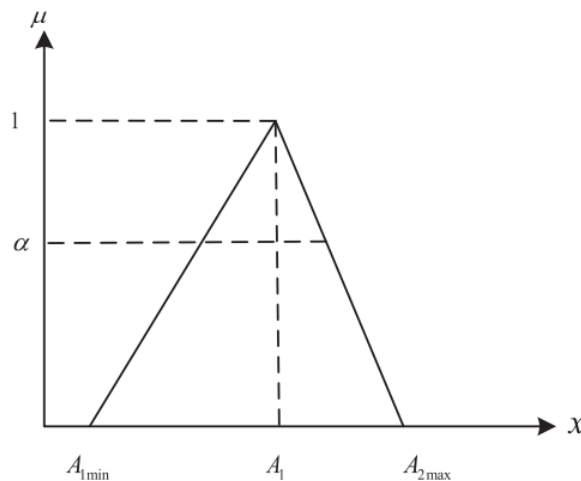


پارامترها و داده‌های ورودی به مدل بهینه‌سازی، مقادیر حجم آب رهاسازی شده از سد سفیدرود، حجم آب قابل دسترس از طریق رودخانه‌های محلی و حجم آب زیرزمینی قابل استفاده و همچنین مقادیر نیاز آبیاری به عنوان پارامترهای با عدم قطعیت معرفی شدند که مقادیر آن‌ها با استفاده از روش مجموعه‌های فازی وارد مدل بهینه‌سازی شدند. چارچوب مدل‌سازی در این روش به گونه‌ای است که جواب‌های بهینه را در سطوح مختلف فازی ارائه می‌کند که می‌تواند راهنمای مناسبی برای تصمیم‌گیری مدیران و مسئولان در توسعه سیستم کشاورزی در آینده باشد.

### روش منطق فازی

در مطالعه حاضر برای مقابله با عدم قطعیت فازی، مدل بهینه‌سازی بر اساس تئوری مجموعه‌های فازی توسعه می‌یابد که به طور موثر توانایی برخورد با مسائل فازی را دارد. تابع عضویت اغلب برای رویارویی با مسائل فازی از توابع خطی مثلثی و ذوزنقه‌ای استفاده می‌شود. در این مطالعه از توابع خطی مثلثی استفاده شده است که با استفاده از مقادیر حد بالا، حد پایین و بیشترین مقدار ممکن، توانایی ارائه مهم‌ترین اطلاعات مربوط به یک عضو فازی را دارند. هنگامی که  $A$  یک عدد فازی با تابع عددی مثلثی باشد، بر اساس تعریفی که Li and Huang, 2011 ارائه کردند، آن را می‌توان با تعیین سه عدد بیان نمود: ۱- کمترین مقدار ممکن ( $A_{1min}$ )، ۲- بیشترین مقدار ممکن ( $A_{2max}$ ) و ۳- بالاترین احتمال ممکن ( $A_1$ ) است. سه مقدار مورد استفاده در تئوری فازی در شکل ۲ نشان شده است. در این شکل نمایش تابع مثلثی نمایش داده شده است. برای نمایش عددی مقادیر فازی از سطوح  $\alpha$ -cut استفاده می‌شود، با توجه به سطح  $\alpha$ -cut، پارامتر فازی  $A$  می‌تواند یک فاصله‌ی بسته باشد به صورت رابطه زیر باشد (Ren et al., 2019).

$$[A_{\alpha}^{-}, A_{\alpha}^{+}] = [(1 - \alpha) A_{1min} + \alpha A_1, (1 - \alpha) A_{2max} + \alpha A_1] \quad (\text{رابطه ۱})$$



شکل ۲- تابع عضویت مثلثی از یک مجموعه فازی

### برآورد تبخیر- تعرق گیاه در مدل‌های مبتنی بر بیلان آب خاک

مهم‌ترین بخش طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های تأمین آب مورد نیاز کشاورزی برآورد نیاز آبی گیاه است (Yu et al., 2008). برای محاسبه تبخیر-تعرق گیاه ( $ET_c$ ) به عنوان بخش عمده نیاز آبی، می‌توان از مدل‌های برنامه‌ریزی آبیاری مبتنی بر شبیه‌سازی بیلان آب خاک استفاده کرد. این مدل‌ها  $ET_c$  را با استفاده از حاصل ضرب یک ضریب گیاهی ( $K_c$ ) در تبخیر-تعرق مرجع ( $ET_o$ ) برآورد می‌کنند. برای محاسبه  $ET_o$  روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که هر کدام از نظر داده‌های مورد نیاز تا حدودی با یکدیگر تفاوت دارند. فائو در سال ۱۹۹۸، روش فائو-پنمن-مانتیت را به عنوان روش استاندارد برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع معرفی کرد. در این مطالعه به منظور برآورد مقدار تبخیر-تعرق گیاه مرجع به روش فائو-پنمن-مانتیت از رابطه ۲ استفاده شده است:

$$ET_0 = \frac{0.408\delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} U_2 (E_s - E_a)}{\delta + (1 + C_d U_2)} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در رابطه ۲،  $ET_0$  تبخیر-تعرق مرجع استاندارد شده برای چمن سردسیری با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر برحسب میلی‌متر بر روز برای گام‌های زمانی روزانه یا میلی‌متر بر ساعت برای گام‌های زمانی ساعتی،  $R_n$  تابش خالص محاسبه‌شده در سطح گیاه بر حسب مگاژول بر متر مربع بر روز برای گام‌های زمانی روزانه یا مگاژول بر مترمربع بر ساعت برای گام‌های زمانی ساعتی،  $G$  شدت شار گرمایی در سطح



خاک بر حسب مگاژول بر مترمربع بر روز برای گام‌های زمانی روزانه یا مگاژول بر مترمربع بر ساعت برای گام‌های زمانی ساعتی،  $T$  میانگین روزانه یا ساعتی دمای هوا در ارتفاع ۱/۵ تا ۲/۵ متری بر حسب درجه سلسیوس،  $U_2$  میانگین روزانه یا ساعتی سرعت باد در ارتفاع ۲ متری بر حسب متر بر ثانیه،  $e_s$  فشار بخار اشباع در ارتفاع ۱/۵ تا ۲/۵ متری بر حسب کیلو پاسکال، محاسبه شده برای گام‌های زمانی روزانه به صورت میانگین فشار بخار اشباع رخ داده در بیشینه و کمینه دمای هوا،  $e_g$  میانگین فشار بخار واقعی در ارتفاع ۱/۵ تا ۲/۵ متری بر حسب کیلو پاسکال،  $\delta$  شیب منحنی فشار بخار اشباع در مقابل دما بر حسب کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس،  $\gamma$  ثابت سایکرومتری بر حسب کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس،  $C_n$  ثابت صورت کسر که بسته به نوع مرجع و گام زمانی محاسبات تغییر می‌کند،  $C_d$  ثابت مخرج کسر که بسته به نوع مرجع و گام زمانی محاسبات تغییر می‌کند. واحد ضریب 0.408 در رابطه ۲، متر مربع میلی‌متر بر مگاژول است (این ضریب دربرگیرنده گرمای نهان تبخیر ( $\gamma$ ) و چگالی آب ( $\rho_w$ ) است به گونه‌ای که  $\gamma=2.45 \text{ MJkg}^{-1}$  و  $\rho_w=1.0 \text{ Mgm}^{-3}$ ). برای گام‌های روزانه  $C_d=0.34$  و  $C_n=900$  است (Allen et al., 1998).

به منظور برآورد بیلان آب و خاک در منطقه ریشه باید در مقیاس مزرعه‌ای محاسبه شود. بنابراین، بیلان آبی روزانه با هدف برآورد کمبود در پایان روز، به صورت رابطه ۳ بیان می‌شود (Allen et al., 1998, 2007).

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_{n_i} + ET_{a,i} + DP_i \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه ۳،  $D_{r,i}$  تخلیه از ناحیه ریشه در پایان روز  $i$  بر حسب میلی‌متر،  $D_{r,i-1}$  تخلیه از ناحیه ریشه در پایان روز قبل با واحد میلی‌متر،  $P_i$  بارندگی در روز  $i$  بر حسب میلی‌متر،  $RO_i$  رواناب سطحی در روز  $i$  با واحد میلی‌متر،  $I_{n_i}$  عمق خالص آبیاری در روز  $i$  که در خاک نفوذ می‌کند بر حسب میلی‌متر،  $ET_{a,i}$  تبخیر-تعرق واقعی گیاه در روز  $i$  بر حسب میلی‌متر و  $DP_i$  آب خارج شده از ناحیه ریشه از راه نفوذ عمقی در روز  $i$  بر حسب میلی‌متر است.

در رابطه ۳،  $(P - RO)_i$  میزان بارش موثر در روز  $i$  است که برای محاسبه مقدار بارش موثر از روابط ۴ تا ۶ استفاده می‌شود.

$$RO = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{if } P > 0.2S \quad \text{رابطه ۴}$$

$$RO = 0 \quad \text{if } P \leq 0.2S \quad \text{رابطه ۵}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{رابطه ۶}$$

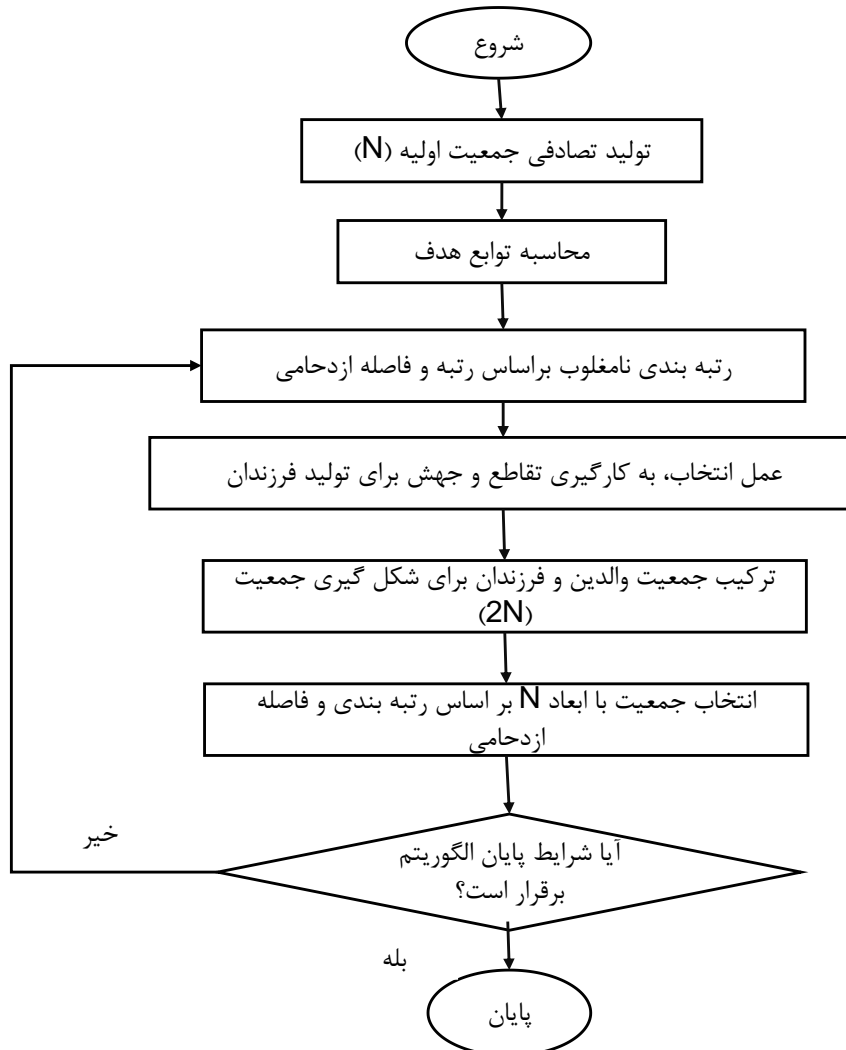
با توجه به این که مقدار  $S$  به طور نظری بین صفر تا بی‌نهایت تغییر می‌کند، بر اساس رابطه ۶ شماره منحنی (CN) می‌تواند بین ۱۰۰ تا صفر تغییر کند. مقدار CN با توجه به نوع گیاه و بافت خاک تعیین می‌شود. به این ترتیب، نیازآبی برای دو محصول برنج و چای در بافت خاک متوسط که بافت غالب منطقه است محاسبه شد. همچنین میزان بارش موثر و نیاز خالص آبیاری نیز با استفاده از سامانه بومی برآورد نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی در اقلیم‌های مختلف ایران (پیرمردادیان، ۱۳۹۷) محاسبه شد.

