

Optimal Model of Irrigation Network Operational Management to Maximize Profit (Case Study: Ghazvin Irrigation Network)

MARYAM AZIZABADI FARAHANI¹, FARHAD MIRZAEI^{1*}

1. Department of Irrigation and Reproduction Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(Received: Nov. 14, 2019- Revised: July. 19, 2020- Accepted: Nov. 13, 2020)

ABSTRACT

Considering the limitation of water resources and their value in agriculture, determining the optimal crop cultivation pattern and irrigation planning in low water conditions in the country's catchments is of great importance. Therefore, it is necessary to develop an optimal cultivation model to be flexible in wet and dry conditions. The purpose of this study is to develop a model for offering the best program for irrigation and cultivation area for network operation under different conditions of water resources. After receiving basic information (plant, soil and meteorology) and various irrigation and deficit irrigation scenarios by connecting to the plant growth model (Aqucrop), the model calculates crop yield under defined scenarios. The scenario with the highest economic efficiency is determined as irrigation planning and by connecting to Ant Colony Optimization (ACO), the optimal cultivation pattern for different volumes of available surface water is determined with the aim of maximizing net profit. The optimal cultivation pattern for all crops grown in Qazvin irrigation network in four different modes of water delivery (100%, 80%, 75% and 70%) was performed for 93-94 crop year to evaluate the efficiency of model. The results showed when the year is normal and the amount of water delivered to the network is equal to the long-term average (100% scenario), the largest area is allocated to wheat cultivation (10740) and the dryland will be the least. In the case of 70% of average annual long-term amount to be provided, the area under wheat cultivation will be 3,000 hectares, and about 15,000 hectares of the network must be managed dryland or without irrigated cultivation. The results showed that the developed program with high capability and high flexibility for a variety of existing conditions is able to determine the optimal pattern and maximize network profits.

Keywords: Management, Economic Productivity, ACO, Optimal Cultivation Pattern.

* Corresponding author's Email: Fmirzaei@ut.ac.ir

مدل بهینه مدیریت بهره‌برداری شبکه آبیاری با هدف سود بیشینه (مطالعه موردی: شبکه آبیاری قزوین)

مریم عزیزآبادی فراهانی^۱، فرهاد میرزایی^{۱*}

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۸/۲۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۴/۲۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۵/۴)

چکیده

با توجه به محدودیت منابع آب و ارزش آن در کشاورزی، تعیین الگوی کشت بهینه محصولات کشاورزی و برنامه‌ریزی آبیاری در شرایط کم‌آبی حاکم بر حوضه‌های آبریز کشور از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین تدوین و توسعه مدل الگوی بهینه کشت که قابلیت انعطاف‌پذیری در شرایط ترسالی و خشک‌سالی را دارا باشد، ضرورت می‌یابد. هدف تحقیق تهیه مدلی است که تحت شرایط مختلف منابع آب بهترین برنامه آبیاری و سطح زیر کشت را برای بهره‌برداری شبکه آبیاری ارائه دهد. مدل پس از دریافت اطلاعات اولیه (گیاه، خاک و هواشناسی) و سناریوهای مختلف آبیاری و کم‌آبیاری با اتصال به مدل رشد گیاهی آکواکراپ، عملکرد محصولات را تحت سناریوهای تعریف شده محاسبه می‌کند. سناریویی که بیشینه بهره‌وری اقتصادی را دارا است به عنوان برنامه‌ریزی آبیاری تعیین می‌گردد و با اتصال به ACO الگوی کشت بهینه برای حجم‌های مختلف آب سطحی در دسترس با هدف بیشینه‌سازی سود خالص تعیین می‌گردد. الگوی کشت بهینه برای کل محصولات مورد کشت شبکه آبیاری قزوین در چهار حالت مختلف امکان تحویل آب (۰.۱۰، ۰.۸۰، ۰.۷۵، ۰.۷۰) برای سال زراعی ۹۳-۹۴ جهت بررسی کارایی مدل انجام شد. نتایج نشان داد در حالتی که سال نرمال و مقدار آب تحویلی به شبکه برابر متوسط دراز مدت (گزینه ۰.۱۰) باشد، بیشترین مساحت به کشت گندم اختصاص می‌یابد (۱۰۷۴۰) و مساحت بدون کشت آبی حداقل خواهد بود. در حالتی که ۷۰ درصد مقدار متوسط دراز مدت سالانه تأمین شود سطح زیر کشت گندم ۳۰۰۰ هکتار خواهد بود و حدود ۱۵۰۰۰ هکتار از شبکه به ناچار بایستی به صورت دیم و یا بدون کشت آبی اداره شود. نتایج نشان داد که برنامه تدوین شده با توانایی بالا و انعطاف‌پذیری زیاد برای انواع شرایط موجود، قادر به تعیین الگوی بهینه و بیشینه‌کردن سود شبکه است.

