

## تخصیص بهینه‌ی منابع آبی شبکه‌ی آبیاری مارون با هدف بیشینه‌سازی سود اقتصادی

بیمان کاشفی نژاد<sup>۱</sup> و عبدالرحیم هوشمند<sup>۲\*</sup>

### چکیده

دستیابی به کشاورزی پایدار و از طرفی چالش کمبود منابع آبی در دسترس، مدیریت مصرف آب را به طور جدی می‌طلبد. بدین منظور در مطالعه‌ی حاضر، یک مدل بهینه‌سازی تخصیص بهینه‌ی آب به الگوی کشت شبکه‌ی آبیاری مارون با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و با هدف بیشینه‌سازی سود اقتصادی ساخته شد. در این مدل، سال آبی به ۳۶ دوره ۱۰ روزه تقسیم شد. میزان عمق آب آبیاری در هر یک از این دوره‌های ۱۰ روزه و سطح کشت محصولات به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری مدل تعیین شدند. نتایج نشان داد که سطح کل کشت شبکه به میزان ۱۲۷۱ هکتار افزایش می‌یابد و این به معنای احیای ۱۴٪ از اراضی رها شده شبکه است. این افزایش در ازای کاهش عمق آبیاری و به‌کارگیری تغییرات در سطح کشت دیگر محصولات است؛ اما با وجود آنکه در مدل امکان اجرای کم‌آبیاری وجود دارد، به‌دلیل استفاده مدل از رطوبت موجود در خاک در تأمین نیاز آبی، به تمامی محصولات به‌جز کنگد تنش آبی اعمال نمی‌شود. به‌کارگیری تخصیص بهینه‌ی منابع آبی در دسترس شبکه باعث افزایش ۱۶/۴ درصدی سود اقتصادی می‌شود؛ در حالی که در مصرف آب تغییرات چندانی صورت نمی‌گیرد. بنابراین، با بهینه‌سازی تخصیص آب می‌توان تا حد زیادی چالش کم‌آبی کشاورزی در منطقه را برطرف کرد.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک، بهیهان، بهینه‌سازی، تنش آبی.

ارجاع: کاشفی نژاد پ. و هوشمند ع. ۱۳۹۹. تخصیص بهینه‌ی منابع آبی شبکه‌ی آبیاری مارون با هدف بیشینه‌سازی سود اقتصادی. مجله پژوهش آب ایران. ۳۶: ۴۱-۴۹.

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.  
۲- دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

\* نویسنده مسئول: [Hooshmand\\_a@scu.ac.ir](mailto:Hooshmand_a@scu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: 1398/04/03

تاریخ دریافت: 1397/05/21

## مقدمه

ایران کشوری با اقلیم‌های متفاوت است. ۶۵٪ مساحت کشور خشک، ۲۰٪ مساحت کشور نیمه‌خشک و میزان باقی‌مانده اقلیم مرطوب یا نیمه مرطوب است. میزان میانگین بارش این کشور ۲۵۰ میلی‌متر بوده که توزیع آن به‌صورت غیریکنواخت است (مدنی، ۲۰۱۴). مطابق با شاخص بین‌المللی مدیریت منابع آب<sup>۱</sup>، ایران در مرحله‌ی تنش آبی بحرانی و به‌شدت بحرانی قرار دارد (زرگان و واعظ موسوی، ۲۰۱۶). در چنین شرایطی، محدودیت منابع آبی در دسترس و تخصیص آن به بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی با مشکل کمبود آب روبه‌روست. در چنین شرایطی، تخصیص کارآمد منابع آبی به بخش کشاورزی می‌تواند یکی از راهکارهای سازگاری با محدودیت منابع آبی در دسترس باشد. بهینه‌سازی تخصیص منابع آبی در دسترس یکی از راهکارهایی است که در مدیریت تخصیص منابع آبی در دسترس در مطالعات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. میرزایی و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از الگوریتم ژنتیک، الگوی کشت بهینه را برای شبکه‌ی آبیاری و زهکشی سد گلستان ارائه دادند. نتایج مطالعه نشان داد در صورت اجرایی کردن الگوی کشت پیشنهادی، ۳۸٪ آب مازاد باقی خواهد ماند. این میزان آب می‌تواند به افزایش ۱۳۸۸ هکتاری سطح زیر کشت و همچنین افزایش ۳۷ درصدی سود اقتصادی در تخصیص این آب مازاد به کشت تابستانه منجر می‌شود. ربیعی و همکاران (۲۰۱۵) پس از بهینه‌سازی تخصیص آب به کانال اردیبهشت با استفاده از الگوریتم ژنتیک نتیجه گرفتند که در شرایط تخصیص بهینه‌ی آب، با کاهش مصرف آب می‌توان سطح کشت را ۱۲٪ افزایش داد. نتایج بهینه‌سازی الگوی کشت از طریق به‌کارگیری کم‌آبیاری منطقه‌ی هشترود استان آذربایجان شرقی توسط فقیهی و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از الگوریتم ژنتیک نشان داد که در میان رژیم‌های آبیاری مورد بررسی (۱۰ تا ۴۵٪)، کم‌آبیاری ۱۵٪ با در نظر گرفتن میزان کاهش محصول و کارایی مصرف آب به‌عنوان رژیم بهینه انتخاب شد. رات و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی تخصیص آب به منطقه ماندوقات پرداختند. نتایج نشان داد میزان سود اقتصادی ۶۸٪ افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج آنها در مطالعه‌ی دیگر به بهینه‌سازی

