

بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری در شرایط مختلف تأمین آب با استفاده از الگوریتم مورچگان

مریم عزیزآبادی فراهانی^۱ و فرهاد میرزایی^{۲*}

چکیده

در پژوهش حاضر مدلی در فضای برنامه‌نویسی متلب ۲۰۱۷ تدوین و به الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان و مدل رشد گیاهی AquaCrop متصل شد. این مدل با هدف ماکزیمم‌سازی سود خالص، عمق و دور بهینه آبیاری را در وضعیت مختلف حجم آب در دسترس تعیین می‌کند. برای سه حالت مختلف حجم آب قابل دسترس الف- تأمین ۱۰۰ درصد متوسط دراز مدت حجم منابع آب ب- تأمین ۷۰ درصد متوسط درازمدت حجم منابع آب ج- تأمین ۶۰ درصد متوسط درازمدت حجم منابع آب، در نظر گرفته شد. سه سناریو مختلف عمق و دور آب آبیاری تعریف شد: ۱- عمق و دور آبیاری یکسان برای محصولات پاییزه و بهاره؛ ۲- عمق آب آبیاری متفاوت و دور یکسان برای محصولات پاییزه و بهاره و ۳- عمق و دور آبیاری مختلف برای محصولات پاییزه و بهاره. برای حالت «الف» بهترین برنامه دور آبیاری ۸ روز و عمق آب آبیاری ۵۰ و ۸۰ میلی‌متر به ترتیب برای محصولات پاییزه و بهاره به دست آمد. برای حالت «ب» دور آبیاری ۱۰ روز و عمق آب آبیاری ۴۸ و ۹۶ میلی‌متر به ترتیب برای محصولات پاییزه و بهاره حاصل شد. برای حالت «ج» بهترین برنامه آبیاری دور ۸ روز و عمق ۳۲ و ۸۰ میلی‌متر برای محصولات پاییزه و بهاره تعیین گردید. همچنین الگوی کشت بهینه نیز برای سناریوهای مختلف تعیین شد.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی آبیاری، بهینه‌سازی، الگوریتم مورچگان، الگوی کشت بهینه

ارجاع: عزیزآبادی فراهانی م. و میرزایی ف. ۱۴۰۰. بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری در شرایط مختلف تأمین آب با استفاده از الگوریتم مورچگان. ۴۰: ۶۴-۵۵.

۱- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج.

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج.

* نویسنده مسئول: Fmirzaei@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۰۶

مقدمه

آب از مهم‌ترین احتیاجات رشد گیاه است و با توجه به محدودیت منابع آب و ارزش آن در کشاورزی و از طرفی افزایش جمعیت و تلاش در زمینه، حذف یا ترمیم کشاورزی کم بازده و ارتقای کشاورزی نوین توجه بیشتر به مدیریت آب آبیاری و به کارگیری هر راهکاری برای صرفه‌جویی در مصرف و استفاده بهینه از آب موجود، امری مهم و ضروری است. استفاده از تکنیک‌های مناسب برای بهینه‌سازی تخصیص آب به محصولات مختلف کشت شده در هر دشت، در این خصوص می‌تواند راهگشا باشد (سپاسخواه و همکاران، ۲۰۰۸).

انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای مستلزم صرف زمان و انرژی فراوان است. می‌توان با به کارگیری نرم‌افزارها، برخی از پدیده‌ها را شبیه‌سازی کرد و آن‌ها را در برنامه‌ریزی مدیریت زراعی به کار گرفت. امروزه مدل‌های برنامه‌ریزی به‌صورت گسترده برای کمک به بهره‌برداران برای مدیریت بهینه مزرعه به کار می‌روند و یک ابزار مهم در تحلیل‌های اقتصاد کشاورزی هستند (پاریس و آرفینی، ۲۰۰۰؛ بخشی، ۲۰۱۰).

برای تعیین بهترین برنامه آبیاری می‌توان از دو روش آزمایش‌های مزرعه‌ای و مدل‌های شبیه‌سازی استفاده کرد. روش اول علاوه بر این‌که نیازمند آزمایش‌های مزرعه‌ای متعدد است، محدودیت‌هایی هم از جمله محدود بودن مکان و شرایط آزمایش و کوتاه بودن زمان اجرای آزمایش دارد. روش دوم، یعنی استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، ابزاری مناسب برای ارزیابی و تعیین مدیریت بهینه آبیاری و بررسی تأثیرات کمی آب آبیاری بر عملکرد محصول است. از آنجایی که تغییر برنامه و مدیریت آبیاری سبب تغییر در موازنه آب خاک می‌شود، مدل‌سازی واکنش محصول به کمبود آب معمولاً سخت و پیچیده است.

مدل‌های مدیریتی آبیاری برای مطالعه سناریوهای مختلف آبیاری با استفاده از شاخص‌های مدیریت آبیاری می‌توانند این وظیفه را به خوبی انجام دهند و یک مزیت مهم آن‌ها این است که اجازه توسعه یافته‌ها و نتایج را برای شرایط آزمایش نشده در مزرعه فراهم می‌آورند و در نتیجه توصیه‌های عملی را برای کشاورزان و کسانی که به‌صورت گسترده روی برنامه‌ریزی آبیاری و کم آبیاری در وضعیت‌های مختلف تأمین آب و مدیریت محصول کار می‌کنند، فراهم می‌نمایند (کو و همکاران، ۲۰۰۶).

یوسفی و همکاران (۱۳۹۵) به توسعه و تدوین مدل بهینه‌سازی PSO و MOPSO برای شبکه آبیاری ورامین پرداختند. آنان مدل بهینه‌سازی الگوی کشت را با بهره‌برداری تلفیقی کمی-کیفی از منابع آب سطحی غیرمتعارف (پساب) و آب زیرزمینی با سه هدف حداکثرسازی سود حاصله از الگوی کشت، کاهش آبیاری نیتروژن و بهبود تغذیه آبخوان مدنظر قرار دادند. نتایج این پژوهش می‌تواند در استفاده بهینه منابع آب، افزایش درآمد کشاورزان و کاهش آبیاری نیتروژن در طرح‌های شبکه آبیاری مورد استفاده قرار گیرد.