واژه‌های کلیدی: مدیریت، بهره‌وری اقتصادی، الگوریتم مورچگان، الگوی بهینه کشت.

مقدمه

بهترین جواب قابل قبول، با توجه به محدودیت‌ها و نیازهای مسئله است. روش‌های مختلفی جهت بهینه‌سازی وجود دارد، برخی از این روش‌ها بر مدل‌سازی ریاضی و تکنیک‌های برنامه‌نویسی خطی^۱، غیرخطی^۲، و پویا^۳ متکی است. روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک، روش‌های قطعی هستند که به محض رسیدن به اولین نقطه بهینه موضعی متوقف می‌شوند و توانایی خروج از این نقطه و حرکت به سوی نقطه بهینه بهتری را ندارند. بدین منظور برای رفع این مشکل محققان به روش‌های هوش مصنوعی روی آورده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به شبکه‌های عصبی، منطق فازی و الگوریتم‌های فرا ابتکاری مانند: الگوریتم ژنتیک^۴ (GA)، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید یا باز پخت^۵ (SA)، الگوریتم جستجوی

بهینه‌سازی یکی از راهکارهای بهتر کردن و کیفیت بخشیدن به پروژه‌های آبیاری است. جهت تعیین بهترین برنامه‌ریزی 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. هدف از بهینه‌سازی یافتن

*نویسنده مسئول: Fmirzaei@ut.ac.ir

۱. Linear programming(LP)

۲. NonLinear programming(NLP)

۳. Dynamic programming(DP)

4. Genetic Algorithm

5. Simulated Annealing

Salemi *et al.* (2011) طی پژوهشی نشان دادند که با به کارگیری مدل Aqua Crop، بهره‌وری آب برای گندم زمستانه ۰/۹۱ تا ۱/۴۹ کیلوگرم به ازای هر مترمکعب خواهد بود که حاکی از سازگاری مناسب آن است.

در تحقیقی، Vafaienejhad *et al.* (2014) با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و GIS، نسبت به بهینه‌سازی الگوی کشت اراضی سد آق‌چای اقدام کردند. نتایج به دست آمده در این تحقیق، افزایش ۳۰ درصدی بهره‌وری را در صورت استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در تعیین الگوی کشت نشان می‌دهد.

Charnes and Cooper (2014) در مقاله‌ای به بررسی الگوهای بهینه آبیاری با استفاده از شبکه‌های عصبی در مزارع جنوب شرق ایرلند پرداخته‌اند. در این تحقیق، بازه زمانی ۵ ساله برای بررسی و آزمون الگوهای بهینه‌سازی شبکه عصبی در این مزارع به کار رفته است. نتایج نشان داد الگوریتم لونیبرگ-مارکارد به بهینه‌سازی الگوی کشت کمک کرده است.

Kanooni and Monem (2016) در مطالعه‌ای تخصیص و توزیع بهینه آب در بخش‌های مختلف شبکه آبیاری در سطح واحدهای مزرعه و در سطح کانال‌های توزیع را با هدف بیشینه‌کردن سودمندی شبکه مد نظر قرار دادند. سه سناریو مختلف مقدار آب، شامل شرایط نرمال، ۲۵ و ۵۰ درصد کمبود آب در فرایند مدل‌سازی مورد توجه قرار گرفت. نتایج نشان داد علی‌رغم کاهش سود کل در سناریوهای ۲۵ و ۵۰ درصد کمبود آب نسبت به شرایط نرمال، بهره‌وری آب افزایش یافته است.

Delavar *et al.* (2015) روش بهینه‌سازی جهت تخصیص منابع آب با توجه به محدودیت‌های کمی و کیفی آب به منظور مدیریت خشکسالی ارائه دادند. بدین منظور از یک مدل بهینه‌سازی سه لایه به منظور بهینه‌سازی از سطح گیاه تا شبکه‌های آبیاری استفاده شد و مدل توسعه یافته قادر است در شرایط مختلف شوری و کمبود آب میزان عملکرد محصولات زراعی و همچنین مقادیر بهینه تخصیص آب از سطح مخزن تا دوره رشد گیاه را برآورده کند.

Moghaddasi *et al.* (2010) در مطالعه‌ای بهینه‌سازی تخصیص آب در شرایط خشکسالی را در شبکه آبیاری زاینده‌رود اصفهان مورد مطالعه قرار دادند. مراحل مختلف رشد گیاهان و حساسیت آن‌ها به تنش آبی در مدل‌سازی تخصیص آب لحاظ گردید و سه زیر مدل جهت تخصیص بهینه آب در مراحل مختلف رشد هر گیاه، بین گیاهان مختلف و بین زیر شبکه‌های آبیاری

ممنوعه^۱(TS)، الگوریتم جامعه مورچگان^۲(ACO)، الگوریتم بهینه‌سازی مجموعه ذرات^۳(PSO)، الگوریتم کلونی زنبور عسل^۴(ABC)، الگوریتم جهش قورباغه^۵(SFLA) اشاره کرد. در واقع الگوریتم‌های فرا ابتکاری قادر هستند بدون دانستن مسئله، با ارائه یک راه‌حل عمومی مسئله را با سرعت و دقت معقولی حل کنند.

