



Publisher: Agricultural Research, Education and Extension Organization

## Journal of Water Research in Agriculture

<https://wra.areeo.ac.ir/>

# Development of a Conceptual Crop Pattern Optimization Model Based on Particle Swarm Optimization under Water-Limited Conditions: Alborz Irrigation Network in Mazandaran Province

M. Fazelian, D. Akbari Nodehi\* , and A. Bagheri

Ph.D. Candidate, Department of Water Science and Engineering, QaS.C., Islamic Azad University, Ghaemshahr, Iran. [mohamadfazlian2007@iau.ir](mailto:mohamadfazlian2007@iau.ir)

Assistant Prof., Department of Water Science and Engineering, QaS.C., Islamic Azad University, Ghaemshahr, Iran. [d.akbari@iau.ac.ir](mailto:d.akbari@iau.ac.ir)

Assistant Prof., Department of Water Science and Engineering, QaS.C., Islamic Azad University, Ghaemshahr, Iran. [ali523b@yahoo.com](mailto:ali523b@yahoo.com)

### Article Info

#### Research Article

**Received:** July 14, 2026

**Accepted:** September 08, 2026

**Keywords:** Deficit irrigation; Water stress; Water allocation; Water supply scenarios; Irrigation management

**Corresponding author's email:** [d.akbari@iau.ac.ir](mailto:d.akbari@iau.ac.ir)

### Abstract

This study aimed to develop a crop pattern optimization model based on the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm for water resources management in the Alborz Irrigation Network, Mazandaran Province, Iran. Agricultural and economic data corresponded to the 2024–2025 cropping year. The model included 18 decision variables, representing cultivated areas and allocated irrigation water for nine agricultural and horticultural crops. The objective function maximized total net agricultural profit subject to water and land limitations and restrictions on changes in rice and citrus cultivated areas. Crop yield under water stress was estimated using the FAO yield response-to-water relationship and crop-specific yield response factors (Ky). Seven water-supply scenarios (100% to 40%) and three management strategies, including deficit irrigation (H1), crop pattern optimization (H2), and an integrated strategy (H3), were evaluated. Under the baseline condition (A1) and cultivated area of 3,000 ha, irrigation water consumption was 22.791 Mm<sup>3</sup>, and net profit was 5,920 billion Rials. Under H2, reducing water availability to 40% decreased net profit to 3,480 billion Rials (41.2% reduction), while economic water productivity increased from 259.8 to 382.0 thousand Rials/m<sup>3</sup> (47.1% increase). H2 consistently achieved the highest economic water productivity. Considering the trade-off between water conservation and economic returns, A4–H2 was identified as the more balanced management option, with water consumption of 15.950 million m<sup>3</sup> (30% reduction), net profit of 5,010 billion IRR (15.4% reduction), and economic water productivity of 314.1 thousand Rials/m<sup>3</sup> (20.9% increase). These findings demonstrate the potential of PSO-based optimization as a quantitative decision-support tool for crop pattern and water allocation under water-limited conditions.

Cite this article: Fazelian, M., Akbari Nodehi, D. and Bagheri, A., 2026. Development of a Conceptual Crop Pattern Optimization Model Based on Particle Swarm Optimization under Water-Limited Conditions: Alborz Irrigation Network in Mazandaran Province. *Journal of Water Research in Agriculture*, 40(1), pp.35-53.



DOI: <https://doi.org/10.22092/jwra.2026.373469.1123>



## نشریه پژوهش آب در کشاورزی

<https://wra.areeo.ac.ir>

# توسعه مدل مفهومی بهینه‌سازی الگوی کشت مبتنی بر الگوریتم ازدحام ذرات در شرایط محدودیت منابع آب در شبکه آبیاری البرز

محمد فاضلیان، داود اکبری نودهی \*  و علی باقری

دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائمشهر، ایران.

[mohamadfazlian2007@iau.ac.ir](mailto:mohamadfazlian2007@iau.ac.ir)

استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائمشهر، ایران.

[d.akbari@iau.ac.ir](mailto:d.akbari@iau.ac.ir)

استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائمشهر، ایران.

[ali523b@yahoo.com](mailto:ali523b@yahoo.com)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۵/۴/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۵/۶/۱۷

واژه‌های کلیدی: کم‌آبایی، تنش آبی، تخصیص آب، سناریوهای تأمین آب، مدیریت آبیاری

آدرس ایمیل نویسنده مسئول:

[d.akbari@iau.ac.ir](mailto:d.akbari@iau.ac.ir)

پژوهش حاضر با هدف توسعه مدل بهینه‌سازی الگوی کشت مبتنی بر الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) برای مدیریت منابع آب در شبکه آبیاری البرز، استان مازندران، انجام شد. داده‌های زراعی و اقتصادی مورد استفاده مربوط به سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ بود. مدل شامل ۱۸ متغیر تصمیم شامل سطح زیر کشت و آب آبیاری تخصیصی به ۹ محصول برنج و باغی بود. تابع هدف، بهینه‌سازی سود خالص کل کشاورزی با در نظر گرفتن محدودیت‌های آب و زمین و قید تغییرات سطح زیر کشت برنج و مرکبات بود. عملکرد محصولات تحت تنش آبی با استفاده از رابطه عملکرد-آب فائو (FAO) و ضرایب حساسیت به کم‌آبی (Ky) برآورد شد. مدل تحت هفت سناریوی تأمین آب (۴۰ تا ۱۰۰ درصد) و سه راهبرد مدیریتی شامل کم‌آبایی (H1)، اصلاح الگوی کشت (H2) و راهبرد تلفیقی (H3) ارزیابی شد. در شرایط مبنا (A1) و سطح زیر کشت ۳۰۰۰ هکتار، حجم آب مصرفی ۲۲/۷۹۱ میلیون مترمکعب و سود خالص ۵۹۲۰ میلیارد ریال بود. در راهبرد H2، کاهش منابع آب به ۴۰٪ موجب کاهش سود خالص به ۳۴۸۰ میلیارد ریال (۴۱/۲٪ کاهش) و افزایش بهره‌وری اقتصادی آب از ۲۵۹/۸ به ۳۸۲ هزار ریال بر مترمکعب (۴۷/۱٪ افزایش) شد. راهبرد H2 در تمامی سناریوها بیشترین بهره‌وری اقتصادی آب را ایجاد کرد. با توجه به توازن میان صرفه‌جویی آب و حفظ بازده اقتصادی، A4-H2 به‌عنوان گزینه متعادل‌تر شناسایی شد؛ به‌طوری‌که مصرف آب ۱۵/۹۵۰ میلیون مترمکعب (۳۰٪ کاهش)، سود خالص ۵۰۱۰ میلیارد ریال (۱۵/۴٪ کاهش) و بهره‌وری اقتصادی آب ۳۱۴/۱ هزار ریال بر مترمکعب (۲۰/۹٪ افزایش) به دست آمد. این یافته‌ها ظرفیت بهینه‌سازی مبتنی بر ازدحام ذرات را به‌عنوان ابزاری کمی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در الگوی کشت و تخصیص آب تحت شرایط محدودیت منابع نشان می‌دهد.

استناد: فاضلیان، محمد، اکبری نودهی، داود، و باقری، علی، ۱۴۰۵. توسعه مدل مفهومی بهینه‌سازی الگوی کشت مبتنی بر الگوریتم ازدحام ذرات در شرایط

محدودیت منابع آب در شبکه آبیاری البرز. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۴۰ (۱). صص ۳۵-۵۳



DOI: <https://doi.org/10.22092/jwra.2026.373469.1123>

## مقدمه

رشد جمعیت، توسعه کشاورزی و تشدید تغییرات اقلیمی طی دهه‌های اخیر فشار بر منابع آب شیرین را افزایش داده است. بخش کشاورزی همچنان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب شیرین جهان است و حدود ۷۰ درصد برداشت آب تجدیدپذیر را به خود اختصاص می‌دهد؛ این سهم در بسیاری از کشورهای خشک، از جمله ایران، بیشتر است (فائو، ۲۰۲۱).

از سوی دیگر، کاهش بارندگی، افت منابع آب زیرزمینی و تشدید خشکسالی نیز پایداری تولید کشاورزی را با چالش مواجه کرده است. از این رو، افزایش بهره‌وری آب و مدیریت تقاضای آن از الزامات اساسی توسعه پایدار کشاورزی محسوب می‌شود (فائو، ۲۰۲۴؛ فائو، ۲۰۲۵).

مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهد که مقابله با بحران کم‌آبی، بیش از توسعه منابع جدید، به افزایش بهره‌وری مصرف آب و مدیریت تقاضا وابسته است. از این رو، بهره‌وری آب، به عنوان نسبت ارزش اقتصادی یا عملکرد تولید به حجم آب مصرف‌شده، یکی از شاخص‌های مهم ارزیابی سامانه‌های کشاورزی محسوب می‌شود (مولدن و همکاران، ۲۰۱۰). افزایش بهره‌وری اقتصادی آب نه تنها موجب ارتقای درآمد بهره‌برداران می‌شود، بلکه امکان تخصیص بهینه منابع محدود آب میان محصولات مختلف را نیز فراهم می‌سازد و نقش مهمی در تحقق امنیت غذایی و توسعه پایدار دارد (فررسو سوریانا، ۲۰۰۷).

یکی از مهم‌ترین ابزارهای مدیریت تقاضای آب در کشاورزی، اصلاح الگوی کشت است، زیرا الگوی کشت بر مصرف آب، عملکرد و درآمد محصولات و بهره‌وری اقتصادی سامانه اثر مستقیم دارد. با این حال، در بسیاری از شبکه‌های آبیاری، محدودیت آب، نیاز آبی و ارزش اقتصادی محصولات به صورت هم‌زمان در تعیین الگوی کشت لحاظ نمی‌شود و این امر می‌تواند به استفاده غیربهینه از منابع آب و کاهش بهره‌وری اقتصادی منجر شود (گریس و ریز، ۲۰۰۹).

در پاسخ به این چالش، استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی در مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی کشاورزی گسترش یافته است. با توجه به پیچیدگی این مسائل، کاربرد الگوریتم‌های فراابتکاری نیز توسعه یافته است (انگلیش و همکاران، ۱۹۹۰).

این الگوریتم‌ها قادرند فضای وسیع جواب را با سرعت بالا جستجو کرده و راه‌حل‌های نزدیک به بهینه را برای مسائل پیچیده مدیریت منابع آب ارائه دهند. در میان روش‌های فراابتکاری، الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) که نخستین بار توسط کندی و ابراهام (۱۹۹۵) معرفی شد، به دلیل ساختار ساده، سرعت همگرایی مناسب، نیاز اندک به تنظیم پارامترها و توانایی حل مسائل غیرخطی و چندمتغیره، به یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی در مهندسی آب و کشاورزی تبدیل شده است.