کانونی و منعم (۲۰۱۶) در مطالعه‌ای تخصیص و توزیع بهینه آب در بخش‌های مختلف شبکه آبیاری، یعنی در سطح واحدهای مزرعه و در سطح کانال‌های توزیع را با هدف بیشینه کردن سودمندی شبکه مد نظر قرار دادند. سه سناریوی مختلف مقدار آب، شامل شرایط نرمال، ۲۵ و ۵۰ درصد کمبود آب در فرایند مدل‌سازی مورد توجه قرار گرفت و نتایج نشان داد علی‌رغم کاهش سود کل در سناریوهای ۲۵ و ۵۰ درصد کمبود آب نسبت به وضعیت نرمال، بهره‌وری آب افزایش یافته است. نگوبین و همکاران (۲۰۱۶) یک چارچوب مسأله بهینه‌سازی را برای گیاه و تخصیص آب با استفاده از ACO توسعه دادند و برای افزایش بهره‌وری محاسباتی گسترش دادند. اسعدی و همکاران (۱۳۹۷) برای بیشینه کردن درآمد مزرعه در دشت قزوین، از روش برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی (PMP) به همراه روش حداکثر آنتروپی (ME) مشروط بر توابع واکنش عملکرد محصولات نسبت به آب استفاده کردند. در این مطالعه درصدهای مختلف کاهش آب مصرفی در دوره‌های مختلف رشد به عنوان سناریوهای کم‌آبیاری بر بهینه‌سازی مصرف آب در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد کاهش ۵٪ کم آبیاری در مرحله رشد، امکان افزایش درآمد مزرعه به میزان ۰/۴ درصد وجود دارد. نجفی و همکاران (۱۳۹۵) دو نوع برنامه‌ریزی آبیاری عمق ثابت-دور ثابت و عمق متغیر-دور متغیر متناسب با دو نوع بافت خاک، برای محصول ذرت دانه‌ای را با مدل بهینه‌سازی چند هدفه الگوریتم ژنتیک بررسی قرار کردند. نتایج نشان‌دهنده کاهش تقریباً ۵۰ درصد در مصرف آب و افزایش ۹۴ درصد در مقدار بهره‌وری آب است. هایپ نوین و همکاران (۲۰۱۷) مدل بهینه عملکرد گیاه ذرت را تحت متغیرهای آب در دسترس و نرخ کود به‌کار رفته با استفاده

است. در تمام دوره رشد گیاه، مقدار آب ذخیره شده در ناحیه ریشه از طریق بیلان جریان آب ورودی (آبیاری و بارش) و خروجی (رواناب سطحی، نفوذ عمقی و تبخیر و تعرق مفید و غیرمفید) در محدوده عمق رشد و توسعه ریشه شبیه‌سازی می‌شود. میزان ضرایب تنش آبی (Ks) موثر بر توسعه و بسط پوشش سبزینه‌ای گیاه، هدایت روزنه‌ای تعرق (شدت تعرق در واحد CC)، پیری و کاهش پوشش تاجی و شاخص برداشت به وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود. علاوه بر این، بعضی جنبه‌های مدیریتی و عملکرد نهایی محصول با توجه به مدیریت آبیاری (زمان، میزان و نحوه آبیاری) و میزان محدودیت حاصل‌خیزی خاک از طریق تأثیر آن‌ها بر توسعه رشد گیاه، بهره‌وری آب و سازگارشده گیاه به تنش‌ها بیان می‌شود.

مدل بهینه‌سازی ACO

ACO یک الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری که از رفتار مورچه‌ها برای شناسایی کوتاه‌ترین مسیر از لانه خود به یک منبع غذایی با استفاده از مسیره‌های فرومون الهام گرفته است (دوریگو و همکاران، ۱۹۹۶). در ACO، فضای تصمیم مسأله بهینه‌سازی با یک نمودار نشان داده می‌شود که، گره‌ها و لبه‌های نمودار، به ترتیب نشان‌دهنده متغیرهای تصمیم‌گیری و گزینه‌های متغیر تصمیم هستند. یک راه حل توسط عبور یک مورچه از گراف و انتخاب لبه در هر گره ساخته شده است. همان‌گونه که مورچه‌ها در طول مسیر حرکت می‌کنند، فرومون را در بر می‌گیرند. مسیره‌هایی که در حال عبور هستند، اغلب دارای غلظت‌های بیشتری از فرومون هستند و بیشتر در آینده ممکن است با مورچه‌های دیگر انتخاب شوند (مایر و همکاران، ۲۰۰۳). در طول هر تکرار از فرآیند ACO، تمام اعضای یک کولونی از گراف عبور و هر کدام یک راه‌حل را ایجاد می‌کنند. پس از هر تکرار، مسیره‌هایی که منجر به راه‌حل‌های کلی‌تر شده‌اند، با فرومون بیشتری به دست می‌آیند و آن‌ها را در تکرارهای بعدی انتخاب می‌کنند. به این ترتیب، راه‌حل‌های بهتر، با افزایش تعداد تکرارها، تکامل می‌یابد. در هر نقطه تصمیم، احتمال این‌که یک مورچه یک مسیر خاص را انتخاب کند (برای مثال، مسیر A، B) با معادله (۲) بیان می‌شود: (دوریگو و همکاران، ۱۹۹۶).

از الگوریتم مورچگان توسعه دادند. همچنین آنان برای تعیین عملکرد، مدل گیاهی RZWQM2 را به الگوریتم ACO لینک کردند.

مطالعات زیادی برای بهبود بهره‌وری آب در مزرعه از طریق اصلاح الگوی کشت یا بهبود برنامه آبیاری با ماکزیمم نیاز آبی در بین محصولات مورد کشت یا کم آبیاری (در برنامه آبیاری موجود) انجام شده است. اما ضرورت مطالعه‌ای که بتواند با ایجاد یک مدل کارا، بهترین برنامه آبیاری در وضعیت الگوی کشت موجود و وضعیت مختلف حجم آب در دسترس را تعیین کند، احساس می‌شود.