الگوریتم‌های جستجوی فرا ابتکاری مانند الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورچگان (ACO) به طور قابل‌توجهی برای حل مسائل مربوط به منابع آب (Afshar *et al.*, 2015) و مسائل مربوط به مدیریت آب (Nguyen *et al.*, 2016) کمک کرده‌اند. این الگوریتم به دلیل توابع آن و امکان تعریف متناسب اجزای مسائل، و همچنین با توجه به نتایج مطلوب تحقیقات مختلف، از روش‌های جالب در برخورد با مسائل گوناگون بهینه‌یابی می‌باشد. استفاده از ACO می‌تواند احتمال یافتن راه‌حل‌های بهینه و یا نزدیک به سطح مطلوب را افزایش دهد چرا که این الگوریتم شامل دو ویژگی منحصر به فرد است، تخییر شدن فرمون و احتمال انتخاب مسیرهای دیگر به مورچه‌ها امکان پیدا کردن مسیر جدید کوتاه‌تر را می‌دهد و بهره‌وری محاسباتی را از طریق تمرکز بر نقاط با شایستگی بیشتر ایجاد می‌کند.

مدل AquaCrop در سال ۲۰۰۹ توسط سازمان خواروبار جهانی (FAO) توسعه پیدا کرد (Raes *et al.*, 2009). این مدل قابلیت برقراری توازن بین دقت، سادگی و توانایی در شبیه‌سازی بالا را دارا است و ضمن استفاده از تعداد پارامترهای کم نسبت به سایر مدل‌ها که مستقیماً قابل‌اندازه‌گیری هستند، برای شبیه‌سازی عملکرد محصول، نیاز آبی گیاه و کارایی مصرف آب گیاه تحت سناریوهای مختلف آبیاری از جمله کم‌آبیاری قابل استفاده می‌باشد (Heng *et al.*, 2009).

Todorovic *et al.* (2009) به مقایسه عملکرد مدل AquaCrop با دو مدل CropSyts و WOFOST پرداختند. علی‌رغم داده‌های ورودی مورد نیاز کمتر در مدل AquaCrop، هیچ تأثیری در نتایج شبیه‌سازی مشاهده نداشت.

در مدت بسیار کوتاه تحقیقات وسیعی روی عملکرد مدل AquaCrop انجام گرفته است. Garcia-Vila *et al.* (2009) در مطالعه بهینه‌سازی کم‌آبیاری برای گیاه پنبه نتیجه گرفتند که با استفاده از مدل AquaCrop می‌توان عملکرد محصول، بهره‌وری آب، بیوماس و رشد پوشش تاجی گیاه را به خوبی شبیه‌سازی کرد.

تهیه شد. نهایتاً نتایج روش بهینه‌سازی با نتایج روش منداول تخصیص آب در منطقه که بر اساس اعمال یکسان کمبود آب استوار بود مورد مقایسه قرار گرفت و نشان داده شد که با اعمال روش بهینه‌سازی ۴۲ درصد درآمد بیشتری عاید کشاورزان می‌گردد.

Mirzaie et al. (2015) با استفاده از الگوریتم مورچگان، الگوی بهینه شبکه آبیاری و زهکشی سد گلستان را با هدف ایجاد سود حداکثری برای کشاورزان تعیین کردند. نتایج نشان داد الگوی پیشنهادی تا ۷۵ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی خواهد داشت.

Vivekanandan et al. (2015) در مقاله‌ای با عنوان "بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی هدف‌دار" به بررسی الگوی آبیاری هدفمند و محاسباتی در اراضی کشاورزی روسیه پرداخته‌اند. آن‌ها استفاده بهینه از زمین و آب برای بهینه‌سازی الگوی کشت تحت مجموعه‌ای از محدودیت‌ها را در نظر گرفتند و سه برنامه مختلف برداشت از رویکرد برنامه‌نویسی هدف (GP) ارائه کردند که برای حداکثر کردن بازده خالص، پروتئین و کالری (به جای وزن محصول انرژی معادل آن به کالری) با حداقل زمین و آب برای منطقه بارنا در نظر گرفته شده است.