الگوی کشت اراضی تحت آبیاری کانال سنهپالی<sup>۲</sup> شبکه‌ی آبیاری هیراکود<sup>۳</sup> در هندوستان با استفاده از الگوریتم ژنتیک نشان داد که در الگوی کشت بهینه‌ی پیشنهادی، میزان سود اقتصادی ۴۸٪ افزایش می‌یابد (رات و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، استفاده از فن بهینه‌سازی می‌تواند در تصمیم‌گیری مربوط به مسائل مدیریت تخصیص آب برای منطقه کمک بسیار شایانی کند. با تخصیص بهینه‌ی آب و زمین می‌توان ضمن مصرف حداقلی آب، بهترین راهکارهای ممکن را در راستای حفاظت از منابع آبی در دسترس اجرایی کرد. این راهکارها بدون در نظرگیری مسئله‌ی اقتصاد با مشکل ضمانت اجرایی مواجه می‌شوند. از این‌رو، این تخصیص بهینه‌ی آب و زمین باید میزان سود اقتصادی بیشتری را نسبت به وضعیت فعلی تضمین کند. در مطالعه‌ی حاضر، با به‌کارگیری روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک<sup>۴</sup> و با هدف افزایش سود اقتصادی به تخصیص بهینه‌ی آب و زمین به محصولات زیر کشت اراضی شبکه‌ی آبیاری مارون واقع در شهرستان بهبهان پرداخته شده است.

## مواد و روش‌ها

## مشخصات منطقه

شهرستان بهبهان در جنوب غربی ایران و در جنوب شرقی استان خوزستان قرار گرفته است. این شهر در موقعیت جغرافیایی ۳۰ درجه و ۳۶ دقیقه شمالی و ۵۰ درجه و ۱۴ دقیقه شرقی قرار دارد. منبع عمده برای تأمین آب آبیاری، رودخانه مارون بوده و منابع آب زیرزمینی از لحاظ کیفی چندان رضایت‌بخش نیست. آب و هوای بهبهان، آب و هوای نیمه‌بیابانی یا کوهپایه‌ای است و حداکثر دمای مطلق بهبهان بیش از ۵۰ درجه سلسیوس در تیر و مرداد و حداقل کمتر از صفر درجه سلسیوس در اواخر آذر و دی می‌رسد.

## شبکه‌ی آبیاری مارون

شبکه‌ی آبیاری مارون به وسعت ۱۳۵۰۰ هکتار، بخش بزرگی از طرح توسعه اراضی حوضه‌ی رودخانه مارون و واقع در شهرستان بهبهان است. الگوی کشت شبکه در سال آبی ۹۲-۹۳ بر اساس اطلاعات دریافتی از اداره‌ی

2- Senhapali

3- Hirakud

4- Genetic Algorithm

1- Water resources vulnerability index

است از آنجا که کشت محصولات این شبکه در دو فصل پاییز و بهار صورت می‌گیرد، مجموع سطح کشت محصولات از ۱۳۵۰۰ هکتار بیشتر بوده و کل سطح قابل کشت برابر ۲۷۰۰۰ هکتار است.

جهاد کشاورزی بهبهان، سازمان جهاد کشاورزی خوزستان و سازمان آب و برق خوزستان مطابق جدول ۱ است. تمامی اراضی شبکه به روش آبیاری سطحی و از طریق آبیگری از کانال‌های شبکه مشروب می‌شود. لازم به ذکر

جدول ۱- محصولات زیر کشت شبکه‌ی آبیاری مارون

محصول	سطح زیر کشت (ha)	عملکرد (Kg/ha)	قیمت فروش (Rial/Kg)	هزینه ثابت کشت (Rials/ha)	آب‌بها (Rials/m <sup>3</sup> )
گندم	۸۰۰۰	۳۰۳۸	۱۰۵۰۰	۱۸۹۹۰۰۰۰	۱۷۵
یونجه	۲۷۰۰	۱۳۷۶۳	۵۳۰۰	۵۰۵۹۷۵۰۰	۵۱
کلزا	۱۵۰	۱۹۴۸	۱۸۵۰۰	۱۳۳۰۷۰۰۰	۵۴
کنجد	۲۰۰	۱۱۰۰	۵۰۰۰۰	۱۹۷۳۶۰۴۰	۲۹
ذرت علوفه‌ای	۲۲۵۰	۵۵۲۴۵	۱۱۰۰	۲۳۴۸۱۱۱۰	۱۲۱
ذرت دانه‌ای	۴۴۵۰	۶۲۸۱	۸۳۰۰	۲۷۴۸۱۱۱۰	۱۲۱
مجموع	۱۷۷۵۰	-	-	-	-