#### الگوریتم بهینه‌سازی NSGAII

روش کار و الگوریتم کلی NSGA-II به صورت فلوجارت شکل ۳ است. تمام مراحل ارائه شده در فلوجارت تا رسیدن به جواب بهینه تکرار می‌شود. پس از پایان کار مدل، پاسخ‌های بهینه پارتو اعضای دسته اول در جمعیت جواب‌ها هستند، بدست می‌آیند. با استفاده از پاسخ‌های به دست آمده، بر اساس قضاوت‌های فنی و اجرایی می‌توان جواب مناسب را با حفظ مقادیر تابع‌های هدف در سطح مطلوب، از جبهه پارتو انتخاب کرد (Deb et al., 2002).

#### توسعه مدل بهینه‌سازی مدیریت همبست آب و انرژی

هدف از این بخش، توسعه یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه غیرخطی برای مدیریت همبست بین بخش‌های آب و انرژی تحت عدم قطعیت است. دیدگاه همبست آب و انرژی در این مطالعه در فرآیند بهره‌برداری از سد سفیدرود مورد استفاده قرار گرفته است و تبادلات بین تولید انرژی برقایی و آبیاری محصولات کشاورزی شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود که با استفاده از خروجی آب سد سفیدرود انجام می‌شود بر اساس این دیدگاه مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین، این برنامه‌ریزی در راستای بهینه‌سازی مدل مدیریتی با دو هدف حداقل کردن کمبود آب کشاورزی و حداکثرسازی تولید انرژی برقایی با وجود محدودیت‌های مختلف موجود ایجاد شد. با توجه به اینکه یکی از اهداف مدل برنامه‌ریزی، تامین نیاز آبیاری محصولات کشاورزی و حداقل کردن کمبودها است سایر منابع آبی مورد استفاده در تامین نیازهای آبیاری کشاورزی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه توابع هدف و محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی توسعه یافته با جزئیات آورده شده است.



شکل ۳- فلوجارت الگوریتم NSGAII

### -توابع هدف

**هدف اول - حداقل کردن شاخص کمبود آب کشاورزی:** تابع هدف اول برای کل دوره آبیاری محصولات منتخب، حداقل کردن کمبود آب کشاورزی است که به صورت شاخص کمبود برای ارزیابی کمی میزان کمبود آب کشاورزی استفاده می‌شود (Hec, 1975). در رابطه ۷، SI به صورت شاخص کمبود آب کشاورزی برای کل دوره آبیاری محصولات چای و برنج بیان می‌شود:

$$F_1 = \min \left[ \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 SI(i, j) \right] \quad \text{رابطه ۷}$$

$$SI(i, j) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{TS(i, j, t)}{TD(i, j, t)} \quad \text{رابطه ۸}$$

در این رابطه، T، کل دوره زمانی که شامل ۶ ماه نخست سال (فروردین تا شهریور) است و i، شماره نواحی آبیاری (ناحیه آبیاری فومنات، 1؛ ناحیه آبیاری مرکزی، 2؛ ناحیه آبیاری شرق، 3) و j شماره نواحی محصولات منتخب (برنج، 1 و چای، 2) می‌باشد. همچنین مقدار TS و TD به ترتیب مقدار کمبود آب کشاورزی و نیاز آبیاری بر حسب میلیون متر مکعب بوده و به صورت روابط ۹ و ۱۰ بیان می‌شوند:

$$TD(i, j, t) = \frac{I_{iw}(i, j, t) \times A(i, j)}{I_C(j)} + I_{others}(i, t) \quad \text{رابطه ۹}$$

$$TS(i, j, t) = TD(i, j, t) - R_T(i, j, t) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

در رابطه ۹،  $I_{iw}(i, j, t)$  نیاز خالص آبیاری محصول  $z$  در ناحیه  $i$  برای دوره زمانی  $t$  بر حسب میلیون متر مکعب بر هکتار؛  $A(i, j)$  سطح زیر کشت محصول  $z$  در هر ناحیه  $i$  بر حسب هکتار؛  $I_C(j)$  راندمان آبیاری محصول  $z$  (با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده در منطقه، راندمان آبیاری ۵۰/۳ درصد برای چای و ۵۸/۳ درصد برای برنج در نظر گرفته شد (Pirmoradian and Davatgar, 2019));  $I_{others}(i, t)$  کل نیاز ناخالص دیگر محصولات کشت شده در ناحیه  $i$  در دوره زمانی  $t$  که با توجه به سطح زیر کشت مربوطه بر حسب میلیون متر مکعب محاسبه می‌شود. در رابطه ۱۰، مقدار کل آب تخصیص یافته به محصول  $z$  در ناحیه آبیاری  $i$  و به محصول  $z$  ام است. بر اساس رابطه ۱۱،  $R_T(i, j, t)$  برابر با مجموع  $R_C(i, j, t)$ ،  $R_r(i, j, t)$ ،  $R_d(i, j, t)$  و  $R_w(i, j, t)$  است که به ترتیب بیانگر مقادیر آب تخصیص یافته از کانال، آب زیرزمینی، رودخانه‌ها، آب برگشتی از زهکش‌ها و آب‌بندان به محصول  $z$  در ناحیه آبیاری  $i$  در زمان  $t$  است. آب برگشتی از زهکش‌ها به‌عنوان دیگر منبع تأمین نیاز کشاورزی، به‌صورت ضریب تجربی از مجموع سایر منابع و بر حسب میلیون متر مکعب به‌صورت رابطه ۱۲ برآورد می‌شود.

$$R_T = R_r(i, j, t) + R_C(i, j, t) + R_w(i, j, t) + R_d(i, j, t) + R_g(i, j, t) \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$R_d = \alpha(i, j, t) \times (R_r(i, j, t) + R_C(i, j, t) + R_w(i, j, t) + R_g(i, j, t)) \quad \text{رابطه ۱۲}$$

**هدف دوم - حداکثر کردن تولید انرژی برقایی:** دومین تابع هدف (رابطه ۱۳)، حداکثر کردن تولید انرژی برقایی در سد مخزنی سفیدرود می‌باشد که به‌صورت نسبت میزان انرژی برقایی تولید شده توسط توربین‌های هیدرولیکی سد سفیدرود بر حسب کیلو وات ساعت و پیک انرژی برقایی تولید شده در کل دوره زمانی بیان می‌شود.

$$F_2 = \max \left[ \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{E(t)}{E_{\max}} \right] \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$E(t) = 2.725 \times R(t) \times h(t) \times e \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$e = e_T \times e_G \quad \text{رابطه ۱۵}$$

در روابط ۱۳ تا ۱۵،  $E(t)$ ، مقدار انرژی تولیدی برقایی در نیروگاه سد برحسب مگاوات ساعت (Mwh)،  $R(t)$ ، حجم آب عبوری از توربین برحسب میلیون متر مکعب (MCM) و  $e$ ، راندمان کل نیروگاه است که بی بعد بوده و از طریق حاصلضرب راندمان ژنراتور (۹۰ درصد) در راندمان توربین (۸۵ درصد) بدست می‌آید. در رابطه ۱۴،  $h(t)$  ارتفاع آب بالای توربین برحسب متر است که برای محاسبه آن از رابطه ۱۶ استفاده می‌شود. در این رابطه،  $h(t)$  بر اساس رابطه ارتفاع - حجم مخزن سد بدست می‌آید.

$$h(t) = -0.00001 \times S(t)^2 + 0.0479 \times S(t) + 27.866 \quad \text{رابطه ۱۶}$$

که  $S(t)$  حجم ذخیره مخزن سد در انتهای دوره  $t$  بر حسب میلیون مترمکعب است.

#### - محدودیت‌ها

**محدودیت تامین آب سطحی:** با توجه به کم بودن نیاز آبی چای نسبت به برنج و همچنین در دسترس نبودن رودخانه‌ها در باغات چای، نیاز آبی چای تنها از طریق منابع آب زیرزمینی تامین می‌شود و از منابع آب سطحی برای تامین نیاز آبی شالیزارهای برنج استفاده می‌شود. بنابراین، کل آب‌های سطحی (شامل رودخانه‌ها، آبندها، کانال‌ها و آب زهکش‌ها) تخصیص داده شده به نواحی عمرانی  $F$ ،  $G$  و  $D$  برای کشت محصول برنج نباید از کل آب سطحی قابل دسترس بیشتر باشد. محدودیت‌های منابع آب سطحی به صورت روابط ۱۷ تا ۲۱ آورده شده است.

$$0 \leq R_C(i, j, t) \leq q_C(i) \quad \text{رابطه ۱۷}$$

$$0 \leq R_r(i, j, t) \leq q_r(i) \quad \text{رابطه ۱۸}$$

$$0 \leq R_d(i, j, t) \leq q_d(i) \quad \text{رابطه ۱۹}$$

$$0 \leq R_g(i, j, t) \leq q_g(i) \quad \text{رابطه ۲۰}$$

$$0 \leq R_w(i, j, t) \leq q_w(i) \quad \text{رابطه ۲۱}$$

در این روابط،  $q_C(i)$ ،  $q_r(i)$ ،  $q_w(i)$ ،  $q_d(i)$  و  $q_g(i)$ ، به ترتیب منابع در دسترس آب زیرزمینی، آب‌بندان‌ها، رودخانه‌ها، کانال‌های

شبکه و زهکش‌ها هستند.

