نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۹، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۱، ص. ۴۴-۳۱

Water Management in Agriculture
Vol. 9, No. 1, Spring and Summer 2022, 31-44

مقاله علمی -پژوهشی

ارائه مدلی برای تخصیص آب شبکه آبیاری و زهکشی با استفاده از روش‌های هوشمند تکاملی

امید جهاندیده[۱] و سمیه امامی[۲*]

چکیده

با توجه به وضعیت آبی کشور و از طرف دیگر افزایش نیاز به آب، مدیریت منابع آبی اهمیت فراوانی دارد. ازآنجاکه سهم عمده مصرف آب به بخش کشاورزی اختصاص‌یافته، ازاین‌رو مدیریت آب در دسترس و تخصیص بهینه آب از مسائلی است که باید موردتوجه قرار سیاست‌گذاران قرار گیرد. در همین راستا، در پژوهش حاضر، از روشی فرا ابتکاری مبتنی بر الگوریتم وال (WOA)، جهت تخصیص بهینه منابع آب شبکه آبیاری و زهکشی صوفی چای واقع در استان آذربایجان شرقی در بخش کشاورزی طی سال‌های آماری ۹۲-۱۳۸۲ استفاده شد. نتایج حاصل از این روش با نتایج الگوریتم رقابت استعماری (ICA) مورد مقایسه قرار گرفت. تابع هدف بر اساس هر یک از محصولات و عملکرد آن‌ها و درآمد حاصله از هر محصول مشخص و سپس حداکثر سازی تابع هدف و تخصیص بهینه منابع آب توسط الگوریتم‌های WOA و ICA انجام شد. نتایج پژوهش نشان داد با افزایش ضریب اعمالی به ۰/۹، سود حاصل از تخصیص بهینه آب با ۳۰٪ افزایش سود اقتصادی همراه است. این در حالی است که الگوریتم WOA در مقایسه با الگوریتم ICA با تخصیص ۱/۷۲۰ میلیون مترمکعب حجم در سال دارای ۸/۹۰ درصد استفاده از منابع آب در حالت بهینه در بخش کشاورزی است. در مجموع می‌توان بیان کرد استفاده از روش‌های هوشمند تکاملی می‌تواند راه‌حل مناسبی در راستای تخصیص بهینه آب در بخش کشاورزی باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم وال، الگوریتم رقابت استعماری، بهینه‌سازی، تخصیص آب، شبکه صوفی چای

مقدمه

کمبود منابع تولید سبب شده است که روش‌های تخصیص بهینه منابع آب بین فعالیت‌های مختلف، روزبه‌روز گسترش یابد. با توجه به نقش به سزای بخش کشاورزی در اقتصاد ملی و تأمین غذای جامعه بشری، ضروری است از منابع و ابزارهای تولید در این بخش به بهترین نحو استفاده شود تا ضمن کاهش مصرف آب، سودآوری و رفاه کشاورزان نیز افزایش یابد. یکی از راه‌های سازگاری با کمبود آب در شرایط خشک‌سالی به‌ویژه در بخش کشاورزی استفاده بهینه از آب و ارائه راهکارهای بهینه‌سازی در شبکه‌های آبیاری و زهکشی است (محمدی ورزنه و وفایی نژاد، ۱۳۹۴). در زمینه برآورد و بهینه‌سازی تخصیص آب نیز طی سالیان اخیر مطالعات متعددی صورت گرفته است. در پژوهشی خاشعی و همکاران (۱۳۹۲)، با مطالعه بر روی کاربرد تخصیص و مدیریت آب کشاورزی در دشت نیشابور با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)[۲] نشان دادند که با افزایش ۲۰۵۹۱ هکتار به محصولات پاییزه و کاهش ۱۰۹۷۰ هکتار از محصولات بهاره، می‌توان ۷۵۰۰ هزار ریال به‌طور متوسط در هر هکتار درآمد بیش‌تری به دست آورد. امیدوار و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی شبکه آبیاری دردوزن

[۱] دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
[۲] دکتری سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (* نویسنده مسئول: somayehemami70@gmail.com)
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۱۸
DOR: 20.1001.1.24764531.1401.9.1.3.4

[2] Particle swarm optimization

فارس بر مبنای تئوری بازی‌های همکارانه پرداختند. نتایج حاصل نشان داد مجموع سود خالص حاصل از شکل‌گیری ائتلاف بین بازیکنان اصلی ۹/۷۲۴ میلیارد تومان و در صورت عدم شکل‌گیری ائتلاف ۸/۹۰۶ میلیارد تومان است که با توجه به مقدار آب ثابت تخصیص‌یافته به منطقه در دو حالت، بهره-وری اقتصادی آب افزایش می‌یابد. خیراندیش و فرزین (۱۳۹۵)، باهدف تأمین نیاز شرب صنعت و تأمین حقابه پایین‌دست، برنامه‌ریزی تخصیص سد کمال صالح را با استفاده از نرم‌افزار WEAP که یک مدل مناسب برای تخصیص منابع آب به نیازهای مختلف است، مدل‌سازی کردند. نتایج حاصل از اجرای این مدل برای سناریو مرجع و نیز سناریو افزایش نیاز شرب و صنعت در سال‌های آتی نشان داد که این سد در هر دو سناریو قادر به تأمین تمام نیازها به‌صورت صد در صد نیست. کاشفی‌نژاد (۱۳۹۶) با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب (NRGA)[1] به تخصیص بهینه آب شبکه آبیاری حمیدیه پرداخت. نتایج نشان داد در تخصیص بهینه آب میزان مجموع کارایی مصرف آب نسبی نسبت به وضعیت فعلی حداقل ۹٪ افزایش و میزان آب مصرفی شبکه حداقل ۱۰۷ میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد. امامی و چوپان (۱۳۹۹) به تخصیص بهینه اقتصادی آب دشت مغان با به‌کارگیری الگوریتم فرا ابتکاری انتخابات پرداختند. نتایج نشان داد با اعمال سیاست‌های اقتصادی همانند تغییر الگوی کشت می‌توان به درآمدهای بالاتری در بخش کشاورزی رسید. ایزیک و کالین با به‌کارگیری برنامه‌ریزی پویا جهت اختصاص بهینه آب آبیاری در ترکیه دریافتند که سود خالص کل در شرایط خشک‌سالی ۲۲/۹۶ میلیون دلار، در شرایط ترسالی ۲۲/۸ میلیون دلار و در شرایط معمولی ۱۳/۸ میلیون دلار است. این در حالی است که باوجوداینکه در شرایط خشک‌سالی میزان آب اختصاص‌یافته ۱۱/۴ درصد کم‌تر است، اما میزان تفاوت در سود خالص به میزان ۱ درصد است (Isik and Kalin, 2014). پرهیزکاری و همکاران (۱۳۹۵) اثر کاهش تخصیص آب و کم آبیاری بر تولیدات کشاورزی در استان قزوین را موردبررسی قراردادند. نتایج نشان داد که در شرایط آبیاری کامل، اعمال سیاست کاهش آب در دسترس تحت سناریوی ۱۰ درصد، منجر به صرفه‌جویی ۶۲/۵ میلیون مترمکعب و افزایش ۱۰۷ میلیارد ریالی سود اقتصادی نسبت به سال پایه می‌گردد. هم‌چنین کمبود آب و عدم تأمین آن‌هم ازنظر تعداد دفعات و هم ازنظر کمی در سناریو جدید بسیار بیشتر از سناریو مرجع است که این امر بیانگر اثرات افزایش تقاضا برای آب در سال‌های آتی است.