Mushtag and Moghaddasi (2011) با استفاده از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی در حوضه آبریز ماری‌دارلینگ استرالیا به بررسی اثرات کم آبیاری در پاسخ به تغییرات اقلیم و تقاضای آب محیط‌زیست پرداختند. در این تحقیق سه سناریو مورد مقایسه قرار گرفت: بهینه‌سازی با آبیاری کامل، بهینه‌سازی با کم‌آبیاری و کم‌آبیاری بدون بهینه‌سازی. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی با کم آبیاری در به حداکثر رساندن بازده ناخالص و افزایش کارایی مصرف آب، مؤثر است.

Nguyen et al. (2016) بهینه‌سازی تخصیص آب و کود برای گیاه ذرت را در شرق کلرادو، ایالات‌متحده با استفاده از ACO انجام دادند. در این مطالعه مقدار عمق آب تخصیصی به هر گیاه با هدف بهینه‌سازی سود خالص تعیین شد. نتایج نشان داد که ACO قادر است برنامه‌های آبیاری و کود را مشخص کند که در هنگام استفاده از آبیاری کمتر، بازده خالص بیشتری حاصل می‌شود.

در شرایط کم‌آبی رویکرد معمول برای محدود کردن مصرف آب در کشاورزی اعمال سهمیه آب است و در چنین شرایطی کشاورزان باید از برنامه آبیاری استفاده کنند که با در نظر گرفتن محدودیت‌های آب عملکرد را به حداکثر برسانند. بنابراین برنامه‌ریزی آبیاری و الگوی کشت بهینه می‌تواند به عنوان یک

مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شود و لازم است مدلی تدوین گردد که قابلیت انعطاف در شرایط مختلف حجم آب اولیه را داشته باشد و در صورت تغییر قیدهای اولیه بتوان تنها با تغییر چند پارامتر ورودی، مدل را مجدد اجرا کرد. هدف از این پژوهش، پیدا کردن الگوی کشت بهینه‌ای است که در شرایط کم‌آبی نیز درآمد خالص را حداکثر کند. بدین منظور از الگوریتم بهینه‌سازی ACO استفاده شد و برای تعیین عملکرد محصولات در فضای برنامه‌نویسی متلب، ACO به مدل رشد گیاهی AquaCrap متصل گردید. این مدل برنامه‌ریزی آبیاری را با توجه به بیشینه بهره‌وری اقتصادی تعیین می‌کند و قابلیت انعطاف‌پذیری در شرایط مختلف آب را دارا خواهد بود، به گونه‌ای که در شرایط کاهش حجم آب در دسترس، مدل الگوی بهینه در شرایط جدید را تعیین می‌کند.

مواد و روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

محدوده شبکه دشت قزوین در استان قزوین در فاصله ۱۵۰ کیلومتری غرب شهر تهران بین ۲۰° ۳۶' عرض شمالی و ۴۰° ۴۹' طول شرقی و ۰۰° ۳۶' عرض شمالی و ۳۵° ۵۰' 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 نیمه‌خشک، تابستان‌های نسبتاً گرم و زمستان‌های سرد است. الگوی رایج این شبکه شامل کشت محصولات هم‌چون کلزا، لوبیا، ذرت دانه‌ای، ذرت علوفه‌ای، سیب‌زمینی، چغندر، جو، گندم و گوجه‌فرنگی می‌باشند. در حال حاضر شبکه آبیاری دشت قزوین دارای ۴۱۰۰۰ هکتار سطح زیر کشت می‌باشد که از طریق کانال‌های متعددی از سد طالقان تغذیه می‌شود. اما مقدار آبی که از این سد برای شبکه تأمین می‌شود کافی نبوده و کشاورزان همواره با مشکل کم‌آبی مواجه هستند. کشاورزان برای جبران کمبود آب اقدام به برداشت غیرمجاز از سفره‌های آب‌های زیرزمینی می‌کنند. آمار و اطلاعات موردنیاز نظیر سطح زیر کشت، عملکرد محصولات، هزینه تولید، هزینه نهاده‌ها، قیمت محصولات، تاریخ کشت گیاهان مختلف بر اساس آمار اخذشده از آمارنامه وزرات جهاد کشاورزی و از آب منطقه‌ای قزوین تهیه شد. تحقیق حاضر در قالب چهار حجم مختلف آب در اختیار شبکه، شامل ۱۰۰٪، ۸۰٪، ۷۵٪ و ۷۰٪ انجام شد.

مواد و روش‌ها

تهیه داده‌های ورودی

(2017) *al.* که از مطالعات (1998) Golkar برای واسنجی و اعتبار سنجی فراسنج‌های گیاهی گندم، (1998) Farhadi Bansoole برای جو، و (2002) Mirlatifi and Sotooodenia برای ذرت دانه‌ای استفاده کرده بود، استفاده گردید. از مطالعات (Rahimikhoob *et al.* (2014) *al.* برای گیاه ذرت علوفه‌ای و (2017) Amiri *et al.* برای گیاه کلزا استفاده شد. پارامترهای گیاهی مربوط به گندم، جو، ذرت دانه‌ای، ذرت علوفه‌ای و کلزا در جدول (۱) آورده شده‌اند. فایل اطلاعات قیمت محصول، هزینه تولید هر محصول، اطلاعات حداقل، حداکثر مساحت هر محصول، بیشینه حجم آب در دسترس و حداکثر مساحت قابل کشت در جدول (۲)، آورده شده‌اند.