### محدودیت‌های مربوط به کانال‌های انتقال آب به شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود: مقدار حجم آب تحویلی از کانال

آبیاری ( $R_c$ ) به نواحی عمرانی، برای آبیاری گیاه برنج بین صفر و مقدار حجم آب قابل دسترس از طریق کانال‌های اصلی شبکه آبیاری ( $q_c$ ) است و مقدار حجم آب ورودی به توربین سد سفیدرود برای تولید انرژی برقایی برابر مجموع کل آب‌های تحویلی به شبکه است.

$$0 \leq R_c(i, j, t) \leq q_c(i, j, t) \quad \text{رابطه ۲۲}$$

$$R(t) = R_c(1,1, t) + R_c(2,1, t) + R_c(3,1, t) + R_{ENV} \quad \text{رابطه ۲۳}$$

در رابطه ۲۲،  $i = 1, 2, 3$  بوده و  $j = 1$  است و در رابطه ۲۳،  $R_{ENV}$  حجم آب در نظر گرفته شده برای نیاز زیست محیطی بر حسب میلیون متر مکعب بوده که در ماه‌های خرداد و تیر برای تامین نیاز زیست محیطی وارد کانال پایاب سنگر می‌شود.

### محدودیت‌های مربوط به رودخانه‌ها: برای محاسبه مقدار حجم آب قابل استفاده از کل جریان عبوری متوسط رودخانه‌های محلی

برای تامین نیاز آبیاری شالیزارهای برنج، ابتدا حجم نیاز زیست محیطی رودخانه‌ها محاسبه شد. برای محاسبه مقدار نیاز زیست محیطی از روش تنانت که یک روش ساده هیدرولوژیکی است (Pyrcce., 2004)، استفاده شد. علاوه بر این، بخشی از حجم آب قابل دسترس رودخانه‌ها برای تامین نیاز آبی‌پروری در برخی از نواحی مورد مطالعه که دارای استخرهای آبی‌پروری هستند نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین پس از کسر نیاز زیست محیطی و نیاز آبی‌پروری مقدار حجم آب قابل تخصیص به بخش کشاورزی باید در محدوده حجم آب قابل دسترس در هر سه ناحیه باشد (رابطه ۲۴). در رابطه ۲۴،  $i = 1, 2, 3$  و  $j = 1$  است.

$$0 \leq R_r(i, j, t) \leq q_r(i, j, t) \quad \text{رابطه ۲۴}$$

### محدودیت‌های مربوط به آب‌بندان‌ها: آب‌بندان‌ها یکی از منابع آب سطحی استان گیلان است که برای اهداف مختلفی از

جمله تامین آب مورد نیاز کشاورزی و حمایت از فعالیت‌های ماهیگیری استفاده می‌شود. آب‌بندان‌ها در مواقع بحرانی و خشکسالی، نقشی حیاتی در تامین نیاز آبی شالیزارهای برنج ایفا می‌کند. مقدار آب تخصیص یافته از آب‌بندان‌ها برای تامین نیاز آبی برنج باید در محدوده آب قابل دسترس باشد (رابطه ۲۵). در رابطه ۲۵،  $i = 1, 2, 3$  و  $j = 1$  است.

$$0 \leq R_w(1,1, t) \leq q_w(1,1, t) \quad \text{رابطه ۲۵}$$

با توجه به مساحت آب‌بندان‌ها در هر یک از نواحی آبیاری، حجم آب قابل استفاده از طریق آب‌بندان‌ها در هر یک از نواحی آبیاری  $F, G$  و  $D$  به ترتیب  $۱۱/۶۷$ ،  $۱۵/۳۱$  و  $۳۹/۴۹$  میلیون مترمکعب برآورد شده است.

### محدودیت مربوط به آب زیرزمینی: محدودیت برداشت آب زیرزمینی به صورت رابطه ۲۶ می‌باشد. در این رابطه، $i = 1, 2, 3$

بوده و  $j = 1, 2$  است. آب زیرزمینی تخصیص یافته با در نظر گرفتن مقدار برداشت مجاز از چاه‌های حفر شده در مناطق آبیاری در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که به دلیل محدودیت دسترسی باغات چای به کانال‌های آبیاری و رودخانه‌های محلی، آب مورد نیاز این محصول از طریق منابع آب زیرزمینی تامین می‌شود. همچنین برای آبیاری سایر محصولات کشت شده در نواحی  $F, G$  و  $D$  مانند کیوی، بادام زمینی، لوبیا و غیره نیز از آب برداشتی از منابع آب زیرزمینی استفاده می‌شود که این مقادیر از کل حجم قابل برداشت آب زیرزمینی کسر شده است. لازم به ذکر است که برای محاسبه حجم آب زیرزمینی قابل برداشت ( $q_g(i, j, t)$ ) از معادله بیلان سالانه آب زیرزمینی استفاده شد.

$$0 \leq R_g(i, j, t) \leq q_g(i, j, t) \quad \text{رابطه ۲۶}$$

### محدودیت‌های مربوط به تولید انرژی برقایی: محدودیت‌های مربوط به مخزن سد شامل رابطه پیوستگی مخزن، محدودیت حداقل

و حداکثر حجم مخزن و برقراری رابطه حجم ذخیره انتقالی برای دوره بهره‌برداری بعدی<sup>۱</sup> در روابط ۲۷ تا ۲۹ آورده شده است.

$$S(t+1) = S(t) + Q(t) - R(t) - loss \quad \text{رابطه ۲۷}$$

$$S_{min} \leq S(t+1) \leq S_{max} \quad \text{رابطه ۲۸}$$

$$S(T+1) = S_{ini} \quad \text{رابطه ۲۹}$$

که در این روابط،  $S(t)$  و  $S(t+1)$  به ترتیب حجم ذخیره مخزن سد در انتها و ابتدای دوره  $t$  بر حسب میلیون مترمکعب،  $Q(t)$  حجم جریان ورودی به مخزن بر حسب میلیون متر مکعب،  $R(t)$  حجم آب خروجی از مخزن برای تامین نیازهای کشاورزی نواحی

عمرانی شرق گیلان و مرکزی و فومنات بر حسب میلیون مترمکعب که وارد توربین های سد سفیدرود میشود.  $S_{max}$  و  $S_{min}$  به ترتیب حداقل و حداکثر حجم ذخیره موجود در دوره  $t$  و همچنین  $S_{ini}$  مقدار حجم ذخیره ابتدایی مخزن سد است. در سدهای برقایی،  $h(t)$  باید از حداقل ارتفاع آب بالای توربین ( $h_{min}$ ) بیشتر باشد (رابطه ۳۰) تا توربین‌های سد قادر به تولید انرژی برقایی باشند.

$$h(t) > h_{min} \quad \text{رابطه ۳۰}$$

علاوه براین، با توجه به اینکه تعداد توربین‌های سد سفیدرود، ۵ است و حداقل حجم آب عبوری از هر توربین ( $V_{min}$ )، ۲ میلیون مترمکعب و حداکثر ظرفیت حجم آب عبوری از هر توربین ( $V_{max}$ )، ۲/۵ میلیون مترمکعب است، رابطه ۳۱ باید برقرار شود. در این رابطه،  $R(t)$  مجموع حجم آب ورودی به توربین بر حسب میلیون مترمکعب و  $n$  تعداد توربین‌ها است.

$$\text{if } R(t) > nV_{max} \quad \rightarrow \quad R(t) = nV_{max} \quad \text{رابطه ۳۱}$$

## نتایج و بحث

### نتایج برآورد نیاز خالص آبیاری برنج و چای مبتنی بر بیلان آب و خاک

داده‌های مورد نیاز برای برآورد بارش موثر، تبخیر-تعرق مرجع و نیاز خالص آبیاری برنج و چای در سه ناحیه عمرانی شامل پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژیکی هستند که پس از آماده‌سازی برای یک دوره آماری ۲۶ ساله (۹۶-۱۳۷۱) به صورت روزانه به عنوان ورودی مدل جمع‌آوری شدند. همچنین بافت غالب خاک برای برنج، رسی سیلتی<sup>۱</sup> و برای چای لومی<sup>۲</sup> در نظر گرفته شد و از طرفی نیاز خالص آبیاری کل در ناحیه فومنات، مرکزی (G) و شرق گیلان (D) برای دو محصول برنج و چای، با توجه به تیسن‌بندی ایستگاه‌های هواشناسی و درصد سهیم بودن هر ایستگاه در هر ناحیه با جمع وزنی مقادیر، بر حسب متر مکعب بر هکتار محاسبه شده است. حداقل، حداکثر و میانگین نیاز خالص آبیاری بر حسب متر مکعب بر هکتار در دوره‌های رشد محصولات، در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد و شهریور به صورت ماهانه در جداول ۱ و ۲ تشریح شده است.

جدول ۱- میانگین، حداکثر و حداقل نیاز خالص آبیاری برنج به صورت ماهانه بر حسب متر مکعب بر هکتار

ماه	F	G	D
اردیبهشت	(۳۳۱، ۱۱۳۴، ۶۶۴)	(۴۴۱، ۱۰۶۴، ۷۳۹)	(۴۵۰، ۱۰۳۶، ۷۳۲)
خرداد	(۹۰۶، ۱۹۹۸، ۱۳۷۹)	(۹۶۵، ۱۸۰۰، ۱۴۰۴)	(۹۵۸، ۱۷۶۵، ۱۳۸۷)
تیر	(۸۹۴، ۱۹۶۶، ۱۴۶۷)	(۸۰۸، ۱۷۰۶، ۱۳۵۷)	(۸۰۷، ۱۶۸۸، ۱۳۴۳)
مرداد	(۰، ۰، ۰)	(۰، ۰، ۰)	(۰، ۰، ۰)

جدول ۲- میانگین، حداکثر و حداقل نیاز خالص آبیاری چای به صورت ماهانه بر حسب متر مکعب بر هکتار

ماه	F	G	D
اردیبهشت	(۸، ۱۰۱۸، ۲۶۸)	(۳۸، ۹۰۷، ۴۰۱)	(۴۴، ۱۰۳۳، ۳۸۶)
خرداد	(۰، ۱۲۰۸، ۶۱۰)	(۹۸، ۱۱۹۸، ۷۳۴)	(۱۰۰، ۱۱۸۱، ۷۴۱)
تیر	(۰، ۱۵۶۴، ۹۴۹)	(۰، ۱۲۳۱، ۷۶۵)	(۰، ۱۲۲۸، ۷۳۱)
مرداد	(۱۱۰، ۱۲۳۷، ۸۷۳)	(۰، ۱۲۲۷، ۷۹۶)	(۰، ۱۲۲۴، ۷۷۰)
شهریور	(۰، ۱۲۱۲، ۳۸۸)	(۰، ۹۷۱، ۲۶۳)	(۰، ۱۰۰۴، ۲۴۳)