احمد و همکاران از یک برنامه چندهدفه دومرحله‌ای خطی برای تخصیص بهینه منابع آب در حوضه‌ی رودخانه Swat پاکستان استفاده نمودند. چهار سناریو با اولویت‌بندی استفاده از آب به‌صورت جداگانه، شامل آبیاری، صنعت، خانگی و محیط‌زیست تهیه شد. نتایج مدل نشان داد که برای چهار سناریو، بازده اقتصادی به ترتیب ۱۷۴، ۱۷۷، ۱۸۰ و ۱۷۲ میلیون دلار بود. هم‌چنین نتایج مطالعه‌ی ایشان نشان داد که مدل استفاده‌شده یک رویکرد ساده، کاربردی، عملی و درعین‌حال کارآمد برای تخصیص بهینه آب است (Ahmad et al., 2018). سردارشهرکی و امامی به ارزیابی اقتصادی تخصیص بهینه آب با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در دشت مغان پرداختند. نتایج نشان داد که حدود ۴۴ درصد از درآمد تخصیص بهینه منابع آب (۱۱۵ میلیارد دلار) در مقایسه با وضعیت موجود در بین بخش‌های کشاورزی بهبودیافته است (Sardarshahraki and Emami, 2020). ژو و همکاران به تخصیص بهینه آب یک سیستم چند مخزنه با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. نتایج نشان داد الگوریتم ژنتیک اصلاح‌شده سازگاری بهتری داشته و روشی هوشمند برای حل تخصیص بهینه منابع آب برای سیستم‌های چندمخزنه می‌باشد (Zhuo et al., 2021).

با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده متعدد، استفاده از روش‌های هوشمند نوین در مدیریت تخصیص آب می‌تواند ابزاری مؤثر و کارا باشد. در همین راستا، با توجه به خشک‌سالی‌های اخیر و اهمیت و ضرورت مدیریت منابع آب، در پژوهش حاضر به‌منظور بررسی عملکرد و اثبات کارایی الگوریتم وال به‌عنوان روشی فرا ابتکاری و هم‌چنین سازگاری این

[1] Non-dominated ranked genetic algorithm

الگوریتم با تعداد کم‌تری از پارامترها، به تخصیص بهینه منابع آبی در دسترس شبکه آبیاری و زهکشی صوفی چای پرداخته شد. هدف محاسبه اولویت تخصیص آب شبکه آبیاری زهکشی صوفی چای بر پایه اهداف اقتصادی است که با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری پیشنهادی انجام گردید. روند تخصیص آب با در نظرگیری محدودیت‌های مختلفی ازجمله محدودیت‌های اقتصادی، منابع آبی در دسترس و قابل تأمین و محدودیت سطوح زیر کشت در فضای نرم‌افزار MATLAB انجام شد. درنهایت نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج الگوریتم رقابت استعماری (ICA) مورد مقایسه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

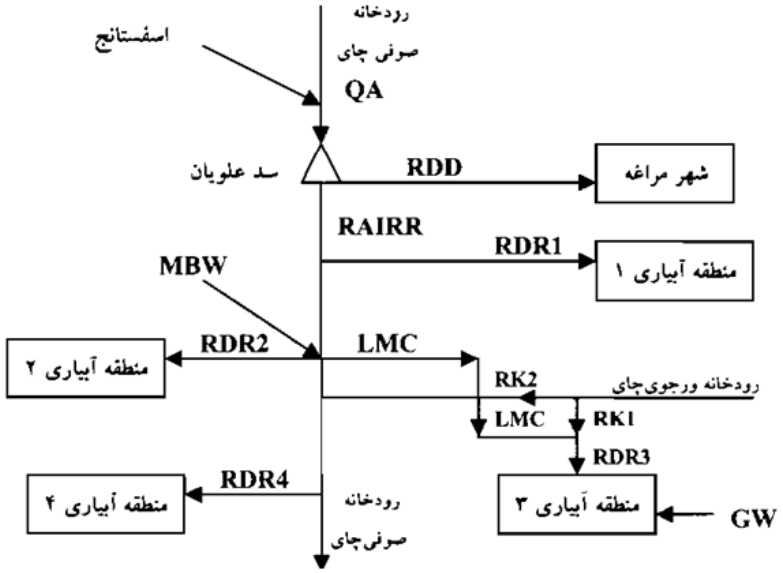
منطقه موردمطالعه (شبکه آبیاری و زهکشی صوفی چای)

محدوده مطالعاتی شامل سد علویان و شبکه آبیاری زهکشی صوفی چای در پایین‌دست آن است. رودخانه صوفی چای از اصلی‌ترین منابع این منطقه می‌باشند. این رودخانه در مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه تا ۴۶ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۳ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی با وسعت برابر با ۳۱۳/۶ کیلومترمربع قرار دارد. سد علویان در سه کیلومتری شمال شهر مراغه و در نزدیکی روستای علویان قرار دارد. این سد بر روی رودخانه صوفی چای احداث‌شده است و آب آشامیدنی شهرستان‌های مراغه، میاندوآب، بناب، عجب‌شیر و ملکان را تأمین می‌کند. اراضی کشاورزی این محدوده شامل ۴ منطقه به شرح جدول ۱ است (شکل ۱). بر اساس اطلاعات هواشناسی، متوسط بارندگی سالانه‌ای محدوده برابر با ۳۳۰ میلی‌متر است که بیش از ۴۰ درصد آن در فصل بهار رخ می‌دهد. محصولات کشت‌شده شامل گندم، جو، یونجه، سیب‌زمینی، پیاز، انگور، بادام و سردرختی است. میزان تقاضای آب تخصیصی از سد علویان در بخش‌های کشاورزی، شرب، صنایع و محیط‌زیست دسته‌بندی می‌شود که بیش‌ترین نیاز آب در این محدوده مطالعاتی مربوط به بخش کشاورزی است.

بر اساس آمار موجود، متوسط سالانه حجم آب تخصیص‌یافته برای آبیاری، ۴۲ میلیون مترمکعب و متوسط سالانه آب تخصیص‌یافته برای شرب، ۷/۴ میلیون مترمکعب است. نیاز سالانه آب در بخش شرب و صنایع شهر مراغه در سال ۸۸ برابر ۸/۰۶ میلیون مترمکعب، در بخش زیست‌محیطی برابر ۱۲/۱ میلیون مترمکعب به دست آمد. بیش‌ترین نیاز آب در محدوده مطالعاتی مربوط به بخش کشاورزی (آبیاری محصولات کشاورزی) است. از آنجایی مقادیر نیاز شرب، زیست‌محیطی و صنایع تغییر چندانی نمی‌کنند، لذا، برنامه‌ریزی تخصیص آب سد علویان در بخش کشاورزی انجام شد. تبخیر و تعرق پتانسیل در محدوده شبکه صوفی چای بر مبنای روش پنمن- مانتیث برابر ۱۰۳۸/۵ میلی‌متر برآورد شد. با توجه به خصوصیات شبکه آبیاری و زهکشی و شیوه‌های کشاورزی مرسوم در منطقه، راندمان کل آبیاری در هر یک از چهار منطقه به ترتیب ۰/۵۶، ۰/۴۲، ۰/۴۲ و ۰/۳۶ لحاظ شد (کیافر و همکاران، ۱۳۹۰).