در این مدل داده‌های ورودی وارد چند فایل اکسل می‌شوند:

فایل داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی شامل: حداقل و حداکثر درجه حرارت روزانه، بارندگی روزانه، میانگین رطوبت نسبی می‌باشند که از اطلاعات ایستگاه هواشناسی قزوین به صورت میانگین ده ساله استفاده شد.

فایل اطلاعات گیاهی و اطلاعات خاک

پیش از استفاده از نرم‌افزار AquaCrop، ضروری است که واسنجی و اعتبار سنجی آن برای گیاهان مختلف و با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای مناسب در سطح منطقه‌ی مطالعاتی یا مناطق نزدیک به آن صورت پذیرند. به این منظور از نتایج مطالعه Ramezani *et al.*

جدول ۱- مقادیر پارامترهای رشد و ثابت ورودی گیاهان غالب دشت قزوین به مدل AquaCrop

گیاه	گندم	جو	ذرت دانه‌ای	ذرت علوفه‌ای	کلزا
جوانه‌زنی	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
بیشینه عمق ریشه (cm)	۱۰۰	۱۰۰	۲۳۰	۲۰۰	۷۹
پوشش گیاهی اولیه (درصد)	۳/۳۷	۳/۱۳	-/۴۹	-/۴۶	۴
حداکثر پوشش گیاهی (درصد)	۸۰	۸۰	۹۰	۹۰	۸۷
دمای پایه (C)	۰	۰	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
بهره‌وری آب نرمال شده برای تبخیر و تعرق و دی‌اکسید کربن	۱۵	۱۵	۳۲/۷	۳۳/۷	۱۵/۳
آستانه تخلیه آب خاک برای گسترش تاج پوشش - سطح آستانه بالا	۰/۲	۰/۲	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۲
آستانه تخلیه آب خاک برای گسترش تاج پوشش - سطح آستانه پایین	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۵۵
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	۰/۶۹	۰/۶۹	۰/۶۵
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	۰/۶۹	۰/۶۹	۰/۶۵
عامل شکل ضریب تنش آب برای پیری تاج پوشش	۲/۵	۲/۵	۲/۷	۲/۷	۳

جدول ۲- قیمت و هزینه تولید هر گیاه در شبکه آبیاری دشت قزوین (سال ۹۴-۱۳۹۳)

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	۰	۰	۱	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰
ذرت دانه‌ای	۸۰۴۷	۴۲۴۸۱۶۴۰	۲	۲۰۰۰	۱۴۰۰۰
ذرت علوفه	۲۸۰۰	۳۷۸۹۵۶۵۰	۲	۲۰۰۰	۷۰۰۰
سیب‌زمینی	۵۰۰۰	۱۴۸۵۲۰۴۰	۲	۱۰۰	۱۰۰۰
گوجه	۴۸۲۸	۱۴۸۵۲۰۴۰	۲	۱۰۰	۱۰۰۰
لوبیا	۳۲۸۷۶	۳۳۹۲۴۰۰۰	۲	۱۰۰	۱۰۰۰
چغندر قند	۲۶۹۴	۶۸۰۸۵۱۰۰	۲	۱۰۰	۱۰۰۰
آیش*۲	۰	۰	۲	۰	۵۰۰۰

* آیش ۲: مساحت آیش در کشت بهاره است.

سناریوهای مختلف آبیاری و کم آبیاری

از آنجایی که هدف تهیه برنامه در شرایط مختلف منابع آب (کم آبی، نرمال و پرآبی) است لذا همه موارد محتمل در منبع آب برای یک شبکه آبیاری که ممکن است در آتیه رخ دهد، تحت عنوان سناریو تعریف گردید و تا حد امکان سعی شد سناریوهای زیادی در نظر گرفته شود. ۲۱ سناریوی مختلف آبیاری و کم-آبیاری برای کلیه محصولات به صورت زیر تعریف شد:

آبیاری پس از ۱۰۰٪ تخلیه RAW

آبیاری پس از ۱۱۰٪ تخلیه RAW (منظور، تخلیه ۱۱۰ درصدی از آب سهل الوصول می‌باشد) که $RAW=0.8*TAW$ و TAW کل حجم آب در دسترس می‌باشد. توضیح اینکه این نوع تیمارهای کم آبیاری مختص مدل آکواکراپ است که البته با تقسیم‌بندی‌های دیگری که در منابع و کتاب‌های آب و خاک می‌شود تناقضی وجود ندارد. در مدل آکواکراپ رطوبت نقطه FC معادل صفر درصد و رطوبت نقطه پژمردگی معادل ۲۰۰ درصد گرفته شده است و مقدار آب سهل‌الوصول نیز (وسط این دو) ۱۰۰ درصد لحاظ شده است. مثلاً اگر بین FC و PW ۱۰۰ میلی متر آب موجود باشد مقدار تیمار ۱۲۰ درصد یعنی $(100 * (120/200))$ ۶۰ میلی‌متر از ۱۰۰ میلی‌متر مصرف شود.