هدف اصلی این پژوهش، تدوین و توسعه مدلی از ترکیب مدل رشد گیاهی AquaCrop و الگوریتم بهینه‌سازی ACO است تا با استفاده از آن مدل، بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری در شبکه آبیاری دشت قزوین در شرایط مختلف حجم آب در دسترس و برای چند محصول انجام شود.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

محدوده شبکه دشت قزوین، در استان قزوین، در فاصله ۱۵۰ کیلومتری غرب شهر تهران بین ۲۰ ۳۶۰ عرض شمالی و ۴۰ ۴۹۰ طول شرقی و ۰۰ ۳۶۰ عرض شمالی و ۳۵ ۵۰۰ طول شرقی واقع شده است. متوسط بارش بلند مدت سالانه در این منطقه ۳۷۶/۲ میلی‌متر و میزان تبخیر از آن ۱۲۸ میلی‌متر می‌باشد. از لحاظ اقلیمی منطقه طرح دارای اقلیمی نیمه خشک، تابستان‌های نسبتاً گرم و زمستان‌های سرد است.

مدل شبیه‌سازی AquaCrop

مدل AquaCrop همانند برنامه CROPWAT بر روابط عملکرد نسبی و تبخیر و تعرق نسبی معادله (۱) (دورنباس و کسام، ۱۹۷۹)؛ اما با برخی ویژگی‌های خاص استوار است و با تفکیک کردن تبخیر و تعرق واقعی به تبخیر از سطح خاک و تعرق و مجزا کردن عملکرد نهایی به ماده خشک و شاخص برداشت تهیه شده است.

$$\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} = K_y \frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \quad (1)$$

Y_x حداکثر عملکرد، Y_a عملکرد واقعی، ET_x حداکثر تبخیر و تعرق، ET_a تبخیر و تعرق واقعی و K_y ضریب تناسب بین کاهش عملکرد و کاهش نسبی تبخیر و تعرق

مرحله اول: داده‌های ورودی

۱-۱) در مرحله اول ET_0 با استفاده از برنامه نوشته شده در متلب با معادله پنمن مانتیث محاسبه و خروجی به فرمت مورد استفاده مدل رشد گیاهی AquaCrop تولید می‌شود. داده‌های هواشناسی ایستگاه قزوین از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. مدل با استفاده از داده‌های دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعت آفتابی، ET_0 را محاسبه و با فرمت ورودی مدل رشد گیاهی ذخیره می‌کند. داده‌های مربوط به بارندگی و دما نیز به صورت ورودی مدل رشد گیاهی ذخیره می‌شود.

۱-۲) در قسمت بعد، کلیه داده‌های ورودی مدل رشد گیاهی و مدل بهینه‌سازی از فایل اکسل دریافت می‌شود. داده‌های ورودی مدل AquaCrop که عبارتند از: داده‌های هواشناسی، داده‌های خاک منطقه که در جدول ۱ آورده شده است و داده‌های مربوط به گیاه و همچنین وضعیت اولیه رطوبت خاک، به صورت فایل‌های اکسل برای کلیه محصولات تهیه شد. استفاده از چند فایل اکسل حاوی کلیه اطلاعات مورد نیاز، باعث راحتی انجام کار و همچنین موجب افزایش دقت و سرعت انجام حل مسئله می‌شود.

پیش از استفاده از نرم‌افزار AquaCrop، ضروری است که واسنجی و اعتبارسنجی آن برای گیاهان مختلف و با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای مناسب در سطح منطقه‌ی مطالعاتی یا مناطق نزدیک به آن انجام می‌شود. به این منظور از نتایج مطالعه‌ی رضانی و همکاران (۱۳۹۷) برای گندم، فرهادی بانسوله (۱۳۷۷) برای جو، و میرلطیفی و ستوده‌نیا (۱۳۸۱) برای ذرت دانه‌ای استفاده شد. از مطالعات رحیمی خوب و همکاران (۱۳۹۳) برای گیاه ذرت علوفه‌ای و امیری و همکاران (۱۳۹۷) برای گیاه کلزا استفاده شد. پارامترهای گیاهی مربوط به گندم، جو، ذرت دانه‌ای، ذرت علوفه‌ای و کلزا در جدول ۲ آورده شده است.

۱-۳) دریافت همه برنامه‌های آبیاری از فایل اکسل برنامه‌های آبیاری برای شبکه آبیاری قزوین با دور آبیاری ثابت و عمق آبیاری ثابت در نظر گرفته شد. شش دور آبیاری مختلف (از ۵ تا ۱۰ روز) با عمق آب آبیاری از ۲۰ میلی‌متر تا ۱۲۰ میلی‌متر در فایل اکسل برنامه‌های آبیاری وارد شد.

$$P_{AB} = \frac{[\tau_{AB}(t)]^\alpha [\eta_{AB}]^\beta}{\sum_{B=1}^{N_A} [\tau_{AB}(t)]^\alpha [\eta_{AB}]^\beta} \quad (2)$$

که در آن P_{AB} احتمال انتخاب، t شاخص تکرار، $\tau_{AB}(t)$ مقدار فرومون بر روی مسیر (A,B) در تکرار، η_{AB} میدان دید مسیر (A,B) که یک بایاس (مقدار ثابت اولیه) تعریف شده توسط کاربر را به سمت راه حل‌های بهینه محلی در نقطه تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده فراهم می‌کند.

N_A مجموعه‌ای از همه نقاط تصمیم در نقطه تصمیم A ، α فاکتور اهمیت فرومون و β فاکتور اهمیت دید است. به روز رسانی فرومون در هر مسیر (برای مثال مسیر A, B) پس از هر تکرار با معادلات ۳ و ۴ انجام می‌شود:

$$\Delta AB(t+1) = \rho \tau_{AB}(t) + \Delta \tau_{AB}(t) \quad (3)$$

$$\Delta \tau_{AB}(t) = q/L(AB) \quad (4)$$

ρ فاکتور استحکام فرومون که برای تبخیر فرومون از یک تکرار به بعد حساب می‌شود. عملکرد این فاکتور فراموش کردن راه‌حل‌های ضعیف‌تر است؛ به عبارت دیگر احتمال انتخاب آن مسیر ضعیف‌تر می‌شود. q مقدار پاداش فرومون، هر قدر بیشتر در نظر گرفته شود، مقدار فرومون بیشتری بر روی مسیرها ریخته می‌شود.