جدول ۱- اراضی کشاورزی محدوده مورد مطالعه

منطقه	محدوده	مساحت (هکتار)
منطقه یک	باغات و مزارع بالادست بند انحرافی مراغه تا سد مخزنی علویان و اطراف شهر مراغه	۲۵۰۰
منطقه دو	حد فاصل کانال اصلی و ساحل راست رودخانه صوفی چای	۴۴۰۰
منطقه سه	حد فاصل سد انحرافی مراغه، کانال اصلی، ساحل چپ دشت مرکزی و رودخانه صوفی چای	۲۴۸۰
منطقه چهار	بخش شمالی شبکه و دشت بناب	۲۸۵۰



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه و وضعیت آب مناطق چهارگانه شبکه آبیاری و زهکشی صوفی چای

در این شکل، QA ورودی سد علویان، RDD آب شرب شهر مراغه، RAIRR برداشت کشاورزی از مخزن علویان، RDR1 آب سطحی تخصیص‌یافته به منطقه ۱، MBW آب برگشتی شهر مراغه، LMC آب انتقال‌یافته به بند خانقاه، RDR2 آب سطحی تخصیص‌یافته به منطقه ۲، RKI آب تخصیص‌یافته به منطقه ۳ از ورجوی چای، RK2 آب رهاسازی شده به پایین‌دست بند خانقاه، RDR3 آب سطحی تخصیص‌یافته به منطقه ۳، RDR4 آب سطحی تخصیص‌یافته به منطقه ۴، GW آب زیرزمینی تخصیص‌یافته به هریک از مناطق.

بر اساس اطلاعات کشاورزی موجود و الگوی کشت غالب در منطقه، مصرف آب کشاورزی کل دشت مراغه-بناب در جدول ۲، ارائه شده است.

جدول ۲- ترکیب کشت، مصرف آب بخش کشاورزی در وضع موجود

نام محصول	سطح زیر کشت خالص	درصد کشت	عملکرد محصول	مصرف ناخالص	برداشت سالیانه
	هکتار		تن در سال	مترمکعب	میلیون مترمکعب
گوجه	۵۶۶۰	۴۶/۲۰	۵/۸	۹۷۲۰	۵۵/۰۲
جو	۸۷۰	۷/۱۰	۵/۲	۹۵۴۰	۸/۳۰
یونجه	۷۸۵	۶/۴۱	۳/۳	۲۰۰۰۰	۱۵/۷۰
سایر گیاهان علوفه‌ای	۳۴۱	۲/۷۸	۱/۲	۲۰۰۰۰	۶/۸۲
حبوبات	۲۲۰	۱/۸۰	۲/۸	۱۳۱۸۰	۲/۹۰
جالیز- پیاز	۱۹۶۰	۱۶/۰۰	۸۵	۱۳۱۱۵	۲۵/۷۱
سیب‌زمینی	۱۲۳	۱/۰۰	۲۸	۱۴۶۳۵	۱/۸۰
میوه خشک	۱۹۶	۱/۶۰	۴/۸	۱۸۸۸۰	۳/۷۰
سایر انواع میوه‌ها	۲۰۹۵	۱۷/۱۰	۲۰	۱۸۶۶۰	۳۹/۰۹

الگوریتم بهینه‌سازی وال

الگوریتم وال[1] یک الگوریتم فرا ابتکاری کاملاً جدید به تقلید از رفتار شکار نهنگ کوهان‌دار است. تفاوت عمده‌ی این الگوریتم با دیگر الگوریتم‌ها، شبیه‌سازی رفتار شکار به‌صورت تصادفی و یا بهترین عامل جستجو برای تعقیب شکار است. این الگوریتم با مجموعه‌ای از جواب‌های تصادفی شروع می‌شود. در هر مرحله عامل‌های جستجو موقعیت خود را با توجه به انتخاب تصادفی عامل جستجو یا بهترین جواب به‌دست‌آمده قبلی به‌روز می‌کنند (Mirjalili and Lewis, 2016). در الگوریتم بهینه‌سازی وال اعضای جمعیت برای یافتن موقعیت بهینه بیش‌ازاندازه به عضو بهینه جمعیت متکی می‌باشند و اگر عضو موردنظر در نزدیکی بهینه محلی باشد، اعضای جمعیت گمراه می‌شوند و الگوریتم به‌جای همگرایی به سمت بهینه‌های سراسری به سمت بهینه‌های محلی همگرا می‌شود.

مدل ریاضی الگوریتم وال به‌صورت زیر است:

محاصره طعمه

نهنگ‌های کوهان‌دار می‌توانند محل طعمه را تشخیص داده و آن‌ها را محاصره کنند. الگوریتم WOA فرض می‌کند که در حال حاضر نامزد بهترین راه‌حل، طعمه هدف می‌باشد. این رفتار توسط معادلات ۱ و ۲ نشان داده شده است.

$$\vec{D} = \left|\vec{C}.\vec{X}^{*}(t) - \vec{X}(t)\right| \qquad (۱)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^{*}(t) - \vec{A}.\vec{D} \qquad (۲)$$

که در این روابط، t تکرار فعلی، $\vec{A}$ و $\vec{C}$ بردار ضرایب، $\vec{X}^{*}$ بردار بهترین راه‌حل به‌دست‌آمده تاکنون و $\vec{X}$ بردار موقعیت جسم می‌باشد. بردارهای A و C به فرم روابط ۳ و ۴، محاسبه می‌شوند.

$$\vec{A} = 2\vec{a}.\vec{r} - \vec{a} \qquad (۳)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r} \qquad (۴)$$

بردار a به‌صورت خطی در هر تکرار از ۲ تا ۰ کاهش می‌یابد و بردار r، یک بردار تصادفی بین صفر و یک است (Mirjalili and Lewis, 2016).

روش حمله شبکه حباب (فاز بهره‌برداری)

برای مدل‌سازی ریاضی رفتار شبکه حباب نهنگ کوهان‌دار، دو روش به‌صورت زیر طراحی‌شده است:

کاهش سازوکار محاصره: این رفتار با کاهش مقدار $\vec{a}$ در رابطه ۶، به دست می‌آید. باید توجه داشت که محدوده نوسان $\vec{A}$ نیز به a کاهش می‌یابد.

موقعیت به‌روزرسانی مارپیچ: معادله مارپیچی بین موقعیت نهنگ و موقعیت طعمه برای تقلید از حرکت مارپیچ شکل نهنگ کوهان‌دار به فرم روابط ۵ و ۶ می‌باشد.

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D}^{t} e^{N}.\cos(2\pi l) + \vec{X}^{*}(t) \qquad (۵)$$

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^{*}(t) - \vec{A}.\vec{D} & p < 0.5 \\ \vec{D}^{t} e^{N}.\cos(2\pi l) + \vec{X}^{*}(t), & p \geq 0.5 \end{cases} \qquad (۶)$$

که p عددی تصادفی بین ۰ و ۱ است.