بهبینه‌سازی الگوریتم ژنتیک مطابق با راتو (۲۰۰۹) در فضای نرم‌افزار متلب ساخته شد. روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک بر اساس تولید یک مجموعه جواب تصادفی است که با استفاده از عملگرهای همبندی<sup>۲</sup> و جهش<sup>۳</sup> جواب‌های جدید تولید می‌شود. سپس، بر اساس میزان تابع هدف<sup>۴</sup>، از میان جواب‌های موجود، بهترین‌ها در قالب نسل جدید جواب‌ها دسته بندی می‌شوند. این عمل آنقدر تکرار می‌یابد تا نسل جدیدی تولید نشود. روند کار مدل به صورت تخصیص آب به الگوی کشت شبکه در ۳۶ دوره است که هر یک از دوره‌های تخصیص، شامل ۱۰ روز است. متغیرهای تصمیم‌گیری این مدل، شامل عمق آب آبیاری تخصیص به هر محصول در دوره‌های ده‌روزه و سطح کشت آن‌هاست. این تخصیص آب در مدل با هدف با بیشینه‌سازی سود اقتصادی<sup>۲</sup> شبکه صورت گرفت. بنابراین، تابع هدف مدل سود اقتصادی بوده که در معادله (۲) نشان داده شده است.

$$NB = \sum_{p=1}^K (B_p \times Y_{ap} - C_p - I_p C_w) \times A_p \quad (2)$$

در این معادله NB، سود خالص (ریال)؛  $B_p$ ، قیمت فروش محصول (ریال در کیلوگرم)؛  $C_p$ ، هزینه ثابت برای گیاه؛  $C_w$ ، هزینه آب آبیاری (ریال بر مترمکعب)؛  $I_p$ ، حجم ناخالص آب آبیاری (مترمکعب در هکتار)؛ و  $A_p$ ، مساحت زمین اختصاص داده به محصول p است (توکلی و همکاران، ۱۳۹۰). در مطالعه‌ی حاضر مدل می‌تواند در تخصیص آب

در این پژوهش، برای محاسبه‌ی تبخیر و تعرق مرجع، از معادله پنمن-مانتیت<sup>۱</sup> استفاده شد که به شرح زیر است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸):

$$ET_0 = \left( \frac{0.0408(R_n - G) + \gamma \left( \frac{900}{T+273} \right) U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34U_2)} \right) \quad (1)$$

در این معادله  $ET_0$  تبخیر تعرق گیاه مرجع ( $\text{mm.day}^{-1}$ )؛  $R_n$  تابش خالص در سطح تبخیر و تعرق ( $\text{MJ.d}^{-1}\text{m}^{-2}$ )؛  $G$ ، شار حرارتی خاک ( $\text{MJ.d}^{-1}\text{m}^{-2}$ )؛  $T$ ، متوسط درجه هوا ( $^{\circ}\text{C}$ )؛  $e_s$ ، فشار بخار اشباع (kpa)؛  $e_a$ ، فشار بخار واقعی (kpa)؛  $e_s - e_a$ ، کمبود فشار بخار اشباع (kpa)؛  $\Delta$ ، شیب منحنی فشار بخار در مقابل درجه حرارت ( $\text{kpa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ )؛  $\gamma$ ، ثابت سایکرومتریک ( $\text{kpa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) و  $U_2$ ، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (m/s) است. اطلاعات اقلیمی لازم از اداره‌ی هواشناسی استان خوزستان اخذ و در محاسبات تبخیر و تعرق مرجع به کار گرفته شد. اطلاعات گیاهی لازم برای محاسبه‌ی تبخیر و تعرق محصولات از نشریه فائو ۵۶ استخراج و با در نظرگیری اطلاعات اقلیمی منطقه مورد مطالعه ضرایب گیاهی طبق این نشریه اصلاح شد. محاسبه‌ی نیاز آبی محصولات بر اساس روش فائو پنمن-مانتیت و با استفاده از نرم‌افزار Cropwat 8.0 صورت گرفت (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

### مدل تخصیص بهینه‌ی آب

برای تخصیص آب به محصولات شبکه‌ی آبیاری مارون مدلی شامل ۶۵۰ خط کدنویسی با استفاده از روش

2- Crossover  
3- Mutation  
4- Objective Function

1- Penman-Monteith

## محدودیت‌های مدل

مدل مطالعه حاضر با تعدادی محدودیت همراه است. این محدودیت‌ها عبارت‌اند از:

Ø مجموع سطح زیر کشت تمامی محصولات نباید بیشتر از مساحت کل سطح قابل کشت اراضی منطقه در هر فصل کشت باشد.

$$\sum_{n=1}^i A_i \leq A_t \quad (۴)$$

در معادله بالا،  $A_i$ ، بیانگر سطح کشت محصول  $A_m$ ؛  $n$ ، تعداد محصولات زیر کشت؛ و  $A_t$ ، بیانگر کل سطح قابل کشت شبکه است.

Ø از آنجا که در شبکه، کشت در دو فصل صورت می‌گیرد، تخصیص سطح کشت محصولات در یک فصل نسبت به محصولات دیگر جداگانه بهینه‌سازی می‌شوند.

Ø تعیین الگوی کشت تابع سیاست‌های مختلف است و صرفاً نمی‌توان بر اساس توابع هدف این مدل تصمیم‌گیری کرد. بنابراین در راستای عدم ایجاد تغییرات کلی صرفاً بر اساس تصمیم‌های مدیریت منابع آبی، تغییرات سطح کشت هر محصول حداکثر ۳۰٪ در نظر گرفته شد (خاشعی و همکاران، ۲۰۱۳؛ لاله‌زاری و همکاران، ۱۳۹۵).