$\Delta TAB(t)$ اضافه فرومون برای مسیر (A, B) در طول تکرار t است. تکرارهای ACO تا زمانی ادامه می‌یابد که معیارهای توقف خاصی مانند تکمیل یک تعداد مشخصی از تکرارها یا تا زمانی که بهبود تابع هدف دیگر وجود نداشته باشد، ادامه پیدا کند؛ به عبارت دیگر الگوریتم‌های ACO به صورت تکراری کار می‌کنند و در این مطالعه معیار توقف تعداد مشخصی از تکرارها است. هدف از این مطالعه توسعه و تدوین مدلی است که عمق و دور آبیاری را در وضعیت‌های مختلف حجم آب در دسترس بهینه کند. متغیرهای تصمیم در این مطالعه، عمق آبیاری و دور آبیاری که بیانگر برنامه آبیاری است. سه محصول کشت پاییزه از قبیل گندم، جو و کلزا و دو محصول کشت بهار از قبیل ذرت دانه‌ای و ذرت علوفه در نظر گرفته شد. مدل با هدف ماکزیم سود به گونه‌ای تدوین شد تا بتوان با استفاده از آن در مدت زمان کوتاه و دقت بالا بهترین برنامه آبیاری را برای دشت قزوین تعیین کرد. با ورود داده‌های اولیه مورد نیاز و برنامه‌های مختلف آبیاری و در نهایت اجرای برنامه، می‌توان خروجی بهینه (دور و عمق آبیاری) را تعیین کرد. مدل تدوین شده طی سه مرحله به صورت زیر اجرا می‌شود:

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک منطقه مورد مطالعه

مشخصه	عمق خاک (سانتی‌متر)				
	۱۰۰-۸۰	۸۰-۶۰	۶۰-۴۰	۴۰-۲۰	۲۰-۰
شن (%)	۳۷	۳۹	۴۷	۳۵	۵۱
سیلت (%)	۵۴	۵۴	۳۸	۵۰	۳۰
رس (%)	۹	۷	۱۵	۱۵	۱۹
بافت خاک	لوم سیلتی	لوم سیلتی	لوم	لوم	لوم
ظرفیت زراعی (%) وزنی)	۲۹	۲۲	۲۴	۲۱	۱۹
نقطه پژمردگی (%) وزنی)	۱۵	۱۲	۱۴	۱۰	۸

جدول ۲- مقادیر پارامترهای رشد و ثابت ورودی گیاهان غالب دشت قزوین به مدل AquaCrop

گیاه	گندم	جو	ذرت دانه ای	ذرت علوفه ای	کلزا
جوانه زنی	۱۷	۱۷	۶	۱۳	۱۰
گل‌دهی	۱۷۵	۱۷۵	۶۶	-	۱۷۹
حداکثر پوشش گیاهی	۱۹۱	۱۹۱	۵۴	۶۰	۱۹۱
شروع پیری پوشش گیاهی	۲۰۱	۲۰۱	۱۰۷	۱۰۳	۲۱۷
رسیدگی فیزیولوژیکی	۲۳۵	۲۳۵	۱۳۲	۱۲۶	۲۵۰
حداکثر عمق توسعه ریشه	۹۷	۹۷	۱۰۸	۱۰۲	۸۰
طول دوره گلدهی (روز)	۱۳	۱۳	۱۳	-	۱۶
ماکزیمم عمق ریشه (cm)	۱۰۰	۱۰۰	۲۳۰	۲۰۰	۷۹
پوشش گیاهی اولیه (درصد)	۳/۲۷	۳/۱۳	-/۴۹	-/۳۶	۴
حداکثر پوشش گیاهی (درصد)	۸۰	۸۰	۹۰	۹۰	۸۷
دمای پایه (C)	-	-	۸	۸	۵
دمای بالا (C)	۲۶	۱۵	۳۰	۳۰	۴۰
ضریب رشد گیاه	۲/۵	۳/۳	۱۶/۳	۱۶/۶	۳/۱
ضریب کاهش رشد گیاه	۸	۷/۷	۱۱/۷	۳	۸/۴
بهره وری آب نرمال شده برای تبخیر و تعرق و دی اکسید کربن	۱۵	۱۵	۳۳/۷	۳۳/۷	۱۵/۳
آستانه تخلیه آب خاک برای گسترش تاج پوشش - سطح آستانه بالا	۰/۲	۰/۲	-/۱۴	-/۱۴	-/۲
آستانه تخلیه آب خاک برای گسترش تاج پوشش - سطح آستانه پایین	۰/۶۵	۰/۶۵	-/۷۲	-/۷۲	-/۵۵
عامل شکل برای ضریب تنش آبی رشد گیاه	۵	۵	۲/۹	۲/۹	۳/۵
آستانه تخلیه آب خاک برای کنترل روزه گیاه - سطح آستانه بالا	۰/۶۵	۰/۶۵	-/۶۹	-/۶۹	-/۶۵
عامل شکل ضریب تنش آب برای کنترل روزه	۲/۵	۲/۵	۶	۶	۵
آستانه تخلیه آب خاک برای پیری تاج پوشش - سطح آستانه بالا	۰/۷	۰/۷	-/۶۹	-/۶۹	-/۶۵
عامل شکل ضریب تنش آب برای پیری تاج پوشش	۲/۵	۲/۵	۲/۷	۲/۷	۳

روز پیر از کاشت

مرحله دوم: مدل رشد گیاهی

عملکرد هریک از محصولات مورد نظر طی همه برنامه‌های آبیاری تعریف شده با مدل AquaCrop محاسبه می و به عنوان ورودی برنامه بهینه‌سازی ذخیره می‌شود.

مرحله سوم: بهینه‌سازی

مدل بهینه‌سازی، داده‌های خروجی از مدل رشد گیاهی و داده‌های هزینه و مساحت و حجم آب در دسترس را دریافت می‌کند. تغییر الگوی کشت حاکم بر یک منطقه که طی سال‌های متمادی توسط کشاورزان منطقه و بر اساس واقعیت حاکم بر سیستم مورد استفاده قرار گرفته به سمت الگوی کشت بهینه امری زمان‌بر و در برخی موارد بسیار مشکل یا حتی غیرممکن است؛ اما برنامه‌ریزی

آبیاری بهینه در وضعیت الگوی کشت موجود، بیانگر میزان اتلاف احتمالی آب در سیستم در وضع موجود است؛ بنابراین مساحت کشت هر یک از محصولات در بازه‌ای از حداقل و حداکثر مساحت کشت با توجه به اطلاعات مربوط به سال‌های اخیر که از آب منطقه‌ای قزوین دریافت شد، در نظر گرفته شد. برای اجرای مدل و بررسی عملکرد آن از اطلاعات مربوط به سال زراعی ۹۴-۹۳ استفاده شد. هزینه تولید، قیمت، فصل کاشت و حداقل و حداکثر مساحت قابل کشت هر محصول در جدول ۳ آورده شده است. حجم آب در دسترس ۲۵۵ میلیون مترمکعب و قیمت هر مترمکعب آب ۵۹۰ ریال است. این اطلاعات از اداره آب منطقه‌ای قزوین و آمارنامه وزرات کشاورزی تهیه شده است.