### اجرای مدل بهینه‌سازی و بررسی مقادیر بهینه توابع هدف

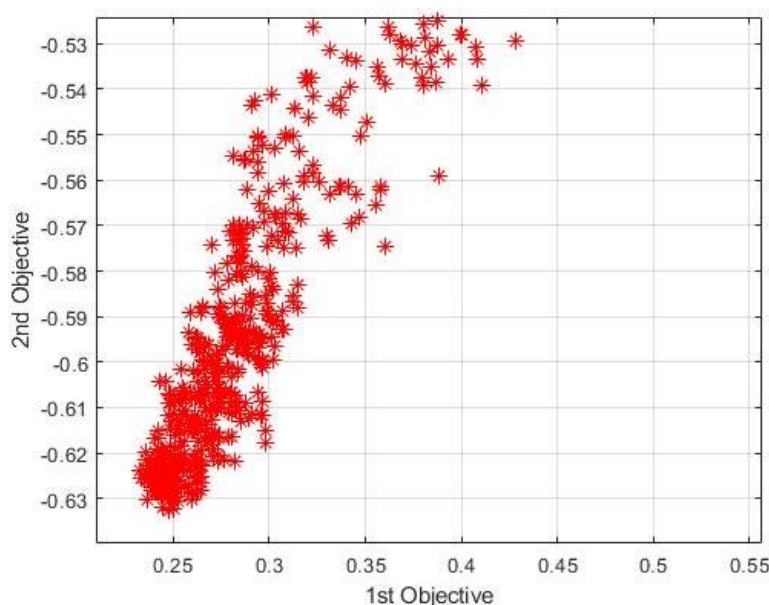
همانطور که ذکر شد، پارامترها و متغیرهای دارای عدم قطعیت در مدل بهینه‌سازی توسعه یافته در این مطالعه با رویکرد مجموعه‌های فازی به صورت قطعی تبدیل شد و در مدل بهینه‌سازی با توجه به کاربرد روش فازی برای مدل‌سازی داده‌هایی که با عدم قطعیت همراه هستند، ابتدا این پارامترها به صورت فازی تعریف می‌شود. در استفاده از رویکرد منطق فازی متغیرهای نیاز خالص آبیاری، حجم آب های

1 Clay Silt

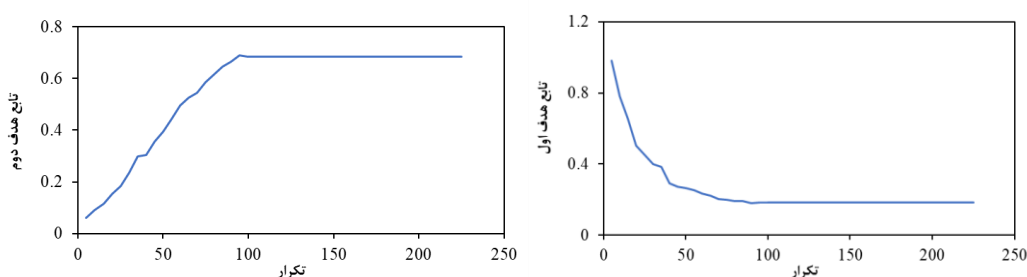
2 Loam

تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود، دبی مجاز برداشت آب زیرزمینی، حجم آب قابل استفاده رودخانه‌های در دسترس برای کشاورزی، به صورت مجموعه‌های فازی حد پایین<sup>۱</sup> و حد بالا<sup>۲</sup> برای آلفا-کات‌های ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ تعیین شد. سپس مجموعه‌های فازی در یک مدل برنامه‌ریزی چند هدفه توسعه می‌یابد.

پس از اجرای مدل بهینه‌سازی توسعه‌یافته در محیط نرم‌افزار MATLAB، مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه به صورت پارتو فرانت در فضای تابع هدف اول و دوم تشکیل می‌شود. مدل بهینه‌سازی توسعه‌یافته با دو هدف حداقل کردن کمبود آب کشاورزی و حداکثرسازی تولید انرژی برقی با رویکرد فازی برای حد بالا و حد پایین در آلفا-کات‌های ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ اجرا شد و مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه بدست آمد. جواب‌های بهینه شامل مقادیر توابع هدف و متغیرهای تصمیم، متشکل از حجم آب تخصیص یافته از طریق آب‌های سطحی و زیرزمینی بر حسب میلیون مترمکعب به صورت ماهانه است. جبهه پارتو جواب‌های بهینه و همگرایی رسیدن به جواب بهینه بعد از ۲۰۰ نسل (تکرار) در مدل بهینه‌سازی توسعه‌یافته با الگوریتم NSGA-II، در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴- جبهه پارتو در فضای تابع هدف اول و تابع هدف دوم



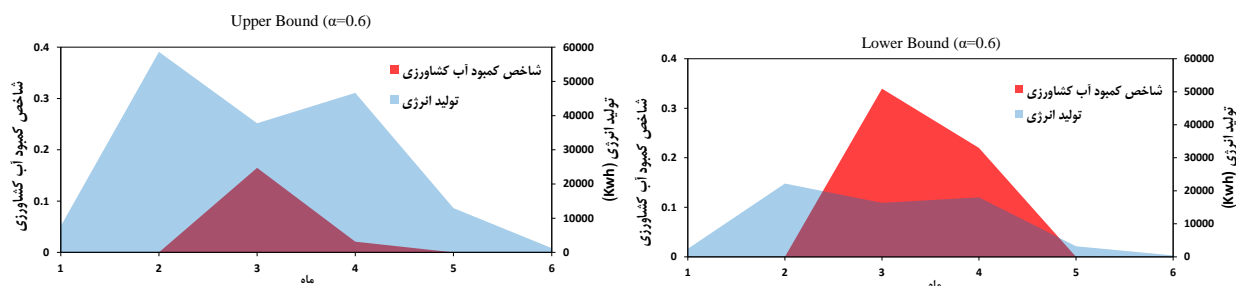
شکل ۵- همگرایی رسیدن به جواب بهینه در تابع هدف اول و دوم

پس از رسیدن به جبهه پارتو (شکل ۴)، با توجه به شرایط موجود در منطقه و درجه اهمیت هر تابع هدف در جهت مدیریت یکپارچه منابع آب برای تصمیم‌گیرندگان یک عضو از آن انتخاب می‌شود، از طرفی در اجرای الگوریتم در تکرارهای بالا، مقادیر تابع هدف نزدیک به هم بوده و با بررسی‌های انجام شده در تکرار ۲۰۰ام شرایط بهینگی این الگوریتم محقق شده است و انتخاب هر عضو به‌عنوان جواب بهینه تفاوت چندانی در تصمیم‌گیری ایجاد نمی‌کند و در این مطالعه مجموعه جوابی انتخاب شد که اولویت تابع هدف اول و دوم تقریباً برابر باشد.

به طور کلی، افزایش سطح اطمینان به معنای سطح رضایت بسیار بالاتر از محدودیت‌ها است، در نتیجه احتمال کمتری را برای

نقض محدودیت‌ها ایجاد می‌کند. این امر از نظر تئوری منجر به افزایش سخت‌گیری برای محدودیت‌های سیستم می‌شود و در نهایت منجر به یک فضای تصمیم‌گیری محدود می‌شود. بنابراین، سطح اطمینان با ترجیحات ریسک یک مدیر مرتبط است و بنابراین یک ریسک قابل قبول و مناسب برای ایجاد راه حل‌های بهینه برای تصمیم‌گیری دارای اهمیت است. در ارزیابی منطق فازی با توجه به نظر Fiedler et al., 2006، هر سطح اطمینان از دو سناریو حداقل و حداکثر قابلیت اطمینان تشکیل شده است و در تحلیل نتایج بهینه بدست آمده هر دو سناریو حداقل و حداکثر حد بالا و پایین مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای مشاهده عملکرد توابع هدف در ۶ ماه نخست سال، شکل ۶ مقادیر تابع هدف یعنی شاخص کمبود آب کشاورزی و تولید انرژی برقایی ماهانه بر حسب کیلووات-ساعت را به عنوان نمونه برای  $\alpha - cut = 0.6$  نشان می‌دهد. مقادیر توابع هدف برای مجموعه‌های فازی در حد پایین و حد بالا متفاوت است، اما به طور کلی با کاهش تولید انرژی برقایی و افزایش شاخص کمبود کشاورزی در کل دوره زمانی همراه است. تولید انرژی برقایی با افزایش آب ورودی به توربین سد سفیدرود و وجود بارش‌ها در فصل بهار قابل توجه است و از آنجائی که هدف مدل بهینه‌سازی حداکثر کردن میزان انرژی برقایی و حداقل کردن کمبود می‌باشد، بنابراین نتایج بهینه در یک راستا است به این معنی که با افزایش شاخص کمبود آب کشاورزی، انرژی برقایی کاهش می‌یابد.



شکل ۶- تغییرات توابع هدف مدل بهینه‌ساز دو هدفه با رویکرد مجموعه‌های فازی برای حد پایین

با توجه به نمودارهای حد بالا و پایین  $\alpha - cut = 0.6$ ، بیشترین انرژی تولیدی در ماه اردیبهشت اتفاق می‌افتد، به طوری که حد بالا و پایین تولید انرژی در این ماه به ترتیب  $5/8 \times 10^4$  و  $2/2 \times 10^4$  کیلووات-ساعت بدست آمد. حداکثر مقادیر تولید انرژی از ماه اردیبهشت تا تیر اتفاق می‌افتد. بررسی مقادیر کمبود آب کشاورزی در نمودارهای شکل ۶ نشان می‌دهد که در ماه اردیبهشت مقدار شاخص کمبود حداقل است، اما در ماه‌های خرداد و تیر به دلیل افزایش مقادیر نیازهای آبی کشاورزی و پاسخگو نبودن منابع آب موجود، کمبود آب برای تامین نیازهای آبیاری وجود دارد و مقدار شاخص کمبود در حد بالا و پایین  $\alpha - cut = 0.6$  در ماه خرداد به بیشترین مقدار خود می‌رسد. مقایسه مقادیر حد بالا و پایین شاخص کمبود آب در دو ماه خرداد و تیر نشان می‌دهد که مقدار شاخص کمبود در حد پایین به ترتیب تقریباً  $2/1$  و  $1/6$  برابر حد بالای این  $\alpha - cut$  می‌باشد.

میزان مصرف انرژی در ماه‌های گرم سال (خرداد تا مرداد) افزایش می‌یابد بنابراین همزمان با افزایش حجم خروجی سد برای تامین نیازهای آبیاری کشاورزی می‌توان در این ماه‌ها میزان تولید انرژی برق از طریق سد برقایی را افزایش داد تا در ساعات پیک مصرف انرژی، برق وارد مدار برق‌رسانی شود. علاوه بر این، انرژی برقایی به عنوان انرژی تجدیدپذیر محسوب می‌شود، بنابراین بهتر است در برنامه‌ریزی‌های آینده برنامه‌ریزان سد به نحوی آب خروجی سد را مدیریت کنند که بیشترین تولید انرژی برقایی را داشته باشند.