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که این الگوریتم در مسائل تخصیص آب، بهره‌برداری از مخازن، برنامه‌ریزی آبیاری و تعیین الگوی کشت، عملکرد مناسبی نسبت به بسیاری از روش‌های کلاسیک دارد (رضایی و همکاران، ۲۰۱۷).

از سوی دیگر، برآورد دقیق عملکرد محصولات در شرایط کم‌آبی، نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت مدل‌های بهینه‌سازی دارد. یکی از معتبرترین چارچوب‌های موجود در این زمینه، رابطه عملکرد-آب ارائه‌شده در نشریه FAO-33 است که کاهش عملکرد محصول را به کمبود تبخیر و تعرق واقعی از طریق ضریب حساسیت به تنش خشکی ( $K_y$ ) مرتبط می‌کند (دورنوس و کاسام). این مفهوم در ادامه در مدل AquaCrop توسعه یافت و امروزه به عنوان یکی از معتبرترین ابزارهای تحلیل اثر تنش آبی بر عملکرد محصولات شناخته می‌شود (استدو و همکاران، ۲۰۱۲).

مطالعات انجام‌شده در سطح بین‌المللی نیز مؤید کارایی ترکیب مدل‌های شبیه‌سازی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی در مدیریت منابع آب است. پولی و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که اصلاح الگوی کشت و کم‌آبیاری

کنترل شده می تواند بهره‌وری مصرف آب را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد.

همچنین غلامی شرفخان و همکاران (۲۰۲۴) با تلفیق مدل AquaCrop و الگوریتم PSO، چارچوبی برای بهینه‌سازی برنامه آبیاری ارائه کردند که موجب افزایش قابل توجه بهره‌وری آب و بهبود تصمیم‌گیری مدیریتی شد.

در ایران نیز با توجه به محدودیت منابع آب، کاربرد الگوریتم‌های فراابتکاری در مدیریت شبکه‌های آبیاری مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. مقدسی و همکاران (۱۳۸۷) نشان دادند که الگوریتم PSO در شرایط کم‌آبی، نسبت به برخی روش‌های کلاسیک، همگرایی سریع‌تر و پایداری بیشتری داشته و موجب افزایش درآمد شبکه آبیاری زاینده‌رود شده است. خاشکی و همکاران (۱۳۹۲) با بهینه‌سازی الگوی کشت در دشت نیشابور گزارش کردند که انتقال بخشی از سطح زیرکشت محصولات بهاره به محصولات پاییزه، ضمن کاهش مصرف آب، درآمد حاصل از هر واحد آب را به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد. سعیدیان و همکاران (۱۳۹۴) نیز در مقایسه الگوریتم ژنتیک و PSO برای تخصیص آب کشاورزی، برتری الگوریتم PSO را از نظر سرعت همگرایی و دستیابی به سود اقتصادی بیشتر نشان دادند.

مطالعات بعدی نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند. خوش‌نواز (۱۳۹۹) در بررسی الگوی کشت دشت شوشتر نشان داد که استفاده از PSO موجب افزایش سود خالص محصولات با ارزش اقتصادی بالا می‌شود. سیاسر و سالاری (۱۴۰۰) نیز در دشت سیستان نتیجه گرفتند که اصلاح الگوی کشت نسبت به اعمال کم‌آبیاری، راهبرد مؤثرتری برای افزایش سود اقتصادی است. همچنین آزاد و همکاران (۱۴۰۱) در شبکه آبیاری مهاباد با بررسی سناریوهای مختلف تحویل آب در مقیاس شبکه و مزرعه نشان دادند که اصلاح الگوی کشت موجب افزایش قابل توجه بهره‌وری اقتصادی آب و سود خالص نسبت به شرایط موجود می‌شود.

مرور مطالعات داخلی و خارجی نشان می‌دهد که اگرچه کاربرد الگوریتم PSO در بهینه‌سازی الگوی کشت و تخصیص آب به‌خوبی اثبات شده، اما مدیریت پایدار آب کشاورزی همچنان نیازمند رویکردهای یکپارچه برای افزایش بهره‌وری و سازگاری با محدودیت منابع است (فائو، ۲۰۲۴؛ فائو، ۲۰۲۵).

شبکه آبیاری و زهکشی البرز به دلیل تنوع محصولات، محدودیت منابع آب و وابستگی تولید کشاورزی به میزان آب قابل تخصیص، نیازمند الگوی مدیریتی متناسب با شرایط متغیر تأمین آب است. در این شبکه، کاهش منابع آب می‌تواند به‌طور هم‌زمان بر ترکیب محصولات، سطح زیر کشت، تخصیص آب و سودآوری اثر بگذارد؛ ازاین‌رو، بررسی این عوامل در یک چارچوب یکپارچه برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی ضروری است. بااین‌حال، در بیشتر مطالعات، ارزیابی هم‌زمان سناریوهای تأمین آب، راهبردهای مدیریتی، تغییر الگوی کشت، سود خالص و بهره‌وری اقتصادی آب در مقیاس شبکه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. ازاین‌رو، توسعه مدلهایی که تعامل این عوامل را در شرایط محدودیت منابع آب تحلیل کنند، ضروری به نظر می‌رسد.

بر این اساس، اهداف پژوهش حاضر شامل توسعه یک مدل مفهومی مبتنی بر الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی هم‌زمان سطح زیر کشت و تخصیص آب، ارزیابی عملکرد شبکه آبیاری البرز تحت هفت سناریوی تأمین آب و سه راهبرد مدیریتی و تحلیل تغییرات الگوی کشت، سود خالص و بهره‌وری اقتصادی آب به‌عنوان شاخص‌های اصلی تصمیم‌گیری است. نتایج این پژوهش می‌تواند چارچوبی کاربردی برای مدیران شبکه‌های آبیاری، برنامه‌ریزان منابع آب و سیاست‌گذاران بخش کشاورزی در راستای افزایش بهره‌وری آب و سازگاری با شرایط کم‌آبی فراهم سازد.

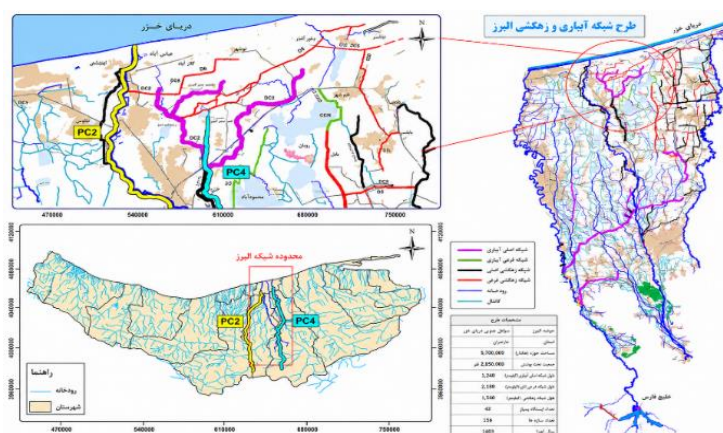
## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

شبکه آبیاری و زهکشی البرز در استان مازندران و حاشیه جنوبی دریای خزر، در پهنه جلگه‌ای خزری با اقلیم مرطوب، خاک‌های حاصلخیز و فعالیت‌های گسترده کشاورزی واقع شده است. محدوده مورد مطالعه شامل اراضی تحت پوشش دو کانال اصلی  $PC_2$  و  $PC_4$  بوده که در مجموع حدود ۳۰۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی منطقه را تحت پوشش قرار می‌دهد (شکل ۱). این شبکه برای تأمین و توزیع آب کشاورزی عمدتاً از کانال‌های روباز ثقلی و منابع سطحی و مخازن تنظیمی استفاده می‌کند؛ با این حال، نوسانات دبی و محدودیت‌های توزیع در دوره‌های اوج نیاز آبی موجب کمبود نسبی آب می‌شود از نظر اقلیمی، منطقه دارای اقلیم مرطوب خزری با میانگین بارندگی سالانه نسبتاً بالا (حدود ۷۰۰ میلی‌متر) است. با این حال، توزیع نامنظم بارش در فصل رشد، نیاز به آبیاری تکمیلی را افزایش

می‌دهد. الگوی کشت منطقه شامل برنج، گندم، جو، سویا، ذرت، مرکبات و سایر محصولات زراعی است که نیاز آبی متفاوتی دارند.

با وجود اقلیم مرطوب و بارندگی نسبتاً مناسب، توزیع زمانی نامنظم بارش و نوسانات تأمین آب در دوره اوج نیاز آبی، مدیریت منابع آب شبکه آبیاری و زهکشی البرز را با چالش مواجه می‌کند. همچنین، غالب بودن برنج و تفاوت نیاز آبی و بازده اقتصادی محصولات، ضرورت بازنگری در تخصیص آب و الگوی کشت را افزایش می‌دهد. در شرایط کم‌آبی، کاهش سطح زیر کشت، کاهش آب تخصیصی یا ترکیبی از این دو می‌تواند پیامدهای متفاوتی بر تولید و سودآوری داشته باشد. از این رو، پژوهش حاضر با توسعه مدلی برای تعیین هم‌زمان سطح زیر کشت و تخصیص آب، به ارزیابی راهبردهای مدیریتی مختلف و شناسایی گزینه‌های مناسب برای مدیریت کم‌آبی و حفظ بهره‌وری اقتصادی آب در شبکه البرز می‌پردازد.



