

## Assessing Water Resource Planning Policies in the Sefidroud Irrigation and Drainage Network Using the Water-Land-Food Nexus Approach

Sajad Ashkevari<sup>1</sup>, Somaye Janatrostami<sup>2\*</sup>  and Afshin Ashrafzadeh<sup>2</sup>

(Received: July 17-2024; Revised: September 9-2024; Accepted: November 11-2024)

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.

2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

\*: Corresponding author Email: [janatrostami@guilan.ac.ir](mailto:janatrostami@guilan.ac.ir)

### Abstract

In this study, a conceptual model based on dynamic systems was developed to optimize the management of water, land, and agricultural production (tea and rice) in the irrigation zones of the Sefidroud irrigation and drainage network. To understand the behavior of the network and create a simulation model of the system, a dynamic systems modeling approach was employed, and the simulation was conducted using MATLAB/Simulink. Subsequently, the optimization model of the studied system was developed as a multi-objective model using a genetic algorithm. Various management scenarios were implemented through the weighting of the objective functions. The results showed that selecting the best response from multi-objective optimization models depends on the weighted values of the objective functions, and by changing these values, decision-makers can provide various responses to complex optimization problems. The optimization model determines the cultivated area and water allocation in such a way as to minimize water scarcity and maximize crop performance through different weighting combinations. Furthermore, the findings indicate that the canals of the irrigation network play a crucial role in meeting water needs, and equitable water allocation is essential to prevent excessive extraction and negative consequences, such as saline intrusion and land subsidence. The study demonstrates that the best solutions are contingent upon local conditions and decision-makers' policies. To achieve maximum economic benefits and address water needs, it is suggested to use a weighting combination close to ( $w_1=1, w_2=2$ ). Ultimately, this model assists managers and decision-makers in minimizing water scarcity in the region by adjusting cropping levels and optimizing the use of available water resources.

**Keywords:** Water and land allocation, multi-objective optimization, Dynamic system, Simulink

**How to cite this article:** Ashkevari, S., Janatrostami, S. and Ashrafzadeh, A. 2025. Assessing Water Resource Planning Policies in the Sefidroud Irrigation and Drainage Network Using the Water-Land-Food Nexus Approach.. *J. Water and Soil Sci.* 29(1): 11-32. DOI: [10.47176/jwss.29.1.40844](https://doi.org/10.47176/jwss.29.1.40844)

Copyright © 2025 Ashkevari et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

## ارزیابی سناریوهای مختلف سیاست برنامه‌ریزی منابع آب با رویکرد همبست آب، غذا و زمین در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود

سجاد اشکوری<sup>۱</sup>، سمیه جنت رستمی<sup>۲\*</sup>  و افشین اشرف زاده<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۴/۲۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۶/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۲۱)

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.  
۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.  
\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: [janatrostami@guilan.ac.ir](mailto:janatrostami@guilan.ac.ir)

### چکیده

در این مطالعه، یک مدل مفهومی مبتنی بر سیستم پویا برای بهینه‌سازی مدیریت آب، زمین و تولید محصولات کشاورزی (چای و برنج) در نواحی آبیاری شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود توسعه داده شد. به منظور شناخت رفتار شبکه و تهیه مدل شبیه‌سازی سیستم از یک مدل مفهومی مبتنی بر مدل پویایی سیستم استفاده شد که در محیط MATLAB/Simulink شبیه‌سازی مدل انجام شد. در ادامه با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک مدل بهینه‌سازی سیستم مورد مطالعه به صورت یک مدل چندهدفه توسعه داده شد و سپس با استفاده از روش وزن‌دهی توابع هدف، شرایط مختلف مدیریتی اجرا شد. نتایج نشان داد که انتخاب بهترین پاسخ از مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه به مقادیر وزنی توابع هدف وابسته است و با تغییر این مقادیر، تصمیم‌گیرندگان می‌توانند پاسخ‌های متنوعی برای مسائل پیچیده بهینه‌سازی ارائه دهند. مدل بهینه‌سازی با ترکیب وزنی مختلف، سطح زیر کشت و تخصیص آب را به گونه‌ای تعیین می‌کند که کمبود آب کمینه و عملکرد محصولات بیشینه شود. علاوه بر این، یافته‌ها حاکی از آن است که کانال‌های شبکه آبیاری نقش حیاتی در تأمین نیاز آبی دارند و تخصیص عادلانه آب برای جلوگیری از برداشت بی‌رویه و پیامدهای منفی مانند پیشروی آب شور و فرونشست زمین ضروری است. مطالعه نشان می‌دهد که بهترین راهکار به شرایط محلی و سیاست‌های تصمیم‌گیرندگان بستگی دارد. برای دستیابی به بیشترین سود اقتصادی و پاسخگویی به نیازهای آب، پیشنهاد می‌شود از ترکیب وزنی نزدیک به  $(W_1=1, W_2=1)$  استفاده شود. در نهایت، این مدل به مدیران و تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا با تغییر سطح زیر کشت و بهره‌برداری بهینه از منابع آب، کمترین میزان کمبود آبی را در منطقه ایجاد کنند.

واژه‌های کلیدی: تخصیص آب و زمین، بهینه‌سازی چندهدفه، پویایی سیستم، سیمولینک

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت

شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



## مقدمه

منابع آب و زمین منابع حیاتی برای بقای انسان و توسعه اجتماعی و اقتصادی هستند (۱۷). رشد مداوم جمعیت و شهرنشینی سریع منجر به استفاده نامتوازن از زمین و کاهش شدید منابع آب شده است و تضاد بین منابع طبیعی، توسعه اجتماعی - اقتصادی و حفاظت از محیط زیست را تشدید می‌کند (۷). حل چالش‌ها و تضادهای در حال گسترش بین سیستم‌های همبست آب - زمین و غذا برای تضمین امنیت غذایی و از بین رفتن فقر حیاتی است (۳۶)؛ بنابراین، توسعه روش‌های علمی و مؤثر مدیریت منابع برای اطمینان از تخصیص و استفاده مناسب از منابع آب و زمین برای دستیابی به توسعه پایدار منطقه‌ای در مواجهه با منابع محدود آب و زمین ضروری است.

محدودیت‌های منابع آب و زمین باعث کاهش بهره‌وری کشاورزی می‌شود و نیاز به افزایش بهره‌وری برای دستیابی به اهداف جهانی غذای پایدار حیاتی است (۱۸ و ۲۲). آب، زمین و غذا منابع غیرقابل جایگزینی هستند (۱ و ۵) و به‌طور جدایی‌ناپذیری به هم مرتبط هستند (۱۰، ۱۳، ۱۵ و ۳۰). در مطالعات زیادی این منابع به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند. برای نمونه، حبیبی داویجانی و همکاران منابع آب را بر اساس بیشینه کردن اشتغال در بخش‌های کشاورزی و صنعت تخصیص دادند. آنها توانستند با بهینه‌سازی عامل اشتغال به‌عنوان یک پارامتر اجتماعی، منابع آب را به نحوی تخصیص دهند که سود اقتصادی بیشینه شد (۲۰). مارتینسن و همکاران در بهینه‌سازی تخصیص منابع آب علاوه بر کمیت منابع آب، کیفیت آب را نیز در نظر گرفتند. نتایج آنها نشان داد که افزودن کیفیت آب به چارچوب مدل بر قیمت‌های سایه در دسترس بودن آب اثرگذار است که می‌تواند بر پشتیبانی تصمیم‌گیری مبتنی بر مدل تأثیر بگذارد (۲۳). هه و همکاران یک مدل بهینه‌سازی مشارکتی برای تخصیص اراضی روستایی و شهری با هدف بهبود عدالت در خدمات عمومی شهری و روستایی پیشنهاد کردند. بر اساس نتایج بهینه‌سازی آنها، سکونتگاه‌های

پراکنده روستایی به‌طور مؤثر یکپارچه شدند و مقادیر زیادی از منابع زمین آزاد شد. برای کاهش شکاف درآمد بین مناطق شهری و روستایی، نسبت درآمد شهری به روستایی به‌طور قابل توجهی کاهش یافت (۲۱).

برای تولید محصولات کشاورزی نیاز به زمین برای کشت و آب برای آبیاری این محصولات است. از طرف دیگر، انواع مختلف کاربری زمین فعالیت‌های اجتماعی و انسانی متفاوتی را ایجاد می‌کند که نیازهای آبی بخش‌های مختلف از جمله زندگی، اکولوژی، صنعت و کشاورزی را تعیین می‌کند و همچنین، انواع کاربری‌های مختلف زمین با مقدار کل منابع آب در یک منطقه محدود می‌شود (۸)؛ بنابراین، سه مؤلفه منابع آب، منابع زمین و تولید غذا به‌عنوان یک سیستم کل نگر (Holistic System) مطرح می‌شود (۱۲ و ۱۹). این سیستم کل‌نگر یک ساختار ایستا متشکل از ترکیبی ساده از سه عنصر نیست؛ بلکه یک سیستم پیچیده و پویا متشکل از ترکیبی ارگانیک از سه عنصر است که تحت تأثیر شرایط بسیاری از جمله شرایط طبیعی، انسانی و اقتصادی است (۶ و ۲۸). برنامه‌ریزی سیستمی یک ابزار تحلیلی قابل اعتماد برای تخصیص بهینه منابع آب و زمین است. در این راستا، سینگ به‌طور همزمان سطح زیر کشت محصول و استفاده از آب آبیاری را برای بیشینه کردن درآمد مزرعه و کمینه کردن مشکلات منابع بهینه کرد (۳۱). وو و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی چندهدفه تصادفی برای به‌دست‌آوردن راهبردهای کاشت محصول و برنامه‌های آبیاری تحت سطوح رواناب مختلف ایجاد کرد (۳۴). داس و همکاران از یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای بهینه‌سازی تخصیص منابع آب و زمین بر اساس ویژگی‌های ساختاری منابع آب و زمین منطقه‌ای برای بیشینه کردن منافع اقتصادی استفاده کردند (۱۱). یان و لیو یک رویکرد برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آب، زمین و غذا در سیستم‌های کشاورزی طراحی کردند که ارزیابی مزایای سیستم آب، زمین و غذا را ممکن می‌سازد (۳۵). نجف آبادی و همکاران در بهینه‌سازی الگوی کشت زراعی و منابع آب، عوامل

گذشته در مورد استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی پویایی سیستم نشان داد در مواردی که بهینه‌سازی در کنار مدل‌سازی انجام می‌شود، وجود هر دو مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در یک محیط برنامه‌نویسی، فرایند شبیه‌سازی - بهینه‌سازی را آسان‌تر می‌کند؛ بنابراین استفاده از ابزار MATLAB/Simulink ترجیح داده می‌شود.

در این مطالعه، مدل آب، زمین و غذا در سیستم کشاورزی شبکه آبیاری و زهکشی رودخانه سفیدرود با استفاده از رویکرد پویایی سیستم شبیه‌سازی می‌شود. با توجه به اینکه هدف اصلی این مطالعه، بهینه‌سازی سامانه کشاورزی شبکه آبیاری و زهکشی است، برای دستیابی به این هدف، مدل پویایی سیستم در محیط MATLAB/Simulink شبیه‌سازی شد و بهینه‌سازی سیستم با استفاده از الگوریتم ژنتیک در محیط MATLAB اجرا می‌شود. در ادامه، مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی توسعه‌یافته آنالیز می‌شود و طیف وسیعی از سناریوهای برنامه‌ریزی در منطقه مطالعاتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تعریف سناریوهای مختلف سعی می‌شود اهداف متنوع مدیران و ذی‌نفعان با توجه به شرایط منطقه در نظر گرفته شود.

## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه مورد مطالعه

استان گیلان با مساحت ۱۴۰۴۴ کیلومتر مربع از استان‌های شمالی ایران است که از شمال به دریای خزر وصل بوده و دارای مرز آبی با کشورهای حاشیه دریای خزر است. از نظر آب و هوایی به علت بارش‌های متعدد در زمره استان‌هایی با آب و هوای معتدل و مرطوب قرار دارد؛ بنابراین با توجه به اقلیم مناسب برای کشت برنج، مناسب‌ترین منطقه برای کشت برنج است. در واقعیت نیز مهم‌ترین محصول کشاورزی منطقه برنج بوده و اکثراً تمامی 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.

اقتصادی، فنی و استراتژیک را بررسی کردند (۲۵). ربیعی و همکاران، با استفاده از روابط بیلان آب در خاک، تخصیص بهینه همزمان آب و زمین در شرایط کمبود منابع در شبکه آبیاری و زهکشی سد درودزن استان فارس را انجام دادند (۲۹). آوردند و همکاران در توسعه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه به صورت همزمان آب و زمین را بهینه کردند (۴).