جستجوی طعمه (فاز اکتشاف)

رویکرد مشابه بر اساس تنوع بردار $\vec{A}$ می‌تواند برای جستجوی طعمه (اکتشاف)، مورداستفاده قرار گیرد. لذا این سازوکار و $|\vec{A}|<1$ کید بر اکتشاف و اجازه دادن به الگوریتم WOA، موجب انجام یک جستجوی کلی می‌شود. مدل ریاضی به‌صورت روابط ۷ و تعریف می‌شود.

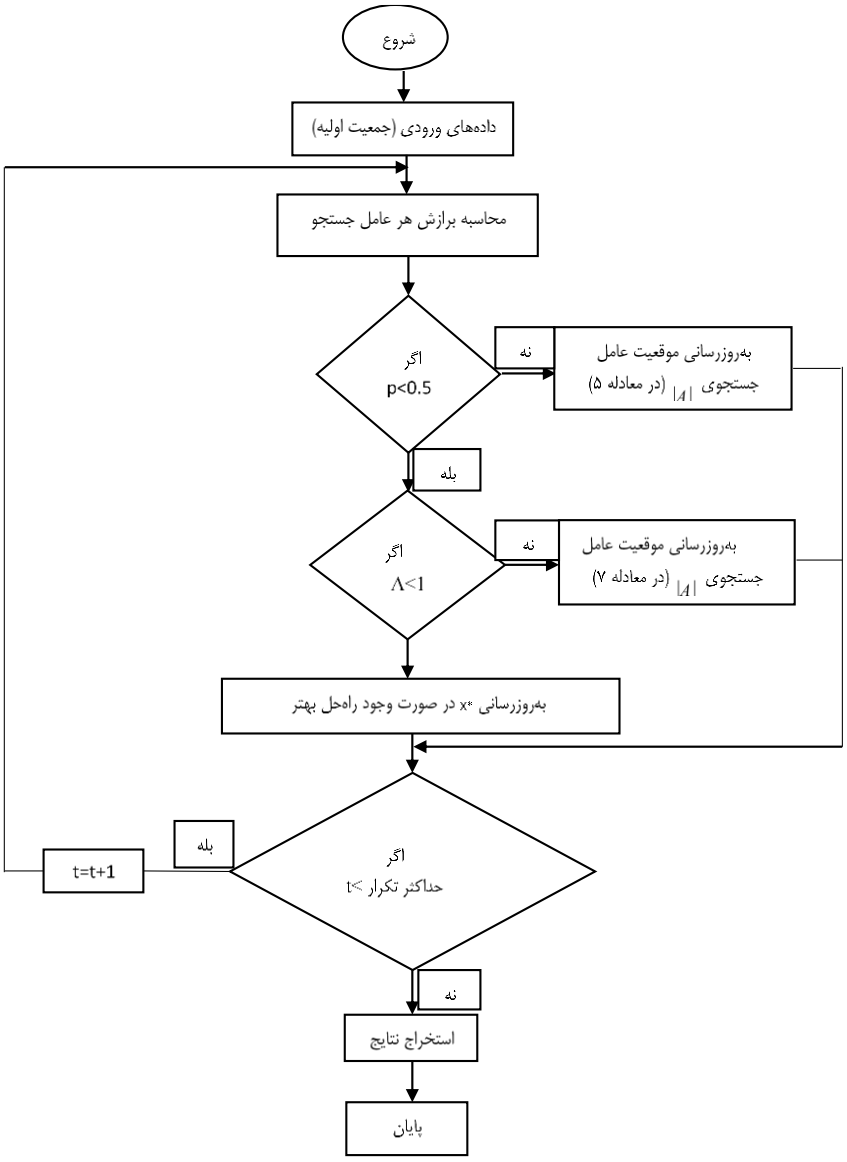
$$\vec{D} = \left|\vec{C}.\vec{X}_{rand} - \vec{X}\right| \qquad (۷)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand} - \vec{A}.\vec{D} \qquad (۸)$$

که $\vec{X}_{rand}$ یک بردار موقعیت تصادفی (یک نهنگ تصادفی) است که از جمعیت فعلی انتخاب‌شده است.

در شکل ۲، فلوچارت الگوریتم وال ارائه شده است.

[1] Whale optimization algorithm



شکل ۲- فلوچارت الگوریتم وال

تابع هدف

تابع هدف مدنظر در این پژوهش به‌صورت رابطه‌های ۹ تا ۱۱ در نظر گرفته شده است.

$$Maximaze: TB - TCE - TCS \quad (۹)$$

$$TB: \sum_{i=1}^{4}\sum_{C=1}^{8}(Y * A) * P_C \quad (۱۰)$$

$$Y_c = Y_{\max c}\left((1-\sum_{t=1}^{n} ky_{ct}\left(1-\frac{ET_c}{ET_{\max c}}\right)\right) \quad (۱۱)$$

در این روابط، TB سود ناخالص شبکه، TCS هزینه‌های کمبود در تخصیص به بخش شرب و صنایع، TCE هزینه‌های کمبود در تخصیص بخش زیست‌محیطی، Ycj مجموع وزن محصول تولیدشده C در منطقه j به ازای واحد سطح زیر کشت، Acj مجموع سطح زیر محصول C در منطقه j، Pc قیمت واحد وزن تولیدی محصول c، Tmaxc حداکثر تولید محصول c بدون تنش آبی، kyct ضریب حساسیت گیاه c در ماه t و Etmax مقدار تبخیر واقعی گیاه c در ماه t بدون تنش آبی

است. اندیس c معرف نوع محصول، j منطقه زراعی و t اندیس زمان (ماه) است.

قیود و محدودیت‌ها

بیلان آب خاک (با نادیده گرفتن رواناب سطحی بیلان آب خاک در هر فاصله زمانی) به‌صورت رابطه ۱۲ در نظر گرفته شد. میزان تبخیر و تعرق (Eta) از رابطه ۱۳ محاسبه شد. کل حجم آب آبیاری در فواصل زمانی پی‌درپی برای همه محصولات نمی‌تواند از آب قابل‌دسترس موجود بیش‌تر باشد (رابطه ۱۴).

$$SM_{i,t+1} = Root_{i,t+1} = SM_{i,t}, Root_{i,t} + Rain_t + IR_{i,t} - ETa_{i,t} - DP_{i,t} + SM_t(Root_{i,t+1} - Root_{i,t}) \quad (۱۲)$$

$$ETa_{i,t} \le \frac{\left[(SM_{i,t} - PWP_i)Root_{i,t} + Rain_t + IR_{i,t} - DP_{i,t}\right]}{\left[(1-P_i)(FC_i - PWP_i)Root_{i,t}\right]} ETp_{i,t} \quad (۱۳)$$

$$\sum_i \sum_t IR_{i,t} \cdot A_i = R \cdot E_{ci} \quad (۱۴)$$

که در رابطه ۱۲، SMi,t+1 و SMi,t، به ترتیب مقدار آب در منطقه ریشه در ابتدا و انتهای یک‌فصل رشد، Rooti,t و Rooti,t+1 به ترتیب عمق مؤثر ریشه گیاه در ابتدا و انتهای دوره، Rain نشان‌دهنده میزان بارندگی مؤثر (mm) در دوره t، SMi رطوبت ثابت لایه‌های زیرین خاک قبل از کاشت گیاه i (mm) است. IR آب آبیاری اختصاص‌یافته برای گیاه i در دوره زمانی t (mm)، Etai,t و Dpi,t به ترتیب تبخیر و تعرق واقعی (mm) و نفوذ عمقی گیاه (mm) در دوره زمانی t است.