جدول ۳- قیمت و هزینه تولید هر گیاه در شبکه آبیاری دشت قزوین (سال ۹۴-۹۳)

نام محصول	قیمت محصول (Rial/kg)	هزینه تولید (Rial/ha)	فصل کاشت	حداقل مساحت (ha)	حداکثر مساحت (ha)
گندم	۱۱۴۰۵	۳۴۴۲۹۴۵۰	۱	۳۰۰۰	۲۰۰۰۰
جو	۹۰۹۷	۲۵۹۵۱۸۷۰	۱	۳۰۰۰	۱۰۰۰۰
کلزا	۱۹۰۵۴	۳۱۱۴۲۵۵۰	۱	۱۰۰۰	۱۰۰۰۰
آیش	.	.	۱	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰
ذرت دانه ای	۸۰۴۷	۴۲۴۸۱۶۴۰	۲	۲۰۰۰	۱۴۰۰۰
ذرت علوفه	۲۸۰۰	۳۷۸۹۵۶۵۰	۲	۲۰۰۰	۷۰۰۰
آیش ^۲	.	.	۲	۵۰۰۰	۵۰۰۰

آیش^۲: مساحت آیش در کشت بهاره است.

تعریف تابع هدف و قیدهای مسئله

تابع هدف بهینه‌سازی به صورت معادله (۵) تعریف شد:

$$F = Max \left\{ \begin{aligned} & \sum_{j=1}^{230} \sum_{i=1}^3 A_{1i} [Y_{1i}(F_j \cdot d_j) P_{1i} - (C_{FIX1i} + W_{1i}(F_j \cdot d_j) C_W)] \\ & + \sum_{j=1}^{230} \sum_{i=1}^2 A_{2i} [Y_{2i}(F_j \cdot d_j) P_{2i} - (C_{FIX2i} + W_{2i}(F_j \cdot d_j) C_W)] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

محدودیت برای حداقل و حداکثر مساحت مجاز هر گیاه در معادله (۷) آورده شده است.

$$\begin{cases} A_{1iMin} \leq A_{1i} \leq A_{1iMax} \\ A_{2iMin} \leq A_{2i} \leq A_{2iMax} \end{cases} \quad (7)$$

محدودیت حجم آب در دسترس در معادله (۸) آورده شده است.

$$\sum_{i=1}^3 W_{1i} A_{1i} + \sum_{i=1}^2 W_{2i} A_{2i} \leq W \quad (8)$$

نتایج و بحث

روش‌های فراکوشی به دلیل ماهیت تصادفی آن‌ها دارای پارامترهای آزادی هستند که با تغییر مقدار این پارامترها، عملکرد مدل، همگرایی و مرغوبیت جواب‌های تولید شده تغییر خواهد کرد. به همین دلیل می‌بایست قبل از کاربرد مدل مقدار این پارامترها برای عملکرد بهینه تنظیم شود. با روش سعی و خطا مقادیر بهینه پارامترها به صورت جدول ۴، انتخاب شدند.

که در آن F کل سود خالص سالانه (ریال در سال)، A_{1i} و A_{2i} مساحت گیاه i در فصل ۱ و فصل ۲ (هکتار)، Y_{1i} و Y_{2i} عملکرد گیاه i در فصل ۱ و فصل ۲ (کیلوگرم در هکتار)، که تابعی از F, d است که به ترتیب عمق و دور آبیاری است و z تعداد برنامه‌های آبیاری تعریف شده می‌باشد. P_{1i} و P_{2i} قیمت گیاه i در فصل ۱ و فصل ۲ (ریال در کیلوگرم)، C_{FIX1i} و C_{FIX2i} هزینه تولید گیاه i در فصل ۱ و فصل ۲ (ریال در هکتار در سال)، W_{1i} و W_{2i} عمق آب آبیاری گیاه i در فصل ۱ و فصل ۲ (میلی‌متر)، که تابعی از F, d می‌باشد و C_W قیمت واحد آب آبیاری (ریال بر میلی‌متر بر هکتار) است.

تعریف محدودیت‌های حداکثر مساحت در هر فصل به صورت معادله (۶) است:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^3 A_{1i} \leq 30000 \text{ (پاییز)} \\ \sum_{i=1}^2 A_{2i} \leq 20000 \text{ (بهار)} \end{cases} \quad (6)$$

جدول ۴- مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم مورد استفاده

پارامتر	ارزیابی	پاداش فرمون	ضریب تبخیر	فرمون اولیه	فاکتور تاثیر تابع	فاکتور تاثیر	تعداد مورچه
		(q)	فرمون (p)	(z0)	هیوریستیک (β)	فرمون (α)	
مقدار انتخابی	۸۵۰۰	۷	۱	۵	.	۲	۴۵

تعیین بهترین برنامه آبیاری به گونه‌ای که دور آبیاری برای محصولات پاییزه و بهاره یکسان و عمق آب آبیاری متفاوت باشد و در سناریوی سوم، دور و عمق آب آبیاری

سه سناریو مختلف در نظر گرفته شد: سناریوی اول تعیین برنامه آبیاری به گونه‌ای که دور و عمق آبیاری برای همه محصولات (پاییزه و بهاره) یکسان باشد، سناریوی دوم

برای محصولات بهاره تعیین می‌کند. مقایسه نتایج برتر دو سناریوی اول نشان می‌دهد بهترین برنامه آبیاری از سناریوی دوم، ۱۹ درصد سود خالص بیشتری را با حجم آب اولیه یکسان تولید می‌کند. بهترین برنامه آبیاری را در سناریو سوم دور آبیاری ۷ روز با عمق ۴۴ میلی‌متر برای محصولات پاییزه و دور ۸ روزه با عمق ۸۰ میلی‌متر برای محصولات بهاره است. با مقایسه نتایج بهترین برنامه آبیاری در سناریوها، برنامه بهینه مربوط به سناریوی دوم است که ماکزیمم سود خالص را در مقایسه با دیگر برنامه‌ها داراست و ۱ درصد سود بیشتر نسبت به بهترین برنامه سناریو سوم و ۱۹ درصد سود بیشتر نسبت به سناریوی اول را دارد. این برنامه آبیاری دارای دور ثابت ۸ روز و عمق متفاوت ۵۰ و ۸۰ میلی‌متر به ترتیب برای محصولات پاییزه و بهاره و الگوی کشت بهینه مربوط به آن در جدول ۶ آورده شده است.