### تغییرات میزان آب مورد تقاضا و آب تخصیص یافته در نواحی عمرانی

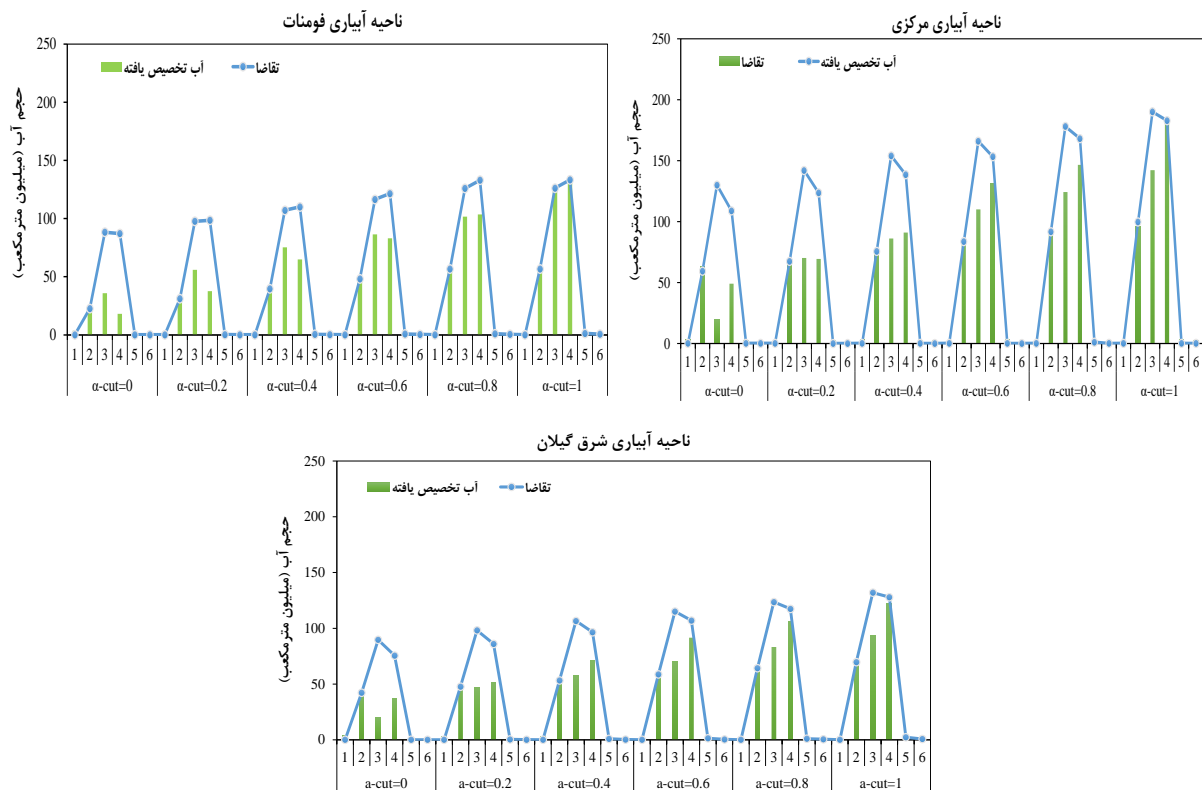
یکی از مهم‌ترین مراحل در طراحی سامانه‌های فازی، بهینه‌سازی آن است. یکی از بهترین روش‌های بهینه‌سازی در چنین شرایطی استفاده از روش بهینه‌سازی چند هدفه می‌باشد که با استفاده از الگوریتم NSGA-II با روش جستجوی تصادفی در فضاهای بسیار وسیع و بزرگ در نهایت بر اساس فرآیند تکامل تدریجی و اصول وراثت و ساختار ژن‌ها و کروموزوم‌ها به سمت یک راه‌حل بهینه همگرا می‌شود. بنابراین می‌توان با کمی‌سازی عدم قطعیت‌ها در مدل بهینه‌ساز توسعه‌یافته در توابع عضویت فازی مثلثی، سطح اطمینان یا آلفا-کات مناسب را انتخاب کرد.

در بررسی و تحلیل نمودارها که مقادیر پارامترهای مهم در قضاوت بهترین تصمیم در مدیریت برنامه‌ریزی آینده آورده شده است به دلیل اینکه برنامه‌ریزی منابع آبی در هر یک از این نواحی به صورت جداگانه نیست و کل شبکه آبیاری و زهکشی در نظر گرفته می‌شود.

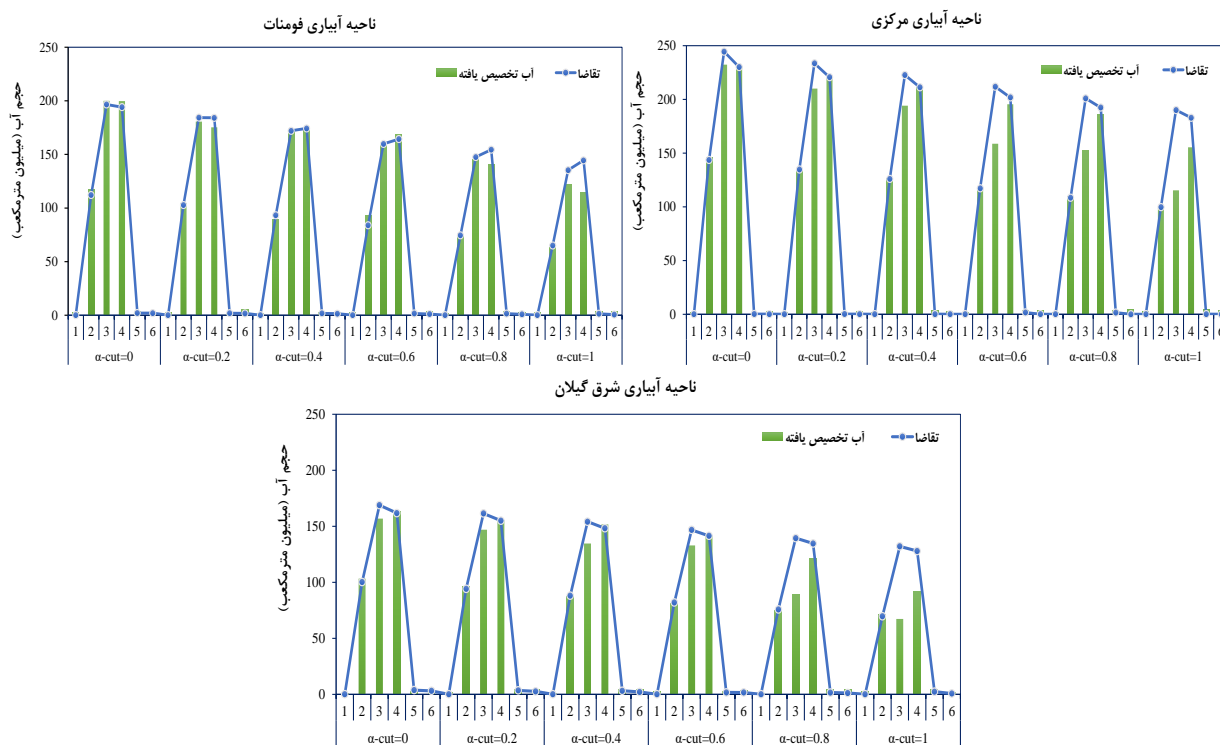


بنابراین نتایج بهینه انتخاب شده در سه ناحیه آبیاری F، G و D از جواب بهینه کل شبکه بدست آمده است. بنابراین سیاستی انتخاب می‌شود که در کل بهترین جواب را در کل منطقه مورد مطالعه به همراه داشته باشد. هدف این مطالعه تنها نمایش اثرات اجرای هر یک از سیاست‌ها در منطقه است و انتخاب بهترین جواب به عهده تصمیم‌گیرندگان و مدیران منطقه است که با لحاظ نمودن شرایط منطقه تصمیم‌گیری می‌کنند.

با توجه به نتایج بدست آمده، مقادیر بهینه آب تخصیص یافته و مقادیر تقاضای آب در حد بالا و پایین سطوح اطمینان آلفا-کات‌های صفر تا ۱، در فواصل ۰/۲ در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. از نظر تئوری، سطح اطمینان به معنای درجه رضایت متناظر عدم قطعیت فازی است که اساساً می‌تواند نگرش‌های ذهنی مدیران را منعکس کند و به‌طور مستقیم بر نتایج تأثیر بگذارد. با توجه به نمودارهای ناحیه آبیاری فومنات، مرکزی و شرق گیلان (شکل ۷)، در حد پایین سطح اطمینان‌ها با افزایش آلفا-کات‌ها، مقادیر کمبود آب کاهش می‌یابد و بیشترین کمبودها در  $\alpha\text{-cut} = 0$  مشاهده شده است. به همین ترتیب در حد بالای سطح اطمینان‌ها با افزایش آلفا-کات‌ها مقادیر کمبود آب در هر سه ناحیه آبیاری افزایش می‌یابد، به طوری که بیشترین کمبودها در  $\alpha\text{-cut} = 1$  مشاهده شده است (شکل ۸). با مقایسه دو شکل ۷ و ۸، این نتیجه برداشت می‌شود که مقادیر کمبودهای آب در حد پایین سطح اطمینان‌ها بیشتر از حد بالا است، علت این پدیده را می‌توان به این صورت توجیه کرد که اختلاف حد بالا و پایین مقادیر تقاضای آبیاری در سطح اطمینان‌های مختلف نسبت به اختلاف مقادیر حد بالا و پایین منابع آب قابل دسترس کمتر است. Zhang et al., 2018 در بررسی نتایج مطالعات خود که در مورد بررسی روش مجموعه‌های فازی در بهینه‌سازی تخصیص آب بود نیز به این نتیجه رسیدند که مزایای سیستم در سطح اطمینان‌های بالاتر، کمتر است. همچنین با توجه به شکل‌های ۷ و ۸، در حد پایین سطح اطمینان‌ها، بیشترین کمبودهای در ماه‌های خرداد و تیر اتفاق می‌افتد و از بین نواحی آبیاری، ناحیه آبیاری مرکزی نسبت به دو ناحیه آبیاری دیگر کمبودهای شدیدتری را تجربه می‌کند. علی‌رغم کمتر بودن مقادیر کمبود در حد بالای سطح اطمینان‌ها نسبت به حد پایین، مقادیر کمبود حد بالا در ناحیه آبیاری مرکزی بیشتر از دو ناحیه آبیاری دیگر است. در ناحیه آبیاری فومنات تا سطح اطمینان  $\alpha\text{-cut} = 0.6$  نیاز آبیاری به طور کامل تأمین شده و با افزایش آلفا-کات‌ها و افزایش نیاز آبی مقداری کمبود آب به همراه است.



شکل ۷- نتایج مدل بهینه ساز با رویکرد فازی برای حد پایین در آلفاکات‌های مختلف برای نواحی آبیاری فومنات، مرکزی و شرق گیلان (بر حسب میلیون متر مکعب)



شکل ۸- نتایج مدل بهینه‌سازی با رویکرد فازی برای حد بالا در آلفاکات‌های مختلف برای نواحی آبیاری فومنات، مرکزی و شرق گیلان (بر حسب میلیون متر مکعب)

نتایج نشان می‌دهد که سطوح مختلف اطمینان با راه‌حل‌های بهینه متفاوتی همراه است که می‌تواند به مدیران کمک کند تا راه‌حل‌های مورد نظر را بر اساس ترجیحات و انتخاب‌های ذهنی خود تشخیص دهند. در واقع، تعامل بین متغیرهای تصمیم‌گیری می‌تواند منعکس‌کننده عدم قطعیت و پیچیدگی سیستم‌های کشاورزی باشد. بنابراین، مهم است که مدیران به عدم قطعیت‌ها و تعاملات متغیرها پی ببرند و تصمیم نهایی را بگیرند.