Ø در ابتدای دوره‌ی رشد هر محصول، رطوبت خاک در نقطه ظرفیت مزرعه است.

Ø برآورد عملکرد نسبی محصول با استفاده از معادله ۳ تا حداکثر ۵۰٪ کم‌آبیاری معتبر است؛ بنابراین، نباید بیشتر از ۵۰٪ از نیاز آبی محصول کاسته شود (کیپکوریر و راس، ۲۰۰۲).

Ø میزان آب تخصیص‌یافته در یک دوره‌ی ۱۰ روزه نباید از میزان آب در دسترس شبکه بیشتر باشد.

Ø اضافه‌کردن معادله‌ی بیلان آب در خاک به مدل این امکان را می‌دهد تا در صورت لزوم از رطوبت موجود در خاک نیز برای تأمین نیاز آبی گیاه استفاده کند. در این راستا، از معادله بیلان آب در خاک مطابق با ردی و کومار (۲۰۰۷) به‌عنوان یکی از محدودیت‌های مدل استفاده شد. این معادله به شرح زیر است:

$$SM_c^{t+1} D_c^{t+1} = SM_c^t D_c^t + RF^t + q_c^t - AET_c^t + SM_c^{max}(D_c^{t+1} - D_c^t) - DP_c^t - SR_c^t \quad (۵)$$

به الگوی کشت شبکه برای هر یک از محصولات کم‌آبیاری<sup>۱</sup> اجرا شود. در صورتی که برای گیاه کم‌آبیاری به‌کار برده شود، عملکرد محصول با کاهش مواجه می‌شود که این میزان کاهش با استفاده از معادله‌ی (۳)، قابل برآورد است (رائو و همکاران، ۱۹۸۷).

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^N \left(1 - K_{y_i} \left(1 - \frac{ET_{a_i}}{ET_{m_i}}\right)\right) \quad (۳)$$

در این معادله  $K_{y_i}$ ، ضریب حساسیت به تنش آبی در مرحله  $i$  محصول؛  $ET_{a_i}$ ، تبخیر تعرق واقعی در مرحله  $i$  رشد محصول؛ و  $ET_m$ ، تبخیر تعرق پتانسیل محصول در مرحله  $i$  رشد محصول؛  $K_{y_i}$ ، ضریب حساسیت گیاه به تنش آبی در مرحله  $i$  رشد محصول؛  $Y_a$ ، عملکرد واقعی محصول ( $kg \cdot ha^{-1}$ )؛  $Y_m$ ، حداکثر عملکرد محصول ( $kg \cdot ha^{-1}$ )؛ و  $N$ ، تعداد مراحل رشد محصول است.

دورنبوس و کاسام (۱۹۷۹) ضرایب حساسیت به تنش آبی را برای محصولات مختلف به تفکیک مراحل چهارگانه رشد محصول ارائه دادند؛ اما این میزان ضرایب با توجه به شرایط اقلیمی هر منطقه می‌تواند متفاوت باشد. در این پژوهش با توجه به نبود داده‌های لازم مربوط به ضرایب حساسیت به تنش آبی<sup>۲</sup> برای هر یک از دوره‌های چهارگانه رشد محصولات کشاورزی منطقه مورد مطالعه و از طرفی هزینه زیاد، نیاز به نیروی کاری فراوان و همچنین زمان‌بری زیاد برای تعیین ضرایب حساسیت به تنش آبی محصولات شبکه‌ی آبیاری مارون، از ضرایب حساسیت به تنش آبی پیشنهاد شده توسط دورنبوس و کاسام (۱۹۷۷) برای برآورد میزان کاهش عملکرد در شرایط به‌کارگیری کم‌آبیاری در این پژوهش استفاده شد. ضرایب مورد استفاده در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- ضرایب حساسیت محصولات کشاورزی شبکه‌ی

## آبیاری مارون

مرحله	۱	۲	۳	۴	۵	۶
مرحله ۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۳
مرحله ۲	۰/۶	۰/۵۵	۰/۹	۱/۵	۱/۵	۰/۵۵
مرحله ۳	۰/۵	۰/۶	۰/۶	۰/۵	۰/۵	۰/۶
مرحله ۴	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۵	۰/۵	۰/۶

1- Deficit irrigation

2- Crop yield response factor

پارامترهای تنظیمی روش بهینه‌سازی مورد استفاده باید به مقداری تنظیم شوند تا بهترین جواب به دست آید. تنظیم پارامتر<sup>۱</sup> در روش‌های بهینه‌سازی مورد استفاده در این مدل مطابق با اکبری پور و ماسحیان (۲۰۱۳) صورت گرفت. پارامترهای تنظیمی در الگوریتم ژنتیک شامل تعداد جمعیت، درصد هجری، درصد جهش، احتمال جهش و تعداد تکرار است. همچنین، تعداد جمعیت، تعداد تکرار، ضریب های اجتماعی و شناختی، وزن اینرسی بیشینه و وزن اینرسی کمینه از پارامترهای تنظیمی روش بهینه‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات است. پس از تعیین بهترین مقادیر پارامترها، در روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک تعداد جمعیت ۳۶۰، درصد همبندی ۸۰، درصد احتمال جهش ۲۰، درصد جهش ۳ و تعداد تکرار ۵۰۰ تنظیم شد. در روش بهینه‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات، تعداد ذرات ۳۶۰، ضریب اجتماعی ۱/۵، ضریب شناختی ۱/۵، وزن اینرسی ماکزیمم ۰/۷، وزن اینرسی مینیمم ۰/۲ و تعداد تکرار ۵۰۰ تنظیم شد. با رعایت تنظیمات یادشده و پس از ۲۰ اجرای مستقل، نتایج هر یک از دو روش در هر یک از دو مدل باهم مقایسه شدند.