روش پویایی سیستم، با تأکید بر پیچیدگی دینامیکی ناشی از بازخوردها، غیرخطی بودن و تأخیرهای زمانی در سیستم به عنوان یک رویکرد ارزیابی قدرتمند معرفی شده است (۱۶). برای درک و تجسم بازخوردهای علی پیچیده در مدل‌های پویایی سیستم از بسته‌های نرم‌افزاری مانند Stella و VENSIM استفاده می‌شود (۱۴ و ۲۷). این ابزارها توانایی تحلیل تعاملات بین بخشی را بدون نوشتن کدهای برنامه‌نویسی پیچیده دارند (۳۲). مدیوایلا و همکاران کاربرد زبان برنامه‌نویسی MATLAB/Simulink برای برنامه‌نویسی و آنالیز مدل‌های پویایی سیستم را بررسی کرد (۲۴). در این راستا، تاکنون مطالعه‌هایی در زمینه مدل‌سازی سیستم‌های منابع آب با استفاده از روش پویایی سیستم انجام شده است که از این ابزار برای انجام مدل‌سازی استفاده شده است. برای نمونه، نقدی و همکاران از Simulink برای مدل‌سازی پویایی سیستم در یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای تخصیص آب‌های سطحی و زیرزمینی استفاده کرد که از الگوریتم NSGAII برای بهینه‌سازی استفاده کرد (۲۶). چریف و همکاران برای مدل‌سازی پویایی سیستم از MATLAB/Simulink استفاده کردند که در ادامه با به کارگیری الگوریتم ژنتیک مدل چندهدفه آب و انرژی را بهینه کردند (۹). ونگ و همکاران برای بهینه‌سازی رابطه همبست آب، غذا، انرژی و پساب در کشاورزی از شاخص ریسک اقتصادی به منظور کاهش بالقوه کربن استفاده کردند. آن‌ها برای مدل‌سازی، روش پویایی سیستم را به کار بردند که برای اجرای مدل پویایی سیستم به منظور شبیه‌سازی انتشار کربن و نوآوری‌های کاهش بالقوه از پلتفرم شبیه‌سازی MATLAB/Simulink استفاده کردند (۳۳). بررسی مطالعه‌های

طرحی برای مدیریت آب، غذا و زمین در سیستم کشاورزی استفاده شد. برای ایجاد یک مدل مدیریتی کارآمد، ایجاد یک مدل مفهومی دقیق که بر اساس آن شبیه‌سازی سیستم انجام شود، دارای اهمیت است. با توجه به هدف این مطالعه، اطلاعات و داده‌های ضروری در بخش‌های آب، غذا و زمین نیاز است. این داده‌ها شامل داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیک، الگوهای کشت محصولات، منابع آبی موجود، نیاز آبی کشاورزی و مشخصات و پارامترهای فیزیکی سد می‌شود. گفتنی است، دوره آماری بررسی شده در این مطالعه فصل زراعی سال ۱۳۹۷ است.

**داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیک:** به منظور محاسبه بیلان آبی، داده‌های ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارندگی در منطقه مورد مطالعه (ایستگاه‌های آستانه، چمخاله، شلمان، رشت، سد سنگر، شفت، کسما، ماسال و پونل) برای به دست آوردن اطلاعات هواشناسی و هیدرولوژی از جمله بارش، دما و تبخیر جمع‌آوری شد.

**منابع آب در دسترس:** منابع آب در محدوده مورد مطالعه به آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی طبقه‌بندی می‌شود. آب‌های سطحی علاوه بر آب رهاسازی شده از سد سفیدرود که از طریق کانال‌های آبیاری در سراسر شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود توزیع می‌شود، شامل رودخانه‌های محلی، آب‌بندان‌ها و آب‌های بازچرخانی شده از طریق سیستم‌های زهکشی است. آب‌های زیرزمینی نیز از طریق پمپاژ از چاه‌های حفر شده در منطقه مورد مطالعه در دسترس قرار می‌گیرد.

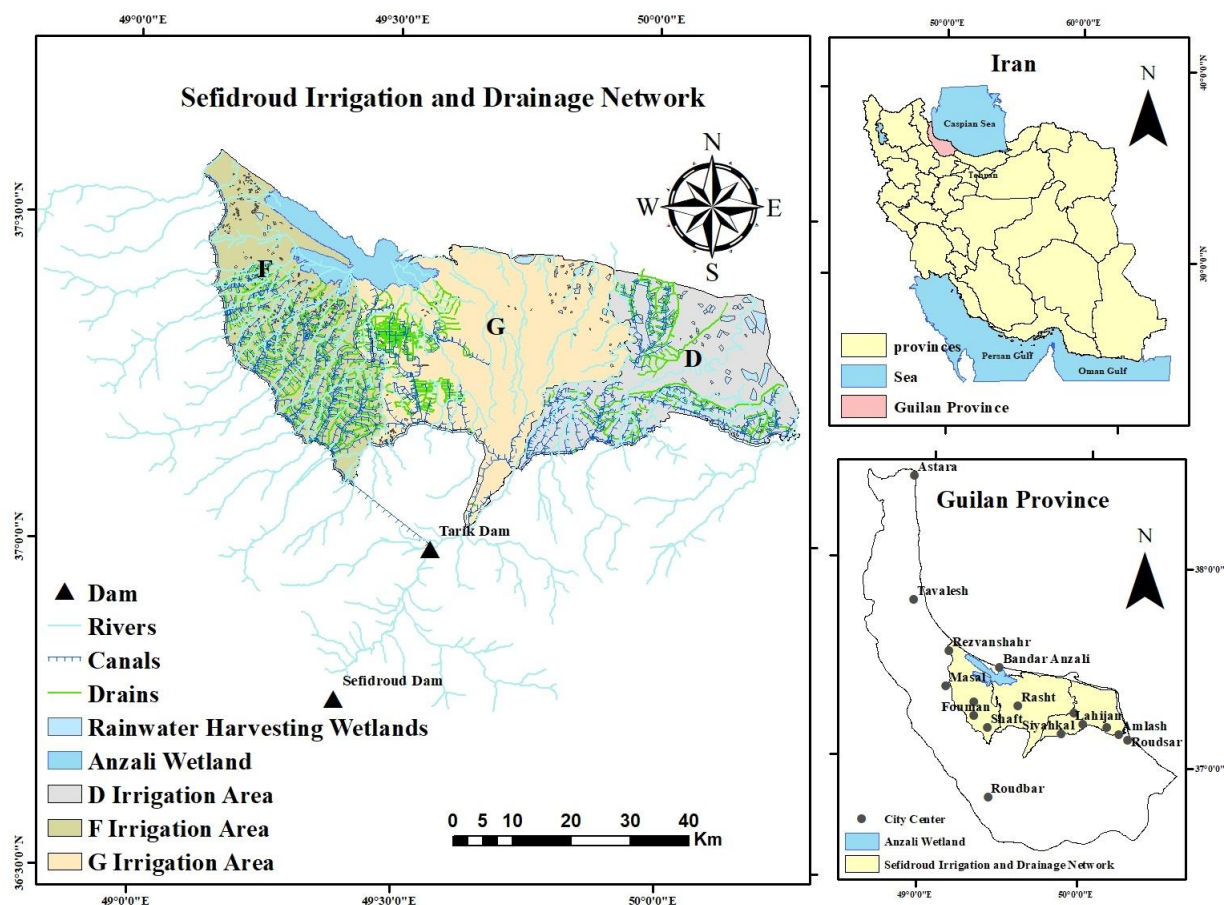
در استان گیلان وجود چشمه‌های فراوان، سطح بالای آب‌های زیرزمینی و قرارگیری منطقه مورد مطالعه در مجاورت کوه‌ها، موجب تشکیل رودخانه‌های متعدد در این منطقه شده است. با توجه به اهمیت پرداختن به نیازهای زیست‌محیطی پایین دست منطقه، بخشی از حجم آب رودخانه برای رفع نیازهای زیست‌محیطی تخصیص می‌یابد و مابقی آن برای رفع نیازهای آبی مختلف منطقه‌ای از جمله آبیاری مناطق کشاورزی استفاده می‌شود. برای محاسبه حجم آب مورد نیاز برای تأمین نیازهای زیست‌محیطی هر رودخانه از روش تنانت (۱۹۹۶) استفاده شد.

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 بزرگ سفیدرود روی این رودخانه ساخته شده که دریاچه این سد ۵۶ کیلومتر مربع است. در حال حاضر، این سد در حال بهره‌برداری است و آب قابل تنظیم آن به میزان ۲۰۹۰ میلیون متر مکعب و ظرفیت تولید انرژی سالانه ۱۲/۵ تا ۱۵ گیگاوات ساعت است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان). رودخانه سفیدرود منبع اصلی تأمین آب اراضی کشاورزی دشت گیلان و به ویژه شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود است. با تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و بررسی‌های میدانی مساحت جغرافیایی نواحی تحت پوشش شبکه‌های آبیاری سفیدرود حدود ۲۸۴۱۸۰ هکتار است که در قالب ۱۷ واحد عمرانی شکل گرفته است. این اراضی حدود ۱۸۹۸۳۳ هکتار ناخالص تحت کشت برنج است که مساحت خالص تحت کشت سالانه آن معادل ۱۶۷۰۰۰ هکتار برآورد می‌شود که از سه ناحیه آبیاری فومنات (F)، مرکزی (G) و شرق گیلان (D) تشکیل شده است (۳). موقعیت نواحی آبیاری منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

همان‌طور که گفته شد، رودخانه سفیدرود به عنوان منبع اصلی تأمین آب شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود است که آب رهاسازی شده از سد سفیدرود توسط سدهای انحرافی و همچنین کانال‌های منشعب از آن‌ها، به نواحی مختلف شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود منتقل می‌شود. علاوه بر این، در تأمین نیاز آبی اراضی واقع در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود، منابع آب‌های زیرزمینی و سایر منابع آب‌های سطحی از جمله رودخانه‌های محلی، آب‌بندان‌ها و زهکش‌ها نیز استفاده می‌شود. گفتنی است که آب‌های زیرزمینی از طریق پمپاژ از چاه‌های حفر شده در این مناطق در دسترس اراضی کشاورزی قرار می‌گیرد.

### داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز

در این مطالعه از یک روش شبیه‌سازی و بهینه‌سازی برای ارائه



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

خلاصه در جدول ۱ آورده شده است. برای محاسبه حجم آب ذخیره شده در این آب‌بندان‌ها عمق متوسط، ۱ متر در نظر گرفته شده است.

در مناطق شمالی ایران، آبیاری اراضی شالیزاری به صورت غرقابی دائمی یا متناوب انجام می‌شود. با توجه به اینکه کشت برنج در شرایط پرآب انجام می‌شود، اما سطح آب بیش از حد می‌تواند به رشد گیاه و عملکرد محصول آسیب برساند. برای رفع این مشکل، سیستم‌های زهکشی برای حذف آب اضافی اجرا می‌شود و آب زهکشی شده پس از این برای آبیاری اراضی شالیزاری پایین دست مورد استفاده مجدد قرار می‌گیرد. مقادیر جدول ۲ بر اساس نتایج مطالعه‌ها و اندازه‌گیری‌های مشاهده‌ای داده‌های حجم آب موجود از طریق زهکشی در مناطق آبیاری F، G و D به دست آمده است.

یکی دیگر از منابع آب سطحی استان گیلان، آب‌بندان‌هاست. آب ذخیره شده در این آب‌بندان‌ها با وجود اینکه به صورت طبیعی باشد یا اینکه به صورت مصنوعی با دخالت انسان ساخته شده باشد، برای اهداف مختلفی از جمله تأمین آب مورد نیاز کشاورزی و حمایت از فعالیت‌های آبی‌پروری استفاده می‌شود. آب‌بندان‌ها در مواقع بحرانی و خشکسالی، نقش حیاتی در تأمین نیاز آبی شالیزارهای برنج ایفا می‌کند. آب ذخیره شده در این آب‌بندان‌ها از طریق آب رودخانه‌ها و رواناب بارندگی در فصول غیرزرعی تأمین می‌شود که این آب‌ها از طریق کانال‌ها و سیستم‌های پمپاژ به درون آب‌بندان وارد می‌شود و با استفاده از روش‌های ثقلی و پمپاژ برای آبیاری در بهار و تابستان در دسترس قرار می‌گیرد. اطلاعات مربوط به آب‌بندان‌های مناطق آبیاری F، G و D به‌طور

جدول ۱. جزئیات آب‌بندان‌ها در نواحی آبیاری شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود

| ناحیه آبیاری | تعداد آب‌بندان‌ها | مساحت (ha) | حجم آب‌بندان‌ها (Million m3) |
|--------------|-------------------|------------|------------------------------|
| F            | 399               | 1167.11    | 11.67                        |
| G            | 116               | 1531.29    | 15.31                        |
| D            | 110               | 3949.33    | 39.49                        |

جدول ۲. مقادیر آب قابل دسترس برای تأمین نیازهای آبیاری دو محصول برنج و چای در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود (مقادیر بر حسب میلیون مترمکعب است)