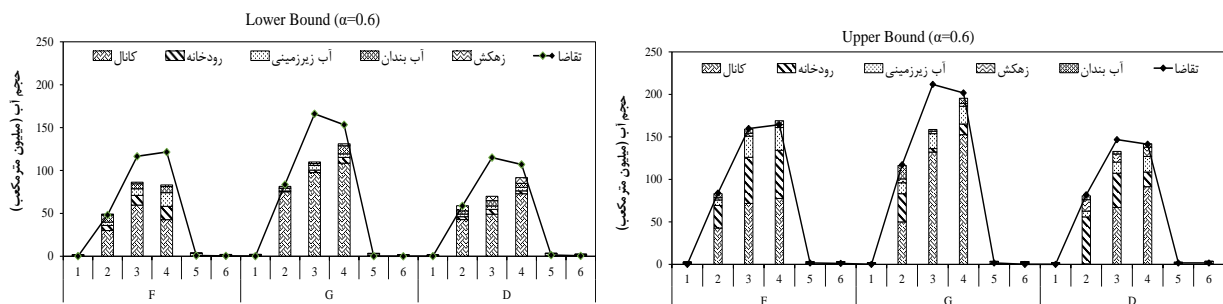
#### میزان مشارکت منابع آب تخصیص یافته حاصل از نتایج مدل بهینه‌سازی به روش فازی

در ادامه، به دلیل اهمیت میزان برداشت آب سطحی و زیرزمینی، نوع منبع آب مورد استفاده در میزان آب تخصیص یافته برای تأمین نیاز آبی در هر یک از نواحی آبیاری سه‌گانه مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۹ برای حد بالا و پایین سطح اطمینان مربوط به آلفا-کات ۰/۶ آورده شده است. در این شکل‌ها میزان مشارکت هر یک از منابع موجود از جمله آب دریافتی از کانال شبکه آبیاری و زهکشی، رودخانه، آب‌بندان، زهکش و منابع آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به مقایسه میانگین درصد تأمین نیاز آبی از طریق منابع آبی مختلف در هر یک از نواحی آبیاری، در ناحیه آبیاری فومنات کل حجم آب تخصیص یافته در حد بالای سطح اطمینان  $\alpha\text{-cut} = 0.6$ ، ۴۲۰/۶ میلیون مترمکعب در طول دوره فصل زراعی بوده که ۳۴/۶ درصد آن از طریق آب دریافتی از سد سفیدرود، ۲۹/۲ درصد آن از طریق آب زیرزمینی، ۲۲/۳ درصد آن از طریق رودخانه‌های محلی، ۱۰/۸ درصد آن از زهکش‌ها و ۳/۱ درصد آن از طریق آب‌بندان‌ها تأمین می‌شود. کل حجم آب تخصیص یافته در حد پایین این سطح اطمینان، ۲۲۶/۵ میلیون مترمکعب در طول دوره فصل زراعی است که ۳۳/۹ درصد آن از طریق آب دریافتی از سد سفیدرود، ۲۵/۱ درصد آن از طریق آب زیرزمینی، ۱۷/۴ درصد آن از طریق رودخانه‌های محلی، ۱۳/۰۳ درصد آن از زهکش‌ها و ۱۰/۶ درصد آن از طریق آب‌بندان‌ها تأمین می‌شود. در ناحیه آبیاری مرکزی نیز کل حجم آب تخصیص یافته در حد بالای سطح اطمینان  $\alpha\text{-cut} = 0.6$ ، ۴۷۹/۸ میلیون مترمکعب در طول دوره فصل زراعی بوده که ۴۷/۰۳ درصد آن از طریق آب دریافتی از سد سفیدرود، ۲۰/۷ درصد آن از طریق آب زیرزمینی، ۱۵/۷ درصد آن از طریق رودخانه‌های محلی، ۹/۴ درصد آن از آب‌بندان‌ها و ۷/۱ درصد آن از طریق زهکش‌ها تأمین می‌شود. کل حجم آب تخصیص یافته در حد پایین این سطح اطمینان، ۳۳۰/۱ میلیون مترمکعب در طول دوره فصل زراعی است که ۵۸/۳ درصد آن از طریق آب دریافتی از سد سفیدرود، ۱۳/۳ درصد آن از طریق زهکش‌ها، ۱۳/۲ درصد آن از طریق آب زیرزمینی، ۹/۱ درصد آن از رودخانه‌های محلی و ۶/۱

درصد آن از طریق آب بندان‌ها تامین می‌شود. همچنین، در ناحیه آبیاری شرق گیلان نیز کل حجم آب تخصیص یافته در حد بالای سطح اطمینان  $\alpha\text{-cut} = 0.6$ ، ۳۶۴/۵ میلیون مترمکعب در طول دوره فصل زراعی بوده که ۲۸/۰۳ درصد آن طریق آب دریافتی از سد سفیدرود، ۲۶/۰۱ درصد آن از طریق رودخانه‌های محلی، ۲۱/۸ درصد آن از طریق آب زیرزمینی، ۱۵/۷ درصد آن از طریق رودخانه‌های محلی، ۱۵/۵ درصد آن از طریق زهکش‌ها و ۸/۷ درصد آن از آب بندان‌ها تامین می‌شود. کل حجم آب تخصیص یافته در حد پایین این سطح اطمینان، ۲۲۷/۷ میلیون مترمکعب در طول دوره فصل زراعی است که ۴۹/۲ درصد آن طریق آب دریافتی از سد سفیدرود، ۲۰/۷ درصد آن از طریق آب زیرزمینی، ۱۱/۷ درصد آن از طریق آب بندان‌ها، ۱۰/۷ درصد آن از رودخانه‌های محلی و ۷/۶ درصد آن از طریق زهکش‌ها تامین می‌شود. مقایسه سهم هر یک از منابع آبی موجود در تامین نیاز آبیاری هر یک از نواحی آبیاری نشان می‌دهد، آب دریافتی از سد سفیدرود بیشترین سهم را در تامین نیازهای آبی دارد به طوریکه، آب دریافتی از سد سفیدرود در ناحیه آبیاری مرکزی نسبت به دو ناحیه دیگر، بیشترین سهم را در تامین نیازهای آبی دارد. علاوه بر این، با توجه به شکل ۹، در ناحیه آبیاری شرق گیلان (D)، در ماه اردیبهشت تخصیص از آب رودخانه در حد بالای سطح اطمینان  $\alpha\text{-cut} = 0.6$ ، بسیار بیشتر از آب دریافتی از کانال است که این به دلیل قابل توجه بودن حجم آب قابل دسترس از طریق رودخانه نسبت به کانال در این ماه است. به همین دلیل در حد بالای این سطح اطمینان سهم آب دریافتی از سد سفیدرود اختلاف قابل توجهی با مقدار متناظر آن در حد پایین این سطح اطمینان دارد.

سهم رودخانه‌ها در تامین نیازهای آبی در ناحیه آبیاری فومنات نسبت به سایر نواحی آبیاری بیشتر است. در این ناحیه، محدودیت ظرفیت تونل انتقال آب فومن و افزایش مساحت سطح زیرکشت برنج (اراضی شالیزاری نو آباد) باعث عدم تامین کامل آب اراضی شالیزاری با کانال‌های آبیاری موجود شده است. بنابراین رودخانه‌های محلی از جمله شاخرز، بهمبر، ماسوله رودخان، مرغک و قلعه‌رودخان و ... نقش مهمی در تامین آب مورد نیاز برای کشت برنج در این ناحیه آبیاری دارند.



شکل ۹- میزان مشارکت منابع تخصیص یافته بعنوان متغیرهای تصمیم برای تامین تراز آبی چای و برنج حاصل نتایج مدل بهینه‌ساز برای حد پایین روش فازی برای آلفا-کات ۰/۶ (بر حسب میلیون متر مکعب)

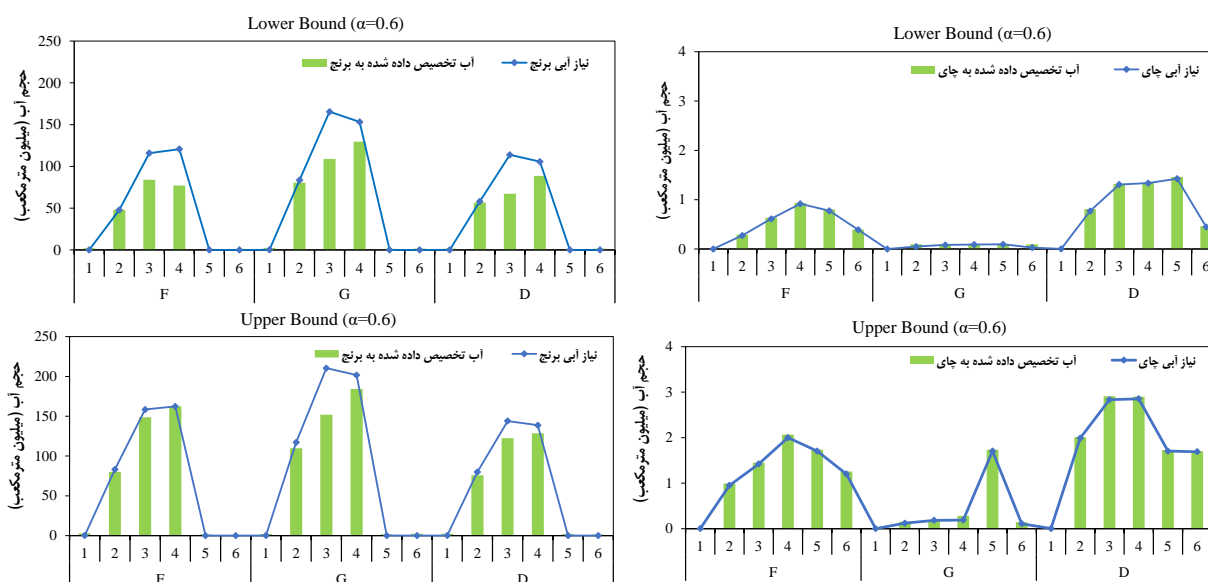
### میزان نیاز و تخصیص آب برای گیاه برنج و چای حاصل از نتایج مدل بهینه‌ساز

از جمله اهداف مدل توسعه یافته تخصیص بهینه منابع آب زیرزمینی برای تامین نیاز آبی چای و سایر محصولات است. در این مطالعه در برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب در نواحی آبیاری شبکه آبیاری زهکشی سفیدرود، تامین نیاز آبی برنج از طریق خروجی سد سفیدرود و رودخانه‌های محلی، آب بازگشتی از زهکش‌ها، آبندان و در شرایط کمبود از آب زیرزمینی بهره‌برداری می‌شود و تامین نیاز آبی چای تنها از طریق برداشت از آب زیرزمینی انجام می‌شود.