### نتایج و بحث

برای اطمینان از درستی نتایج به‌دست آمده، نتایج حاصل از بهینه‌سازی سود اقتصادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک با نتایج به‌دست آمده توسط الگوریتم ازدحام ذرات پس از ۲۰ اجرای مستقل مقایسه شد. جدول ۳، مقایسه‌ی نتایج هر دو روش با هم را نشان می‌دهد. مقادیر مندرج در جدول مربوط به مقادیر سود اقتصادی بیشینه هستند؛ به گونه‌ای که بدترین مقدار، نشان‌دهنده‌ی کمترین میزان سود اقتصادی بیشینه در میان ۲۰ اجرای صورت گرفته و بهترین مقدار، بیانگر بیشترین میزان سود اقتصادی بیشینه در میان ۲۰ اجرای صورت گرفته است. از مقادیر سود اقتصادی بیشینه‌شده در هر دو روش میانگین‌گیری شد و انحراف معیار آن‌ها نیز محاسبه شد. مقایسه‌ی بهترین و بدترین مقادیر نتایج دو روش نشان می‌دهد با وجود اینکه مقادیر میانگین در دو روش نزدیک به هم هستند، اما بیشتر بودن مقدار میانگین در نتایج به‌دست آمده توسط این روش بیانگر کارایی بهتر این روش در

در این معادله  $SM_c^t$ ، رطوبت موجود در خاک در ناحیه‌ی ریشه گیاه  $c$  در دوره‌ی  $t$  سال آبی (mm/mm)؛  $RF^t$ ، میزان بارش در دوره؛  $q_c^t$ ، میزان آب تخصیص‌یافته به گیاه  $c$  در دوره  $t$  (mm)؛  $AET_c^t$ ، تبخیر تعرق واقعی محصول  $c$  در دوره‌ی  $t$ ام سال آبی؛  $SM_c^{max}$ ، حداکثر رطوبت موجود در خاک در وضعیت ظرفیت مزرعه برای گیاه  $c$ ؛  $D_c^t$ ، ریشه گیاه  $c$  در دوره  $t$ ام سال آبی؛ و  $DP_c^t$  و  $SR_c^t$ ، به ترتیب نفوذ عمقی و رواناب سطحی در دوره  $t$ ام سال آبی هستند (ردی و کومار، ۲۰۰۷).

### ارزیابی صحت نتایج

برای اطمینان از درستی جواب به‌دست آمده و دستیابی به پاسخ بهینه، نیاز به مقایسه نتایج با نتایج یک روش بهینه‌سازی دیگر است. روش بهینه‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات، یکی از روش‌های بهینه‌سازی است که به سبب دقت بالا، محاسبات کم و تأثیرپذیری کمتر از جواب اولیه کارایی بالایی دارد (رضایی جوردهی و جانسی، ۲۰۱۲). بنابراین، مقایسه‌ی نتایج روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک با این روش می‌تواند درستی یا نادرستی نتایج به‌دست آمده را نشان دهد. بنابراین، مدل مطالعه با روش الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات نیز اجرا شد. از آنجا که در روش‌های بهینه‌سازی مورد استفاده فراکاشی و بر اساس ایجاد جمعیت تصادفی است، مقدار بهینه تابع هدف مدل در دو اجرای متفاوت می‌تواند مقادیر متفاوتی باشد. بنابراین، یک مرتبه اجرای مدل با استفاده از هر یک از روش‌های نامبرده و مقایسه نتایج بر اساس آن معتبر نیست. برای رفع این اشکال، نتایج به‌دست آمده از هر دو روش پس از ۲۰ اجرای مستقل مورد مقایسه قرار گرفتند. لازم به ذکر است که به‌دلیل کارکرد متفاوت دو روش، دستیابی به نتایج کاملاً مشابه در هر دو روش امکان‌ناپذیر است؛ اما با مقایسه‌ی نتایج می‌توان از دستیابی مدل به بهترین جواب ممکن که جواب بهینه است، اطمینان حاصل کرد.