آبیاری پس از ۱۲۰٪ تخلیه RAW

آبیاری پس از ۱۳۰٪ تخلیه RAW

آبیاری پس از ۱۴۰٪ تخلیه RAW

آبیاری کامل با دور ۷ روز

۱۰٪ کم آبیاری

۲۰٪ کم آبیاری

۳۰٪ کم آبیاری

کم آبیاری در دوره ابتدایی (عدم آبیاری)

کم آبیاری در دوره توسعه گیاه (عدم آبیاری)

کم آبیاری در دوره میانی (عدم آبیاری)

کم آبیاری در دوره گلدهی (عدم آبیاری)

کم آبیاری در دوره پیری (عدم آبیاری)

کم آبیاری در دوره رسیدگی کامل (عدم آبیاری)

کم آبیاری در دوره ابتدایی (۵۰٪)

کم آبیاری در دوره ابتدایی (۵۰٪ کم آبیاری) و کم آبیاری

در دوره توسعه (۵۰٪) و عدم آبیاری در رسیدگی کامل

کم آبیاری در دوره ابتدایی (۲۰٪) و در دوره توسعه

گیاه (۵۰٪) و در رسیدگی کامل (۵۰٪)

عدم آبیاری در دوره ابتدایی و کم آبیاری در دوره توسعه (۵۰٪) و عدم آبیاری در رسیدگی کامل

عدم آبیاری در دوره ابتدایی و رسیدگی کامل و کم آبیاری در دوره توسعه (۵۰٪)

کم آبیاری در دوره توسعه (۲۰٪) و عدم آبیاری در رسیدگی کامل

تدوین مدل بهینه

مدل در فضای برنامه‌نویسی متلب به گونه‌ای توسعه داده شد که بتواند ساده‌تر و در زمان خیلی کوتاه ابتدا داده‌های ورودی کلیه محصولات را به صورت یکجا در فایل‌های اکسل دریافت کند. سپس مدل عملکرد گیاهان را تحت سناریوهای مختلف آبیاری به صورت همزمان محاسبه می‌کند. برای اتصال مدل AquaCrop به نرم‌افزار متلب، از فایل اجرایی *plug-in program* که در سایت فائو موجود می‌باشد، استفاده شد. مدل، بهره‌وری اقتصادی محصولات را در سناریوهای مختلف آبیاری محاسبه می‌کند و برای هر محصول، سناریویی که موجب بیشینه بهره‌وری اقتصادی شده است را تعیین و عمق آب بهینه را مشخص می‌کند. سپس مدل برای تعیین الگوی کشت بهینه با هدف بیشینه‌سازی سود به الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان متصل می‌گردد.

تعیین عملکرد محصولات

نرم‌افزار AquaCrop از طریق تفکیک تعرق گیاه از تبخیر و تعرق، بسط مدل رشد از رشد اولیه^۱ تا پیری^۲، پوشش گیاهی، برآورد و پیش‌بینی عملکرد به عنوان تابعی از زیست‌توده نهایی^۳ و شاخص برداشت^۴ و نهایتاً تفکیک تأثیرات تنش آبی در چهار جزء رشد پوشش گیاهی توسعه یافت. برآورد تعرق گیاه، سبب تفکیک مصارف مفید و غیرمفید می‌شود. تعرق روزانه (Tr) به واسطه تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه (ET_0) و بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*) مطابق با رابطه ۱ به زیست‌توده گیاهی (B_i) یا قسمت هوایی گیاه تبدیل می‌شود.

$$B_i = WP^* \left(\frac{Tr_i}{ET_{0i}} \right) \quad (\text{رابطه ۱})$$

WP^* بهره‌وری آب نرمال شده و مقدار آن برای گیاه مشخص در شرایط اقلیمی مشابه، ثابت است (Hanks, 1983; Tanner & Sinclair, 1983) و پس از نرمال کردن بهره‌وری آب برای شرایط اقلیمی متفاوت، مقدار آن به یک پارامتر ثابت تبدیل می‌شود (Steduto et al., 2009). مزیت معادله مورد استفاده در مدل AquaCrop این است که شبیه‌سازی فرایندهای رشد گیاه

مرحله مشخص از رشد، n : تعداد مراحل رشد، Ky_i : ضریب واکنش عملکرد گیاه به آب در مرحله رشد، W_{pi} : حداکثر آب موردنیاز گیاه در دوره‌های مختلف رشد، W_{ai} : مقدار آب موردنیاز گیاه در دوره‌های مختلف رشد که از رابطه (۳) بدست می‌آید (Ghahraman & Sepaskhah, 1997).

$$W_{ai} = (1 - x)W_{pi} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن x کاهش آب آبیاری است.