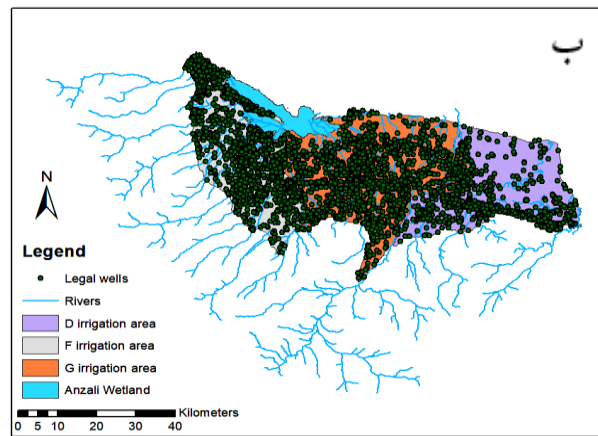
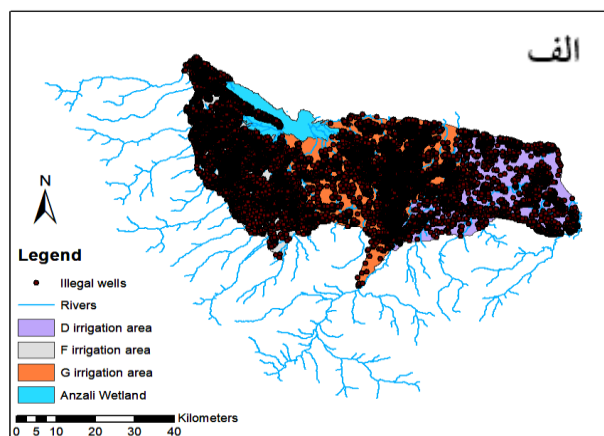
| ناحیه آبیاری | کانال (سد سفیدرود) | رودخانه‌های محلی | زهکش‌ها | آب‌بندان‌ها | آب زیرزمینی | مجموع |
|--------------|--------------------|------------------|---------|-------------|-------------|-------|
| F            | ۳۰۳/۵              | ۲۶/۷             | ۸/۹     | ۱۱/۴        | ۷۶/۴        | ۴۲۶/۹ |
| G            | ۶۸۷/۲              | ۲۲/۶             | ۱۳/۰    | ۱/۴         | ۲۳/۸        | ۷۴۷/۹ |
| D            | ۳۴۷/۲              | ۴۰/۲             | ۳۴/۸    | ۳۶/۱        | ۱۹/۷        | ۴۷۸/۰ |

منابع آب زیرزمینی در استان گیلان از طریق جریان‌های ورودی از ارتفاعات، نفوذ از باران، جریان‌های سطحی و آب‌های برگشتی ناشی از مصارف شرب، صنعت و کشاورزی تغذیه می‌شوند. استفاده از آب زیرزمینی در گیلان با وجود بالا بودن تراز سطح ایستابی و تغذیه مناسب آبخوان‌ها به دلیل زیاد بودن هزینه پمپاژ در اولویت بهره‌برداری از نظر کشاورزان قرار نمی‌گیرد. اما با وجود این با توجه به گزارش‌های شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان، در سال‌های اخیر به دلیل عواملی مانند شرایط اقلیمی، رشد جمعیت، توسعه صنعتی و گسترش کشاورزی برداشت از آب زیرزمینی افزایش یافته است و حتی در بعضی مناطق به دلیل برداشت‌های بی‌رویه از آب زیرزمینی، بسیاری از چاه‌ها خشک شده و چشمه‌های متعددی از بین رفته‌اند. توزیع چاه‌های بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی واقع در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود به صورت شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل، توزیع چاه‌های مجاز (دارای پروانه بهره‌برداری) و غیرمجاز (بدون پروانه بهره‌برداری) نیز مشخص شده است. چاه‌های غیرمجاز در مجاورت چاه‌های مجاز بدون رعایت حریم فواصل از چاه‌های مجاز برای رفع مشکلات کم‌آبی حفر شده است.

برای تعیین سطح زیر کشت محصولات کشاورزی،

بر اساس آمار و اطلاعات سازمان جهاد کشاورزی، محصولاتی با بیشترین سطح زیر کشت در هر منطقه آبیاری انتخاب شدند. به این ترتیب دو محصول برنج و چای انتخاب شدند. البته گفتنی است که با توجه به انتخاب این دو محصول، برای محاسبه نیاز آبیاری کشاورزی در هر یک از نواحی آبیاری، نیاز آبی سایر محصولات کشاورزی از کل منابع آبی قابل تخصیص در مناطق آبیاری کسر می‌شود تا به‌طور مشخص آب مورد نیاز و منابع آبی در دسترس این دو محصول انتخابی محاسبه شود.

پس از تعیین حداقل نیازهای زیست‌محیطی و در نظر گرفتن ضریب تلفات رودخانه، حجم آب قابل تخصیص از طریق رودخانه در هر ناحیه شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود محاسبه شد. منابع آب موجود در هر ناحیه آبیاری برای تأمین مصارف آب در سه بخش خانگی، صنعتی و کشاورزی استفاده می‌شود؛ بنابراین برای محاسبه حجم آب باقیمانده به منظور تأمین نیازهای آبیاری دو محصول منتخب در این مطالعه، حجم آب استفاده‌شده برای تأمین سایر نیازهای آبی از کل حجم آب موجود کسر می‌شود. نتایج این بخش از محاسبات در جدول ۲ به صورت خلاصه آورده شده است. گفتنی است داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان جمع‌آوری شده است.



(ب)

(الف)

شکل ۲. پراکنش چاه بهره‌برداری از آب زیرزمینی در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود: (الف) چاه‌های مجاز، (ب) چاه‌های غیرمجاز (شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان)

جرم، معادلات حاکم در هر زیرسیستم از معادلات اساسی رویکرد پویایی سیستم استخراج شده است. معادله بیلان آب برای منابع آب موجود اعم از آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی در یک بازه زمانی خاص در منطقه مورد مطالعه با معادله (۱) نشان داده شده است:

$$\Delta V_s + \Delta V_g = P + (Q_s)_{in} + (Q_g)_{in} - [(Q_E)_s + (Q_E)_g + QD + (Q_s)_{out} + (Q_g)_{out}] \quad (1)$$

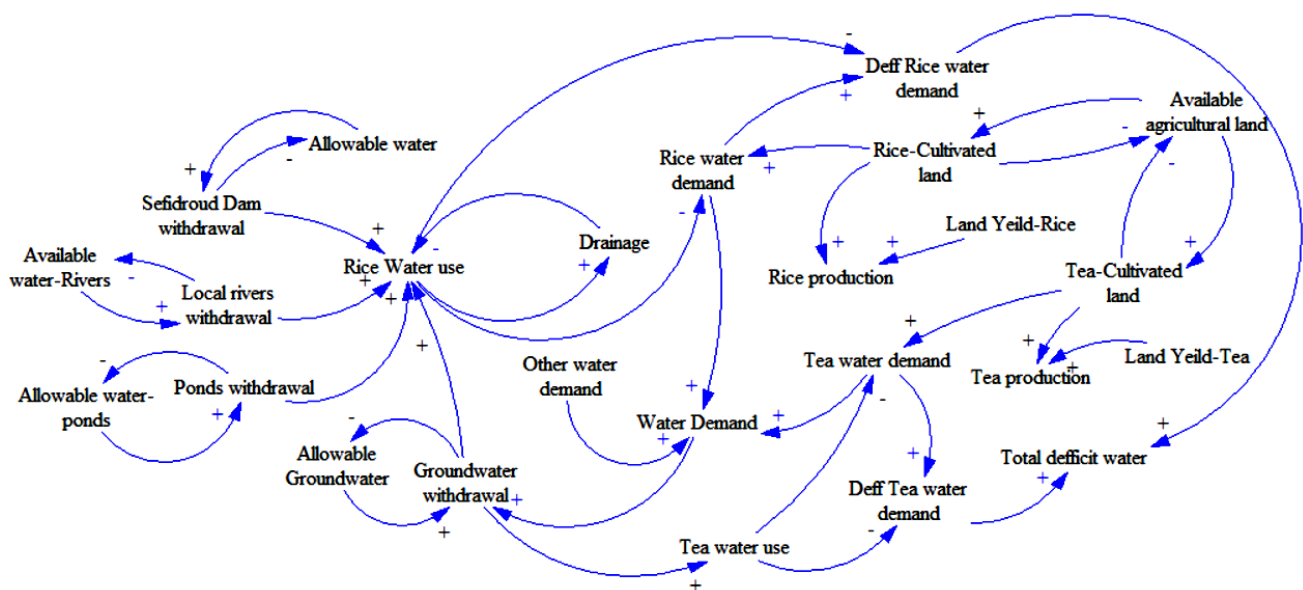
که  $\Delta V_s$  و  $\Delta V_g$  به ترتیب تغییرات حجم ذخیره آب سطحی و آب زیرزمینی را نشان می‌دهد.  $P$ ، حجم بارندگی و  $(Q_s)_{in}$  و  $(Q_s)_{out}$  به ترتیب حجم ورودی و خروجی جریان آب سطحی است که شامل جریان آب کانال‌های آبیاری، رودخانه‌ها، زهکش‌ها و آب‌بندان‌هاست.  $(Q_E)_s$  و  $(Q_E)_g$  به ترتیب حجم تبخیر از سطح آب سطحی و زیرزمینی را نشان می‌دهد.  $QD$ ، حجم آب مورد تقاضا و  $(Q_g)_{in}$  و  $(Q_g)_{out}$  نیز به ترتیب حجم ورودی و خروجی جریان آب زیرزمینی است.

با توجه به قانون دارسی (معادله ۲)، حجم جریان ورودی و خروجی آب زیرزمینی با استفاده از نقشه ضریب انتقال آب زیرزمینی و خطوط تراز آب زیرزمینی محاسبه می‌شود.

$$(Q_g)_{in} \text{ or } (Q_g)_{out} = L \times i \times T \times t \quad (2)$$

### مدل پویایی سیستم

برای تجزیه و تحلیل تعادل آب و فعل و انفعالات درون سیستم آب، زمین و غذا در یک منطقه مورد مطالعه، تعیین فرایندهای هیدرولوژیک مؤثر برای درک مقدار آب مورد نیاز برای تولید محصولات کشاورزی (غذا) به همراه سطح زمین قابل استفاده برای کشت محصولات کشاورزی ضروری است. شبیه‌سازی همزمان آب، زمین و غذا پیچیده است و روش پویایی سیستم می‌تواند به عنوان یک ابزار شبیه‌سازی برای تجزیه و تحلیل همزمان تمامی فرایندهای مؤثر در این سیستم استفاده شود. رویکرد پویایی سیستم می‌تواند دنیای واقعی را با به تصویر کشیدن حلقه‌های بازخورد غیرخطی و پیچیده بین جامعه و سیستم‌های فیزیکی نشان دهد. مدل پویایی سیستم از ماژول‌های به هم پیوسته آب، زمین و تولید محصولات کشاورزی برای شبیه‌سازی تعاملات موجود در این سیستم استفاده می‌کند. مدل مفهومی توسعه یافته برای شبیه‌سازی همزمان آب، زمین و غذا در منطقه مورد مطالعه در شکل ۳ آورده شده است که این مدل در ادامه با استفاده از ابزار MATLAB/Simulink مدل‌سازی شد. بر اساس قانون بقای



شکل ۳. مدل مفهومی توسعه یافته برای شبیه‌سازی همزمان آب، زمین و غذا

مدل‌سازی شد. مقادیر برداشت آب از منابع مختلف رودخانه‌ها، کانال‌های آبیاری، حوضچه‌ها، زهکشی‌ها و آب‌های زیرزمینی، مصارف آب برای آبیاری از هر ناحیه آبیاری، میزان بارندگی‌ها، مقادیر حجم تبخیر از آب‌های سطحی، حجم ورودی و خروجی آب رودخانه و کانال و میزان تولید محصولات کشاورزی از جمله ورودی‌های مدل برای تهیه مدل شبیه‌سازی هستند. مدل شبیه‌سازی به‌گونه‌ای طراحی شده است که با تنظیم ورودی‌ها برای هر سناریو می‌توان خروجی‌های مدل را تعیین کرد.

#### مدل بهینه مدیریتی

در بخش مدیریت بهینه تخصیص منابع آب و زمین در منطقه مورد مطالعه، تابع هدف به‌صورت یک تابع چندهدفه با دو هدف کمینه کردن کمبود آب با توجه به منابع آب در دسترس و بیشینه کردن سطح زیر کشت محصولات در نظر گرفته شد. این مدل بهینه‌ساز شامل تعدادی از متغیرهای تصمیم و مجموعه‌ای از محدودیت‌ها مانند محدودیت منابع آب دسترس و غیره است که در ادامه آورده شده است.

در معادله (۲)،  $L$  پهنای سطح مقطع ورودی و خروجی به آبخوان،  $i$  گرادیان هیدرولیکی در بخش ورودی و خروجی جریان آب زیرزمینی،  $T$  ضریب قابلیت انتقال آبخوان و  $t$  دوره زمانی که در این مطالعه ۶ ماه نخست سال به‌عنوان فصل زراعی در نظر گرفته شده است.

معادله (۳)، تغییرات حجم آب زیرزمینی را در یک دوره زمانی مشخص نشان می‌دهد. در این معادله،  $\Delta H$  تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی در ۶ ماهه اول سال (فروردین تا شهریور)،  $\Delta V$  تغییرات حجم ذخیره آب زیرزمینی،  $A$  مساحت آبخوان و  $S$  ضریب ذخیره آبخوان است.

$$\Delta H = \frac{\Delta V}{A \times S} \quad (3)$$

بیشینه مجاز برداشت آب زیرزمینی نیز با توجه به گزارش مطالعات بیلان آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه که در جدول ۳ آورده شده است، تعیین شد.