شکل ۱- موقعیت شبکه البرز در استان مازندران

Figure 1 – Location of the Alborz Irrigation and Drainage Network in Mazandaran Province

## جمع‌آوری آمار و اطلاعات مورد نیاز

در این پژوهش، مجموعه‌ای از داده‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصادی به منظور توسعه مدل بهینه‌سازی الگوی کشت و تخصیص آب در شبکه آبیاری و زهکشی البرز مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های اقلیمی شامل دما، بارش، رطوبت نسبی و تبخیر-تعرق مرجع، داده‌های هیدرولوژیکی شامل اطلاعات منابع و آب قابل

دسترس و داده‌های کشاورزی و اقتصادی شامل سطح زیر کشت، عملکرد، نیاز آبی، هزینه تولید و قیمت فروش محصولات بود. انتخاب و پردازش داده‌ها به گونه‌ای انجام شد که ضمن بازنمایی شرایط واقعی شبکه، قابلیت استفاده در چارچوب مدل‌سازی مبتنی بر الگوریتم PSO را فراهم کند. منابع و مبنای تعیین پارامترهای جداول ۱ و ۲ در این بخش مشخص شده است. داده‌های زراعی شامل سطح زیر

کشت، عملکرد واقعی و عملکرد پتانسیل بر اساس آمار منطقه‌ای و منابع استاندارد FAO تعیین شد. همچنین، پارامترهای اقتصادی شامل هزینه تولید و قیمت فروش مربوط به سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ در نظر گرفته شد. داده‌های اقلیمی شامل پارامترهای دما، بارش، رطوبت نسبی و تبخیر-تعرق مرجع ( $ET_0$ ) بودند که بر اساس روش استاندارد پنمن-مانتیش در چارچوب FAO-56 محاسبه شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). بارش مؤثر نیز با استفاده از روش‌های پیشنهادی سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) و متناسب با شرایط اقلیم مرطوب خزری برآورد شد. اطلاعات مربوط به الگوی کشت شامل سطح زیر کشت محصولات، عملکرد واقعی و پتانسیل و همچنین ضریب حساسیت به تنش خشکی ( $K_y$ ) از ترکیب آمار بهره‌برداری منطقه‌ای و منابع استاندارد FAO استخراج و کالیبره شد (دورنبوس و کاسام، ۱۹۷۹). علاوه بر این، داده‌های مربوط به سامانه آبیاری شامل ظرفیت انتقال آب در کانال‌های اصلی  $PC_2$  و  $PC_4$ ، محدودیت‌های توزیع و نوسانات زمانی تأمین آب نیز در مدل لحاظ شد. این داده‌ها به‌عنوان قیود اصلی مدل بهینه‌سازی عمل کرده و امکان تحلیل سناریوهای مختلف کم‌آبی را فراهم ساخت.

در نهایت، تمامی داده‌ها در قالب یک ماتریس تصمیم (Decision Matrix) سازمان‌دهی شد که ورودی اصلی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) را تشکیل می‌دهد. این ساختار امکان بهینه‌سازی هم‌زمان تخصیص آب و الگوی کشت را تحت قیود منابع محدود فراهم می‌سازد.

### الگوی کشت، تراکم کشت و عملکرد محصولات در شبکه آبیاری البرز

الگوی کشت در شبکه آبیاری و زهکشی البرز بر اساس داده‌های آماری منطقه‌ای استان مازندران و اطلاعات طراحی شبکه آبیاری و زهکشی البرز به دست آمد. این الگو با هدف بازنمایی ساختار واقعی بهره‌برداری از اراضی کشاورزی و همچنین قابلیت استفاده در چارچوب مدل

بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) تنظیم شد. بر اساس نتایج بررسی‌های منطقه‌ای، محصول برنج به‌عنوان کشت غالب منطقه با بیشترین سهم از سطح زیر کشت شناخته می‌شود که بیانگر وابستگی شدید سامانه کشاورزی منطقه به منابع آب سطحی است. در مقابل، محصولات گندم و جو نقش مهمی در پایداری سامانه زراعی و کاهش ریسک کم‌آبی دارند. محصولات باغی مثل مرکبات نیز سهم قابل توجهی از سطح زیر کشت را به خود اختصاص داده‌اند.

تراکم کشت در این مطالعه به‌صورت نسبت سطح زیر کشت هر محصول به کل اراضی شبکه (۳۰۰۰ هکتار) تعریف شد. این شاخص بیانگر شدت استفاده از منابع زمین و آب بوده و به‌عنوان یکی از متغیرهای کلیدی در مدل PSO در نظر گرفته شد. افزایش سهم محصولات پر آب‌بر مانند برنج موجب افزایش فشار بر منابع آبی شبکه می‌شود، درحالی‌که افزایش سهم محصولات کم‌آب‌بر می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری آب و پایداری سامانه کشاورزی شود. عملکرد واقعی محصولات بر اساس آمار بهره‌برداری منطقه‌ای و شرایط متداول آبیاری در منطقه برآورد شده و عملکرد پتانسیل نیز بر اساس شرایط بدون تنش آبی و مطابق با استانداردهای FAO تعیین شد. اختلاف بین عملکرد واقعی و پتانسیل نشان‌دهنده اثر محدودیت منابع آب و تنش آبی در شبکه آبیاری البرز است.

### نیاز آبی محصولات الگوی کشت

نیاز آبی محصولات به‌عنوان حجم آبی تعریف می‌شود که برای تأمین تبخیر-تعرق واقعی گیاه در طول فصل رشد مورد نیاز هست و از رابطه تبخیر-تعرق گیاه  $ET_c$  از رابطه (۱) استخراج شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (1)$$

که در آن:  $ET_c$  تبخیر-تعرق گیاه،  $K_c$  ضریب گیاهی و  $ET_0$  تبخیر-تعرق مرجع است. سپس نیاز خالص آبیاری از تفاضل بارندگی مؤثر از  $ET_c$  به دست آید.

## منابع تأمین آب

منابع تأمین آب در شبکه آبیاری و زهکشی البرز شامل جریان‌های سطحی رودخانه‌ای، رواناب‌های فصلی و آب تنظیم‌شده از طریق سازه‌های کنترلی و مخازن تغذیه است. این شبکه به صورت سامانه انتقال ثقلی طراحی شده و آب مورد نیاز اراضی کشاورزی از طریق دو کانال اصلی PC<sub>2</sub> و PC<sub>4</sub> در سطح شبکه توزیع می‌شود (شکل ۱). در این پژوهش، ظرفیت تأمین آب به عنوان یکی از قیود اصلی مدل بهینه‌سازی در نظر گرفته شد. مقدار آب قابل دسترس در هر سناریوی مدیریتی (از ۱۰۰ تا ۴۰ درصد تأمین) به عنوان ورودی مدل تعریف شد تا اثر کم‌آبی بر الگوی کشت و عملکرد محصولات مورد ارزیابی قرار گیرد.

## مشخصات محصولات و پارامترهای زراعی

به منظور اجرای مدل بهینه‌سازی، مشخصات زراعی و نیاز آبی محصولات عمده شبکه آبیاری البرز بر اساس اطلاعات منطقه مطالعه، منابع معتبر و داده‌های گردآوری‌شده در سال زراعی ۱۴۰۴-۱۴۰۳ تعیین شد. این اطلاعات شامل سطح زیر کشت موجود، آب مورد نیاز، باران مؤثر، نیاز خالص آبی، مقدار آب آبیاری، عملکرد پتانسیل، عملکرد واقعی و ضریب حساسیت گیاه به تنش آبی (Ky) بوده و به عنوان داده‌های پایه مدل مورد استفاده قرار گرفت. خلاصه این اطلاعات در جدول (۱) ارائه شده است.

## هزینه تولید و قیمت فروش محصولات

به منظور محاسبه سود خالص در تابع هدف، هزینه تولید و قیمت فروش محصولات برای سال زراعی ۱۴۰۴-۱۴۰۳ تعیین شد. هزینه‌های تولید شامل کلیه هزینه‌های آماده‌سازی زمین، نهاده‌ها، عملیات داشت و برداشت بوده و قیمت فروش نیز بر اساس قیمت‌های متداول در سطح مزرعه و منابع رسمی مرتبط انتخاب شد. همچنین، هزینه‌های مرتبط با تأمین و مصرف آب آبیاری، متناسب با ساختار بهره‌برداری شبکه، در مجموعه هزینه‌های

ثابت و متغیر تولید لحاظ شد. از این رو، هزینه آب به عنوان یک هزینه مستقل و جداگانه در جدول (۲) گزارش نشده و از دوباره شماری آن در تابع هدف جلوگیری شد.

این پارامترهای اقتصادی به عنوان ورودی تابع هدف مدل بهینه‌سازی در نظر گرفته شد و مبنای محاسبه سود خالص و بهره‌وری اقتصادی آب در سناریوهای مختلف قرار گرفت. در نتیجه، سود خالص هر سناریو از تفاوت درآمد حاصل از فروش محصولات و مجموع هزینه‌های تولید، شامل اجزای ثابت و متغیر و هزینه‌های مرتبط با مصرف آب، محاسبه شد. مقادیر هزینه تولید و قیمت فروش محصولات در جدول (۲) ارائه شده است.

## توسعه مدل مفهومی بهینه‌سازی

### متغیرهای تصمیم

در مدل پیشنهادی، سطح زیر کشت و مقدار آب تخصیصی به هر یک از محصولات به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شد؛ بنابراین، بردار متغیرهای تصمیم به صورت رابطه (۲) تعریف شد.

$$X = [A_1, A_2, \dots, A_i, I_1, I_2, \dots, I_i] \quad (2)$$

که در آن:  $A_i$  سطح زیر کشت محصول  $i$  (هکتار) و  $I_i$  مقدار آب آبیاری تخصیصی به همان محصول (میلی‌متر یا مترمکعب بر هکتار) است. با توجه به بررسی ۹ محصول، مدل شامل ۱۸ متغیر تصمیم (۹ متغیر سطح زیر کشت و ۹ متغیر تخصیص آب) است.

### تابع هدف

هدف مدل، بیشینه‌سازی سود خالص کل شبکه آبیاری البرز با در نظر گرفتن درآمد حاصل از فروش محصولات، هزینه‌های تولید و هزینه مصرف آب است. تابع هدف به صورت رابطه (۳) تعریف شد.

$$\max Z = \sum_{i=1}^n (P_i Y_i A_i - C_i A_i) \quad (3)$$

که در آن،  $Z$  سود خالص کل شبکه،  $P_i$  قیمت فروش محصول،  $Y_i$  عملکرد واقعی،  $A_i$  سطح زیر کشت و  $C_i$  مجموع هزینه تولید واحد سطح محصول ( $i$ ) است. مقدار ( $C_i$ ) شامل هزینه‌های ثابت و متغیر مرتبط با تولید و

همچنین اجزای هزینه‌ای مرتبط با تأمین و مصرف آب آبیاری است.

#### قیود مدل

مدل بهینه‌سازی تحت محدودیت‌های منابع آب، اراضی قابل کشت و الزامات مدیریتی اجرا شد. مهم‌ترین قیود مدل در روابط ۵ تا ۸ ارائه شد.