پنج مرحله گیاهی در نظر گرفته شد که ضرایب تنش آبی در هر مرحله رشد در جدول (۳) آورده شده است. ضرایب تنش آبی از نتایج تحقیق Doorenbos & Kassam (1979) که به مناطق مختلف قابل تعمیم هستند به دست آمد.

در این نرم‌افزار با استفاده از گام‌های زمانی روزانه صورت می‌گیرد. برای محاسبه عملکرد محصولاتی که پارامترهای گیاهی موردنیاز واسنجی شده برای آن‌ها موجود نبود (سیب‌زمینی، چغندرقد، لوبیا و گوجه‌فرنگی) از معادله (۲) استفاده شد. تابع عملکرد محصولات زراعی در دوره‌های مختلف رشد رابطه خطی با میزان نیاز آبی محصول داشته و در کل دوره این رابطه به صورت غیرخطی بوده و به شکل زیر تعریف شده است (Meyer *et al.*, 1993; Rao *et al.*, 1988):

$$\frac{Y_a}{Y_p} = \prod_{i=1}^n \left(1 - Ky_i \left(1 - \frac{W_a}{W_p} \right)_i \right) \quad (\text{رابطه ۲})$$

Y_a : حداکثر محصول تولیدی در شرایط بدون تنش آبی، Y_p : مقدار محصول تولیدی در شرایط واقعی (شرایب تنش آبی)، i :

جدول ۳- ضریب واکنش عملکرد گیاه به آب در مراحل مختلف رشد (Doorenbos & Kassam, 1979)

گیاهان	مرحله رشد			
	اولیه (۱)	توسعه محصول (۲)	اواسط فصل (۳)	اواخر فصل (۴)
سیب‌زمینی	۰/۴۵	۰/۸	۱	۰/۷
گوجه	۰/۱۲	۰/۲۸	۱/۱	۰/۴
لوبیا	۰/۰۷	۰/۱۳	۱/۱	۰/۷۵
چغندرقد	۰/۱۲	۰/۲۸	۱/۱	۰/۸

فرمون 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 (به عنوان مثال، مسیر A، B) توسط معادله زیر بیان می‌شود: (Dorigo *et al.*, 1979)

$$P_{AB} = \frac{[\tau_{AB}(t)]^\alpha [\eta_{AB}]^\beta}{\sum_{B=1}^N [\tau_{AB}(t)]^\alpha [\eta_{AB}]^\beta} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن P_{AB} : احتمال انتخاب، i : شاخص تکرار، $\tau_{AB}(t)$: مقدار فرمون بر روی مسیر (A,B) در تکرار t است.

η_{AB} : میدان دید مسیر (A,B) است که یک بایاس (چولگی) تعریف شده توسط کاربر را به سمت راه‌حل‌های 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 فرمون و β : فاکتور اهمیت دید می‌باشند.

به‌روزرسانی فرمون در هر مسیر (به عنوان مثال مسیر A، B) پس از هر تکرار توسط معادله زیر انجام می‌شود:

$$\tau_{AB}(t+1) = \rho \tau_{AB}(t) + \Delta \tau_{AB}(t) \quad (\text{رابطه ۶})$$

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

محاسبه بیشینه بهره‌وری اقتصادی

مدل تدوین‌شده، عملکرد محصولات را تحت هر یک از سناریوهای آبیاری تعریف‌شده محاسبه می‌کند و با استفاده از داده‌های قیمت محصول و هزینه تولید و قیمت آب (جدول ۱) مقدار بهره‌وری اقتصادی (NBPD)^۱ را با استفاده از فرمول (۴) محاسبه می‌کند.

$$NBPD = NB/TW_c \quad (\text{رابطه ۴})$$

NB: میزان سود خالص (ریال) در هر هکتار و TW_c : حجم آب مصرف‌شده (مترمکعب) در هکتار بدون در نظر گرفتن بارندگی است.