مدل بهینه‌سازی توسعه‌یافته با استفاده از الگوریتم ژنتیک در محیط MATLAB حل می‌شود. همان‌طور که گفته شد، مدل شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه با استفاده از روش پویایی سیستم انجام شد که در محیط MATLAB/Simulink

جدول ۳. بیلان آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی (برحسب میلیون مترمکعب)

| واحد عمرانی | نفوذ از بارندگی | نفوذ از جریان سطحی | حجم آب ورودی به آبخوان | جریان برگشتی به آب زیرزمینی | خروجی |                        |                  |                        |
|-------------|-----------------|--------------------|------------------------|-----------------------------|-------|------------------------|------------------|------------------------|
|             |                 |                    |                        |                             | تبخیر | حجم آب خروجی به آبخوان | مصرف آب زیرزمینی | زهکش آبخوان $\Delta V$ |
| F           | ۶۰/۷۹           | ۱۱/۳۶              | ۲۸/۱۰                  | ۳۴/۲۴                       | ۱۱/۹۹ | ۳/۶                    | ۴۴/۶۴            | ۶۶/۳۶ - ۱۱/۹۲          |
| G           | ۸۷/۲۶           | ۲۹/۶۰              | ۲۹/۴۷                  | ۴۱/۲۶                       | ۱۵/۸۳ | ۳/۴۱                   | ۷۴/۶۹            | ۱۰۶/۸۲ - ۱۲/۱۵         |
| D           | ۶۸/۹۰           | ۲۶/۶۷              | ۲۶/۶۶                  | ۲۶/۸۷                       | ۱۲/۶۶ | ۱۳/۳۴                  | ۴۵/۴۴            | ۹۱/۷۷ - ۱۴/۱۱          |

## توابع هدف

$$F = \min(w_1 F_1 - w_2 F_2) \quad (4)$$

تابع هدف اول: کمینه کردن کمبود تأمین نیاز آبی

$$F_1 = \min \left[ \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 (de(i, j) - r(i, j) + \varepsilon) / (de_{\max}(i, j)) \right] \quad (5)$$

تابع هدف دوم: بیشینه کردن سود اقتصادی از طریق افزایش سطح زیر کشت با توجه به منابع آبی موجود

$$F_2 = \max \left[ \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 NB(i, j) \times A(i, j) / (NB(i, j) \times A_{\text{mean}}(i, j)) \right] \quad (6)$$

$$de(i, j) = \frac{Iw(i, j) * A(i, j)}{Ic(i, j)} \quad (7)$$

$i$ ، شمارنده نواحی آبیاری (ناحیه آبیاری فونمات،  $i=1$ ؛ ناحیه آبیاری مرکزی،  $i=2$ ؛ ناحیه آبیاری شرق،  $i=3$ ؛  $i$ ، شمارنده محصولات منتخب (برنج ( $j=1$ ) و چای ( $j=2$ ))؛  $de(i, j)$  نیاز آبی محصول  $j$  در ناحیه آبیاری  $i$  است که بر اساس رابطه (۴) به دست می آید؛  $I(i, j)$  مقدار آب تخصیص یافته به محصول  $j$  در ناحیه آبیاری  $i$ ؛  $de_{\max}(i, j)$  بیشترین نیاز آبی محصول  $j$  در ناحیه آبیاری  $i$  است که با توجه به بیشینه سطح کشت مجاز محصول  $j$  در ناحیه آبیاری  $i$  به دست می آید؛  $A(i, j)$  سطح زیر کشت محصول  $j$  در ناحیه  $i$ ؛  $A_{\text{mean}}(i, j)$  میانگین سطح زیر کشت محصول  $j$  در ناحیه آبیاری  $i$  است که با توجه به کمینه و بیشینه سطح زیر کشت محصول  $j$  در ناحیه آبیاری  $i$  به دست می آید؛  $Iw(i, j)$  نیاز خالص آبیاری محصول  $j$  در ناحیه آبیاری  $i$ ؛  $Ic(i, j)$  راندمان آبیاری محصول  $j$  در ناحیه آبیاری  $i$ ؛  $F_1$  و  $F_2$  به ترتیب تابع هدف اول و دوم و  $w_1$  و  $w_2$  به ترتیب وزن تابع

هدف اول و دوم است و برای جلوگیری از صفر شدن صورت کسر رابطه (۵)، مقدار  $\varepsilon$  برابر با  $0.001$  در نظر گرفته شد. گفتنی است، در معادله (۴) به دلیل اینکه دو تابع هدف  $F_1$  و  $F_2$  ماهیت و جهت متفاوتی دارند، طوری که جهت تابع هدف اول، کمینه کردن و جهت تابع هدف دو، حداکثر کردن است و با توجه به این که جهت تابع هدف کلی کمینه کردن است، تابع هدف دوم برای همسو شدن با جهت تابع هدف اول، در عدد  $-1$  ضرب شده است. علاوه بر این، برای بی بعد کردن توابع هدف دو معادله (۵) و (۶) به صورت کسری نوشته شده است. به این ترتیب که در معادله (۵)، مقادیر کمبود آب آبیاری محصول  $j$  در ناحیه آبیاری  $i$  بر مقادیر نیاز آبی محصول  $j$  در ناحیه آبیاری  $i$  تقسیم شده است و در معادله (۶)، مقادیر سود حاصل از کشت محصول  $j$  در ناحیه آبیاری  $i$  بر میانگین سود حاصل از محصول  $j$  در ناحیه آبیاری  $i$  تقسیم شده است.

برای محاسبه سود اقتصادی هر یک از محصولات از معادلاتی استفاده شد (معادلات ۸ و ۹) که در مطالعه امینی و همکاران در این ناحیه مطالعاتی گزارش شده است. در این معادلات،  $y(i)$  عملکرد محصول  $j$  است که بر اساس معادله (۷) به دست می آید.  $Aw(i)$  حجم آب در دسترس است که با توجه به معادله (۹) به دست می آید (۲). گفتنی است مقادیر  $NB(i, j)$  بر حسب میلیون ریال بر هکتار است.

$$\text{if } j = 1 \rightarrow NB(i, j) = 0.045 \times y(i) - 40 / 756 \quad \forall i \quad (8)$$

$$\text{if } j = 2 \rightarrow NB(i, j) = 57 / 85 \quad \forall i \quad (9)$$

$$y(i) = -0.0033Aw(i)^2 + 27.43Aw(i) - 52844 \quad \forall i \quad (10)$$

$$\text{if } j = 1 \rightarrow Aw(i) = \frac{Ic(i, j) \times r(i, j)}{A(i, j)} \quad \forall i \quad (11)$$

## محدودیت‌ها

### محدودیت اول: منابع آب در دسترس

همان‌طور که گفته شد، منابع آب در دسترس برای تأمین نیاز آبیاری اراضی کشاورزی شامل آب برداشتی از کانال آبیاری، آب زیرزمینی، رودخانه‌های محلی، آب‌بندان و زهکش‌ها است؛ بنابراین با توجه به حجم مجاز قابل برداشت از هر یک از منابع تأمین آب، محدودیت‌های منابع آب در دسترس به صورت معادلات (۱۳) تا (۱۷) اعمال می‌شود. علاوه بر این با توجه به حجم آب مورد تقاضا، محدودیت حجم آب تخصیص‌یافته نیز به صورت معادله (۱۵) در نظر گرفته می‌شود.

$$r(i, j) = r_c(i, j) + r_g(i, j) + r_r(i, j) + r_d(i, j) + r_w(i, j) \quad (12)$$

$$0 \leq r_c(i, j) \leq q_c(i) \quad (13)$$

$$0 \leq r_g(i, j) \leq q_g(i) \quad (14)$$

$$0 \leq r_r(i, j) \leq q_r(i) \quad (15)$$

$$0 \leq r_d(i, j) \leq q_d(i) \quad (16)$$

$$0 \leq r_w(i, j) \leq q_w(i) \quad (17)$$

$$0 \leq r(i, j) \leq de(i, j) \quad (18)$$

در این معادلات،  $(i, j)$  مجموع مقدار آب تخصیص‌یافته به محصول ژام در ناحیه آبیاری  $i$  است که از حاصل جمع  $r_c(i, j)$ ،  $r_g(i, j)$ ،  $r_r(i, j)$ ،  $r_d(i, j)$  و  $r_w(i, j)$  که به ترتیب مقادیر آب تخصیص‌یافته از کانال آبیاری، آب زیرزمینی، رودخانه، زهکش و آب‌بندان به محصول ژام در ناحیه آبیاری  $i$  است، به دست می‌آید. در منطقه مورد مطالعه تقریباً کل نیاز آبی محصول چای از طریق منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود و بخش ناچیزی از طریق منابع آب سطحی تأمین می‌شود؛ بنابراین در این مطالعه فرض شد که نیاز آبی چای از طریق منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. به این ترتیب محدودیت معادله (۱۹) نیز به محدودیت‌های منابع آب در دسترس اضافه شد.

$$r_g(i, 2) = de(i, 2) \quad \forall i \quad (19)$$

### محدودیت دوم: محدودیت سطح زیر کشت

محدودیت مربوط به سطح زیر کشت هر یک از محصولات با

توجه به کمینه و بیشینه سطح زیر کشت در نظر گرفته می‌شود (معادله ۲۰). مقادیر کمینه سطح زیر کشت بر اساس نیاز منطقه و بیشینه سطح زیر کشت بر اساس زمین قابل کشت در منطقه تعیین می‌شود. در معادله (۲۰)،  $A_{min}(i, j)$  و  $A_{max}(i, j)$ ، به ترتیب کمینه و بیشینه سطح زیر کشت در محصول ژام در ناحیه  $i$  است.

$$A_{min}(i, j) \leq A(i, j) \leq A_{max}(i, j) \quad (20)$$

$$A_{mean}(i, j) = \frac{A_{min}(i, j) + A_{max}(i, j)}{2} \quad (21)$$

**محدودیت سوم: محدودیت مثبت بودن کل متغیرهای تصمیم**  
در این محدودیت همه متغیرهای تصمیم که شامل  $A(i, j)$ ،  $r_c(i, j)$ ،  $r_g(i, j)$ ،  $r_r(i, j)$ ،  $r_d(i, j)$ ،  $r_w(i, j)$ ،  $r(i, j)$  می‌شود، به صورت بزرگتر مساوی صفر در نظر گرفته می‌شود (معادله ۲۲).

$$\text{All variables} \geq 0 \quad (22)$$

برای حل مدل بهینه‌سازی توسعه‌یافته، با توجه به اینکه تابع هدف به صورت دوبعدی است، از رویکرد وزن‌دهی هر تابع هدف در GA استفاده شد. به دلیل استفاده از الگوریتم ژنتیک دودویی، پیاده‌سازی آن با تولید یک جمعیت از کروموزوم‌های تصادفی (مجموعه متغیرهای تصمیم) آغاز می‌شود. طی هر نسل، الگوریتم میزان برآزش هر کروموزوم در جمعیت را محاسبه می‌کند. در گام بعدی، بر اساس مقادیر برآزش به دست آمده، زیرمجموعه‌ای از کروموزوم‌های جمعیت قبلی را انتخاب و وارد نسل جدید می‌شود که این فرایند با استفاده از روش چرخه رولت انجام می‌شود. بعد از این فرایند، جواب‌های ممکن در جمعیت جدید بر اساس احتمال تقاطع ( $P_{cross}$ ) تعیین می‌شود. گام نهایی فرایند جهش است که برای افزایش تنوع جمعیت با اصلاح جواب‌های قبلی به کار گرفته می‌شود. این فرایند با استفاده از احتمال جهش ( $P_{mut}$ ) کنترل می‌شود که برای حفظ تنوع ژنتیکی در جمعیت از یک نسل به نسل بعدی استفاده می‌شود. این مراحل تا زمانی که شرط توقف برقرار شود، تکرار می‌شود. با توجه به انجام فرایند سعی و خطا، مقادیر پارامترهای جمعیت، احتمال تقاطع، احتمال جهش و بیشترین تعداد تکرارها، ۵۰، ۰/۹۵، ۰/۰۵ و ۱۰۰۰ تعیین شد.

در مرحله اجرای مدل بهینه‌سازی و تحلیل نتایج بهینه،

همان‌طور که در جدول ۳ نیز نشان داده شده است، با افزایش وزن تابع هدف اول مقادیر تابع هدف کلی از مقادیر منفی به سمت مقادیر مثبت پیش می‌رود. با توجه به نوع تابع هدف کلی که کمینه کردن و تابع هدف دوم بیشینه کردن است، هنگامی که تابع هدف دوم دارای وزن بیشتری نسبت به تابع هدف اول است، سهم بیشتری در کمینه کردن تابع هدف کلی دارد؛ بنابراین مقادیر کلی تابع هدف نیز منفی‌تر خواهد شد. به‌طور کلی با افزایش وزن تابع هدف اول، این تابع هدف نسبت به تابع هدف دوم سهم بیشتری در مقادیر تابع هدف کلی دارد و این نکته به‌صورت برعکس نیز صادق است. با توجه به مطالبی که گفته شد، در مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه، بهترین جواب به مقادیر وزن‌های هر یک از توابع هدف بستگی دارد. مقادیر بهترین وزن‌ها نیز به شرایط مسئله و منطقه بستگی دارد. در این مطالعه، تابع هدف اول در جستجوی بهترین جواب برای کمینه کردن کمبود آب مورد نیاز است؛ در حالی که تابع هدف دوم در جستجوی بهترین جواب برای بیشینه کردن سود اقتصادی از طریق افزایش سطح زیر کشت محصولات است که منجر به افزایش نیاز آبی و افزایش میزان کمبود آب در تابع هدف اول می‌شود؛ بنابراین با توجه به مطالب گفته‌شده، انتخاب بهترین جواب مدل بستگی به مقادیر  $w_1$  و  $w_2$  دارد که می‌توان با شرایط حاکم بر منطقه بهترین وزن‌ها را تعیین کرد. به‌این ترتیب در ادامه برای بررسی جزئی‌تر، نتایج بهینه به‌دست‌آمده برای هر یک از وزن‌ها در جدول‌های ۵، ۶ و ۷ آورده شده است.