محدودیت زمین:

$$\sum_i^9 A_i \leq 3000 \quad (5)$$

محدودیت منابع آب

$$\sum_{i=1}^9 A_i I_i \leq I_{\text{Available}} \quad (6)$$

محدودیت سطح زیر کشت مرکبات و برنج

$$\begin{aligned} 0.9 A_{\text{Rice.citrus}} &\leq A_{\text{Rice}} \text{ and } A_{\text{citrus}} \leq \\ 1.1 A_{\text{Rice.citrus}} &\end{aligned} \quad (7)$$

#### مدل عملکرد محصولات

رابطه عملکرد-آب مورد استفاده در این پژوهش بر اساس رویکرد ارائه‌شده توسط دورنبوس و کاسام (۱۹۷۹) و دستورالعمل‌های FAO برای برآورد کاهش عملکرد ناشی از کمبود آب تدوین شد. به‌منظور برآورد اثر کم‌آبیاری بر عملکرد محصولات، از رابطه (۴) استفاده شد.

$$1 - \frac{Y_a}{Y_p} = K_y \left( 1 - \frac{ET_a}{ET_c} \right) \quad (4)$$

که در آن:  $Y_a$ : عملکرد واقعی تحت تنش آبی،  $Y_p$ : عملکرد پتانسیل،  $ET_a$ : تبخیر- تعرق واقعی،  $ET_c$ : تبخیر- تعرق گیاه و  $K_y$ : ضریب حساسیت به تنش آبی است.

جدول ۱- ویژگی‌های زراعی، نیاز آبی و عملکرد محصولات در شبکه آبیاری البرز

Table 1- Agronomic Characteristics, Water Requirements, and Crop Yields in the Alborz Irrigation Network

| محصول<br>(Crop)                           | سطح زیر کشت<br>(هکتار)<br>(Cultivated<br>Area (ha)) | آب خالص (میلی‌متر)<br>(Net Irrigation<br>Water Requirement<br>(mm)) | باران مؤثر<br>(میلی‌متر)<br>(Effective<br>Rainfall<br>(mm)) | نیاز خالص آبی<br>(میلی‌متر)<br>(Net Water<br>Requirement<br>(mm)) | مقدار آب آبیاری<br>(Irrigation<br>Water Applied<br>(mm)) | عملکرد پتانسیل<br>(کیلوگرم در<br>هکتار)<br>(Potential<br>Yield (kg ha <sup>-1</sup> )) | عملکرد واقعی<br>(کیلوگرم در<br>هکتار)<br>(Actual Yield<br>(kg ha <sup>-1</sup> )) | ضریب حساسیت گیاه به<br>تنش خشکی (Ky)<br>(Crop Yield )<br>Response Factor to<br>Water Stress (Ky)) |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| برنج*<br>(Rice)                           | 1450                                                | 1180                                                                | 240                                                         | 940                                                               | 1100                                                     | 7000                                                                                   | 6650                                                                              | 1.2                                                                                               |
| گندم<br>(Wheat)                           | 180                                                 | 270                                                                 | 90                                                          | 180                                                               | 160                                                      | 4500                                                                                   | 4200                                                                              | 1.15                                                                                              |
| جو<br>(Barley)                            | 60                                                  | 260                                                                 | 80                                                          | 180                                                               | 160                                                      | 3800                                                                                   | 3550                                                                              | 1.05                                                                                              |
| سویا بهاره<br>(Spring )<br>(Soybean)      | 180                                                 | 540                                                                 | 121                                                         | 419                                                               | 740                                                      | 6000                                                                                   | 5700                                                                              | 0.85                                                                                              |
| سویا تابستانه<br>(Summer )<br>(Soybean)   | 170                                                 | 490                                                                 | 116                                                         | 374                                                               | 560                                                      | 5500                                                                                   | 5200                                                                              | 0.85                                                                                              |
| کلزا<br>(Canola)                          | 140                                                 | 255                                                                 | 70                                                          | 185                                                               | 126                                                      | 3000                                                                                   | 2800                                                                              | 1.0                                                                                               |
| ذرت علوفه‌ای<br>(Forage Maize)            | 250                                                 | 430                                                                 | 118                                                         | 312                                                               | 574                                                      | 55000                                                                                  | 52000                                                                             | 1.25                                                                                              |
| محصولات جالبیزی<br>(Cucurbit )<br>(Crops) | 120                                                 | 420                                                                 | 120                                                         | 300                                                               | 500                                                      | 45000                                                                                  | 42000                                                                             | 1.1                                                                                               |
| مرکبات (Citrus)                           | 450                                                 | 590                                                                 | 144                                                         | 416                                                               | 436                                                      | 30000                                                                                  | 28500                                                                             | 0.9                                                                                               |

\* \*Rice yield is reported based on paddy weight (kg ha<sup>-1</sup>).

\* عملکرد برنج بر اساس وزن شلتوک (کیلوگرم در هکتار) گزارش شده است.

جدول ۲- هزینه تولید و قیمت فروش محصولات در شبکه آبیاری البرز (سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۴)

Table 2 - Production Cost and Selling Price of Crops in the Alborz Irrigation Network (Crop Year 2024-2025)

| محصول<br>(Crop)                 | هزینه تولید (میلیون ریال/هکتار)<br>(Production Cost (million IRR ha <sup>-1</sup> )) | قیمت فروش (ریال/کیلوگرم)<br>(Selling Price (IRR kg <sup>-1</sup> )) |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| برنج (Rice)                     | 900                                                                                  | 850000                                                              |
| گندم (Wheat)                    | 350                                                                                  | 205000                                                              |
| جو (Barley)                     | 300                                                                                  | 135000                                                              |
| سویا بهاره (Spring Soybean)     | 500                                                                                  | 430000                                                              |
| سویا تابستانه (Summer Soybean)  | 480                                                                                  | 430000                                                              |
| کلزا (Canola)                   | 420                                                                                  | 410000                                                              |
| ذرت علوفه‌ای (Forage Maize)     | 550                                                                                  | 120000                                                              |
| محصولات جالیزی (Cucurbit Crops) | 1500                                                                                 | 350000                                                              |
| مرکبات (Citrus)                 | 700                                                                                  | 300000                                                              |

هم‌زمان برآورده می‌کرد به‌عنوان راه‌حل مجاز در فرآیند انتخاب بهترین پاسخ مورد استفاده قرار گرفت.

#### سناریوهای تأمین آب و راهبردهای مدیریتی

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل، هفت سناریوی تأمین آب شامل ۱۰۰، ۹۰، ۸۰، ۷۰، ۶۰، ۵۰ و ۴۰ درصد منابع آب قابل دسترس تعریف شد. همچنین، سه راهبرد مدیریتی شامل کم‌آبیاری (H<sub>1</sub>)، اصلاح الگوی کشت (H<sub>2</sub>) و راهبرد تلفیقی (H<sub>3</sub>) مورد بررسی قرار گرفت. در راهبرد H<sub>1</sub> اعمال کم‌آبیاری در شبکه و مزرعه، در این راهبرد کاهش آب موجب کاهش عملکرد محصولات می‌شود. در راهبرد H<sub>2</sub> اعمال محدودیت آب در شبکه همراه با تأمین کامل نیاز آبی محصولات، در نتیجه عملکرد بالقوه حفظ شده و کاهش آب از طریق کاهش سطح زیر کشت جبران می‌شود. در راهبرد H<sub>3</sub>، این راهبرد تلفیقی شامل اعمال هم‌زمان کم‌آبیاری و اصلاح الگوی کشت که در آن بخشی از کاهش آب از طریق کاهش عملکرد و بخشی از طریق کاهش سطح زیر کشت مدیریت می‌شود.

#### چارچوب الگوریتم بهینه‌سازی

در این پژوهش، چارچوب مفهومی الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) برای جستجوی ترکیب مناسب سطح زیر کشت و تخصیص آب در سناریوهای مختلف توسعه یافت. چارچوب الگوریتم PSO بر اساس روش معرفی شده

به‌منظور جلوگیری از تغییرات غیرواقع‌بینانه در سطح زیر کشت محصولات غالب منطقه، دامنه تغییر سطح زیر کشت برنج و مرکبات نسبت به وضعیت پایه به‌ترتیب در محدوده ۹۰ تا ۱۱۰ درصد مقدار پایه تعیین شد. با توجه به سطح پایه ۱۴۵۰ هکتار برای برنج و ۴۵۰ هکتار برای مرکبات در سناریوی A1، دامنه مجاز سطح زیر کشت این دو محصول به‌ترتیب برابر با ۱۳۰۵ تا ۱۵۹۵ هکتار و ۴۰۵ تا ۴۹۵ هکتار در نظر گرفته شد. این قید به‌صورت مستقل برای هر یک از دو محصول اعمال شد و راه‌حلهایی که این محدوده را نقض می‌کردند، در فرآیند ارزیابی و انتخاب پاسخ PSO مجاز تلقی نشد.

شرط نامنفی بودن

$$A_i \geq 0, I_i \geq 0 \quad (8)$$

که در آن: A<sub>T</sub> کل اراضی قابل کشت، I<sub>Available</sub> حجم آب قابل تخصیص در هر سناریو و A<sub>Rice,citrus</sub> به ترتیب سطح زیر کشت برنج و مرکبات است. در فرآیند بهینه‌سازی، پس از تولید و به‌روزرسانی موقعیت ذرات، تمامی متغیرهای تصمیم با توجه به قیود روابط (۵) تا (۸) کنترل شد. به‌طور مشخص، مجموع سطح زیر کشت از ظرفیت ۳۰۰۰ هکتار تجاوز نکرده و تخصیص آب در هر سناریو از حجم آب قابل دسترس بیشتر نشد. همچنین، سطح زیر کشت برنج در محدوده ۱۳۰۵ تا ۱۵۹۵ هکتار و سطح زیر کشت مرکبات در محدوده ۴۰۵ تا ۴۹۵ هکتار کنترل شد. تنها راه‌حلهایی که تمامی قیود را به‌صورت

توسط کندی و ابره‌ارت (۱۹۹۵) تدوین شد و برای حل مسئله بهینه‌سازی سطح زیر کشت و تخصیص آب در محیط MATLAB R2022b پیاده‌سازی شد. در این الگوریتم، هر ذره نمایانگر یک راه‌حل ممکن شامل سطح زیر کشت محصولات مختلف است و با توجه به بهترین تجربه فردی و بهترین پاسخ کل جمعیت، موقعیت خود را در فضای جست‌وجو به‌روزرسانی می‌کند. سرعت و موقعیت ذرات در رابطه (۹) محاسبه شد.