در روش‌های بهینه‌سازی، جواب به‌دست آمده بسته به نوع تابع هدف بیشترین یا کمترین مقدار آن است. عملکرد روش‌های بهینه‌سازی به مقدار تعیین شده‌ی پارامترهای مربوط به عملکردهاست. در مطالعه‌ی حاضر، از آنجا که تابع هدف میزان سود اقتصادی است، مدل باید بیشترین میزان ممکن تابع هدف را به دست آورد. در این راستا،

سطح کشت محصولات را در وضعیت فعلی و وضعیت تخصیص بهینه نشان می‌دهند. مطابق با نتایج مدل، در تمامی محصولات به‌جز یونجه و گندم افزایش سطح کشت مشاهده می‌شود. بیشترین میزان کاهش و افزایش سطح به‌ترتیب در محصولات یونجه و ذرت دانه‌ای صورت می‌گیرد. روند تخصیص سطح در مدل بدین صورت است که در راستای افزایش سود اقتصادی و کاهش هزینه‌های آب‌بها، محصولی که ضمن رعایت محدودیت‌های مدل، نیاز آبی کمتر و سود اقتصادی بیشتری داشته باشد، نسبت به دیگر محصولات در اولویت تخصیص سطح است؛ اما محصولات ذرت دانه‌ای، ذرت علوفه‌ای و کنجد که در نیم سال دوم کشت می‌شوند، با وجود اینکه نیاز آبی بالایی دارند، به سبب ارزش اقتصادی بالاتر و همچنین میزان آب‌بهای کمتر نسبت به دیگر محصولات، با افزایش سطح کشت بیشتری مواجه می‌شوند. نتایج مدل همچنین نشان می‌دهند که کل سطح کشت در تخصیص بهینه‌ی آب به شبکه‌ی آبیاری مارون نسبت به وضعیت فعلی ۱۲۷۱ هکتار افزایش می‌یابد. این به معنای به زیر کشت رفتن ۱۴٪ از اراضی رهاشده شبکه است. افزایش سطح کشت محصولات در این مطالعه با نتایج میرزایی و همکاران (۱۳۹۶) مطابقت دارد.

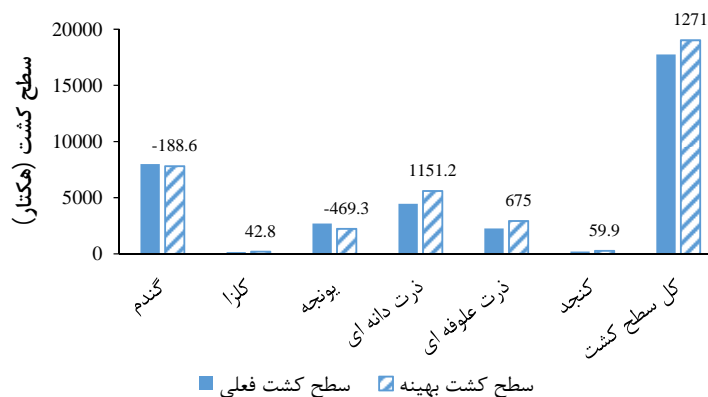
یافتن پاسخ بهینه است. مقایسه‌ی مقادیر انحراف معیار نشان می‌دهد که مقادیر به‌دست آمده توسط الگوریتم ازدحام ذرات به هم نزدیک‌تر بوده و از این‌رو، همگرایی بهتری دارند که این یکی از مزایای روش بهینه‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات نسبت به الگوریتم ژنتیک در مدل مطالعه حاضر است. در کل، با مقایسه‌ی مقادیر در جدول از آنجا که مقادیر بیشینه شده در دو روش به هم نزدیک هستند، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج به‌دست آمده توسط الگوریتم ژنتیک قابل اعتماد بوده و تفاوت در مقادیر ناشی از تفاوت در روش‌های بهینه‌سازی و توان هر یک در اجرای مدل مطالعه حاضر است.

جدول ۳- مقایسه نتایج روش‌های الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات در بیشینه‌سازی سود اقتصادی

الگوریتم ژنتیک	الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات	
$2/70 \times 10^{11}$	$3/62 \times 10^{11}$	بدترین مقدار
$3/90 \times 10^{11}$	$3/72 \times 10^{11}$	بهترین مقدار
$3/79 \times 10^{11}$	$3/67 \times 10^{11}$	میانگین مقادیر
$5/20 \times 10^9$	$4/05 \times 10^9$	انحراف معیار

### تخصیص بهینه‌ی آب

شکل ۱، نشان‌دهنده‌ی مقایسه‌ی سطح کشت محصولات شبکه‌ی آبیاری مارون در وضعیت فعلی نسبت به وضعیت تخصیص بهینه است. اعداد مندرج در شکل، تفاوت میزان



شکل ۱- مقایسه سطح کشت فعلی و بهینه محصولات شبکه‌ی آبیاری مارون

دو وضعیت فعلی و تخصیص بهینه نشان می‌دهد. مطابق با جدول، در تمامی محصولات به جز کنجد نیاز آبی محصولات به تمامی تأمین می‌شود. بنابراین، افزایش ۷ درصدی سطح کشت بدون به‌کارگیری کم‌آبیاری با توجه به محدودیت منابع آبی در دسترس، غیرممکن است؛ مگر