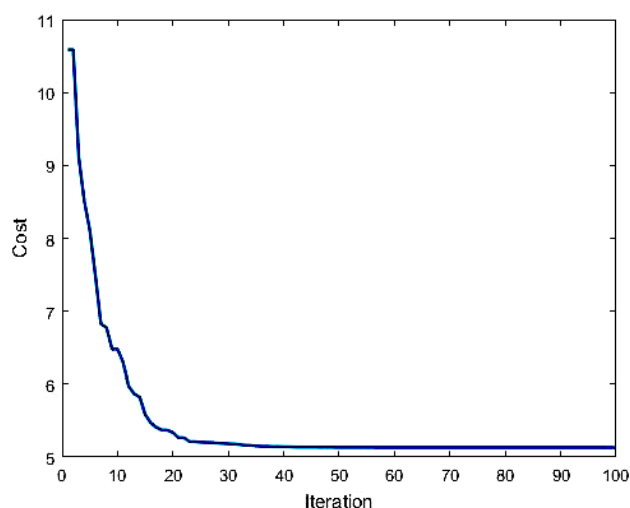
مقادیر ارائه‌شده در جدول ۵، مساحت زیر کشت بهینه را به‌عنوان یکی از متغیرهای تصمیم نشان می‌دهد. مقایسه مقادیر در حالت‌های مختلف در ترکیب‌های وزنی نشان می‌دهد که با افزایش وزن تابع هدف اول، به‌طور کلی مدل بهینه‌سازی به دنبال کمینه کردن کمبود آبی با کاهش سطح زیر کشت هر یک از محصولات در هر یک از نواحی عمرانی است. در اینجا ذکر این نکته ضروری است که مقدار تابع هدف دوم، تابعی از مقادیر متغیر سطح زیر کشت محصولات است. این تابع هدف،

به‌دلیل اینکه پیشنهاد طرح‌های بهینه مختلف به مدیران و برنامه‌ریزان منطقه یکی از اهداف اصلی این مطالعه بود، سعی شد با تعیین وزن‌های مختلف برای اهداف مختلف مدل بهینه‌ساز، شرایط مختلف بررسی شود تا نتایج به‌دست‌آمده دیدگاه‌ها و جنبه‌های مختلف اهداف مدیران و برنامه‌ریزان منطقه را پوشش دهد. به‌این ترتیب، اجرای این برنامه بهینه مدیریتی امکان درک تأثیر اجرای دیدگاه‌های مختلف را فراهم می‌کند؛ بنابراین، مدیران و تصمیم‌گیران منطقه می‌توانند تأثیر اجرای هر تصمیم را درک کرده و بهترین تصمیم را با توجه به شرایط منطقه مد نظر در راستای رسیدن به توسعه پایدار انتخاب کنند.

## نتایج و بحث

بعد از اجرای مدل بهینه‌سازی توسعه‌یافته با الگوریتم ژنتیک، همگرایی و رسیدن به جواب بهینه بعد از ۱۰۰ نسل (تکرار) به‌صورت شکل ۴ به‌دست آمد. مدل بهینه‌سازی توسعه‌یافته به‌صورت یک مدل چندهدفه با دو تابع هدف کمینه کردن کمبود آب و بیشینه کردن سود اقتصادی بوده که با استفاده از روش وزن‌دهی به یک مدل تک هدفه تبدیل شد. گفتنی است که نتایج ارائه‌شده در این بخش بر اساس محدودیت کمینه و بیشینه سطح زیر کشت ۸۰ و ۱۰۰ درصد مساحت فعلی در منطقه به‌دست آمده است.

همان‌طور که در بخش قبلی نیز گفته شد،  $w_1$  وزن تابع هدف اول همان کمینه کردن کمبود آبی و  $w_2$  وزن تابع هدف دوم که بیشینه کردن سود اقتصادی است، تعریف شد. هنگام استفاده از روش وزن‌دهی در تبدیل مدل بهینه‌سازی چندهدفه به مدل تک هدفه، تعیین مقادیر وزن‌ها دارای اهمیت زیادی است و تأثیر قابل توجهی در مقادیر جواب‌های بهینه دارد. بدین منظور ترکیب وزن‌های مختلف برای توابع هدف اول و دوم و تأثیر آن در مقدار تابع هدف کلی ارزیابی شد. گفتنی است که مقادیر وزنی  $w_1$  و  $w_2$  به‌گونه‌ای تعیین شد که مجموع آن‌ها برابر ۲ شود. نتایج حاصل از اعمال مقادیر مختلف وزن‌دهی توابع هدف در جدول ۴ آورده شده است.



شکل ۴. همگرایی رسیدن به جواب بهینه

جدول ۴. مقادیر تابع هدف در وزن‌های مختلف

| ترکیب وزنی | وزن تابع هدف اول<br>(w <sub>1</sub> ) | وزن تابع هدف دوم<br>(w <sub>2</sub> ) | تابع هدف اول<br>(F <sub>1</sub> ) | تابع هدف دوم<br>(F <sub>2</sub> ) | تابع هدف کلی<br>(F) |
|------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|
| ۱          | ۰                                     | ۲                                     | ۰/۳۶۴                             | ۰/۱۲۲                             | -۰/۲۴۳              |
| ۲          | ۰/۴                                   | ۱/۶                                   | ۰/۱۱۴                             | ۰/۱۰۷                             | -۰/۱۲۶              |
| ۳          | ۰/۸                                   | ۱/۲                                   | ۰/۲۲۸                             | ۰/۱۱۲                             | ۰/۰۴۹               |
| ۴          | ۱                                     | ۱                                     | ۰/۱۳۵                             | ۰/۱۰۶                             | ۰/۰۲۹               |
| ۵          | ۱/۲                                   | ۰/۸                                   | ۰/۱۰۵                             | ۰/۱۰۵                             | ۰/۰۴۲               |
| ۶          | ۱/۶                                   | ۰/۴                                   | ۰/۰۸۴                             | ۰/۱۰۱                             | ۰/۰۹۴               |
| ۷          | ۲                                     | ۰                                     | ۰/۰۹۷                             | ۰/۱۰۴                             | ۰/۱۹۴               |

جدول ۵. مقادیر سطح زیر کشت محصولات منتخب نواحی آبیاری در وزن‌های مختلف برحسب هکتار

| سطح زیر کشت (هکتار) |        |     |        |     |        | ترکیب وزنی |
|---------------------|--------|-----|--------|-----|--------|------------|
| D                   |        | G   |        | F   |        |            |
| چای                 | برنج   | چای | برنج   | چای | برنج   |            |
| ۱۴۷۸                | ۴۵۸۵۸  | ۹۱  | ۷۴۴۴۰  | ۷۹۴ | ۴۵۶۲۲  | ۱          |
| ۱۳۵۳                | ۴۳۷۸۹  | ۸۰  | ۶۹۷۴۲  | ۶۷۳ | ۴۵۹۳۲  | ۲          |
| ۱۳۰۵                | ۴۶۲۳۰  | ۸۵  | ۶۷۹۵۷  | ۷۳۲ | ۴۵۷۸۷  | ۳          |
| ۱۲۴۹                | ۴۴۲۱.۷ | ۸۲  | ۶۸۰۷.۲ | ۷۲۴ | ۴۵۴۸.۱ | ۴          |
| ۱۲۹۱                | ۴۳۷۶۳  | ۸۷  | ۶۹۲۹۹  | ۸۳۶ | ۴۵۴۵۷  | ۵          |
| ۱۲۹۷                | ۴۳۹۲۳  | ۸۳  | ۶۷۸۶۷  | ۶۸۸ | ۴۵۴۹۱  | ۶          |
| ۱۲۴۷                | ۴۳۶۸۱  | ۸۸  | ۶۷۹۵۷  | ۶۸۳ | ۴۵۵۴۱  | ۷          |

جدول ۶. مقایسه مقادیر بهینه آب تخصیص یافته و کمبود آب نواحی آبیاری در وزنهای مختلف برحسب میلیون مترمکعب

| ترکیب وزنی | F           |                |       | G           |                |       | D           |                |       |
|------------|-------------|----------------|-------|-------------|----------------|-------|-------------|----------------|-------|
|            | نیاز آبیاری | آب تخصیص یافته | کمبود | نیاز آبیاری | آب تخصیص یافته | کمبود | نیاز آبیاری | آب تخصیص یافته | کمبود |
| ۱          | ۴۲۳/۳       | ۳۸۰/۰          | ۴۳/۳  | ۸۱۴/۰       | ۷۳۳/۱          | ۸۰/۹  | ۴۹۷/۸       | ۴۴۲/۷          | ۵۵/۱  |
| ۲          | ۴۲۵/۴       | ۴۱۷/۰          | ۸/۵   | ۷۶۲/۶       | ۷۴۳/۸          | ۱۸/۸  | ۴۷۵/۰       | ۴۴۸/۱          | ۲۶/۹  |
| ۳          | ۴۲۴/۴       | ۳۸۰/۷          | ۴۳/۷  | ۷۴۳/۱       | ۷۲۶/۸          | ۱۶/۳  | ۵۰۰/۸       | ۴۴۹/۷          | ۵۱/۱  |
| ۴          | ۴۲۱/۶       | ۳۹۸/۹          | ۲۲/۷  | ۷۴۴/۴       | ۷۴۰/۷          | ۳/۷   | ۴۷۹/۰       | ۴۴۱/۲          | ۳۷/۸  |
| ۵          | ۴۲۲/۰       | ۴۱۸/۳          | ۳/۷   | ۷۵۷/۸       | ۷۴۲/۶          | ۱۵/۲  | ۴۷۴/۴       | ۴۴۰/۴          | ۳۴/۰  |
| ۶          | ۴۲۱/۵       | ۴۲۱/۳          | ۰/۲   | ۷۴۲/۱       | ۷۳۶/۳          | ۵/۸   | ۴۷۶/۱       | ۴۴۲/۷          | ۳۳/۴  |
| ۷          | ۴۲۱/۹       | ۴۱۴/۴          | ۷/۵   | ۷۴۳/۲       | ۷۳۳/۴          | ۹/۸   | ۴۷۳/۳       | ۴۴۴/۸          | ۲۸/۴  |

جدول ۷. مقایسه نتایج بهینه در شالیزارهای برنج نواحی آبیاری در وزنهای مختلف (مساحت زیر کشت برحسب هکتار، مقادیر نیاز آبیاری و کمبود بر حسب میلیون مترمکعب و عملکرد محصول برحسب کیلوگرم بر هکتار)

| نواحی آبیاری | نوع پارامتر   | ترکیب وزنی |        |        |         |        |        |        |
|--------------|---------------|------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
|              |               | ۱          | ۲      | ۳      | ۴       | ۵      | ۶      | ۷      |
| F            | مساحت زیر کشت | ۴۵۶۲۲      | ۴۵۹۳۲  | ۴۵۷۸۷  | ۴۵۴۸۱   | ۴۵۴۵۷  | ۴۵۴۹۱  | ۴۵۵۴۱  |
|              | نیاز آبیاری   | ۴۱۸/۸      | ۴۲۱/۷  | ۴۲۰/۳  | ۴۱۷/۵   | ۴۱۷/۳  | ۴۱۷/۶  | ۴۱۸/۱  |
|              | کمبود         | ۳۹/۶       | ۹/۳۸   | ۴۳/۵۲  | ۲۱/۹۵   | ۳/۶۵   | ۰/۲۲   | ۸/۳۳   |
|              | عملکرد محصول  | ۴۱۵۶/۴     | ۳۷۹۳   | ۴۱۵۰/۷ | ۴۰۳۴    | ۳۶۴۴/۶ | ۳۵۴۲   | ۳۷۶۹/۴ |
| G            | مساحت زیر کشت | ۷۴۴۴۰      | ۶۹۷۴۲  | ۶۷۹۵۷  | ۶۸۰۷/۲  | ۶۹۲۹۹  | ۶۷۸۶۷  | ۶۷۹۵۷  |
|              | نیاز آبیاری   | ۸۱۳/۵      | ۷۶۲/۲  | ۷۴۲/۷  | ۷۴۳/۹   | ۷۵۷/۳  | ۷۴۱/۷  | ۷۴۲/۷  |
|              | کمبود         | ۸۰/۴۳      | ۱۸/۸   | ۱۶/۱۳  | ۳/۶۴    | ۱۵     | ۵/۸۹   | ۹/۶۷   |
|              | عملکرد محصول  | ۴۱۵۵/۱     | ۳۸۱۶/۹ | ۳۷۸۷/۷ | ۳۵۹۷/۶  | ۳۷۶۸/۱ | ۳۶۳۵   | ۳۶۹۴/۴ |
| D            | مساحت زیر کشت | ۴۵۸۵۸      | ۴۳۷۸۹  | ۴۶۲۳۰  | ۴۴۲۱/۷  | ۴۳۷۶۳  | ۴۳۹۲۳  | ۴۳۶۸۱  |
|              | نیاز آبیاری   | ۴۸۹/۵      | ۴۶۷/۴  | ۴۹۳/۵  | ۴۷۲/۰   | ۴۶۷/۱  | ۴۶۸/۸  | ۴۶۶/۳  |
|              | کمبود         | ۵۰/۰۱      | ۲۶/۰۵  | ۵۰/۹۸  | ۳۷/۹۶   | ۳۳/۷۴  | ۳۴/۱۷  | ۲۷/۸   |
|              | عملکرد محصول  | ۴۱۵۲/۳     | ۴۰۵۱/۶ | ۴۱۵۱   | ۴۱۴۲/۳۵ | ۴۱۲۱/۸ | ۴۱۲۳/۸ | ۴۰۷۱/۶ |

در برابر کمبود آب بود که تابع عملکرد این محصول با توجه به میزان آب در دسترس نیز در معادله ۱۰ ارائه شد؛ بنابراین سعی شد با توجه به معادله تابع عملکرد برنج، مقادیر عملکرد این محصول پیشینه شود. بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول ۷، بیشترین عملکرد محصول برنج در شبکه مربوط به شرایط ترکیب وزنی اول ( $w_1 = 0, w_2 = 2$ ) به دست آمده است.