متفاوت برای محصولات در نظر گرفته شد. سه سناریو مختلف در نظر گرفته شد: سناریوی اول تعیین برنامه آبیاری به گونه‌ای که دور و عمق آبیاری برای همه محصولات (پاییزه و بهاره) یکسان باشد، سناریوی دوم تعیین بهترین برنامه آبیاری به گونه‌ای که دور آبیاری برای محصولات پاییزه و بهاره یکسان و عمق آب آبیاری متفاوت باشد و در سناریوی سوم، دور و عمق آب آبیاری متفاوت برای محصولات در نظر گرفته شد.

الف: حجم آب در دسترس ۱۰۰ درصد

نتایج بهترین برنامه‌های آبیاری مربوط به سناریو اول و دوم در صورتی که حجم آب در دسترس ۱۰۰ درصد باشد، در جدول ۵ آورده شده است. بهترین برنامه آبیاری در سناریو اول، دور ۱۰ روز با عمق ۹۶ میلی‌متر است و مدل از سناریو دوم بهترین برنامه آبیاری را دور ۸ روز و عمق ۵۰ میلی‌متر برای محصولات پاییزه و عمق ۸۰ میلی‌متر

جدول ۵- بهترین عمق آب در هر دور آبیاری در سناریوی اول و دوم برای محصولات پاییزه و بهاره در وضعیت حجم آب ۱۰۰ درصد

دور ۵ روز		دور ۶ روز		دور ۷ روز		دور ۸ روز		دور ۹ روز		دور ۱۰ روز		نوع برنامه آبیاری
عمق آبیاری	سود خالص	عمق آبیاری	سود خالص	عمق آبیاری	سود خالص	عمق آبیاری	سود خالص	عمق آبیاری	سود خالص	عمق آبیاری	سود خالص	
پاییزه	۳۲	۹۳۰۰	۴۴	۸۴۰۰	۴۴	۹۲۰۰	۵۰	۹۵۰۰	۵۴	۹۵۰۰	۶۰	سناریو دوم: عمق متفاوت و دور ثابت
بهاره	۵۲	۰۰	۶۰	۰	۷۴	۰	۸۰	۰	۹۲	۰	۹۶	برای محصولات پاییزه و بهاره
یک	۴۶	۷۵۰۰	۶۰	۷۳۰۰	۷۰	۷۳۰۰	۷۴	۷۶۰۰	۸۰	۷۵۰۰	۹۶	سناریو اول: برنامه آبیاری یکسان برای محصولات پاییزه و بهاره
آبیاری	۰۰	۰۰	۰۰	۰۰	۰۰	۰۰	۰۰	۰۰	۰۰	۰۰	۰۰	

* عمق آب آبیاری بر واحد میلی‌متر و سود خالص میلیون ریال می‌باشد.

جدول ۶- الگوی کشت بهینه مربوط به بهترین برنامه آبیاری از سه سناریوی تعریف شده در حجم آب ۱۰۰ درصد

گندم	جو	کلزا	ذرت دانه‌ای	ذرت علوفه	حجم کل آب (Mm ³)	مساحت کل (ha)	سود خالص (میلیون ریال)
۸ و ۵۰	۸ و ۵۰	۸ و ۵۰	۸ و ۸۰	۸ و ۸۰	۲۵۵.۵	۲۳۰.۲۹	۹۵۲.۵۴
۵۰۰	۳۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰.۲۹	۲۰۰			
مساحت (ha)							

بیشتری را با حجم آب اولیه یکسان تولید می‌کند. با مقایسه نتایج با کاهش حجم آب در دسترس به میزان ۳۰ درصد، بهترین برنامه آبیاری به گونه‌ای تعیین شد که سود خالص به میزان ۲۷ درصد به نسبت حجم آب ۱۰۰ درصد کاهش داشته است. بهترین برنامه آبیاری در سناریوی سوم دور آبیاری ۷ روز با عمق ۳۲ میلی‌متر برای محصولات پاییزه و دور ۸ روزه با عمق ۸۰ میلی‌متر برای محصولات بهاره است. با مقایسه نتایج بهترین برنامه آبیاری در سناریوها، برنامه بهینه مربوط به سناریوی دوم است و ماکزیمم سود خالص را در مقایسه با دیگر برنامه‌ها

ب: حجم آب در دسترس ۷۰ درصد
نتایج بهترین برنامه‌های آبیاری مربوط به سناریوی اول و دوم در هر دور آبیاری و در صورتی که حجم آب در دسترس ۷۰ درصد باشد، در جدول ۷ آورده شده است. بهترین برنامه آبیاری در سناریوی اول، دور ۱۰ روز با عمق ۴۸ میلی‌متر می‌باشد و مدل از سناریو دوم بهترین برنامه آبیاری را دور ۷ روز و عمق ۳۲ میلی‌متر برای محصولات پاییزه و عمق ۷۰ میلی‌متر برای محصولات بهاره تعیین می‌کند. مقایسه نتایج برتر دو سناریوی اول نشان می‌دهد بهترین برنامه آبیاری سناریوی دوم ۳۰ درصد سود خالص

دارد و ۱ درصد سود بیشتر نسبت به بهترین برنامه سناریوی سوم و ۳۰ درصد سود بیشتر نسبت به سناریو اول را دارد. این برنامه آبیاری دارای دور ثابت ۱۰ روز و عمق متفاوت ۴۸ و ۹۶ میلی‌متر به ترتیب برای محصولات پاییزه و بهاره و الگوی کشت بهینه مربوط به آن در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۷- بهترین عمق آب آبیاری در هر دور در سناریوی اول و دوم محصولات پاییزه و بهاره در وضعیت حجم آب ۷۰ درصد