در میزان تبخیر و تعرق (Eta) (رابطه ۱۳)، i نوع محصول، t دهه‌های آبیاری، Pi کسر تخلیه آب خاک است.

در رابطه ۱۴، IRi,t حجم آب آبیاری (mm)، Ai مساحت (ha)، R حجم آب موجود (M/m3)، Eci راندمان انتقال است.

حداکثر کاهش آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل گیاهان با توجه به حد مجاز کاهش عملکرد به‌صورت جدول ۳ در نظر گرفته شد (Parand et al., 2006; Jalilian et al., 2001; Hosseini, 2005; Sepaskhahand Kamgar-Haghighi, 1994)

جدول ۳- حداکثر مقدار کاهش آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل

گیاه	درصد کاهش آب
گندم	۴۰
جو	۴۰
برنج	۳۶
ذرت علوفه‌ای	۳۰
ذرت دانه‌ای	۳۰
چغندرقند	۲۰

متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم شامل مقدار جریان تحویلی و مدت‌زمان تحویل آب می‌باشند. لازم به ذکر است برای هر یک از قسمت-های الگوریتم‌های مورداستفاده با توجه به قابلیت‌های بالای آن، گزینه‌های مختلف برای رسیدن به بهترین راه‌حل مورد امتحان قرار گرفت و در برخی موارد با آنالیز حساسیت انجام شده بهترین گزینه در هر مورد انتخاب شده است.

معیار ارزیابی

جهت مقایسه نتایج الگوریتم‌های مورداستفاده با مقادیر مشاهداتی، از شاخص‌های ضریب هم‌بستگی (R^2)، مجذور

مربعات خطا (RMSE) و معیار نش–ساتکلیف (NSE) استفاده شد که در روابط ۱۵ تا ۱۷ به این معیارها اشاره شده است.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} (Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})}{\sum_{i=1}^{n} \sqrt{(Y_i - \bar{Y})^2} \sum_{i=1}^{n} \sqrt{(X_i - \bar{X})^2}} \right]^2 \quad (۱۵)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - y_i)^2} \quad (۱۶)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2} \quad (۱۷)$$

که در این روابط، xi مقادیر پیش‌بینی‌شده، Yi ها مقادیر مشاهده‌شده، $\bar{x}$ میانگین x و $\bar{Y}$ میانگین است. مقدار ایده آل به ترتیب برای R2 و RMSE برابر یک و صفر است. مقدار معیار نش ساتکلیف (NSE) از ۱ تا منفی بی‌نهایت تغییر می‌کند، به‌طوری‌که محدوده‌های ۱–۰/۷۵، ۰/۷۵–۰/۳۶ و کم‌تر از ۰/۳۶ به ترتیب بیانگر عملکرد بسیار خوب، رضایت‌بخش و ضعیف مدل است (Emami et al., 2021).

نتایج و بحث

در پژوهش حاضر، هدف بیشینه کردن درآمد ناخالص حاصل از فروش محصولات زراعی و کمینه کردن خسارات ناشی از کمبود در تخصیص منابع آب در بخش کشاورزی است که در سه مرحله زیر انجام پذیرفت:

– آماده‌سازی و آنالیز داده‌ها شامل بررسی همبستگی

– نرمال‌سازی داده‌ها

ارزیابی و مقایسه الگوریتم‌های وال و رقابت استعماری در بهینه‌سازی و ارائه برنامه تخصیص بهینه منابع آب شبکه آبیاری و زهکشی صوفی چای در ماه‌های بهره‌برداری

بدین منظور از دوره آماری ۱۰ ساله (۹۲–۱۳۸۲)، استفاده شد (دو سال ۸۴ و ۸۵ به دلیل نبود آمار در بررسی‌ها وارد نشدند). از ۸۰ درصد داده‌های موجود به‌منظور آموزش مدل و ۲۰ درصد باقی‌مانده داده‌ها برای صحت سنجی مدل استفاده شد. در اجرای تابع هدف با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، ابتدا مقادیر بهینه‌شده در آغاز فصل زراعی به‌عنوان ورودی وارد مدل شده و سپس متغیرهای مسئله مربوط به تخصیص آب در طول فصل زراعی بهینه گردید. پارامترهای مورداستفاده در الگوریتم WOA در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ٤- پارامترهای الگوریتم وال

پارامتر	مقدار
اندازه جمعیت	۱۰۰
حداکثر تعداد تکرار	۱۰۰۰
ضریب شکل مارپیچ	۱

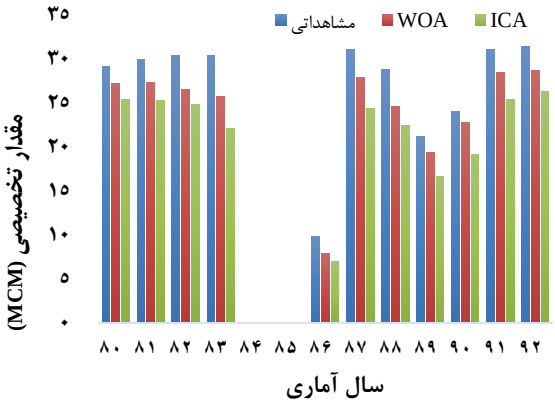
مقادیر عددی پارامترهای ارائه‌شده در جدول ۲، پس از بررسی مقادیر مختلف برای پارامترها و اجرای الگوریتم به ازای مقادیر مذکور تا رسیدن به بهینه‌ترین جواب انتخاب شدند.

نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های WOA و ICA و نیز مقادیر در دسترس برای آب تخصیص‌یافته مناطق چهارگانه شبکه آبیاری و زهکشی صوفی چای در طول فصل زراعی در شکل‌های ۳ تا ۶ آورده شده است.

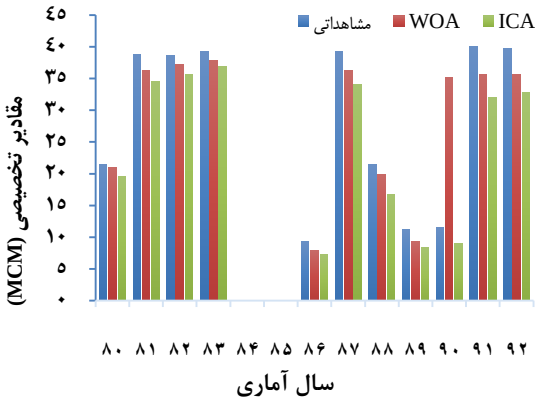
با توجه به شکل‌های ۳ تا ۶ مشخص شد نتایج حاصل از الگوریتم WOA در مقایسه با الگوریتم ICA تطابق قابل قبولی با مقادیر مشاهداتی آب تخصیص‌یافته دارد و این امر نشان‌دهنده کارایی الگوریتم WOA در تخصیص بهینه آب است. کم‌ترین مقدار آب تخصیص‌یافته در منطقه چهار محدوده مطالعاتی مربوط به سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۲ است.

تفاوت مقادیر بهینه آب تخصیص‌یافته با استفاده از الگوریتم WOA و مقادیر در دسترس در طی سال‌های آماری موردبررسی به ترتیب برابر با ۱/۴، ۰/۳، ۲/۳ و ۰/۷ میلیون مترمکعب در سال است که مقدار قابل‌توجهی است و لزوم مصرف بهینه آب در این منطقه را دوچندان می‌کند. نتایج پژوهش حاضر با نتایج مطالعات امامی و همکاران (۱۳۹۹) و کیافر و همکاران (۱۳۹۰) هم‌خوانی دارد.