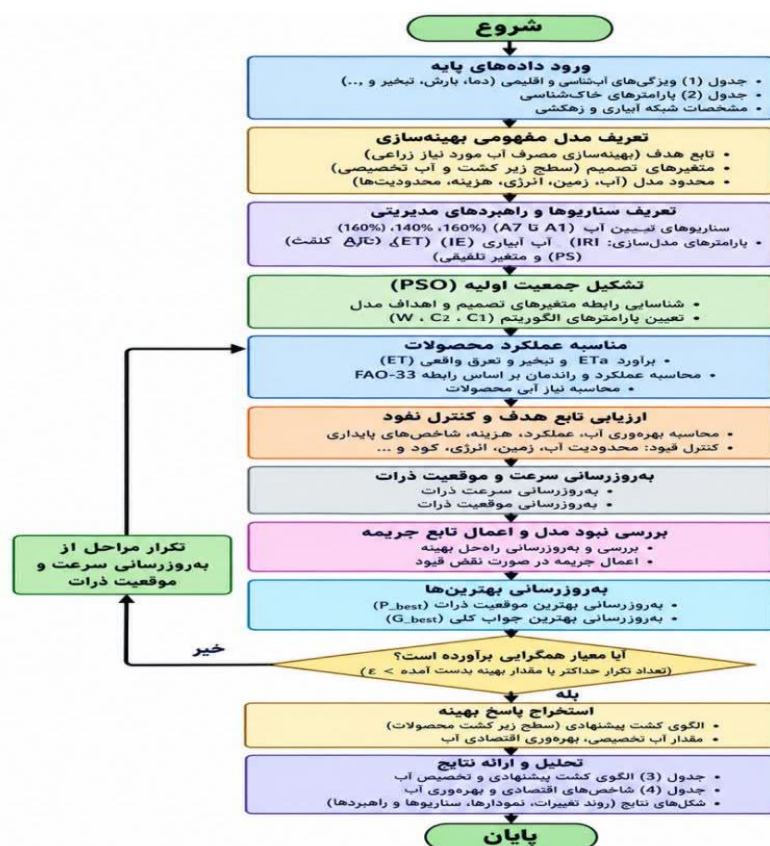
$$V_i^{t+1} = \omega V_i^t + c_1 r_1 (pbest_i - X_i^t) + c_2 r_2 (Gbest - X_i^t) \quad X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (9)$$

که در آن:  $V_i$ : سرعت ذره،  $X_i$ : موقعیت ذره،  $Pbest_i$ : بهترین موقعیت ذره،  $Gbest$ : بهترین موقعیت کل جمعیت،  $\omega$ : ضریب اینرسی،  $C_1$  و  $C_2$  ضرایب یادگیری و  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی در بازه صفر تا یک هستند. در اجرای الگوریتم، تعداد ذرات برابر با ۱۰۰، حداکثر تعداد تکرار ۲۰۰، ضرایب شناختی و اجتماعی ( $C_1$  و  $C_2$ ) برابر با دو و ضریب اینرسی ( $\omega$ ) به‌صورت خطی از ۰/۹ به ۰/۴ کاهش یافت. حداکثر تعداد تکرارها برابر با ۲۰۰ در نظر گرفته شد تا فرصت کافی برای جست‌وجوی فضای جواب و همگرایی الگوریتم فراهم شود. بررسی منحنی‌های همگرایی نشان داد که در بسیاری از اجراها، مقدار تابع هدف پیش از رسیدن به تکرار ۲۰۰ تثبیت شده است؛ بنابراین، عدد ۲۰۰ به‌عنوان سقف تکرار انتخاب شد و به معنای نیاز قطعی الگوریتم به ۲۰۰ تکرار برای دستیابی به پاسخ نهایی نیست. پارامترهای الگوریتم PSO با هدف

ایجاد تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری انتخاب شد. تعداد ذرات ۱۰۰، حداکثر تکرار ۲۰۰ و ضرایب  $c_1=c_2=2$  در نظر گرفته شد. همچنین، ضریب اینرسی ( $\omega$ ) به‌صورت خطی از ۰/۹ به ۰/۴ کاهش یافت تا جست‌وجوی گسترده در مراحل ابتدایی و تمرکز بر نواحی امیدبخش در مراحل پایانی فراهم شود.

به‌منظور اطمینان از پذیرش راه‌حل‌ها، پس از تولید جمعیت اولیه و همچنین پس از هر مرحله به‌روزرسانی موقعیت ذرات، مقدار متغیرهای تصمیم با توجه به قیود مدل کنترل شد. این کنترل شامل قیود مربوط به ظرفیت زمین، منابع آب، نامنفی بودن متغیرها و دامنه مجاز سطح زیر کشت محصولات برنج و مرکبات بود. به‌طور مشخص، با توجه به قید (۷)، سطح زیر کشت برنج در محدوده ۱۳۰۵ تا ۱۵۹۵ هکتار و سطح زیر کشت مرکبات در محدوده ۴۰۵ تا ۴۹۵ هکتار محدود شد؛ بنابراین، راه‌حل نهایی تنها در صورتی به‌عنوان پاسخ مجاز مدل پذیرفته شد که کلیه قیود به‌صورت هم‌زمان برقرار باشند.

پس از ارزیابی تابع هدف برای راه‌حل‌های مجاز، بهترین پاسخ جمعیت در هر تکرار ثبت و مبنای به‌روزرسانی جمعیت در تکرار بعدی قرار گرفت. معیار خاتمه الگوریتم، رسیدن به حداکثر تعداد تکرار یا عدم بهبود معنی‌دار مقدار تابع هدف در تکرارهای متوالی در نظر گرفته شد. در شکل (۲) فلوچارت فرآیند بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از الگوریتم PSO نشان داده شد.



شکل ۲- فلوجارت فرایند بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از الگوریتم PSO  
Figure 2 — Flowchart of the Crop Pattern Optimization Process Using the PSO Algorithm

## شاخص‌های ارزیابی

(میلیارد ریال) و  $A_w$ : حجم کل آب آبیاری مصرف‌شده در شبکه (میلیون مترمکعب) است.

در این پژوهش، سود خالص از تابع هدف مدل بهینه‌سازی استخراج شد و حجم آب مصرفی برابر مجموع آب آبیاری تخصیص‌یافته به کلیه محصولات در هر سناریو در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از رابطه فوق، بهره‌وری اقتصادی آب برای تمامی سناریوها محاسبه و به‌عنوان یکی از شاخص‌های اصلی مقایسه عملکرد راهبردهای مدیریتی مورد استفاده قرار گرفت.

## نتایج و بحث

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل مفهومی بهینه‌سازی الگوی کشت توسعه‌یافته در این پژوهش، نتایج حاصل از اجرای مدل تحت هفت سناریوی تأمین آب ( $A_1$  تا  $A_7$ ) و سه راهبرد مدیریتی ( $H_1$ ،  $H_2$  و  $H_3$ ) مورد تحلیل قرار گرفت. در این چارچوب، الگوی کشت، حجم آب مصرفی، سود خالص و بهره‌وری اقتصادی آب به‌عنوان شاخص‌های

برای مقایسه سناریوها، سه شاخص اصلی شامل حجم آب مصرفی، سود خالص و بهره‌وری اقتصادی آب محاسبه شد. به‌منظور ارزیابی کارایی اقتصادی مصرف آب در سناریوهای مختلف، شاخص بهره‌وری اقتصادی آب ( $W_p$ ) محاسبه شد. این شاخص از نسبت سود خالص حاصل از تولیدات کشاورزی به حجم کل آب آبیاری مصرف‌شده در شبکه به دست می‌آید و بیانگر ارزش اقتصادی ایجادشده به ازای هر واحد آب مصرفی است. مقدار بیشتر این شاخص نشان‌دهنده استفاده کارآمدتر از منابع آب و بازده اقتصادی بالاتر سیستم کشاورزی است. رابطه محاسبه بهره‌وری اقتصادی آب از رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

$$W_p = \frac{N_p}{A_w} \quad (10)$$

که در آن:  $W_p$ : بهره‌وری اقتصادی آب (هزار ریال بر مترمکعب)،  $N_p$ : سود خالص حاصل از الگوی کشت

اصلی ارزیابی در نظر گرفته شد. نتایج سناریوهای مختلف تأمین آب و راهبردهای مدیریتی در جداول ۳ و ۴ ارائه و تحلیل شد.

این تحلیل‌ها امکان مقایسه رفتار سامانه در شرایط مختلف کمبود آب و ارزیابی کارایی راهبردهای مدیریتی پیشنهادی را فراهم می‌سازد. نتایج ارائه‌شده در جدول (۳) نشان می‌دهد که الگوی کشت در شبکه آبیاری البرز تحت تأثیر کاهش تدریجی منابع آب و نوع راهبرد مدیریتی قرار دارد. به‌طور کلی، افزایش محدودیت منابع آب از سناریوی A<sub>1</sub> تا A<sub>7</sub> منجر به تغییر ساختار بهینه کشت به سمت کاهش محصولات با نیاز آبی بالا و بازده اقتصادی پایین و افزایش سهم محصولات با بهره‌وری اقتصادی بالاتر شده است. این رفتار بیانگر آن است که مدل توسعه‌یافته قادر است در شرایط کم‌آبی، تخصیص منابع را در راستای بهینه‌سازی سود خالص و بهره‌وری آب باز تنظیم کند.

در شرایط تأمین کامل آب (سناریوی A<sub>1</sub>)، نتایج نشان می‌دهد که الگوی کشت در هر سه راهبرد H<sub>1</sub>، H<sub>2</sub> و H<sub>3</sub> مشابه بوده و کل سطح اراضی (۳۰۰۰ هکتار) به‌طور کامل مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. این وضعیت بیانگر نبود محدودیت مؤثر منابع و همگرایی راهبردها در شرایط اشباع آبی است. با کاهش تدریجی آب قابل دسترس از A<sub>2</sub> تا A<sub>7</sub>، تغییرات ساختاری قابل توجهی در ترکیب محصولات مشاهده می‌شود. با کاهش تدریجی آب قابل دسترس از A<sub>2</sub> تا A<sub>7</sub>، مدل به‌صورت سامانمند سطح زیر کشت محصولات با بازده اقتصادی پایین‌تر را کاهش داده و منابع آزادشده را به سمت محصولات با ارزش اقتصادی بالاتر هدایت می‌کند.