دور ۵ روز		دور ۶ روز		دور ۷ روز		دور ۸ روز		دور ۹ روز		دور ۱۰ روز		نوع برنامه آبیاری
عمق آبیاری	سود خالص	عمق آبیاری	سود خالص	عمق آبیاری	سود خالص	عمق آبیاری	سود خالص	عمق آبیاری	سود خالص	عمق آبیاری	سود خالص	
۲۶	۶۵۰۰	۳۲	۶۲۰۰	۳۲	۷۷۰۰	۳۸	۶۷۰۰	۴۲	۶۸۰	۴۸	۶۹۰۰	سناریوی دوم: عمق متفاوت و دور ثابت برای محصولات پاییزه و بهاره
۵۲	۰	۶۰	۰	۷۰	۰	۸۰	۰	۸۶	۰	۹۶	۰	یک بهاره
۲۶	۵۲۰۰	۳۸	۵۰۰۰	۳۸	۵۳۰۰	۴۰	۵۶۰۰	۴۴	۵۷۰	۲۴۸	۵۹۰۰	سناریوی اول: برنامه آبیاری یکسان برای محصولات پاییزه و بهاره
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	عمق آب آبیاری بر واحد میلی‌متر و سود خالص میلیون ریال می‌باشد.

جدول ۸- الگوی کشت بهینه مربوط به بهترین برنامه آبیاری از سه سناریوی تعریف شده در حجم آب ۷۰ درصد

گندم	جو	کلزا	ذرت دانه‌ای	ذرت علوفه	حجم آب (Mm ³)	مساحت کل (ha)	سود خالص (میلیون ریال)
۱۰ و ۴۸	۱۰ و ۴۸	۱۰ و ۴۸	۱۰ و ۹۶	۱۰ و ۹۶	۱۷۹	۲۴۶۹۰	۶۹۴۹۰
۱۶۶۹۰	۳۰۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰			

بهترین برنامه آبیاری سناریوی سوم، دور آبیاری ۸ روز با عمق ۳۲ میلی‌متر برای محصولات پاییزه و دور ۷ روزه با عمق ۷۰ میلی‌متر برای محصولات بهاره است. با مقایسه نتایج بهترین برنامه آبیاری در سناریوها، برنامه بهینه مربوط به سناریوی دوم، ماکزیمم سود خالص را در مقایسه با دیگر برنامه‌ها دارد، که ۴۰ درصد سود بیشتر نسبت به بهترین برنامه سناریو سوم و ۱/۵ درصد نسبت به سناریو اول است. این برنامه آبیاری دارای دور ثابت ۸ روز و عمق متفاوت ۳۲ و ۸۰ به ترتیب برای محصولات پاییزه و بهاره است و الگوی کشت بهینه مربوط به آن در جدول ۱۰ آورده شده است.

ج: حجم آب در دسترس ۶۰ درصد
نتایج بهترین برنامه‌های آبیاری مربوط به سناریوی اول و دوم در هر دور آبیاری و در صورتی که حجم آب در دسترس ۷۰ درصد باشد در جدول ۹ آورده شده است. بهترین برنامه آبیاری در سناریو اول، دور ۵ روز با عمق ۲۶ میلی‌متر است و مدل از سناریوی دوم بهترین برنامه آبیاری را دور ۶ روز و عمق ۳۲ میلی‌متر برای محصولات پاییزه و عمق ۶۰ میلی‌متر برای محصولات بهاره تعیین می‌کند. مقایسه نتایج برتر دو سناریوی اول نشان می‌دهد که بهترین برنامه آبیاری سناریوی دوم ۴۰ درصد سود خالص بیشتری را با حجم آب اولیه یکسان تولید می‌کند.

جدول ۹- بهترین عمق آب آبیاری در هر دور در سناریوی اول و دوم محصولات پاییزه و بهاره در وضعیت حجم آب ۶۰ درصد

دور ۵ روز		دور ۶ روز		دور ۷ روز		دور ۸ روز		دور ۹ روز		دور ۱۰ روز		محصولات
عمق آبیاری	سود خالص	عمق آبیاری	سود خالص	عمق آبیاری	سود خالص	عمق آبیاری	سود خالص	عمق آبیاری	سود خالص	عمق آبیاری	سود خالص	
۲۴	۵۴۷۰۰	۳۲	۵۲۰۰۰	۳۲	۵۶۰۰۰	۳۲	۵۸۵۰۰	۳۲	۵۷۰۰۰	۳۲	۵۲۸۰۰	عمق متفاوت و دور ثابت برای محصولات پاییزه و بهاره
۵۲	۰	۶۰	۰	۷۰	۰	۸۰	۰	۸۰	۰	۸۰	۰	یک بهاره
۲۶	۴۲۰۰۰	۵۴	۴۱۰۰۰	۵۸	۳۷۰۰۰	۶۸	۳۸۰۰۰	۷۶	۳۸۰۰۰	۸۴	۴۰۰۰۰	برنامه آبیاری یکسان برای محصولات پاییزه و بهاره
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	عمق آب آبیاری بر واحد میلی‌متر و سود خالص میلیون ریال می‌باشد.

جدول ۱۰- الگوی کشت بهینه مربوط به بهترین برنامه آبیاری از سه سناریوی تعریف شده در حجم آب ۶۰ درصد

تعداد قطره‌ها (میلیمتر بر ثانیه)	مساحت کل (ha)	عمق آبیاری (mm)	تعداد قطره‌ها	تعداد قطره‌ها	کلز	ک	ک	عمق (mm) و دور آبیاری (ha)
۵۸۵۰۴	۱۷۱۸۸	۱۵۳/۵	۸ و ۸۰	۸ و ۸۰	۸ و ۳۲	۸ و ۳۲	۸ و ۳۲	عمق (mm) و دور آبیاری (ha)
			۲۰۰	۶۱۸۸	۱۰۰	۳۰۰	۵۰۰	مساحت (ha)

مدل AquaCrop. مجله علوم و مهندسی آبیاری. (۴۱):۵۷-۷۲.

۳. رحیمی خوب ح. ستوده‌نیا ع. و مساح بوانی ع. ۱۳۹۳. واسنجی و ارزیابی مدل AquaCrop برای ذرت علوفه‌ای منطقه قزوین. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۸(۱):۱۰۸-۱۱۵.