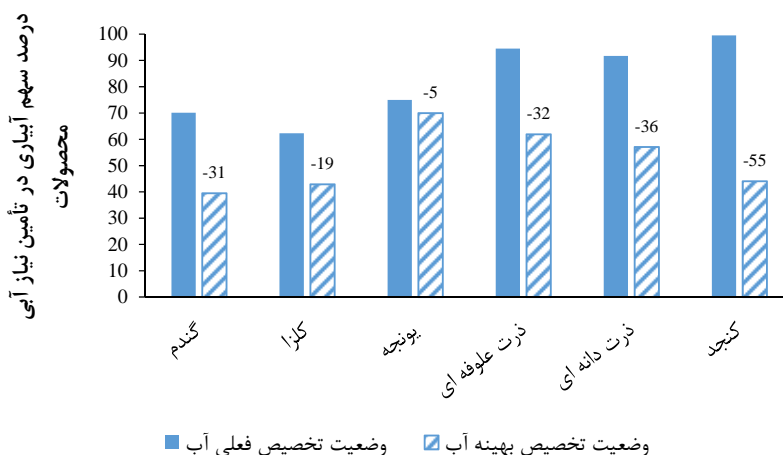
از آنجا که مدل قادر به اجرا کردن کم‌آبیاری به محصولات شبکه است، در صورت کمبود منابع آبی در دسترس برای تخصیص آب به الگوی کشت شبکه مدل می‌تواند نیاز آبی برخی یا تمامی محصولات را به تمامی تأمین نکند. جدول ۴، مقایسه‌ی میزان درصد تأمین نیاز آبی محصولات را در

کاهش می‌یابد. بیشترین میزان کاهش عمق در محصولات کنجد، ذرت دانه‌ای و ذرت علوفه‌ای رخ می‌دهد. بنابراین، افزایش سطح کشت عمدتاً در ازای کاهش عمق آب آبیاری و جبران این میزان کاهش از طریق استفاده از رطوبت موجود در خاک صورت می‌گیرد.

جدول ۴- مقایسه درصد تأمین نیاز آبی محصولات در وضعیت فعلی و تخصیص بهینه‌ی آب

محصول	وضعیت تخصیص فعلی آب	وضعیت تخصیص بهینه‌ی آب
گندم	۱۰۰	۱۰۰
کلزا	۱۰۰	۱۰۰
یونجه	۱۰۰	۱۰۰
ذرت دانه‌ای	۱۰۰	۱۰۰
ذرت علوفه‌ای	۱۰۰	۱۰۰
کنجد	۱۰۰	۷۴

آنکه نیاز آبی محصولی که دچار افزایش سطح کشت شده است، از منبع آب در دسترس دیگری تأمین شود. همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها پیش‌تر توضیح داده شد، رابطه ۵ به‌عنوان محدودیت به مدل اضافه شد تا علاوه بر جلوگیری از وقوع رواناب سطحی و نفوذ عمقی تا حد امکان، از رطوبت موجود در خاک نیز برای تأمین نیاز آبی محصولات استفاده شود. بنابراین، در شرایطی که عمق آب آبیاری با کاهش مواجه شود، استفاده از رطوبت خاک می‌تواند تمام یا بخشی از این کاهش را جبران کند. شکل ۲، سهم آبیاری را در تأمین نیاز آبی محصولات در دو وضعیت فعلی و تخصیص بهینه نشان می‌دهد. اعداد موجود در شکل بیانگر میزان تفاوت سهم آب آبیاری در دو وضعیت فعلی و تخصیص بهینه است. مطابق با شکل ۲، به‌دلیل استفاده مدل از رطوبت موجود در خاک، درصد سهم آب آبیاری در تأمین نیاز آبی تمامی محصولات



شکل ۲- مقایسه درصد سهم آب آبیاری در تأمین نیاز آبی محصولات در وضعیت‌های فعلی و بهینه

قابل توجهی کاهش نمی‌دهد؛ اما می‌توان با استفاده از مدل میزان سود اقتصادی شبکه را بدون افزایش مصرف آب تا ۱۷٪ افزایش داد. افزایش میزان سود اقتصادی در مطالعه‌ی حاضر با نتایج میرزایی و همکاران (۱۳۹۶) و رات و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد.

جدول ۵- مقایسه میزان سود اقتصادی و آب مصرفی در وضعیت فعلی و در تخصیص بهینه

سود اقتصادی (میلیارد ریال)	وضعیت تخصیص فعلی آب	وضعیت تخصیص بهینه‌ی آب
۳۳۵/۵	۳۹۰/۴	
میزان مصرف آب (میلیون مترمکعب)	۲۲۲/۹	۲۲۳/۲

جدول ۵، میزان آب مصرفی شبکه و همچنین میزان سود اقتصادی را در دو وضعیت فعلی و تخصیص بهینه نشان می‌دهد. در تخصیص بهینه‌ی آب، میزان سود اقتصادی ۵۴/۹ میلیارد ریال افزایش می‌یابد. این افزایش میزان سود اقتصادی ناشی از افزایش سطح کشت محصولات در ازای کاهش عمق آب آبیاری در تأمین نیاز آبی محصولات است. این مسئله عملاً منجر به صرفه‌جویی چندان زیادی در مصرف آب نمی‌شود و به‌همین دلیل میزان آب مصرفی در وضعیت تخصیص بهینه نسبت به وضعیت فعلی با کاهش بسیار ناچیز همراه است. بنابراین، استفاده از مدل مطالعه‌ی حاضر، میزان مصرف آب شبکه را به میزان

## نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، مدلی برای تخصیص بهینه‌ی آب به الگوی کشت شبکه‌ی آبیاری مارون با هدف افزایش سود اقتصادی با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک ساخته شد. نتایج نشان داد که وضعیت فعلی تخصیص آب و سطح به الگوی کشت شبکه بهینه نبوده است و با بهینه‌سازی این تخصیص می‌توان سود اقتصادی را به میزان ۱۷٪ افزایش داد. در این تخصیص بهینه، میزان آب موجود در خاک نیز در مدل به‌عنوان منابع آبی در دسترس در نظر گرفته شده است که این مسئله باعث می‌شود که مدل در ازای کاهش عمق آب آبیاری، سطح کشت محصولات شبکه را به میزان ۷٪ افزایش دهد. نتایج مطالعه‌ی حاضر، بیانگر کارایی مؤثر الگوریتم ژنتیک در حل مسائل بهینه‌سازی تخصیص آب است. بنابراین، می‌توان وضعیت بهره‌برداری از آب و همچنین درآمد حاصل از کشت را بدون افزایش در مصرف آب ارتقا داده و گام مهمی در راستای کمک به تحقق کشاورزی پایدار برداشت. مطالعه‌ی حاضر، بخشی از یک سری مطالعات در راستای تخصیص بهینه‌ی آب است، از همین رو در مطالعات تکمیلی پیشنهاد می‌شود مبنای فعلی قیمت‌گذاری آب که بر اساس نوع محصول است، به‌صورت مبتنی بر حجم آب تحویلی تغییر داده شود. همچنین می‌توان بر اساس شرایط حاکم بر بازار منطقه امکان‌سنجی کشت محصولی جدید که اهداف این مطالعه را برآورده کند، مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر موارد نامبرده، برای ضمانت اجرایی تخصیص بهینه‌ی آب، پیشنهاد می‌شود موانع پذیرش این مسئله و اقدامات اجرایی مربوط به آن از طرف کشاورزان مورد بحث و بررسی قرار گیرد.

## منابع

۱. توکلی ع. ر. لیاقت ع. م. و مهدوی مقدم م. ۱۳۹۰.
۲. لاله‌زاری ر. برومند نسب س. معاضد ه. و حقیقی ع. ۱۳۹۵. تخصیص بهینه‌ی منابع آب سطحی و زیرزمینی به الگوی کشت دشت باغملک با الگوریتم برنامه‌ریزی چندهدفه مبتنی بر رتبه‌بندی
۳. میرزایی ش. ذاکری نیا م. شهابی فر م. و شریفان ح. ۱۳۹۶. تعیین الگوی کشت بهینه در شبکه‌ی آبیاری و زهکشی سد گلستان با استفاده از الگوریتم ژنتیک. مجله علوم و مهندسی آبیاری. ۴۰(۳): ۱۸۱-۱۹۰.
4. Akbaripour H. and Masehian E. 2013. Efficient and Robust Parameter Tuning for Heuristic Algorithms. International journal of industrial engineering & production research. 24(2): 143-150.
5. Allen RG. Pereira LS. Raes D. and Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). Irrigation and drainage paper NO.56, Rome. 333 p.
6. Doorenbos J. and Kassam A. H. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage paper No.33, Rome. 350 p.
7. Faghihi N. Babazadeh H. Sedghi H. and Pazira E. 2015. Optimization of Irrigation Planning and Cropping Pattern Under Deficit Irrigation Condition Using Genetic Algorithm. Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences. 5(3): 566-577.
8. Khashei Siuki A. Ghahraman B. and Kouchakzadeh M. 2013. Application of Agricultr Water Allocation and Management by PSO Optimization Technic (Case study: Nayshabur Plaine). Journal of Water and Soil. 27(2): 292-303.
9. Kipkorir EC. and Raes D. 2002. Transformation of yield response factor into Jensen's sensitivity index. Irrigation and drainage systems. 16: 47-52.
10. Madani K. 2014. Water management in iran: what is causing this looming crisis. journal of environmental studies and sciences. 4: 315-328.
11. Rabie Z. Honar T. and Bateni M. 2015. Determination of Optimal 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.
12. Rao NH. Sarma PBS. and Chander S. 1987. A simple Dated Water-Production Function for Use in Irrigated Agriculture. Agricultural Water Management. 13: 25-32.
13. Rao S. S. 2009. Engineering Optimization Theory and Practice. John Wiley and Sons, New York. 813 p.
14. Rath A. Prakash S. and Swain C. 2017. Optimal Irrigation Management at Mundoghat Command Area of Hirakud Canal System Using Genetic Algorithm.

نامغلوب. رساله دکتری. دانشگاه شهید چمران

اهواز. ۲۰۸ ص.



- International journal of Recent Advances in Multidisciplinary Research. 4(8): 2175-2719.
15. Rath A. Samantary S. Biswal S. and Swain P. C. 2018. Application of Genetic Algorithm to Derive an Optimal Cropping Pattern in Part of Hirakud Command. Advances in Intelligence and Computing. Singapore. 845 p.
  16. Reddy M. J. and Kumar D. N. 2007. Multi-objective particle swam optimization for generating trade-offs in reservoir operation. Hydrological Processes. 21: 2897-2909.
  17. Rezaee Jordehi A. and Jansi J. 2012. Parameter selection in particle swarm optimization: a survey. Journal of experimental & theoretical artificial inteelligence. 25(4): 527-542.
  18. Zargan J. and Waez-Mousavi S. M. 2016. Water crisis in Iran: its intensity, causes and confronting strategies. Indian journal of science and technology. 9(44): 2-6.