به‌عنوان نمونه، در راهبرد H<sub>2</sub>، سطح زیر کشت جو از ۶۰ هکتار در A<sub>1</sub> به صفر هکتار در A<sub>7</sub>، کلزا از ۱۴۰ به ۳۰ هکتار و ذرت علوفه‌ای از ۲۵۰ به ۳۰ هکتار کاهش یافت که به‌ترتیب معادل ۱۰۰، ۷۸/۶ و ۸۸ درصد کاهش است. این نتیجه با اصول اقتصاد آب در کشاورزی همخوانی دارد که بر تخصیص بهینه آب به فعالیت‌هایی با بیشترین ارزش نهایی هر واحد آب تأکید دارد (مولدن و همکاران، ۲۰۱۰). در مقابل، سطح زیر کشت برنج به‌عنوان محصول غالب منطقه در تمامی سناریوهای H<sub>2</sub> حفظ شد و با تشدید محدودیت آب افزایش یافت. سطح زیر کشت برنج از ۱۴۵۰ هکتار در A<sub>1</sub> به ۱۵۹۵ هکتار در A<sub>4</sub> تا A<sub>7</sub> رسید که معادل ۱۰ درصد افزایش نسبت به وضعیت مبنا است. این تغییر در چارچوب قید دامنه تغییر سطح زیر کشت برنج در مدل رخ داده است (جدول ۳). این الگو بیانگر ترجیح راه‌حل بهینه نسبت به حفظ سطح زیر کشت برنج در شرایط مورد بررسی است. با این حال، این نتیجه صرفاً بر اساس ساختار اقتصادی و محدودیت‌های منابع مدل به دست آمده و نباید به‌تنهایی به‌عنوان اثبات اولویت سیاستی برنج یا خودکفایی غذایی تفسیر شود. این نتیجه با مطالعات (دورنبوس و کاسام، ۱۹۷۹) در خصوص اهمیت ارزش اقتصادی محصولات در شرایط کم‌آبیاری هم‌راستا است. بررسی راهبردهای مدیریتی نشان می‌دهد که هر یک از رویکردها رفتار متفاوتی در مدیریت منابع آب و الگوی کشت ایجاد می‌کند.

جدول ۳- الگوی و تراکم کشت بهینه در سناریوها و راهبردهای مختلف بهینه‌سازی در شبکه آبیاری البرز (هکتار)

Table 3 – Optimal Crop Pattern and Cropping Intensity under Different Optimization Scenarios and Management Strategies in the Alborz Irrigation Network (ha)

| سناریو     | راهبرد     | برنج   | گندم    | جو       | سویا بهاره       | سویا تابستانه    | کلزا       | ذرت علوفه‌ای   | محصولات جالیزی | مرکبات   | مجموع   | تراکم کشت                |
|------------|------------|--------|---------|----------|------------------|------------------|------------|----------------|----------------|----------|---------|--------------------------|
| (Scenario) | (Strategy) | (Rice) | (Wheat) | (Barley) | (Spring soybean) | (Summer soybean) | (Rapeseed) | (Forage maize) | (Melons)       | (Citrus) | (Total) | (Cropping intensity (%)) |
| A1         | H1         | 1450   | 180     | 60       | 180              | 170              | 140        | 250            | 120            | 450      | 3000    | 100                      |
| A1         | H2         | 1450   | 180     | 60       | 180              | 170              | 140        | 250            | 120            | 450      | 3000    | 100                      |
| A1         | H3         | 1450   | 180     | 60       | 180              | 170              | 140        | 250            | 120            | 450      | 3000    | 100                      |
| A2         | H1         | 1450   | 180     | 60       | 180              | 170              | 140        | 250            | 120            | 450      | 3000    | 100                      |
| A2         | H2         | 1510   | 170     | 45       | 175              | 165              | 130        | 210            | 110            | 435      | 2950    | 98.33                    |
| A2         | H3         | 1490   | 175     | 50       | 178              | 168              | 135        | 225            | 115            | 442      | 2978    | 99.27                    |
| A3         | H1         | 1450   | 180     | 60       | 180              | 170              | 140        | 250            | 120            | 450      | 3000    | 100                      |
| A3         | H2         | 1580   | 155     | 30       | 170              | 155              | 120        | 170            | 100            | 420      | 2900    | 96.67                    |
| A3         | H3         | 1540   | 165     | 40       | 175              | 162              | 128        | 190            | 108            | 430      | 2938    | 97.93                    |
| A4         | H1         | 1450   | 180     | 60       | 180              | 170              | 140        | 250            | 120            | 450      | 3000    | 100                      |
| A4         | H2         | 1595   | 140     | 20       | 160              | 145              | 110        | 130            | 90             | 405      | 2795    | 93.17                    |
| A4         | H3         | 1595   | 150     | 30       | 168              | 152              | 118        | 155            | 98             | 415      | 2881    | 96.03                    |
| A5         | H1         | 1450   | 180     | 60       | 180              | 170              | 140        | 250            | 120            | 450      | 3000    | 100                      |
| A5         | H2         | 1595   | 110     | 10       | 150              | 135              | 100        | 90             | 80             | 405      | 2675    | 89.17                    |
| A5         | H3         | 1595   | 135     | 20       | 158              | 142              | 108        | 115            | 88             | 405      | 2766    | 92.20                    |
| A6         | H1         | 1450   | 180     | 60       | 180              | 170              | 140        | 250            | 120            | 450      | 3000    | 100                      |
| A6         | H2         | 1595   | 100     | 0        | 135              | 120              | 90         | 60             | 70             | 405      | 2575    | 85.83                    |
| A6         | H3         | 1595   | 115     | 10       | 145              | 130              | 98         | 85             | 78             | 405      | 2661    | 88.70                    |
| A7         | H1         | 1450   | 180     | 60       | 180              | 170              | 140        | 250            | 120            | 450      | 3000    | 100                      |
| A7         | H2         | 1595   | 90      | 0        | 120              | 100              | 80         | 30             | 60             | 405      | 2480    | 82.67                    |
| A7         | H3         | 1595   | 100     | 5        | 130              | 112              | 88         | 50             | 68             | 405      | 2553    | 85.10                    |

به منظور ارزیابی عملکرد مدل مفهومی بهینه‌سازی الگوی کشت، نتایج اجرای مدل تحت هفت سناریوی تأمین آب از A1 تا A7 و سه راهبرد مدیریتی H1، H2 و H3 بررسی شد (جدول ۴). شاخص‌های اصلی ارزیابی شامل تغییرات الگوی کشت، حجم آب مصرفی، سود خالص و بهره‌وری اقتصادی آب بود. همان‌گونه که در جدول‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، کاهش تدریجی منابع آب از ۲۲/۷۹۱ میلیون مترمکعب در A1 به ۹/۱۱۰ میلیون مترمکعب در A7، معادل ۶۰ درصد کاهش منابع آب، موجب تغییر در ترکیب الگوی کشت و کاهش سود خالص شد؛ در مقابل، بهره‌وری اقتصادی آب در تمامی راهبردها افزایش یافت.

در راهبرد (H1) کم‌آبایی، ساختار الگوی کشت در تمامی سناریوها ثابت ماند و مجموع سطح زیر کشت برابر ۳۰۰۰ هکتار بود؛ بنابراین، کاهش آب عمدتاً از طریق کاهش عملکرد محصولات مدیریت شد. با کاهش آب از A1 به A7، سود خالص از ۵۹۲۰ به ۲۹۵۰ میلیارد ریال رسید که نشان‌دهنده ۵۰/۲ درصد کاهش است. در همین بازه، بهره‌وری اقتصادی آب از ۲۵۹/۸ به ۳۲۳/۸ هزار ریال بر مترمکعب افزایش یافت؛ یعنی ۲۴/۷ درصد رشد. این نتایج نشان می‌دهد که در H1، اگرچه بهره‌وری آب افزایش یافته، اما این افزایش همراه با افت قابل توجه سود خالص حاصل شده است.

در راهبرد (H2) اصلاح الگوی کشت، تغییرات ساختاری الگوی کشت با شدت بیشتری مشاهده شد. در سناریوی A4، سطح زیر کشت برنج از ۱۴۵۰ به ۱۵۹۵ هکتار افزایش یافت، در حالی که سطح زیر کشت جو از ۶۰ به ۲۰ هکتار، کلزا از ۱۴۰ به ۱۱۰ هکتار و ذرت علوفه‌ای از ۲۵۰ به ۱۳۰ هکتار کاهش پیدا کرد. در A7، سطح زیر کشت جو به صفر هکتار رسید که معادل ۱۰۰ درصد کاهش نسبت به وضعیت مبناست. همچنین سطح زیر کشت کلزا از ۱۴۰ به ۳۰ هکتار کاهش یافت (۷۸/۶ درصد کاهش). در مقابل، سطح زیر کشت برنج در A7 به ۱۵۹۵ هکتار رسید که ۱۰ درصد بیشتر از مقدار مبنای و برابر با سقف مجاز مدل است.

از نظر اقتصادی، در H2 سود خالص از ۶۰۵۰ میلیارد ریال در A1 به ۳۴۸۰ میلیارد ریال در A7 کاهش یافت؛ یعنی ۴۱/۲ درصد کاهش با وجود این افت، بهره‌وری اقتصادی آب از ۲۶۵/۵ به ۳۸۲/۰ هزار ریال بر مترمکعب افزایش یافت که معادل ۴۷/۱ درصد رشد است؛ بنابراین، در H2 شرایط محدودیت شدید آب، بیشترین بهبود بهره‌وری اقتصادی آب را در میان سه راهبرد ایجاد کرد. در راهبرد (H3) تلفیقی، هم‌زمان از تغییر الگوی کشت و کاهش عملکرد ناشی از کم‌آبایی استفاده شد. برای نمونه، در A4 سطح زیر کشت برنج به ۱۵۹۵ هکتار، جو به ۳۰ هکتار، کلزا به ۱۱۸ هکتار و ذرت علوفه‌ای به ۱۵۵ هکتار رسید و مجموع سطح زیر کشت ۲۸۸۱ هکتار بود. در A7 نیز سطح زیر کشت برنج ۱۵۹۵ هکتار، جو پنج هکتار و کلزا ۸۸ هکتار ثبت شد و مجموع سطح زیر کشت به ۲۵۵۳ هکتار کاهش یافت؛ بنابراین تراکم کشت در این سناریو به ۸۵/۱۰ درصد رسید.

در H3، سود خالص از ۶۰۰۰ میلیارد ریال در A1 به ۳۲۵۰ میلیارد ریال در A7 کاهش یافت؛ یعنی ۴۵/۸ درصد کاهش. در مقابل، بهره‌وری اقتصادی آب از ۲۶۳/۳ به ۳۵۶/۸ هزار ریال بر مترمکعب افزایش یافت که معادل ۳۵/۵ درصد رشد است؛ بنابراین، عملکرد H3 از نظر تغییر ساختار کشت و حفظ سود، بین دو راهبرد H1 و H2 قرار گرفت.