از آنجا که برنج نسبت به چای دارای مصرف آب چشمگیری است و علاوه بر این بخش عمده مصرف آب محصول چای از طریق آب زیرزمینی تأمین می‌شود و به منظور آبیاری برنج از انواع منابع آبی منطقه استفاده می‌شود، در ادامه نیاز آبی برنج به همراه مقادیر آب تخصیص یافته به اراضی شالیزاری از هر یک از منابع آبی بررسی می‌شود. به این ترتیب، نقش منابع آبی مختلف در تأمین نیازهای آبی برنج در شبکه آبیاری و زهکشی برنج بررسی می‌شود. در جدول ۸، این مقادیر برای هر یک از شرایط ترکیب وزنی اختصاص یافته به توابع هدف آورده شده است. برای بررسی جزئی تر نتایج شرایط وزنی ( $w_1 = 0, w_2 = 2$ )، ( $w_1 = 1, w_2 = 1$ ) و ( $w_1 = 2, w_2 = 0$ ) به صورت شکل ۵ ارائه شده است. در این شکل مقادیر برداشتی از هر یک از منابع و مقدار تأمین نیاز آبی بر اساس مقدار نیاز آبیاری نشان داده شده است.

با توجه به نمودار ستونی شکل ۴، به طور کلی بیشترین و کمترین درصد تأمین نیاز آبی مربوط به شرایط وزنی ( $w_1 = 0, w_2 = 2$ ) و ( $w_1 = 2, w_2 = 0$ ) است. مقادیر درصد تأمین نیازهای آبی اراضی شالیزاری و درصد برداشت از منابع مختلف آبی در جدول ۹ آورده شده است. نتایج در این بخش نشان می‌دهد که کانال شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود (آب ذخیره شده در سد سفیدرود) نقش مهمی در تأمین نیاز آبی نواحی آبیاری F، G و D دارد؛ بنابراین ضروری است که با اعمال مدیریت برداشت آب کانال‌های واقع در هر یک از نواحی، تخصیص به نحوی صورت گیرد که کل سطح شبکه به این منبع آبی دسترسی داشته باشند و به گونه‌ای نباشد که

تابعی از جنس پیشینه کردن است و عکس تابع هدف اول در مقدار تابع هدف کلی عمل می‌کند؛ بنابراین در عمل جستجوی بهترین جواب در الگوریتم بهینه‌سازی با کمینه کردن سطح زیر کشت در تابع هدف اول و پیشینه کردن سطح زیر کشت در تابع هدف دوم انجام می‌شود؛ بنابراین با افزایش وزن تابع هدف دوم، مقادیر بهینه سطح زیر کشت افزایش می‌یابد و هرچه از وزن تابع هدف دوم کم می‌شود و به وزن تابع هدف اول اضافه می‌شود، مقادیر بهینه سطح زیر کشت به دست آمده کاهش می‌یابد (جدول ۵). به این ترتیب، مقادیر بهینه مقادیر سطح زیر کشت به صورت بینابینی هر دو تابع هدف را تأمین می‌کند. در ادامه، همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده شده است، مقادیر بهینه آب تخصیص یافته به هر یک از نواحی آبیاری به همراه کمبود آبی یا همان نیازهای آبی تأمین نشده هر یک از نواحی در وزن‌های مختلف قابل مقایسه است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که کمترین مقادیر نیازهای تأمین نشده در نواحی مختلف آبیاری متفاوت است؛ به طوری که در ناحیه‌های آبیاری F و G، کمترین کمبود مربوط به ترکیب وزنی ۶ و در ناحیه آبیاری D، کمترین کمبود مربوط به ترکیب وزنی ۷ است که مدل بهینه‌سازی در این شرایط سعی کرده کمترین مقادیر سطح زیر کشت را به عنوان مقادیر بهینه برای هر یک از نواحی آبیاری ارائه دهد. در مقابل کمترین مقادیر نیاز تأمین نشده، بیشترین مقادیر در ناحیه آبیاری F، برای ترکیب وزنی سوم و در ناحیه‌های آبیاری D و G، در شرایط ترکیب وزنی اول به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده شد که در یک ترکیب وزنی همه نواحی آبیاری به طور یکسان عمل نکرده است. این تفاوت به دلیل ساختار انتخاب نوع توابع هدف است که همان‌طور که گفته شد، مقادیر بهینه سطح زیر کشت در شرایطی به دست آمده است که سعی می‌کند به صورت بینابینی هر دو تابع هدف را تأمین کند.

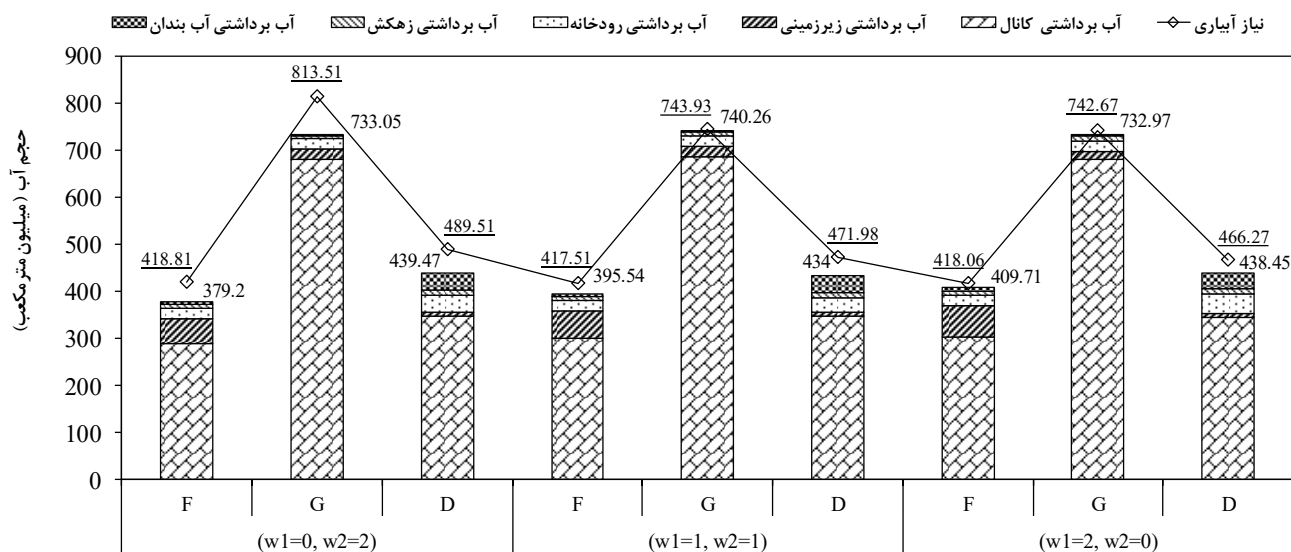
یکی از نکاتی که در مدل بهینه‌سازی توسعه یافته در این مطالعه سعی شد بررسی شود، میزان عملکرد محصول برنج

جدول ۸. مقادیر آب تخصیص یافته به اراضی شالیزاری از هر یک از منابع آبی در وزنهای مختلف (برحسب میلیون مترمکعب)

| ترکیب وزنی | نواحی آبیاری | نیاز آبیاری | آب برداشتی<br>کانال | آب برداشتی<br>زیرزمینی | آب برداشتی<br>زهکش | آب برداشتی<br>رودخانه | آب برداشتی<br>آب بندان |
|------------|--------------|-------------|---------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|
| ۱          | F            | ۴۱۸/۸       | ۲۹۰/۲               | ۵۲/۸                   | ۸/۴                | ۲۲/۵                  | ۵/۴                    |
|            | G            | ۸۱۳/۵       | ۶۸۱/۰               | ۲۲/۶                   | ۷/۳                | ۲۰/۹                  | ۱/۳                    |
|            | D            | ۴۸۹/۵       | ۳۴۶/۷               | ۱۰/۱                   | ۱۱/۱               | ۳۶/۵                  | ۳۵/۱                   |
| ۲          | F            | ۴۲۱/۷       | ۲۹۹/۹               | ۷۰/۱                   | ۷/۷                | ۲۴/۲                  | ۱۰/۴                   |
|            | G            | ۷۶۲/۲       | ۶۸۷/۱               | ۲۳/۰                   | ۱۱/۴               | ۲۰/۵                  | ۱/۳                    |
|            | D            | ۴۶۷/۴       | ۳۴۶/۰               | ۱۰/۰                   | ۱۰/۸               | ۴۰/۲                  | ۳۴/۴                   |
| ۳          | F            | ۴۲۰/۳       | ۲۹۲/۳               | ۴۳/۶                   | ۷/۹                | ۲۴/۹                  | ۸/۰                    |
|            | G            | ۷۴۲/۷       | ۶۸۱/۸               | ۱۳/۰                   | ۱۲/۹               | ۱۷/۹                  | ۰/۹                    |
|            | D            | ۴۹۳/۵       | ۳۴۴/۵               | ۱۰/۸                   | ۱۲/۵               | ۳۹/۴                  | ۳۵/۵                   |
| ۴          | F            | ۴۱۷/۵       | ۳۰۱/۴               | ۵۶/۴                   | ۶/۹                | ۲۴/۳                  | ۶/۶                    |
|            | G            | ۷۴۳/۹       | ۶۸۶/۶               | ۲۱/۴                   | ۹/۵                | ۲۱/۶                  | ۱/۱                    |
|            | D            | ۴۷۲/۰       | ۳۴۷/۰               | ۸/۷                    | ۱۲/۱               | ۳۰/۵                  | ۳۵/۷                   |
| ۵          | F            | ۴۱۷/۳       | ۲۹۹/۹               | ۶۹/۲                   | ۷/۹                | ۲۶/۷                  | ۹/۹                    |
|            | G            | ۷۵۷/۳       | ۶۸۵/۴               | ۲۲/۹                   | ۱۱/۶               | ۲۱/۱                  | ۱/۳                    |
|            | D            | ۴۶۷/۱       | ۳۴۳/۲               | ۱۰/۴                   | ۹/۴                | ۳۹/۰                  | ۳۱/۳                   |
| ۶          | F            | ۴۱۷/۶       | ۳۰۱/۸               | ۷۱/۵                   | ۸/۱                | ۲۴/۶                  | ۱۱/۳                   |
|            | G            | ۷۴۱/۷       | ۶۸۰/۸               | ۲۲/۱                   | ۱۱/۴               | ۲۰/۳                  | ۱/۲                    |
|            | D            | ۴۶۸/۸       | ۳۴۵/۸               | ۸/۹                    | ۱۲/۸               | ۳۱/۶                  | ۳۵/۶                   |
| ۷          | F            | ۴۱۸/۱       | ۳۰۲/۱               | ۶۷/۱                   | ۸/۳                | ۲۲/۵                  | ۹/۷                    |
|            | G            | ۷۴۲/۷       | ۶۸۰/۹               | ۱۷/۷                   | ۱۲/۳               | ۲۱/۱                  | ۱/۰                    |
|            | D            | ۴۶۶/۳       | ۳۴۵/۶               | ۸/۱                    | ۱۲/۱               | ۳۹/۷                  | ۳۳/۰                   |

اختلاف حجم آب برداشتی اراضی واقع در ابتدای شبکه به دلیل دسترسی بیشتر به این منبع آبی بسیار بیشتر از اراضی انتهایی یا همان پایین دست شبکه باشد. به عبارت دیگر عدالت توزیع آب در منطقه برقرار شود. علاوه بر این، عدم برقراری این نکته در شبکه باعث می شود که کشاورزان

پایین دست برای تأمین نیاز آبیاری شالیزارها در صورت در دسترس نبودن رودخانه ها با توجه به شرایط مکانی به سمت استفاده از دومین منبع آبی این منطقه یعنی آب زیرزمینی روی آورند که برداشت بی رویه این منبع آبی مهم نیز باعث ایجاد اثرهای زیانباری به آبخوان های واقع در این منطقه



شکل ۵. مقایسه آب تخصیص یافته از هر یک از منابع موجود و نیاز آبی برنج در محدودیت ۸۰ و ۱۰۰ درصد سطح زیر کشت فعلی (کل حجم آب تخصیص یافته در بالای ستون‌ها و کل نیاز آبی در هر یک نواحی آبیاری در سمت چپ نقاط نمودار خطی آورده شده است).