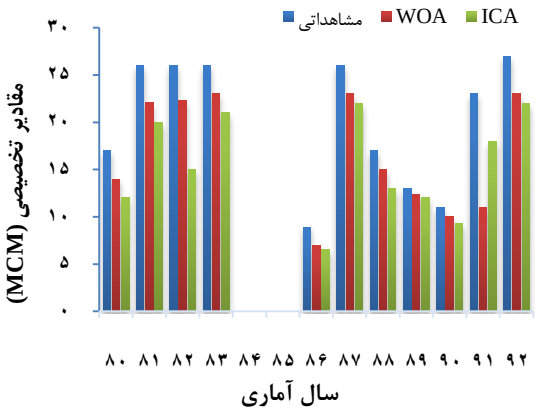
در جدول ۵، میانگین مقادیر حاصل از معیارهای ارزیابی مختلف برای تخصیص بهینه آب ارائه شده است.



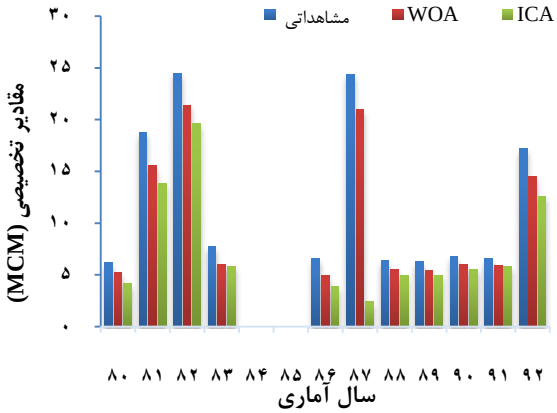
شکل ۳- مقایسه مقادیر آب تخصیص‌یافته در منطقه یک محدوده مطالعاتی



شکل ٤- مقایسه مقادیر آب تخصیص‌یافته در منطقه دو محدوده مطالعاتی



شکل ٥- مقایسه مقادیر آب تخصیص‌یافته در منطقه سه محدوده مطالعاتی



شکل ٦- مقایسه مقادیر آب تخصیص‌یافته در منطقه چهار محدوده مطالعاتی

جدول ٥- مقادیر معیارهای ارزیابی

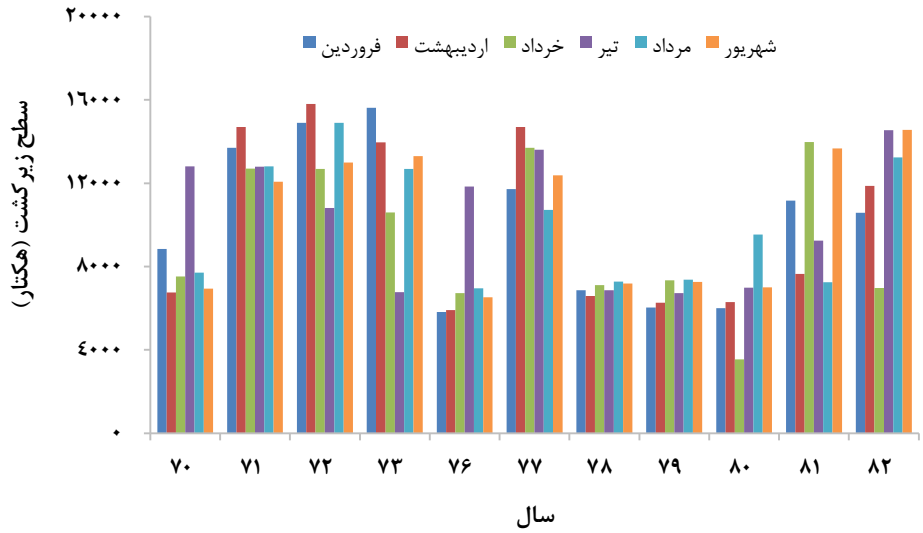
منطقه	WOA			ICA		
	R^2	RMSE	NSE	R^2	RMSE	NSE
یک	۰/۹۵۶	۰/۰۱۳	۰/۹۴۲	۰/۹۰	۰/۰۲۲	۰/۹۲۲
دو	۰/۹۷۵	۰/۰۲۷	۰/۹۶۴	۰/۹۱	۰/۰۳۹	۰/۹۳۰
سه	۰/۹۶۲	۰/۰۳۵	۰/۹۵۲	۰/۸۹	۰/۰۴۵	۰/۹۱۸
چهار	۰/۹۵۲	۰/۰۳۸	۰/۹۳۶	۰/۸۸	۰/۰۵۱	۰/۸۹۶

جدول ٦- مقادیر تابع هدف برای ۱۰۰ بار اجرای برنامه

الگوریتم	مقادیر تابع هدف		انحراف معیار نرمال‌سازی شده	تعداد اجرای شدنی
	حداقل	میانگین		
WOA	۵/۸۱×۵-۱۰	۵/۹۳×۵-۱۰	۰/۰۰۰۵	۱۰۰

سطح زیر کشت بهینه کل بر اساس مقادیر تخمین زده شده منابع آب در ابتدای هر ماه از سال و با در نظر گرفتن محدودیت حداقل و حداکثر سطح زیر کشت در شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به شکل ۷، بررسی‌ها در دو بازه جداگانه انجام شد. بازه اول شامل سال‌هایی است که مقادیر تخمین زده شده بیش‌تر از مقادیر واقعی باشد. در طی این سال‌ها سطح زیر کشت محصولات از مقدار اولیه آن‌ها، کم‌تر بوده است که با کاهش سطح زیر کشت، تنها درصدی از سطح زیر کشت، به‌صورت آبیاری کامل می‌شود. بازه دوم شامل سال‌هایی است که مقادیر منابع آب بیش‌تر از مقادیر تخمین زده شده باشد که این‌گونه استنباط می‌توان کرد که در اکثر سال‌های آماری، سطح زیر کشت با روند افزایشی روبرو بوده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، میانگین سطح زیر کشت کل تخمین زده شده، ۳-۴ درصد بیش‌تر از مقادیر مشاهداتی (اندازه‌گیری شده) است، لذا برای دستیابی به حداکثر منابع آب، لازم است سطح الگوی بهینه کشت در ابتدای فصل زراعی با ضریب ۱/۰۴ در نظر گرفته شود. نتایج تحقیق حاضر با نتایج مطالعات کیافر و همکاران (۱۳۹۰) که به تخصیص بهینه آب در شبکه آبیاری و زهکشی صوفی چای با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند، هم‌خوانی دارد.

در جدول ۷، به ترتیب الگوی پیشنهادی سطوح زیر کشت با استفاده از الگوریتم WOA ارائه شده است.