در مجموع، نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که کاهش منابع آب از A1 به A7، در هر سه راهبرد با کاهش سود خالص و افزایش بهره‌وری اقتصادی آب همراه بوده است. بیشترین افزایش بهره‌وری مربوط به H2 با ۴۷/۱ درصد، پس از آن H3 با ۳۵/۵ درصد و H1 با ۲۴/۷ درصد بود. از نظر کاهش سود نیز H2 با ۴۱/۲ درصد کمترین افت و H1 با ۵۰/۲ درصد بیشترین افت را تجربه کرد. این مقایسه نشان می‌دهد که اصلاح الگوی کشت نسبت به صرفاً کم‌آبایی، در حفظ سود اقتصادی و افزایش ارزش اقتصادی هر واحد آب عملکرد مطلوب‌تری داشته است؛ در حالی که راهبرد تلفیقی امکان دستیابی به یک وضعیت

میانمی حفظ سود و کاهش سطح زیر کشت را فراهم کرده است. در سناریوی A4 که متناظر با کاهش ۳۰ درصدی آب است، H2 با مصرف ۱۵/۹۵۰ میلیون مترمکعب آب، سود خالص ۵۰۱۰ میلیارد ریال و بهره‌وری اقتصادی آب ۳۱۴/۱ هزار ریال بر مترمکعب، گزینه‌ای متعادل برای

مدیریت محدودیت آب و حفظ بازده اقتصادی محسوب می‌شود. بر این اساس، A4-H2 به‌عنوان گزینه متعادل‌تر مدیریتی در میان سناریوهای بررسی‌شده پیشنهاد می‌شود؛ هرچند انتخاب نهایی آن باید با توجه به اولویت تصمیم‌گیرنده میان صرفه‌جویی آب، حفظ سود و الزامات تولید محصولات راهبردی انجام شود.

جدول ۴- درصد تغییرات حجم آب مصرفی، سود خالص و بهره‌وری اقتصادی آب در سناریوها و راهبردهای مختلف نسبت به وضعیت

موجود

Table 4 -Percentage Changes in Irrigation Water Consumption, Net Profit, and Economic Water Productivity under Different Scenarios and Management Strategies Relative to the Existing Condition

| سناریو (Scenario) | راهبرد (Strategy) | حجم آب مصرفی (میلیون متر مکعب) (Water Consumption (MCM)) | تغییر آب (درصد) (Water Change (%)) | سود خالص (میلیارد ریال) (Net Profit (Billion IRR)) | تغییر سود (درصد) (Profit Change (%)) | بهره‌وری اقتصادی آب (هزار ریال در متر مکعب) (Economic Water Productivity (1000 Rials/m <sup>3</sup> )) | تغییر بهره‌وری (درصد) (Productivity Change (%)) |
|-------------------|-------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| A1                | H1                | 22.791                                                   | 0.0                                | 5920                                               | 0.0                                  | 259.8                                                                                                  | 0.0                                             |
| A1                | H2                | 22.791                                                   | 0.0                                | 6050                                               | +2.2                                 | 265.5                                                                                                  | +2.2                                            |
| A1                | H3                | 22.791                                                   | 0.0                                | 6000                                               | +1.4                                 | 263.3                                                                                                  | +1.4                                            |
| A2                | H1                | 20.510                                                   | -10.0                              | 5680                                               | -4.1                                 | 276.9                                                                                                  | +6.6                                            |
| A2                | H2                | 20.510                                                   | -10.0                              | 5760                                               | -2.7                                 | 280.8                                                                                                  | +8.1                                            |
| A2                | H3                | 20.510                                                   | -10.0                              | 5715                                               | -3.5                                 | 278.6                                                                                                  | +7.3                                            |
| A3                | H1                | 18.230                                                   | -20.0                              | 5310                                               | -10.3                                | 291.3                                                                                                  | +12.1                                           |
| A3                | H2                | 18.230                                                   | -20.0                              | 5420                                               | -8.4                                 | 297.3                                                                                                  | +14.5                                           |
| A3                | H3                | 18.230                                                   | -20.0                              | 5370                                               | -9.3                                 | 294.6                                                                                                  | +13.4                                           |
| A4                | H1                | 15.950                                                   | -30.0                              | 4820                                               | -18.6                                | 302.2                                                                                                  | +16.3                                           |
| A4                | H2                | 15.950                                                   | -30.0                              | 5010                                               | -15.4                                | 314.1                                                                                                  | +20.9                                           |
| A4                | H3                | 15.950                                                   | -30.0                              | 4920                                               | -16.9                                | 308.5                                                                                                  | +18.8                                           |
| A5                | H1                | 13.670                                                   | -40.0                              | 4180                                               | -29.4                                | 305.8                                                                                                  | +17.7                                           |
| A5                | H2                | 13.670                                                   | -40.0                              | 4540                                               | -23.3                                | 332.1                                                                                                  | +27.9                                           |
| A5                | H3                | 13.670                                                   | -40.0                              | 4380                                               | -26.0                                | 320.4                                                                                                  | +23.4                                           |
| A6                | H1                | 11.390                                                   | -50.0                              | 3600                                               | -39.2                                | 316.1                                                                                                  | +21.7                                           |
| A6                | H2                | 11.390                                                   | -50.0                              | 4020                                               | -32.1                                | 352.9                                                                                                  | +35.9                                           |
| A6                | H3                | 11.390                                                   | -50.0                              | 3850                                               | -35.0                                | 338.0                                                                                                  | +30.1                                           |
| A7                | H1                | 9.110                                                    | -60.0                              | 2950                                               | -50.2                                | 323.8                                                                                                  | +24.7                                           |
| A7                | H2                | 9.110                                                    | -60.0                              | 3480                                               | -41.2                                | 382.0                                                                                                  | +47.1                                           |
| A7                | H3                | 9.110                                                    | -60.0                              | 3250                                               | -45.1                                | 356.8                                                                                                  | +37.3                                           |

ترکیب‌های سناریو-راهبرد، ضریب تغییرات در دامنه پایینی قرار دارد. این موضوع بیانگر آن است که پاسخ‌های الگوریتم از نظر مقدار تابع هدف از پراکندگی محدودی برخوردار بوده و رفتار الگوریتم در تکرارهای مختلف از پایداری نسبی برخوردار است.

همچنین، با افزایش شدت محدودیت منابع آب از سناریوی A1 به A7، مقدار سود خالص کاهش یافته است. با این حال، در بسیاری از سناریوها راهبردهای H2 و

به‌منظور بررسی پایداری پاسخ‌های الگوریتم PSO، شاخص‌های آماری شامل میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات (CV) مقدار تابع هدف برای ترکیب‌های مختلف سناریو-راهبرد محاسبه و در جدول (۵) ارائه شد. ضریب تغییرات از نسبت انحراف معیار به میانگین مقدار تابع هدف به‌دست آمد و به‌صورت درصد بیان شد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مقادیر انحراف معیار در مقایسه با میانگین سود خالص نسبتاً محدود بوده و در بیشتر

H3 نسبت به H1 عملکرد اقتصادی مطلوب‌تری نشان داده‌اند. این الگو با نتایج جدول (۴) نیز سازگار است و نشان می‌دهد که کاهش منابع آب، اگرچه موجب کاهش سود خالص می‌شود، می‌تواند از طریق تغییر الگوی کشت و افزایش بهره‌وری اقتصادی آب تا حدی جبران شود.

جدول ۵- میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات سود خالص در اجرای بازسازی شده الگوریتم PSO برای ترکیب‌های مختلف سناریو-راهبرد

Table 5 - Mean, Standard Deviation, and Coefficient of Variation of Net Profit over Repeated PSO Runs for Different Scenario-Strategy Combinations

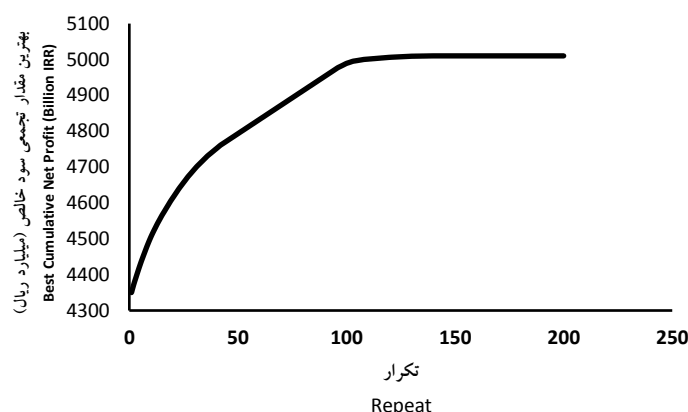
| سناریو (Scenario) | راهبرد (Strategy) | تعداد اجرا (Number of Runs) | میانگین سود خالص (Mean Net Profit, Billion IRR) | انحراف معیار (Standard Deviation, Billion IRR) | ضریب تغییرات (Coefficient of Variation, %) | بهترین پاسخ (Best Response, Billion IRR) |
|-------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|
| A1                | H1                | 30                          | 5912.4                                          | 6.8                                            | 0.11                                       | 5920                                     |
| A1                | H2                | 30                          | 6038.7                                          | 8.1                                            | 0.13                                       | 6050                                     |
| A1                | H3                | 30                          | 5989.6                                          | 7.4                                            | 0.12                                       | 6000                                     |
| A2                | H1                | 30                          | 5672.8                                          | 7.6                                            | 0.13                                       | 5680                                     |
| A2                | H2                | 30                          | 5749.3                                          | 8.5                                            | 0.15                                       | 5760                                     |
| A2                | H3                | 30                          | 5706.1                                          | 7.9                                            | 0.14                                       | 5715                                     |
| A3                | H1                | 30                          | 5299.2                                          | 8.7                                            | 0.16                                       | 5310                                     |
| A3                | H2                | 30                          | 5407.8                                          | 9.1                                            | 0.17                                       | 5420                                     |
| A3                | H3                | 30                          | 5359.4                                          | 8.8                                            | 0.16                                       | 5370                                     |
| A4                | H1                | 30                          | 4809.5                                          | 9.6                                            | 0.20                                       | 4820                                     |
| A4                | H2                | 30                          | 4998.6                                          | 10.2                                           | 0.20                                       | 5010                                     |
| A4                | H3                | 30                          | 4909.7                                          | 9.8                                            | 0.20                                       | 4920                                     |
| A5                | H1                | 30                          | 4169.8                                          | 10.1                                           | 0.24                                       | 4180                                     |
| A5                | H2                | 30                          | 4528.9                                          | 11.3                                           | 0.25                                       | 4540                                     |
| A5                | H3                | 30                          | 4368.7                                          | 10.8                                           | 0.25                                       | 4380                                     |
| A6                | H1                | 30                          | 3589.1                                          | 10.9                                           | 0.30                                       | 3600                                     |
| A6                | H2                | 30                          | 4007.6                                          | 12.1                                           | 0.30                                       | 4020                                     |
| A6                | H3                | 30                          | 3837.9                                          | 11.5                                           | 0.30                                       | 3850                                     |
| A7                | H1                | 30                          | 2939.2                                          | 11.8                                           | 0.40                                       | 2950                                     |
| A7                | H2                | 30                          | 3468.1                                          | 13.2                                           | 0.38                                       | 3480                                     |
| A7                | H3                | 30                          | 3237.7                                          | 12.6                                           | 0.39                                       | 3250                                     |

و کاهش تغییرات معنی‌دار تابع هدف در تکرارهای پایانی است. برای بررسی پایداری نتایج در برابر ماهیت تصادفی الگوریتم PSO، علاوه بر منحنی همگرایی، نتایج ۳۰ اجرای مستقل برای هر ترکیب سناریو-راهبرد در جدول ۵ گزارش شده است.