مقایسه مقادیر آب تخصیص یافته و نیاز آبی محصولات برنج و چای در حد بالا و پایین سطح اطمینان  $\alpha\text{-cut} = 0.6$  در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مقایسه نمودارهای حد بالا و پایین محصول چای نشان می‌دهد که کمبود تامین نیاز آبی در این گیاه مشاهده نمی‌شود که این می‌تواند به دلیل نیاز آبی پایین چای و سطح زیرکشت پایین این محصول باشد. البته لازم به ذکر است که محصول چای در ناحیه شرق گیلان، با سطح زیر کشت ۱۵۵۳ هکتار و پس از آن ناحیه فومنات با سطح زیر کشت ۸۴۱/۶ هکتار مهم‌ترین نواحی کشت چای در کشور بوده و در راستای مدیریت پایدار کشاورزی در این مطالعه سعی شده با توجه به در نظر گرفتن ریسک‌پذیری‌های مختلف تصمیم‌گیرندگان، تامین کامل نیاز آبی چای در اولویت باشد.

مقایسه نمودارهای حد بالا و پایین محصول برنج نشان می‌دهد که به طور کلی کمبود آب در حد پایین سطح اطمینان  $\alpha\text{-cut} = 0.6$  بیشتر از حد بالای این سطح اطمینان است. مقادیر کمبود آب در حد پایین این سطح اطمینان در هر سه ناحیه آبیاری اتفاق می‌افتد و

بیشترین کمبودها در ماه‌های خرداد و تیر در هر سه ناحیه آبیاری اتفاق می‌افتد. مقایسه کمبودهای این سه ناحیه نشان می‌دهد که حداکثر کمبود در تامین نیازهای آبی در ماه خرداد و در ناحیه آبیاری مرکزی به مقدار ۵۶/۶ میلیون مترمکعب است. مقایسه کمبودها در حد بالای سطح اطمینان  $\alpha\text{-cut} = 0.6$  نیز نشان می‌دهد که حداکثر کمبود آب در ماه خرداد در ناحیه آبیاری مرکزی به مقدار ۵۸/۶ میلیون مترمکعب اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است که در ناحیه مرکزی گیلان به دلیل بالا بودن سطح زیر کشت برنج، آب مورد تقاضا در این ناحیه نیز بیشتر است.



شکل ۱۰- میزان نیاز و تخصیص آب برای گیاه برنج حاصل از نتایج مدل بهینه‌ساز در رویکرد فازی حد بالا برای سطح آلفا-کات ۰/۶ (بر حسب میلیون متر مکعب)

با توجه به اینکه در این مطالعه، دو هدف حداکثر سازی تولید انرژی برقایی و حداقل کردن کمبود آب کشاوری همزمان رخ می‌دهد، پس مدیران و برنامه‌ریزان با در نظر گرفتن نیاز خالص آبی برنج می‌توانند برای آب تخصیص داده شده از طریق آب‌های سطحی از جمله کانال‌ها، رودخانه‌های محلی و آب برگشتی زهکش‌ها در طول دوره رشد برنامه‌ریزی کرده تا با کمبود آب در ماه‌های مهم سال از جمله اردیبهشت، خرداد و تیر مواجه نشده و به بیشترین تولید انرژی در این ماه‌ها دست یابند تا از این طریق نیز موجب کاهش اثرات مخرب زیست محیطی گردند و همچنین کشاورزان ناچار به برداشت غیر مجاز از آب‌های زیرزمینی در نتیجه افت سطح ایستابی چاه‌ها و کمبود آب در کشت چای دچار نشوند. بنابراین تخصیص بهینه آب با دیدگاه همبست آب و انرژی همراه با راندمان بالا می‌تواند توسعه سریع بخش‌های مختلف مربوطه و پایداری اجتماعی را تضمین کند (Martinez et al., 2018).

## نتیجه‌گیری

مدیریت یکپارچه منابع آبی در استان گیلان، به ویژه در نواحی تحت پوشش شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود، برای تأمین نیاز آبی محصولات کشاورزی به خصوص برنج از اهمیت بالایی برخوردار است. این مطالعه با استفاده از مدل توسعه‌یافته فازی، به بررسی عدم قطعیت‌ها در برنامه‌ریزی مدیریت همبست آب، غذا و انرژی در نواحی عمرانی فومنات، مرکزی و شرق گیلان می‌پردازد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تخصیص بهینه آب تحت تأثیر سطوح مختلف اطمینان قرار دارد و مقادیر کمبود آب به طور قابل توجهی در سطوح مختلف آلفا-کات متفاوت است. با افزایش سطح اطمینان، کمبود آب در نواحی مختلف تغییر می‌کند و مشخص می‌شود که در سطح اطمینان پایین، کمبود آب کاهش می‌یابد، در حالی که در سطح اطمینان بالا، این کمبود افزایش می‌یابد. بررسی‌ها همچنین حاکی از آن است که ناحیه آبیاری مرکزی بیشترین کمبود آب را در مقایسه با سایر نواحی تجربه می‌کند. به علاوه، نهایی‌ترین تصمیم‌گیری‌ها باید با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و تعاملات متغیرها صورت گیرد تا به بهینه‌ترین نتایج دست یابند. به طور کلی، این تحلیل می‌تواند به مدیران در شناسایی و اتخاذ تصمیمات صحیح بر اساس شرایط متغیر کمک کند.

همچنین، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که منابع آبی مختلف نقش حائز اهمیتی در تأمین نیازهای آبیاری در نواحی آبیاری سه‌گانه گیلان دارند. آب دریاقتی از سد سفیدرود، به عنوان اصلی‌ترین منبع تأمین آب، بیشترین سهم را در هر سه ناحیه آبیاری ایفا می‌کند، به ویژه در ناحیه آبیاری مرکزی که وابستگی بیشتری به این منبع دارد. همچنین، در ناحیه آبیاری فومنات، سهم رودخانه‌ها در تأمین آب نسبت به سایر نواحی بیشتر است، که به دلیل محدودیت‌های فنی در سیستم انتقال آب و افزایش سطح زیرکشت برنج، اهمیت بیشتری پیدا کرده است. این موضوع به این معناست که بهینه‌سازی مدیریت منابع آبی و توجه به قابلیت‌های هر یک از منابع می‌تواند به تأمین بهتر نیازهای آبیاری و کاهش کمبود آب کمک کند. به طور کلی، تأمین نیازهای آبیاری در این نواحی به تعامل میان منابع مختلف آبی بستگی دارد و مدیریت صحیح این منابع می‌تواند به افزایش بهره‌وری و پایداری در کشاورزی مطلوب منجر شود. نتایج مقایسه نیاز آبی برنج و چای در سطوح اطمینان مختلف، حاکی از آن است که کمبود آب در تأمین نیازهای آبی برنج به ویژه در ماه‌های خرداد و تیر، قابل توجه است، به خصوص در ناحیه آبیاری مرکزی با سطح زیرکشت بیشتر، بحرانی‌تر می‌شود. در حالی که برای کشت چای، به دلیل سطح زیرکشت کمتر و نیاز آبی پایین، کمبودی مشاهده نمی‌شود.

به منظور مدیریت بهینه منابع آب و انرژی، پیشنهاد می‌شود که مدیران با در نظر گرفتن نیازهای آبی و تولید انرژی، برنامه‌ریزی‌های لازم را برای تخصیص آب‌های سطحی انجام دهند، تا در ماه‌های بحرانی اردیبهشت، خرداد و تیر، از بروز کمبود آب جلوگیری کنند. این امر نه تنها به افزایش تولید انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک می‌کند، بلکه مانع از برداشت غیرمجاز از آب‌های زیرزمینی توسط کشاورزان می‌شود. در نهایت، تخصیص بهینه آب، انرژی و غذا می‌تواند به توسعه پایدار بخش‌های کشاورزی و اجتماعی کمک کرده و کمبود منابع را به حداقل برساند. مدل توسعه یافته در این مطالعه، با توجه به تغییرات سیستم و نگرش‌های مدیران، اطلاعات بیشتری برای تصمیم‌گیری در مدیریت یکپارچه آب فراهم می‌آورد. برنامه‌ریزی در سطوح اطمینان پایین‌تر می‌تواند منجر به مزایای بیشتری شود، اما با ریسک بیشتر همراه است و بالعکس. لذا، بررسی عدم قطعیت‌ها در بهینه‌سازی مدیریت آب، بر مدل‌های قطعی برتری دارد و می‌تواند به بهبود تبادل بین اقتصاد، محیط زیست و قابلیت اطمینان سیستم کمک کرده و راه‌حل‌های مؤثرتری برای تخصیص آب ارائه دهد.

### "هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

### منابع

- بی نام (۱۳۸۳)، «گزارش مطالعات بهسازی شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود گیلان»، شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان، مهندسین مشاور پندام، جلد دهم.
- سرگزی، علیرضا. (۱۳۹۶). برنامه ریزی و تخصیص بهینه منابع آب در بخش کشاورزی با استفاده از رهیافت برنامه‌ریزی فازی (مطالعه موردی شهرستان صومعه سرا). تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳(۲)، ۸۱-۷۴.
- اسعدی مهربانی، مژگان؛ بنی حبیب، محمد ابراهیم و روزبهانی، عباس. (۱۳۹۷). مدل برنامه ریزی خطی فازی برای بهینه سازی الگوی کشت در حوضه ی زربینه رود. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴(۱)، ۲۴-۱۳.