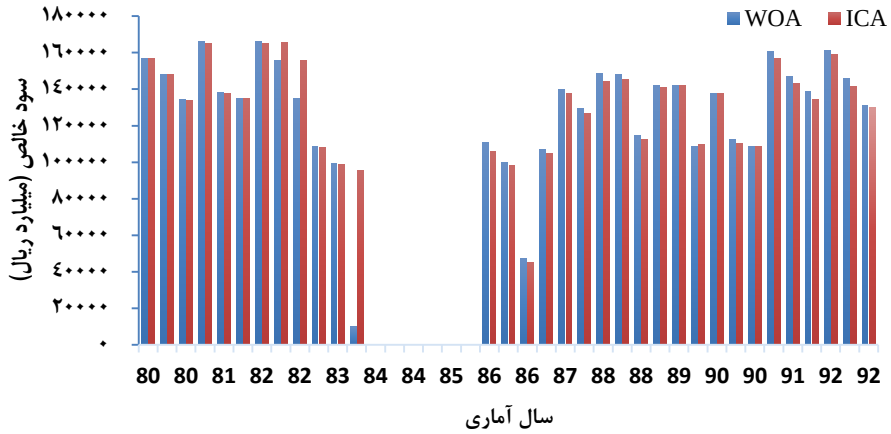
شکل ۷- کل سطح زیر کشت بهینه در ابتدای هر ماه بر حسب هکتار

جدول ۷- الگوی کشت پیشنهادی و حداکثر سود حاصل به روش الگوریتم WOA

نام محصول	آب تخصیص‌یافته میلیون متر مکعب	مساحت بهینه محصولات قابل‌کشت هکتار	حداکثر سود میلیارد ریال
گوجه	۲۴/۱	۵۸۲۰	۱۴۰۰۰۰
جو	۲۴/۱	۷۹۰	۱۹۰۰۵
یونجه	۲۰/۴	۶۱۰	۱۸۵۰۰
سایر گیاهان علوفه‌ای	۱۴/۴	۳۵۰	۱۴۲۰۰
حبوبات	۷/۹۵	۲۰۰	۱۴۵۰۰
جالیز- پیاز	۲۸/۹	۱۷۵۰	۱۳۲۵۰
سیب‌زمینی	۷/۹۵	۹۵	۱۰۵۸۰
میوه خشک	۸/۱۰	۲۱۰	۱۶۵۰۰
سایر انواع میوه‌ها	۳۱/۹	۲۰۷۸	۸۵۰۰۰

با توجه نتایج مشخص می‌شود که کل سطح زیر کشت بهینه محصولات معادل ۱۱۹۰۳ هکتار می‌باشد و محصول سیب‌زمینی به دلیل بازده اقتصادی پایین نسبت به سایر محصولات دارای سطح زیر کشت کم‌تری است. هم‌چنین گندم به سبب سود اقتصادی بالا به‌عنوان محصول زراعی پر درآمد منطقه تلقی شده و سطح زیر کشت به خاطر سودآوری اقتصادی بالای این محصول ایجاد شده است. هم‌چنین نتایج نشان داد الگوریتم WOA از حداکثر پتانسیل مساحت قابل‌کشت استفاده کرده و بیش‌ترین مساحت زیر کشت به محصول گندم و در سپس به محصول جالیز-پیاز و میوه خشک اختصاص داده شده است. هم‌چنین حداکثر سود حاصل در محصول گندم که مساحت زیر کشت بیش‌تری در مقایسه با کشت‌های بعدی، ۱/۴ میلیارد تومان به دست آمد. مقایسه مقادیر درآمد حاصله از تخصیص اقتصادی در پژوهش حاضر با نتایج مطالعات حبیبی داویجانی و همکاران (۱۳۹۲)، نشان داد که در مناطق شمال‌غربی ایران، با توجه به وضعیت منابع آبی در مقایسه با بخش‌های مرکزی، محصول گندم با کسب سود اقتصادی بالا به‌عنوان محصول زراعی پر بازده در این مناطق محسوب می‌شود.

در ادامه سود خالص در هر سال با اعمال ضرایب ۰/۶، ۰/۷۵ و ۰/۹ محاسبه شده است (شکل ۸). با توجه به این شکل، در طی سه سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۲، سود خالص با روند صعودی روبرو بوده سپس روند نزولی را طی می‌کند. با افزایش ضریب اعمالی از ۰/۶ به ۰/۹، سود حاصل از فروش محصولات افزایش می‌یابد. در طی دوره آماری موردبررسی، سال ۱۳۸۶ به دلیل مقدار آب تخصیصی و سطح زیر کشت بهینه، دارای کم‌ترین میزان سود و سال‌های ۱۳۸۲، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲، به دلیل رشد چشمگیر بخش کشاورزی بیش‌ترین مقدار سود را به خود اختصاص دادند. نتایج حاصل از عملکرد الگوریتم WOA نشان داد الگوریتم پیشنهادی در تخصیص بهینه آب با ۳۰٪ افزایش سود اقتصادی همراه است. به‌نحوی‌که الگوریتم WOA در مقایسه با الگوریتم ICA با تخصیص ۱/۷۲۰ میلیون مترمکعب در سال دارای ۸/۹۰ درصد استفاده از منابع آب در حالت بهینه در بخش کشاورزی است. تخصیص‌های بهینه انجام‌شده با استفاده از الگوریتم WOA، موجب بهبود ۲۲٪ رشد اقتصادی (۱۱۵ میلیارد ریال درآمد) در بخش کشاورزی در محدوده مطالعاتی در مقایسه با الگوریتم ICA (۹۰ میلیارد ریال) شد.



شکل ۸- سود خالص در طی دوره آماری مورد مطالعه (سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۹۲) با اعمال ضرایب ۰/۶، ۰/۷۵ و ۰/۹

نتیجه‌گیری

در این پژوهش الگوریتم بهینه‌سازی وال (WOA) برای نخستین بار برای تخصیص بهینه آب شبکه آبیاری زهکشی صوفی چای معرفی شد. بدین منظور، مقادیر بهینه‌شده با مقادیر در دسترس مقایسه گردید که نتایج حاصله از تطابق مناسبی برخوردار بودند. در ادامه نتایج حاصل از الگوریتم WOA با الگوریتم ICA مقایسه و نتیجه گرفته شد نتایج حاصل از دو الگوریتم از تطابق مناسبی با داده‌های مشاهداتی برخوردارند و این امر بیانگر کارایی روش‌های پیشنهادی است. نتایج حاصله از بهینه‌سازی مصرف آب نشانگر این مطلب بود که کم‌ترین مقدار آب تخصیص‌یافته در منطقه چهار محدوده مطالعاتی و مربوط به سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۲ و بیش‌ترین مقدار آب تخصیص‌یافته در منطقه یک محدوده مطالعاتی و در محدوده سال‌های ۸۳-۱۳۸۰ و ۸۸-۱۳۸۷ است. در منطقه موردمطالعه، محصول گندم به سبب سود اقتصادی بالا به‌عنوان محصول زراعی پر درآمد منطقه تلقی شده و درنتیجه اجرای الگوی کشت بهینه حاصل از الگوریتم WOA در این منطقه با رشد سود اقتصادی ۲۲ درصدی مواجه خواهد بود. هم‌چنین الگوریتم WOA در تعیین الگوی کشت بهینه، با تخصیص ۱۱۵ میلیارد ریال درآمد در بخش کشاورزی، بسیار بهینه عمل نموده و در یافتن جواب بهینه از سرعت و دقت بالایی برخوردار است. در حالت کلی، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق می‌توان برتری الگوریتم WOA و هم‌چنین کارایی و نرخ هم‌گرایی بالای روش پیشنهادی جدید را در تخصیص بهینه آب به اثبات رساند که می‌توان این تکنیک را برای دیگر مسائل بهینه‌سازی در حوضه منابع آب نیز تعمیم داد.