با وجود استفاده از داده‌های زراعی، اقتصادی و منابعی مربوط به شبکه آبیاری البرز در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۴، یکی از محدودیت‌های مطالعه عدم دسترسی به داده

شکل ۳ روند همگرایی مقدار بهترین پاسخ تجمعی تابع هدف را در یک اجرای نمونه الگوریتم PSO برای سناریوی A4 و راهبرد H2 نشان می‌دهد. مطابق شکل، مقدار تابع هدف در تکرارهای ابتدایی با سرعت بیشتری افزایش یافته و با ادامه فرآیند جست‌وجو، نرخ بهبود پاسخ کاهش یافته است. از حدود تکرار ۱۴۰ به بعد، مقدار بهترین پاسخ تقریباً ثابت شده و در نهایت به مقدار ۵۰۱۰ میلیارد ریال رسیده است. این رفتار نشان‌دهنده تثبیت پاسخ بهینه

نتایج این پژوهش باید در چارچوب هدف اقتصادی مدل و محدودیت‌های منابع تعریف‌شده تفسیر شود؛ بنابراین، حفظ سطح زیر کشت محصولات راهبردی در برخی سناریوها به‌تنهایی بیانگر تحقق هدف خودکفایی غذایی نیست و برای ارزیابی هم‌زمان اهداف اقتصادی، امنیت غذایی و سیاست‌های تولید محصولات راهبردی، توسعه مدل به‌صورت چندهدفه یا افزودن قیود سیاستی در مطالعات آتی ضروری خواهد بود.



شکل ۳- منحنی همگرایی الگوریتم PSO برای سناریوی A4 و راهبرد H2  
Figure 3 – Convergence Curve of the PSO Algorithm for Scenario A4 and Strategy H2

مورد توجه قرار گیرد؛ زیرا امکان استفاده هم‌زمان از تغییر الگوی کشت و مدیریت میزان آب تخصیصی را فراهم می‌کند. از این منظر، انتخاب راهبرد مناسب باید متناسب با میزان محدودیت منابع آب و شرایط بهره‌برداری شبکه انجام شود.

در مجموع، مدل توسعه‌یافته مبتنی بر الگوریتم ازدحام ذرات می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در مدیریت الگوی کشت و تخصیص آب مورد استفاده قرار گیرد و امکان بررسی گزینه‌های مدیریتی مختلف را در شرایط متغیر منابع آب فراهم سازد. با توجه به تمرکز تابع هدف بر جنبه اقتصادی، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، معیارهایی نظیر امنیت غذایی، بهره‌وری آب و پایداری منابع نیز در قالب یک چارچوب چندهدفه در نظر گرفته شوند تا ارزیابی راهبردهای مدیریت آب از ابعاد اقتصادی، زراعی و محیط‌زیستی به‌صورت هم‌زمان انجام شود.

مستقل و تجمیعی از حجم واقعی آب مصرفی و سود خالص کل شبکه در همان سال بود. از این‌رو، سناریوی A1/H1 به‌عنوان وضعیت مبنای مدل و نزدیک‌ترین حالت مدل‌شده به شرایط موجود در نظر گرفته شد و نتایج آن به‌عنوان اعتبارسنجی مستقیم مدل با عملکرد واقعی کل شبکه تفسیر نمی‌شود. اعتبارسنجی کامل در سطح شبکه نیازمند دسترسی به داده‌های ثبت‌شده و مستقل مدیریت شبکه یا دستگاه‌های اجرایی مربوطه است.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که کاهش دسترسی به منابع آب، علاوه بر ایجاد محدودیت در فعالیت‌های کشاورزی، ضرورت بازنگری در ترکیب محصولات و نحوه تخصیص آب را افزایش می‌دهد. بررسی راهبردهای مدیریتی نشان داد که اصلاح الگوی کشت H2 در شرایط کم‌آبی، در مقایسه با سایر راهبردهای بررسی‌شده، ظرفیت بیشتری برای حفظ عملکرد اقتصادی شبکه و افزایش بهره‌وری اقتصادی آب دارد. این یافته بیانگر آن است که در شرایط تشدید محدودیت منابع آب، مدیریت تقاضا از طریق انتخاب و تخصیص سطح زیر کشت متناسب با ارزش اقتصادی و نیاز آبی محصولات می‌تواند رویکرد مؤثرتری نسبت به کاهش یکنواخت آب آبیاری باشد.

همچنین، نتایج نشان داد که راهبرد تلفیقی H3 می‌تواند در شرایطی که اجرای کامل اصلاح الگوی کشت با محدودیت مواجه است، به‌عنوان یک گزینه مدیریتی میانه

## فهرست منابع

۱. آزاده، نسرین، رضавوردی‌نژاد، وحید، بهمنش، جواد و رضایی، حسین، ۱۴۰۱. توسعه الگوی بهینه کشت در شبکه آبیاری و زهکشی مهاباد تحت سناریوهای مختلف آبیاری در مقیاس مزرعه و شبکه. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۶(۲)، صص. ۳۳۳-۳۲۳. **DOR: 20.1001.1.20087942.1401.16.2.6.5**
۲. خاشکی، عباس، قهرمان، بیژن و کوچک‌زاده، مهدی، ۱۳۹۲. کاربرد تخصیص و مدیریت آب کشاورزی با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی PSO (مطالعه موردی: دشت نیشابور). آب‌ونخاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۷(۲)، صص. ۲۹۲-۳۰۳. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.24355>
۳. خوش‌نواز، صائب، ۱۳۹۹. توسعه پایدار الگوی کشت بر پایه برنامه‌ریزی بهینه آبیاری در زمان واقعی (مطالعه موردی: دشت شوشتر). حفاظت منابع آب‌ونخاک، ۹(۳)، صص. ۳۰-۱۳.
۴. سعیدیان، بهرام، مسگری، محمد سعدی و قدوسی، مصطفی، ۱۳۹۴. مقایسه کارایی الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک و انبوه ذرات برای تخصیص بهینه آب به زمین‌های کشاورزی در شرایط محدودیت آب. نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، ۳(۴)، صص. ۱۹-۴۲.
۵. سیاسر، هادی و سالاری، امیر، ۱۴۰۰. بهینه‌سازی الگوی کشت دشت سیستان با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات آشوبناک (Chaotic Particle Swarm Algorithm). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۵(۵)، صص. ۱۰۰۶-۱۰۱۷. **DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.5.2.0**
۶. مقدسی، مهنوش، مرید، سعید و عراقی نژاد، شهاب، ۱۳۸۷. بهینه سازی تخصیص آب در شرایط کم آبی با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی، هوش جمعی و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی). فصلنامه تحقیقات منابع آب ایران، ۴(۳)، صص. ۱-۱۳.
7. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome*.
8. Doorenbos, J., and Kassam, A.H., 1979. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33, FAO, Rome*.
9. English, M.J., Solomon, K.H. and Hoffman, G.J., 2002. A paradigm shift in irrigation management. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(5), pp. 267–277. **Doi: 10.1061/(ASCE) 0733-9437(2002)128:5(267)**
10. Fereres, E. and Soriano, M.A., 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), pp. 147–159. **doi: 10.1093/jxb/erl165**
11. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2024. Rome Declaration on Water Scarcity in Agriculture. *Rome, FAO*.
12. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2025. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2025: The potential to produce more and better (SOLAW 2025). *Rome, FAO*.
13. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2021. The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Systems at breaking point (SOLAW 2021). *Rome, FAO*.
14. Geerts, S. and Raes, D., 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96(9), pp. 1275–1284. **Doi: 10.1016/j.agwat.2009.04.009**
15. Gholami Sharafkhane, M., Ziaei, A.N., Naghedifar, S.M.R., Akbari, A. and Verdi, A., 2024. AquaCrop Plug-in-PSO: A novel irrigation scheduling optimization framework for maize to maximize crop water productivity using in-season weather forecast and crop yield estimation. *Agricultural Water Management*, 306, 109153. **Doi: 10.1016/j.agwat.2024.109153**

16. Kennedy, J. and Eberhart, R., 1995. Particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, pp. 1942–1948.  
**Doi: 10.1109/ICNN.1995.488968**
17. Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Bindraban, P., Hanjra, M.A. and Kijne, J., 2010. Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agricultural Water Management*, 97(4), pp. 528–535. **doi: 10.1016/j.agwat.2009.03.023**
18. Poli, R., Kennedy, J. and Blackwell, T., 2007. Particle Swarm Optimization: An Overview. *Swarm Intelligence*, 1(1), pp. 33–57. **doi: 10.1007/s11721-007-0002-0**
19. Rezaei, F., Safavi, H.R. and Zekri, M., 2017. A hybrid fuzzy-based multi-objective PSO algorithm for conjunctive water use and optimal multi-crop pattern planning. *Water Resources Management*, 31(4), pp. 1139–1155. **doi: 10.1007/s11269-016-1532-1**
20. Rosenberg, N.J., Epstein, D.J., Wang, D., Vail, L.W., Srinivasan, R. and Arnold, J.G., 1999. Possible impacts of global warming on the hydrology of the Ogallala aquifer region. *Climatic Change*, 42(4), pp. 677–692. **doi: 10.1023/A:1005424003553**
21. Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. and Raes, D., 2012. Crop yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 500 p.