### REFERENCES

- Allen, R.G., Clemmens, A.J., Burt, C.M., Solomon, K., & O'Halloran, T. (2005). Prediction accuracy for projectwide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 131 (1):24. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:1\(24\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(24)).
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*, FAO, Rome, Italy.
- Allen, R.G., Wright, J.L., Pruitt, W.O., Pereira, L.S., & Jensen, M.E. (2007). Water requirements. In G.J. Hoffman, R.G. Evans, M.E. Jensen, D.L. Martin, R.L. Elliot (Eds.), *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*. (pp. 208–288). St Joseph, MI: ASABE.
- Anonymous. (2004). Rehabilitation Studies of the Sefidroud irrigation and drainage network, Gilan. Gilan Regional Water Authority, Pandam Consulting Engineers, Volume 10. (In Persian)
- Asaadi Mehrabani, A., Banihabib, M.E., & Roozbahany, A. (2018). Fuzzy Linear Programming Model for the Optimization of Cropping Pattern in Zarrinehroud Basin. *Iran-Water Resources Research*, 14(1), 13-24. (In Persian).
- Arizpe, N., Giampietro, M., Ramos-Martin, J. (2011). Food security and fossil energy dependence: An international comparison of the use of fossil energy in agriculture (1991–2003). *Critical Reviews in Plant*

- Sciences*, 30, 45–63. <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.554352>.
- Asaadi Mehrabani, M., Banihabib, M.E., & Roozbahany, A. (2018). Fuzzy Linear Programming Model for the Optimization of Cropping Pattern in Zarrinehroud Basin. *Iran-Water Resources Research*, 14(1), 13-24.
- Bhatarai, N., Pollack, A., Lobell, D.B., Fishman, R., Singh, B., Dar, A., & Jain, M. (2021). The impact of groundwater depletion on agricultural production in India. *Environmental Research Letters*, 16 (8), 085003 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac10de>.
- Buko, J., Duda, J., & Makowski, A. (2021). Food Production Security in Times of a Long-Term Energy Shortage Crisis: The Example of Poland. *Energies*, 14, 4725. <https://doi.org/10.3390/en14164725>.
- D'Odorico, P., Davis, K.F., Rosa, L., Carr, J.A., Chiarelli, D., Dell'Angelo, J., Gephart, J., MacDonald, G.K., Seekell, D.A., Suweis, S., & Rulli, M.C. (2018). The global food-energy-water nexus. *Reviews of Geophysics*, 56, 456–531. <https://doi.org/10.1029/2017RG000591>.
- Pirmoradian, N., & Davatgar, N. (2019). Simulating the effects of climatic fluctuations on rice irrigation water requirement using AquaCrop. *Agricultural water management* 213, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.003>.
- Pirmoradian, N. (2018). Designing and creating the native system of water requirement of agricultural and garden plants in different climates of Iran. *Soil and Water Research Institute, Agricultural Research and Training Organization, Ministry of Agriculture*. (In Persian)
- Daher, B., Lee, S.H., Kaushik, V., Blake, J., Askariyeh, M.H., Shafiezadeh, H., Zamaripa, S., & Mohtar, R.H. (2019). Towards bridging the water gap in Texas: a waterenergy-food nexus approach. *Science of The Total Environment*, 647, 449–463. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.398>.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6, 182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>.
- Fernandez, J.E., Alcon, F., Diaz-Espejo, A., Hernandez-Santana, V., & Cuevas, M.V. (2020). Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: a case study of a super high density olive tree orchard. *Agricultural Water Management*, 237, 106074. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106074>.
- Fiedler, M., Nedoma, J., Ramík, J., & Rohn, J. (2006). *Linear Optimization Problems with Inexact Data*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/0-387-32698-7>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2017). *Water for Sustainable Food and Agriculture: A report produced for the G20 Presidency of Germany*. <https://www.fao.org/3/i7959e/i7959e.pdf>.
- Georgiou, S., Acha, S., Shah, N., & Markides, C.N. (2018). A generic tool for quantifying the energy requirements of glasshouse food production. *Journal of Cleaner Production*, 191, 384–399. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.278>.
- Ghisellini, P., Setti, M., & Ulgiati, S. (2016). Energy and land use in worldwide agriculture: An application of life cycle energy and cluster analysis. *Environment, Development and Sustainability*, 18, 799–837. <https://doi.org/10.1007/s10668-015-9678-2>.
- Gholizadeh, H., Fazlollahtabar, H., & Khalilzadeh, M. (2020). A robust fuzzy stochastic programming for sustainable procurement and logistics under hybrid uncertainty using big data. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120640 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120640>.
- Guan, X., Mascaro, G., Sampson, D., & Maciejewski, R. (2020). A metropolitan scale water management analysis of the food-energy-water nexus. *Science of The Total Environment*, 701, 134478 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134478>.
- IEA. (2016). *World Energy Outlook*. International Energy Agency., Paris, France.
- Ji, L., Zhang, B., Huang, G., & Lu, Y. (2020). Multi-stage stochastic fuzzy random programming for food-water-energy nexus management under uncertainties. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104665 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104665>.
- Ji, L., Zhang, B., Huang, G., & Lu, Y. (2020). Multi-stage stochastic fuzzy random programming for food-water-energy nexus management under uncertainties. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104665. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104665>.
- Jin, S.W., Li, Y.P., & Huang, G.H. (2017). An interactive optimization model for energy systems planning associated with clean-energy development under uncertainty. *International Journal of Energy Research*, 41, 482–501. <https://doi.org/10.1002/er.3628>.
- Li, M., Fu, Q., Singh, V.P., Ji, Y., Liu, D., Zhang, C.L., & Li, T.X. (2019). An optimal modelling approach for managing agricultural water-energy-food nexus under uncertainty. *Science of The Total Environment*,





- 651, 1416–1434. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.291>.
- Li, Y.P., & Huang, G.H. (2011). Planning Agricultural Water Resources System Associated With Fuzzy and Random Features. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 47(4), 841-860. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00558.x>.
- Liu, D.D., Guo, S.L., Liu, P., Xiong, L.H., Zou, H., Tian, J., Zeng, Y.J., Shen, Y.J., & Zhang, J. Y. (2019). Optimisation of water-energy nexus based on its diagram in cascade reservoir system. *Journal of Hydrology*, 569, 347–358. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.010>.
- Liu, J., Li, Y., Huang, G., Suo, C., & Yin, S. (2017). An Interval Fuzzy-Stochastic Chance-Constrained Programming Based Energy-Water Nexus Model for Planning Electric Power Systems. *Energies*, 10, 1914. doi:10.3390/en10111914.
- Liu, J., Mooney, H., Hull, V., Davis, S.J., Gaskell, J., Hertel, T., Lubchenco, J., Seto, K.C., Gleick, P., Kremen, C., & Li, S.X. (2015). Systems integration for global sustainability. *Science*, 347 (6225), 1258832. DOI: 10.1126/science.1258832.
- Lv, J., Li, Y.P., Shan, B.G., Jin, S.W., & Suo, C. (2018). Planning energy-water nexus system under multiple uncertainties—A case study of Hebei province. *Applied Energy*, 229, 389–403. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.010>.
- Namany, S., Al-Ansari, T., & Govindan, R. (2019). Optimisation of the energy, water, and food nexus for food security scenarios. *Computers & Chemical Engineering*, 129, 106513. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106513>.
- Opejin, A.K., Aggarwal, R.M., White, D.D., Jones, J.L., Maciejewski, R., Mascaro, G., & Sarjoughian, H.S. (2020). A bibliometric analysis of food-energy-water nexus literature. *Sustainability*, 12 (3), 1112. <https://doi.org/10.3390/su12031112>.
- Perrone, D., Murphy, J., & Hornberger, G.M. (2011). Gaining perspective on the water-energy nexus at the community scale. *Environmental Science & Technology*, 45 (10), 4228–4234. <https://doi.org/10.1021/es103230n>.
- Pyrce, R. (2004). Hydrological low flow indices and their uses.
- Raes, D. (1982). A summary simulation model of the water budget of a cropped soil (budget). *Dissertationes de Agricultura (Belgium) no 122*.
- Ren, C., Guo, P., Tan, Q., & Zhang, L. (2017). A multi-objective fuzzy programming model for optimal use of irrigation water and land resources under uncertainty in Gansu Province, China. *Journal of Cleaner Production*, 164, 85-94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.185>.
- Ren, C., Li, Z., & Zhang, H. (2019). Integrated multi-objective stochastic fuzzy programming and AHP method for agricultural water and land optimization allocation under multiple uncertainties. *Journal of Cleaner Production*, 210, 12-24. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.348>.
- Sanchis, R., Díaz-Madroñero, M., López-Jiménez, P.A., & Pérez-Sánchez, M. (2019). Solution approaches for the management of the water resources in irrigation water systems with fuzzy costs. *Water*, 11 (12), 2432. <https://doi.org/10.3390/w11122432>.
- Sargazi, A.R. (2017). Planning and optimal allocation of water resources in the agricultural sector using fuzzy programming approach (Case study of Someh Sara city). *Iran-Water Resources Research*, 13(2), 74-81.
- Sun, J., Li, Y.P., Suo, C., & Liu, J. (2020). Development of an uncertain water-food-energy nexus model for pursuing sustainable agricultural and electric productions. *Agricultural Water Management*, 241, 106384. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106384>.
- Tan, Q., & Zhang, T.Y. (2018). Robust fractional programming approach for improving agricultural water-use efficiency under uncertainty. *Journal of Hydrology*, 564, 1110–1119. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.080>.
- Tsolas, S.D., Karim, M.N., & Hasan, M.M.F. (2018). Optimization of water-energy nexus: a network representation-based graphical approach. *Applied Energy*, 224, 230–250. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.094>.
- Xie, Y.L., Xia, D.X., Jib, L., & Huang, G.H. (2018). An inexact stochastic-fuzzy optimization model for agricultural water allocation and land resources utilization management under considering effective rainfall. *Ecological Indicators*, 92, 301-311. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.09.026>.
- Xu, Y., Tan, J., Wang, X., Li, W., He, X., Hu, X., & Fa, Y. (2022). Synergetic management of water-energy-food nexus system and GHG emissions under multiple uncertainties: An inexact fractional fuzzy chance constraint programming method. *Agricultural Water Management*, 262, 107323.
- Yu, L., Li, Q.W., Jin, S.W., Chen, C., Li, Y.P., Fan, Y.R., & Zuo, Q.T. (2020). Coupling the two-level programming and copula for optimizing energy-water nexus system management – A case study of Henan



- Province. *Journal of Hydrology*, 586, 124832. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124832>.
- Yu, L., Li, Y.P., & Huang, G.H. (2019). Planning municipal-scale mixed energy system for stimulating renewable energy under multiple uncertainties-the city of Qingdao in Shandong Province, China. *Energy*, 166, 1120–1133. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.157>.
- Yu, L., Li, Y.P., & Huang, G.H. (2019). Planning municipal-scale mixed energy system for stimulating renewable energy under multiple uncertainties-the city of Qingdao in Shandong Province, China. *Energy*, 166, 1120–1133. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.157>.
- Yu, G., Song, X., Wang, Q., Liu, Y., Guan, D., Yan, J., Sun, X., Zhang, L., & Wen, X. (2008). Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables. *New Phytologist*, 177 (4). <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02316.x>.
- Zhang, C., Engel, B.A., & Guo, P. (2018). An Interval-based Fuzzy Chance-constrained Irrigation Water Allocation model with double-sided fuzziness. *Agricultural Water Management*, 210(30), 22-31. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.045>
- Zhang, C.L., Guo, S.S., Zhang, F., Engel, B.A., & Guo, P. (2019). Towards sustainable water resources planning and pollution control: Inexact joint-probabilistic double-sided stochastic chance-constrained programming model. *Science of The Total Environment*, 657, 73–86. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.463>.
- Zhang, F., Zhang, C.L., Yan, Z.H., Guo, S.S., Wang, Y.Z., & Guo, P. (2018). An interval nonlinear multiobjective programming model with fuzzy interval credibility constraint for crop monthly water allocation. *Agricultural Water Management*, 209, 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.026>.
- Zhang, H., Guo, S., Ren, C., & Guo, P. (2018). Integrated IMO-TSP and AHP Method for Regional Water Allocation under Uncertainty. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(6). DOI:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000933.
- Zuo, Q., Wu, Q., Yu, L., Li, Y., & Fan, Y. (2021). Optimization of uncertain agricultural management considering the framework of water, energy and food. *Agricultural Water Management*, 253, 106907 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106907>.