منابع

امیدوار، م.، هنر، ت.، نیکو، م .ر . و سپاسخواه، ع.۱۳۹۵. تدوین یک مدل فازی بهینه‌سازی الگوی کشت و تخصیص آب بر مبنای تئوری بازی‌های مطالعه موردی: کانال اردیبهشت شبکه آبیاری درودزن فارس. نشریه علوم آب و خاک. ۱۳: ۲۰-۱.

امامی، س. و چوپان، ی. ۱۳۹۹. تخصیص بهینه اقتصادی آب با به‌کارگیری خوارزمی‌های فرا ابتکاری انتخابات و رقابت استعماری. مهندسی عمران امیرکبیر. ۵۲(۳): ۶۰۱-۶۱۲.

امامی، س.، چوپان، ی.، خیری قوجه بیگلو، م. و حسام، م. ۱۳۹۹. تخصیص بهینه و اقتصادی آب در شبکه آبیاری و زهکشی با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری (ICA) مطالعه موردی: شبکه صوفی چای). مهندسی آب و آبیاری و ایران. ۱۰(۳).

پرهیزگاری، ا.، صبوحی، م.، احمدپور، م. و بدیع برزین، ح. ۱۳۹۵. ارزیابی اثرات کم آبیاری و کاهش تخصیص آب بر تولید بخش کشاورزی استان قزوین. نشریه پژوهش آب در

کشاورزی. ۲(۳۰): ۱۷۳-۱۸۵.

حبیبی داویجانی، م.، بنی‌حبیب، م. ا. و هاشمی، س. ر. ۱۳۹۲. مدل بهینه‌سازی تخصیص منابع آب در بخش‌های کشاورزی، صنعت و خدمات با استفاده از الگوریتم پیشرفته GAPSO. نشریه آب و خاک (مشهد). ۲۷(۴): ۶۸۰-۶۹۱.

خاشعی سیوکی، ع.، قهرمان، ب. و کوچک‌زاده، م. ۱۳۹۲. کاربرد تخصیص و مدیریت آب کشاورزی با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی PSO (مطالعه موردی: دشت نیشابور). نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۷(۲): ۲۹۲-۳۰۳.

خیراندیش، ع.، فرزین، س.، کرمی، ح. و بوستانی، م. ۱۳۹۵. مدل‌سازی تخصیص آب سد کمال صالح با استفاده از نرم‌افزار WEAP . ششمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران، سنندج.

کاشفی‌نژاد، پ. ۱۳۹۶. تخصیص بهینه آب به الگوی کشت شبکه آبیاری حمیدیه به روش الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی علوم آب، گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

کیافر، ح.، صدرالدینی، ا.، ناظمی، ا. ح. و ثانی خانی، ه. ۱۳۹۰. تخصیص بهینه آب در شبکه آبیاری و زهکشی صوفی چای در استان آذربایجان‌شرقی با استفاده از الگوریتم ژنتیک. مهندسی آب و آبیاری و ایران. ۲(۱): ۵۲-۶۱.

محمدی ورزنه، ن. و وفایی‌نژاد، ع. ۱۳۹۴. تخصیص آب در شبکه‌های آبیاری به کمک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری مبتنی بر سیستم اطلاعات مکانی (GIS) و الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) (مطالعه‌ی موردی: اراضی کشاورزی قورتان). اکوهیدرولوژی. ۲(۱): ۴۹-۳۹.

Ahmad, L., Zhang, F., Liu, J. and U. F. Farid. 2018. A linear bi-level multi-objective program for optimal allocation of water resources. PLoS ONE. 13(2): e0192294.

Emami, S., Parsa, J., Emami, H., A. Abbaspour. 2021. An ISaDE algorithm combined with support vector regression for estimating discharge coefficient of W-planform weirs. Water Supply. 21(7): 3459-3476.

Hosseini, N. 2005. Effects of alternate furrow irrigation with different level of Nitrogen on the yield of wheat in the region of Badjgah and Koshksk. M. Sc. Thesis. Irrigation Dept. Shiraz University, Iran.

Isik, S. and L. Kalin. 2014. Optimal Dynamic Water Allocation for Irrigation of Multiple Crops. World Environmental and Water Resources Congress 2014: Water without Borders, June 1-5, Portland, USA.

Jalilian, A., Shirvani, A.R., Neamati, A., and Basati J. 2001. Effects of Deficit Irrigation on Production and Economy of Sugar beet in Kermanshah region. Journal of Sugar Beet. 17(1): 1-14.

Mirjalili, S. A. and A. Lewis. 2016. The Whale Optimization Algorithm. Advances in Engineering Software. 95: 51-67.

Parand, A. R. and Sepaskhah A. R. 2006. Effects of alternate furrow irrigation with supplemental every-furrow irrigation at different growth stages on the yield of maize (Zea mays L.). Plant Production Science. 9: 415-421.

Sardarshahraki, A. and S. Emami. 2020. The Economic Evaluation of Optimal Water Allocation Using Artificial Neural Network (Case Study: Moghan Plain). Iranian Economic Review. 24(3): 833-851.

Sepaskhah, A. R. and Kamgar-Haghighi A. A. 1994. Effects of every –other furrow irrigation on water use efficiency of sugar beet. Sugar beet Seminar, 1-3 August, Isfahan University, Iran.

Zhuo, L., Cheng, J., and Z. Gong. 2021. Optimal water allocation method based on the genetic algorithm for a system of a reservoir and two pumping stations. Water Supply. 22(1): 549-859.

Water Management in Agriculture
Vol. 9, No. 1, Spring and Summer 2022, 31-44

نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۹، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۱، ص. ۴۴-۳۱

Presentation of a Model for Water Allocation of Irrigation and Drainage Networks Using Intelligent Evolutionary Methods

O. Jahandideh[1], and S. Emami[*2]

Abstract

Due to the water situation in the country and on the other hand the increase in water needs, water resources management is important. Since the major share of water consumption is allocated to the agricultural sector, therefore, the management of available water and optimal water allocation is one of the issues that should be considered by policy makers. In the present study, a new and at the same time high-performance method based on the Whale algorithm (WOA), for the optimal allocation of water resources of Sufi-chai irrigation and drainage network located in East Azerbaijan province in the agricultural sector during the statistical year data were used from 2005 to 2013. The results were compared with the results of the ICA algorithm. The objective function was determined based on each of the products and their performance and the income from each product, and then the maximization of the objective function and the optimal allocation of water resources was performed by WOA and ICA algorithms. The results showed that by increasing the application coefficient to 0.9, the profit from the optimal water allocation is associated with a 30% increase in economic profit. Meanwhile, the WOA algorithm, compared to the ICA algorithm with an allocation of 1.720 MCM per year, has 8.90% of the optimal use of water resources in agriculture. In general, the use of intelligent evolutionary methods can be a good solution for optimal water allocation in the agricultural sector.

Keywords: Imperialist Competitive Algorithm, Optimization, Sufi-chai Network, Water Allocation, Whale Algorithm.

[1] Ph.D. Student of Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
[2] Ph.D. in Hydraulic Structures, Department of Water Science and Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran (*Corresponding Author Email: somayehemami70@gmail.com)
Received: 13 May 2021
Accepted: 9 Dec 2021