جدول ۹. مقایسه مقادیر درصد تأمین نیاز و درصد برداشت از هر یک از منابع آبی موجود در شرایط وزنی مختلف

| ترکیب وزنی                               | نواحی آبیاری | نیاز تأمین شده | آب برداشتی کانال | آب برداشتی زیرزمینی | آب برداشتی زهکش | آب برداشتی رودخانه | آب برداشتی آب بندان |
|------------------------------------------|--------------|----------------|------------------|---------------------|-----------------|--------------------|---------------------|
| (w <sub>1</sub> = 0, w <sub>2</sub> = 2) | F            | ۹۰/۵           | ۷۶/۵             | ۱۳/۹                | ۲/۲             | ۵/۹                | ۱/۴                 |
|                                          | G            | ۹۰/۱           | ۹۲/۹             | ۳/۱                 | ۱               | ۲/۹                | ۰/۲                 |
|                                          | D            | ۸۹/۸           | ۷۸/۹             | ۲/۳                 | ۲/۵             | ۸/۳                | ۸                   |
| (w <sub>1</sub> = 1, w <sub>2</sub> = 1) | F            | ۹۴/۷           | ۷۶/۲             | ۱۴/۳                | ۱/۷             | ۶/۱                | ۱/۷                 |
|                                          | G            | ۹۹/۵           | ۹۲/۸             | ۲/۹                 | ۱/۳             | ۲/۹                | ۰/۲                 |
|                                          | D            | ۹۲             | ۸۰               | ۲                   | ۲/۸             | ۷                  | ۸/۲                 |
| (w <sub>1</sub> = 2, w <sub>2</sub> = 0) | F            | ۹۸             | ۷۳/۷             | ۱۶/۴                | ۲               | ۵/۵                | ۲/۴                 |
|                                          | G            | ۹۸/۷           | ۹۲/۹             | ۲/۴                 | ۱/۷             | ۲/۹                | ۰/۱                 |
|                                          | D            | ۹۴             | ۷۸/۸             | ۱/۸                 | ۲/۸             | ۹/۱                | ۷/۵                 |

در تحلیل نتایج به دست آمده از توسعه مدل بهینه‌سازی مدیریت آب، زمین و غذا در منطقه مورد مطالعه همه ترکیب‌های وزنی بررسی شد. درحالی‌که ممکن است این سؤال در ذهن مخاطب ایجاد شود که بهترین جواب کدام جواب است. برای پاسخ به این سؤال همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، لازم است تأکید شود که انتخاب بهترین جواب

به دلیل ساحلی بودن و نوع بافت خاک آبخوان می‌شود که پیشروی آب شور و فرونشست زمین از مهم‌ترین اثرهای برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در این ناحیه است. به‌طور کلی با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول ۹، آب برداشتی از زهکش و آب‌بندان کمترین سهم را در تأمین نیازهای آبی اراضی شالیزاری دارد.

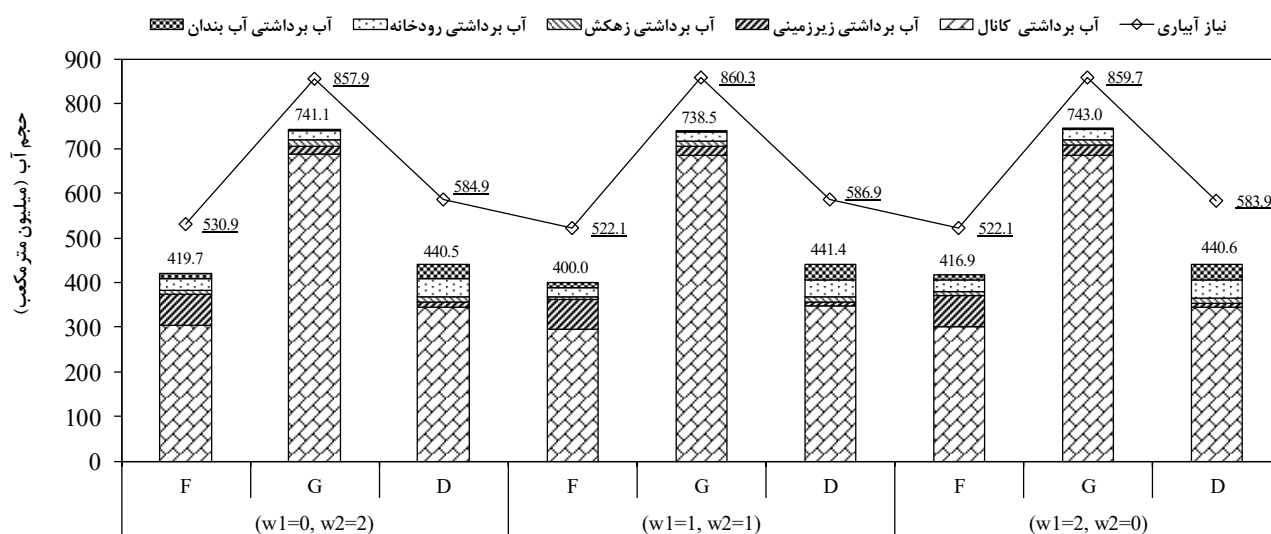
شرایط وزنی ( $w_1 = 1, w_2 = 1$ )، مقادیر بهینه سطح زیر کشت افزایش بیشتری نسبت در محدودیت‌های مختلف سطح زیر کشت دارد.

در بررسی و تحلیل نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه، مقادیر پارامترهای مهم در قضاوت بهترین تصمیم در مدیریت برنامه‌ریزی آینده آورده شده است. به‌دلیل اینکه برنامه‌ریزی منابع آبی در هر یک از سه ناحیه آبیاری  $F$ ،  $G$  و  $D$  به‌صورت جداگانه نیست و به‌هم‌پیوسته است، مقادیر پارامترها به‌صورت کلی برای هر یک از نواحی در نظر گرفته شده است؛ بنابراین سیاستی انتخاب می‌شود که در کل بهترین جواب را در کل منطقه مورد مطالعه به همراه داشته باشد و با توجه به جواب‌های به‌دست‌آمده در این مطالعه، انتخاب بهترین جواب به عهده تصمیم‌گیرندگان و مدیران منطقه است که با لحاظ کردن شرایط منطقه تصمیم‌گیری می‌کنند و هدف این مطالعه تنها نمایش اثرهای اجرای هر یک از سیاست‌ها در منطقه است.

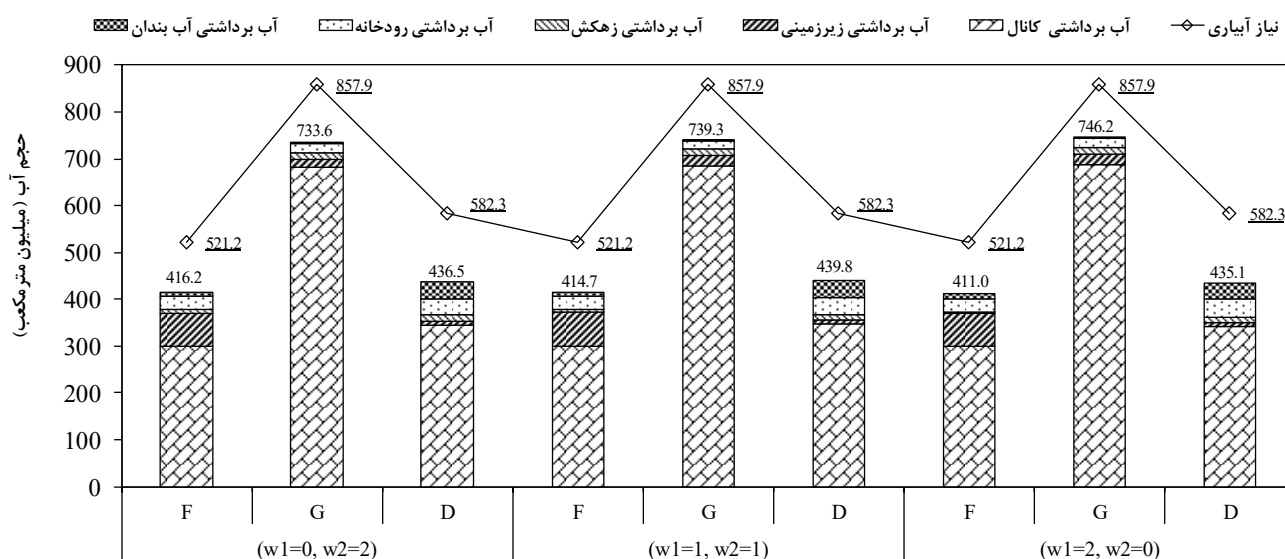
### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با توجه بر مدل مفهومی مبتنی بر سیستم پویا برای دو محصول چای و برنج در نواحی آبیاری شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود نتایجی به‌دست آمد که در ادامه آورده شده است. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، انتخاب بهترین جواب مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه به مقادیر وزنی توابع هدف بستگی دارد و تصمیم‌گیرندگان با تغییر این مقادیر می‌توانند پاسخ‌های مختلفی را برای یک مسئله بهینه‌سازی به‌دست آورند. علاوه بر این، مدل بهینه‌سازی با ترکیب وزنی مختلف، سطح زیر کشت و آب تخصیص‌یافته به نواحی آبیاری را به‌گونه‌ای تعیین می‌کند که کمبود آب کمینه شود و مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم برای هر ناحیه آبیاری را براین اساس ارائه می‌دهد. بر اساس نتایج، مدل بهینه‌سازی توانسته است با پیشینه کردن عملکرد محصول برنج، بهترین مقادیر عملکرد را با توجه به کمبود آب به‌دست آورد و این نتایج نشان می‌دهد که توابع هدف مدل به‌صورت مؤثر

بستگی به شرایط منطقه و سیاست تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان منطقه در هر برهه زمانی دارد. برای نمونه ممکن است شرایط در منطقه به نحوی باشد که رسیدن به بیشترین سود اقتصادی، هدف مسئولان باشد. در این صورت سعی می‌شود، جواب‌هایی انتخاب شود که مقدار تابع هدف دوم بیشتر از تابع هدف اول باشد و در حالتی که هدف اصلی رسیدن به درصد تأمین آب زیاد باشد، باید وزن تابع هدف اول بیشتر باشد. اما با توجه به نوع توابع هدف در نظر گرفته‌شده در این مطالعه پیشنهاد می‌شود از ترکیب وزنی نزدیک به وزن ( $w_1 = 1, w_2 = 1$ ) استفاده شود؛ زیرا هر دو تابع هدف در جهت تأمین اهداف مورد نظر در منطقه به هم وابسته هستند. همان‌طور که گفته شد، یکی از اهداف این مطالعه، کمینه کردن کمبود آب یا همان نیاز تأمین نشده است که یکی از راه‌حل‌های مؤثر به‌کار گرفته‌شده برای رسیدن به این هدف، تغییر سطح زیر کشت محصولات است. در این راستا، مدل بهینه‌سازی توسعه‌یافته در محدودیت کمینه و بیشینه سطح زیر کشت ۸۰ و ۱۰۰ درصد، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد و سطح زیر کشت فعلی از لحاظ میزان کمبودها (نیاز تأمین نشده) بررسی شد. با توجه به ماهیت توابع هدف و متغیرهای تصمیم مدل توسعه‌یافته، جواب‌های بهینه طوری انتخاب شدند که بیشترین سود اقتصادی را از طریق بهترین متغیرهای تصمیم سطح زیر کشت و کمترین میزان کمبود آبی را از طریق بیشترین استفاده از منابع آب موجود و کمترین سطح زیر کشت داشته باشند. گفتنی است که هدف از قرار دادن محدودیت سطح زیر کشت فعلی به‌عنوان مقادیر کمینه و بیشینه محدودیت سطح زیر کشت، یافتن مقادیر کمبود آب فعلی در صورت تخصیص بهینه منابع آب موجود در منطقه است. مقادیر نیاز آبی، حجم آب تخصیص‌یافته از هر منبع آبی برای تأمین نیاز آبی و مقادیر کمبود آب برای هر یک از محدودیت‌های سطح زیر کشت اعمال‌شده در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ و همچنین جدول ۱۰ آورده شده است. مقایسه مقادیر بهینه سطح زیر کشت در شرایط محدودیتی مختلف و وزن‌های مختلف نشان داد که در



شکل ۶. مقایسه آب تخصیص‌یافته از هر یک از منابع موجود و نیاز آبی برنج در محدودیت ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد سطح زیر کشت فعلی (کل حجم آب تخصیص‌یافته در بالای ستون‌ها و کل نیاز آبی در هر یک نواحی آبیاری در سمت چپ نقاط نمودار خطی آورده شده است)



شکل ۷. مقایسه آب تخصیص‌یافته از هر یک از منابع موجود سطح زیر کشت فعلی و نیاز آبی برنج (کل حجم آب تخصیص‌یافته در بالای ستون‌ها و کل نیاز آبی در هر یک نواحی آبیاری در سمت چپ نقاط نمودار خطی آورده شده است)

رعایت این امر کشاورزان را به برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی سوق می‌دهد که پیامدهایی همچون پیشروی آب شور و فرونشست زمین را به دنبال دارد.