۴. رضانی اعتدالی ه. آبابایی ب. و کاویانی ع. ۱۳۹۷. تأثیر افزایش غلظت دی اکسید کربن نیوار بر عملکرد، تعرق و بهره‌وری مصرف آب غلات اصلی در دشت قزوین. مجله مهندسی منابع آب. ۱۵: ۳۹-۴۸.

۵. شعبانی م. ک. هنر ت. و سپاسخواه ع. ر. ۱۳۸۷. بهینه‌سازی مصرف آب و الگوی کشت با استفاده از تکنیک کم آبیاری در سطح مزرعه: مطالعه موردی شبکه آبیاری درودزن فارس. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۶(۳):۳۵-۵۲.

۶. فرهادی بانسوله ب. ۱۳۷۷. بررسی اثرات کم آبیاری بر روی عملکرد محصول جو در منطقه کرج و تعیین تابع تولید. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه آبیاری و آبادانی پردیس کشاورزی دانشگاه تهران. ۱۲۰ ص.

۷. میرلطیفی س. م. و ستوده‌نیا ع. ۱۳۸۱. شبیه‌سازی تأثیر کم آبیاری بر عملکرد محصول ذرت. گزارش نهایی طرح تحقیقات کاربردی معاونت پژوهشی سازمان مدیریت منابع آب ایران وزارت نیرو. ۲۲۱ ص.

۸. نجفی الف. امیری تلکدانی الف. ابراهیمیان ح. و میرابوالقاسمی ه. ۱۳۹۵. بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری در واحدهای زراعی شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران اهواز. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۰(۳):۳۳۹-۳۵۱.

۹. یوسفی م. سلطانی ج. بنی‌حبیب م. و رحیمی

مقایسه الگوی بهینه کشت هر سه حالت حجم آب در دسترس نشان می‌دهد در صورت حجم آب ۱۰۰ درصد مساحت ۲۳۰۲۹ هکتار زیر کشت می‌رود و با کاهش ۳۰ درصد و ۴۰ درصد حجم آب مساحت کشت به ترتیب به ۱۸۵۱۲ هکتار و ۱۷۱۸۸ هکتار کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدلی تدوین شد تا با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان و مدل رشد گیاهی AquaCrop، بهترین برنامه آبیاری با هدف ماکزیمم‌سازی سود خالص برای سه حالت حجم آب در دسترس، تعیین شود. نتایج بیان‌کننده این است که با اجرای مدل تدوین شده در سال زراعی ۹۳-۹۴ بهترین برنامه آبیاری در زمانی که حجم آب اولیه ۱۰۰ درصد است، دور آبیاری ۸ روز و عمق آب آبیاری ۵۰ و ۸۰ میلی‌متر به ترتیب برای محصولات پاییزه و بهاره است. در حالت حجم آب ۷۰ درصد بهترین برنامه آبیاری دور ۱۰ روز و عمق ۴۸ و ۹۶ برای محصولات پاییزه و بهاره و همچنین در صورت ۶۰ درصد حجم آب اولیه، بهترین برنامه آبیاری دور ۸ روز و عمق ۳۲ و ۸۰ میلی‌متر برای محصولات پاییزه و بهاره تعیین شد. مدل نوشته شده انعطاف‌پذیر است و می‌توان داده‌های هزینه و قیمت را بر اساس سال مورد نظر تغییر داد و در نهایت بهترین برنامه آبیاری را با توجه به وضعیت موجود به دست آورد.

منابع

۱. اسعدی م. ع. خلیلیان ص. و موسوی ح. ۱۳۹۷. مدیریت بهینه در مصرف آب و الگوی کشت با تاکید بر راهبرد کم آبیاری. مجله تحقیقات منابع آب ایران. ۱۴(۵):۱-۱۳.
۲. امیری الف. خورسند الف. دانشیان ج. و یوسفی م. ۱۳۹۷. پیش‌بینی ماده خشک و عملکرد کلزا تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری و کود با استفاده از

- خوب ع. ۱۳۹۵. توسعه مدل بهینه‌سازی چند هدفه بهره‌برداری تلفیقی پساب و آب زیرزمینی در شبکه آبیاری ورامین. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۳۰.۴(۴): ۵۵۵-۵۶۷.
10. جهانبخشی م. پیکانی غ. حسینی س. ص. و صالح الف. 1389. بررسی آثار حذف یارانه کودهای شیمیایی و اعمال سیاست پرداخت مستقیم بر الگوی کشت و مصرف نهاده‌ها (مطالعه موردی: زیربخش زراعت شهرستان سبزوار). نشریه اقتصاد کشاورزی (اقتصاد و کشاورزی). 4(2): 185-207.
11. کانونی الف. و منعم م. ج. 1395. بهینه‌سازی تخصیص و برنامه‌ریزی تحویل آب در شبکه‌های آبیاری. مجله آبیاری و زهکشی ایران. 10(1): 23-12.

12. Doorenbos J. and Kassam A. H. 1979. Yieldresponse to water. Irrigation And Drainage Paper, no.33. FAO, Rome.
13. Dorigo M. Maniezzo V. and Colorni A. 1996. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics. 26(1): 29-41.
14. HiepNguyen D. AscoughII J. Maier H. Dandy G. and Andales A. 2017. Optimization of irrigation scheduling using ant colony algorithms and an advanced cropping system model. Environmental Modelling & Software. 97: 32-45
15. Kuo Sh. F. Lin B. J. and Shieh H. J. 2006. Estimation irrigation water requirements with derived crop coefficients for upland and paddy crops in ChiaNan Irrigation Association, Taiwan. Agricultural Water Management Journal. 82: 433-451.
16. Maier H. R. Simpson A. R. Zecchin A. C. Foong W. K. Phang K. Y. Seah H. Y. and Tan C. L. 2003. Ant colony optimisation for design of water distribution systems, ASCE J. Water Resources Planning and Management. 129(3): 200-209.
17. Nguyen D. C. H. Maier H. R. Dandy G. C. and Ascough II J.C. 2016. Framework for computationally efficient optimal crop and water allocation using ant colony optimization, Environmental Modelling & Software. 76: 37-53.
18. Paris Q. and Arfini F. 2000. Frontier cost functions, self selection, price risk, PMP and agenda. Working Paper Series, EUROTOOLS.