مطالعه حاضر، مدل بهینه‌سازی مدیریت آب، زمین و غذا را برای منطقه مورد مطالعه توسعه داد. نتایج نشان داد که بهترین

عمل کرده‌اند. بررسی نتایج نشان داد که کانال‌های شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود نقش مهمی در تأمین نیاز آبی نواحی آبیاری دارد و برای مدیریت آب کانال‌ها، تخصیص باید به گونه‌ای باشد که تمامی اراضی به منابع آبی دسترسی داشته باشند و تفاوتی بین برداشت بالادست و پایین‌دست نباشد. عدم

جدول ۱۰. مقایسه مقادیر پارامترهای مهم در برنامه‌ریزی در وزن‌ها و شرایط مختلف محدودیت سطح زیر کشت برای محصول برنج (مساحت زیر کشت برحسب هکتار، نیاز آبیاری، کمبود بر حسب میلیون مترمکعب و عملکرد محصول بر حسب کیلوگرم بر هکتار)

| شرایط محدودیت                     | نواحی آبیاری | پارامترها     | ( $w_1=0, w_2=2$ ) | ( $w_1=1, w_2=1$ ) | ( $w_1=2, w_2=0$ ) |
|-----------------------------------|--------------|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Amin=Acurrent, Amax=Acurrent      | F            | مساحت زیر کشت | ۵۶۷۷۵              | ۵۶۷۷۵              | ۵۶۷۷۵              |
|                                   |              | نیاز آبیاری   | ۵۲۱/۲              | ۵۲۱/۲              | ۵۲۱/۲              |
|                                   |              | کمبود         | ۱۰۴/۹              | ۱۰۶/۵              | ۱۱۰/۱              |
|                                   |              | عملکرد محصول  | ۳۳۶۳/۴             | ۳۳۱۹/۱             | ۳۲۰۸/۷             |
|                                   | G            | مساحت زیر کشت | ۷۸۵۰۳              | ۷۸۵۰۳              | ۷۸۵۰۳              |
|                                   |              | نیاز آبیاری   | ۸۵۷/۹              | ۸۵۷/۹              | ۸۵۷/۹              |
|                                   |              | کمبود         | ۱۲۴/۳              | ۱۱۸/۶              | ۱۱۱/۷              |
|                                   |              | عملکرد محصول  | ۳۹۷۹/۹             | ۴۰۲۳/۳             | ۴۰۶۷/۸             |
|                                   | D            | مساحت زیر کشت | ۵۴۵۵۵              | ۵۴۵۵۵              | ۵۴۵۵۵              |
|                                   |              | نیاز آبیاری   | ۵۸۲/۳              | ۵۸۲/۳              | ۵۸۲/۳              |
|                                   |              | کمبود         | ۱۴۵/۸              | ۱۴۲/۵              | ۱۴۷/۳              |
|                                   |              | عملکرد محصول  | ۲۴۶۶/۶             | ۲۵۸۸/۲             | ۲۴۱۲/۷             |
| Amin=Acurrent, Amax=1.2(Acurrent) | F            | مساحت زیر کشت | ۵۷۸۳۲              | ۵۶۸۷۱              | ۵۶۸۷۰              |
|                                   |              | نیاز آبیاری   | ۵۳۰/۸۹             | ۵۲۲/۰۷             | ۵۲۲/۰۶             |
|                                   |              | کمبود         | ۱۱۱/۱۳             | ۱۲۲/۰۱             | ۱۰۵/۱۴             |
|                                   |              | عملکرد محصول  | ۳۲۴۰/۴             | ۲۸۰۹/۷             | ۳۳۶۲/۵             |
|                                   | G            | مساحت زیر کشت | ۷۸۵۰۳              | ۷۸۷۱۸              | ۷۸۶۶۷              |
|                                   |              | نیاز آبیاری   | ۸۵۷/۹۲             | ۸۶۰/۲۷             | ۸۵۹/۷۱             |
|                                   |              | کمبود         | ۱۱۷/۴۴             | ۱۲۱/۷۹             | ۱۱۶/۷۱             |
|                                   |              | عملکرد محصول  | ۴۰۳۱/۷             | ۴۰۰۲/۶             | ۴۰۳۸/۲             |
|                                   | D            | مساحت زیر کشت | ۵۴۷۹۰              | ۵۴۹۸۱              | ۵۴۶۹۷              |
|                                   |              | نیاز آبیاری   | ۵۸۴/۸۵             | ۵۸۶/۸۹             | ۵۸۳/۸۶             |
|                                   |              | کمبود         | ۱۴۴/۳۶             | ۱۴۵/۴۴             | ۱۴۳/۲۵             |
|                                   |              | عملکرد محصول  | ۲۵۴۳/۹             | ۲۵۲۳               | ۲۵۷۵/۳             |

توسعه یافته می‌تواند با تغییر سطح زیر کشت محصولات و بیشترین استفاده از منابع آب موجود، کمترین میزان کمبود آبی را داشته باشد. در نهایت، سیاستی انتخاب می‌شود که در کل بهترین جواب را در کل منطقه مورد مطالعه به همراه داشته باشد و با توجه به جواب‌های به دست آمده در این مطالعه، انتخاب بهترین جواب به عهده تصمیم‌گیرندگان و مدیران منطقه است.

جواب به شرایط منطقه، سیاست تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان در هر برهه زمانی بستگی دارد. با توجه به نوع توابع هدف، به منظور رسیدن به بیشترین سود اقتصادی و تأمین آب بالا و همچنین کمینه کردن کمبود آب یا همان نیازهای تأمین نشده پیشنهاد می‌شود که از ترکیب وزنی نزدیک به وزن ( $w_1=1, w_2=1$ ) استفاده شود. نتایج همچنین نشان داد که مدل بهینه‌سازی

## References

## منابع مورد استفاده

1. Akpoti, K., T. Groen, E. Dossou-Yovo, A.T. Kabo-bah and S.J. Zwart. 2022. Climate change-induced reduction in agricultural land suitability of West-Africa's inland valley landscapes. *Agricultural Systems* 200: 103429.
2. Amini, K., S. Janatrostami, N. Pirmoradian and A. Ashrafzadeh. 2018. Eco-efficiency assessment in Command area of F1 in Sefidroud Irrigation and Drainage Network. *Iran- Water Resources Research* 14(3): 114-124.
3. Anonymous. 2004. Rehabilitation Studies of the Sefidroud irrigation and drainage network, Gilan. Gilan Regional Water Authority, Pandam Consulting Engineers, Volume 10 (in Farsi).
4. Avarand, Y., S. Janatrostami, A. Ashrafzadeh and N. Pirmoradian. 2023. Developing Fuzzy Multi-Objective Planning Model for Agricultural Water Management in Areas outside the Sefidrud Irrigation and Drainage Network by Determining Effective Precipitation. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 53(8): 1901-1920 (in Farsi).
5. Bai, T., J. Chang, F. Chang, Q. Huang, Y. Wang and G. Chen. 2015. Synergistic gains from the multi-objective optimal operation of cascade reservoirs in the Upper Yellow River basin. *Journal of Hydrology* 523: 758-767.
6. Benites Lazaro, L.L., L.L. Giatti and J.A. Puppim de Oliveira. 2021. Water-energy-food nexus approach at the core of businesses how businesses in the bioenergy sector in Brazil are responding to integrated challenges? *Journal of Cleaner Production* 127102.
7. Cai, B., K. Hubacek, K. Feng, W. Zhang, F. Wang and Y. Liu. 2020. Tension of agricultural land and water use in China's trade: tele-connections, hidden drivers and potential solutions. *Environmental Science and Technology* 54(9): 5365-5375.
8. Cao, X., H. Wang, B. Zhang, J. Liu and J. Yang. 2024. Sustainable management of land use patterns and water allocation for coordinated multidimensional development. *Journal of Cleaner Production* 457: 142412.
9. Cherif, H., J. Belhadj and G. Champenois. 2021. Intelligent optimization of a hybrid renewable energy system-powered water desalination unit. *International Journal of Environmental Science and Technology* 1-14.
10. Darbandsari, P., R. Kerachian, S. Malakpour-Estalaki and H. Khorasani. 2020. An agent-based conflict resolution model for urban water resources management. *Sustainable Cities and Society* 57: 102112.
11. Das, A., B. Sahoo and S.N. Panda. 2020. Evaluation of nexus-sustainability and conventional approaches for optimal water-energy-land-crop planning in an irrigated canal command. *Water Resources Management* 34(8): 2329-2351.
12. Djehdian, L.A., C.M. Chini, Marston, L., M. Konar and A.S. Stillwell. 2019. Exposure of urban food-energy-water (FEW) systems to water scarcity. *Sustainable Cities and Society* 50: 101621.
13. Fang, D., Q. Cai, F. Wu, B. Chen and L. Zhang. 2022. Modified linkage analysis for water-land nexus driven by interregional trade. *Journal of Cleaner Production* 353: 131547.
14. Feng, Y., S. Chen and L. Zhang. 2013. System dynamics modeling for urban energy consumption and CO2 emissions: A case study of Beijing, China. *Ecological Modelling* 252:44-52.
15. Fitton, N., P. Alexander and N. Arnell. 2019. The vulnerabilities of agricultural land and food production to future water scarcity. *Global Environmental Change: Human and Policy Dimension* 58: 101944.
16. Forrester, J.W. 1961. Industrial Dynamics. MIT Press, Cambridge.
17. Guan, S., M. Han, X. Wu, C. Guan and B. Zhang. 2019. Exploring energy-water-land nexus in national supply chains: China 2012. *Energy* 185: 1225-1234.
18. Guan, X., G. Mascaro, D. Sampson and R. Maciejewski. 2020. A metropolitan scale water management analysis of the food-energy-water nexus. *Science of The Total Environment* 701: 134478.
19. Guo, W., T. Liu and F. Dai. 2019. An improved whale optimization algorithm for forecasting water resources demand. *Applied Soft Computing* 86:105925.
20. Habibi Davijani, M., M.E. Banihabib, A. Nadjafzadeh Anvar and S.R. Hashemi. 2016. Optimization model for the allocation of water resources based on the maximization of employment in the agriculture and industry sectors. *Journal of Hydrology* 533: 430-438.
21. He, Q., S. Tan, C. Yin and M. Zhou. 2019. Collaborative optimization of rural residential land consolidation and urban construction land expansion: a case study of Huangpi in Wuhan, China. *Computers, Environment and Urban Systems* 74: 218-228.
22. Li, M., Q. Fu and V.P. Singh. 2019. Stochastic multi-objective modeling for optimization of water-food-energy nexus of irrigated agriculture. *Advances in Water Resources* 127(5): 209-224.
23. Martinsen, G., S. Liu, X. Mo and P. Bauer-Gottwein. 2019. Joint optimization of water allocation and water quality management in Haihe River basin. *Science of The Total Environment* 654: 72-84.
24. Mediavilla, M., L.J. Miguel, P. Retortillo, C. de Castro and L.F. Blázquez. 2014. Application of fuzzy tools to the automatic analysis of system dynamics models: an example of World3. *IFAC Proceedings Volumes* 47(3): 8983-8988.

25. Najafabadi, M.M., S. Ziaee and A. Nikouei. 2019. Mathematical programming model (MMP) for optimization regional cropping patterns decisions: a case study. *Agricultural Systems* 173: 218–232.
26. Naghdi, S., O. Bozorg-Haddad, M. Khorsandi and X. Chu. 2021. Multi-objective optimization for allocation of surface water and groundwater resources. *Science of the Total Environment* 776:146026.
27. Newell, J.P., B. Goldstein and A. Foster. 2019. A 40-year review of food–energy–water nexus literature and its application to the urban scale. *Environmental Research Letters* 14(7):073003.
28. Niu, S.D., X. Lyu and G.Z. Gu. 2022. A new framework of green transition of cultivated land-use for the coordination among the water-land-food-carbon nexus in China. *Land* 11(6): 933.
29. Rabie, Z., T. Honar and M.M. Bateni. 2015. Determination of optimal and and water allocation under limited water resources using soil water balance in Ordibehesht canal of Doroodzan water district. *Iran Agricultural Research* 34(2): 21-28 (in Farsi).
30. Sharma, S.K. 2021. A novel approach on water resource management with multi-criteria optimization and intelligent water demand forecasting in Saudi arabia. *Environmental Research* 208: 112578.
31. Singh, A. 2022. Judicious and optimal use of water and land resources for long-term agricultural sustainability. *Resources, Conservation and Recycling Advances* 13, 200067.
32. Tang, S., L. Zhang, Y. Hao, Y. Chang, G. Liu, Q. Liu and X. Li. 2021. System dynamics modeling for construction material flows of urban residential building: A case study of Beijing, China. *Resources, Conservation and Recycling* 168:105298.
33. Wang, C., Y. Chen, M. Sun and J. Wu. 2023. Potential of technological innovation to reduce the carbon footprint of urban facility agriculture: A food–energy–water–waste nexus perspective. *Journal of Environmental Management* 339:117806.
34. Wu, H., S. Guo, P. Guo, B. Shan and Y. Zhang. 2022. Agricultural water and land resources allocation considering carbon sink/source and water scarcity/degradation footprint. *Science of The Total Environment* 819: 152058.
35. Yan, L. and M. Liu. 2020. A simplified prediction model for energy use of air conditioner in residential buildings based on monitoring data from the cloud platform. *Sustainable Cities and Society* 60:102194.
36. Yuan, M., N. Zheng, Y. Yang and C. Liu. 2023. Robust optimization for sustainable agricultural management of the water-land-food nexus under uncertainty. *Journal of Cleaner Production* 403: 136846.