تعیین الگوی بهینه کشت در شبکه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان

ACO یک الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری است که از رفتار مورچه‌ها برای شناسایی کوتاه‌ترین مسیر از لانه خود به یک منبع غذایی با استفاده از مسیرهای فرمون الهام گرفته است (Dorigo *et al.*, 1979). در طول هر تکرار از فرآیند ACO، تمام اعضای یک کلونی از گراف عبور و هر کدام یک راه حل را ایجاد می‌کنند. پس از هر تکرار، مسیرهایی که منجر به راه‌حل‌های کلی‌تر شده‌اند، با

به اینکه کشاورزان در دشت قزوین طبق الگوی جهاد کشاورزی، کشت نمی‌کنند، بنابراین سعی شد برنامه بهینه‌سازی به گونه‌ای اجرا شود که هریک از محصولات مساحت حداقلی را داشته باشند. همچنین در تابع هدف گیاهان کشت پاییزه و بهار جدا در نظر گرفته شدند. کلیه مراحل برای هریک از حجم‌های مختلف آب در اختیار شبکه به صورت جداگانه انجام شد، تا بررسی شود در شرایطی که حجم آب اولیه کاهش می‌یابد با حفظ بهترین برنامه آبیاری، الگوی کشت بهینه کدام است. خلاصه گام‌های اصلی در متدولوژی در شکل (۱) آورده شده است.

نتایج و بحث

بهره‌وری اقتصادی گیاهان در سناریوهای مختلف آبیاری

بهره‌وری اقتصادی بدست آمده از برنامه تدوین‌شده در جدول (۴) ملاحظه می‌شود. نتایج نشان داد که بیشترین بهره‌وری اقتصادی گندم ۱/۰۱ می‌باشد و مربوط به سناریوی شماره ۱۸ (کم آبیاری در دوره ابتدایی (۲۰٪) و در دوره توسعه گیاه (۵۰٪) و در رسیدگی کامل (۵۰٪)) می‌باشد. بیشترین بهره‌وری اقتصادی جو ۱/۳۹ می‌باشد و مربوط به سناریوی شماره ۱۴ (کم آبیاری در دوره پیری (عدم آبیاری)) است. بیشترین بهره‌وری اقتصادی ذرت دانه-ای مربوط به سناریو شماره ۳ (آبیاری پس از ۱۲۰٪ تخلیه RAW) با مقدار ۲/۷ بوده است. بیشترین بهره‌وری اقتصادی ذرت علوفه‌ای ۱/۱۷ و کلزا ۰/۶۷ است که به ترتیب مربوط به سناریوهای شماره ۲ و ۱۷ (آبیاری پس از ۱۱۰٪ تخلیه RAW و کم آبیاری در دوره ابتدایی (۵۰٪ کم آبیاری) و کم آبیاری در دوره توسعه (۵۰٪) و عدم آبیاری در رسیدگی کامل) بوده است. بیشترین بهره‌وری اقتصادی سیب‌زمینی ۰/۹۱ مربوط به سناریو شماره ۱۱ (کم-آبیاری در دوره توسعه گیاه (عدم آبیاری) و گوجه‌فرنگی، لوبیا و چغندر قند به ترتیب ۰/۹۷ و ۰/۳۳ می‌باشد که بیشینه بهره‌وری اقتصادی هر سه محصول در سناریو شماره ۶ (آبیاری کامل با دور ۷ روز) اتفاق افتاده است.

با توجه به اینکه نتایج مربوط به بهره‌وری اقتصادی محصولات بهار سیب‌زمینی، گوجه‌فرنگی، لوبیا و چغندر قند، با توجه به سناریوهای تعریف شده کم است بنابراین تصمیم گرفته شد سناریوهای مختلف دیگری با ضریب کاهش آب کمتر، (۵٪ تا ۳۰٪) در نظر گرفته شود.

ρ : فاکتور استحکام فرومون که برای تبخیر فرومون از یک تکرار به بعد حساب می‌شود. عملکرد این فاکتور فراموش کردن راه حل‌های 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.

$TAB(t)$: اضافه فرومون برای مسیر (A, B) در طول تکرار t است. تکرارهای ACO تا زمانی ادامه می‌یابد که معیارهای متوقف 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. در این مطالعه معیار توقف تعداد مشخصی از تکرارها است و تابع هدف به صورت معادله (۷) در نظر گرفته شد:

$$F = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^3 A_{1i} [Y_{1i} P_{1i} - (C_{FIX1i} + W_{1i} C_W)] \\ + \sum_{i=1}^6 A_{2i} [Y_{2i} P_{2i} - (C_{FIX2i} + W_{2i} C_W)] \end{array} \right\} \quad (\text{رابطه } ۷)$$

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)، 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 (میلی متر)، C_W : قیمت واحد آب آبیاری (ریال بر میلی متر بر هکتار)

محدودیت‌های حداکثر مجاز مساحت در هر فصل

$$\sum_{i=1}^3 A_{1i} \leq 30000 \quad (\text{پاییز}) \quad \text{فصل ۱}$$

$$\sum_{i=1}^6 A_{2i} \leq 20000 \quad (\text{بهار}) \quad \text{فصل ۲}$$

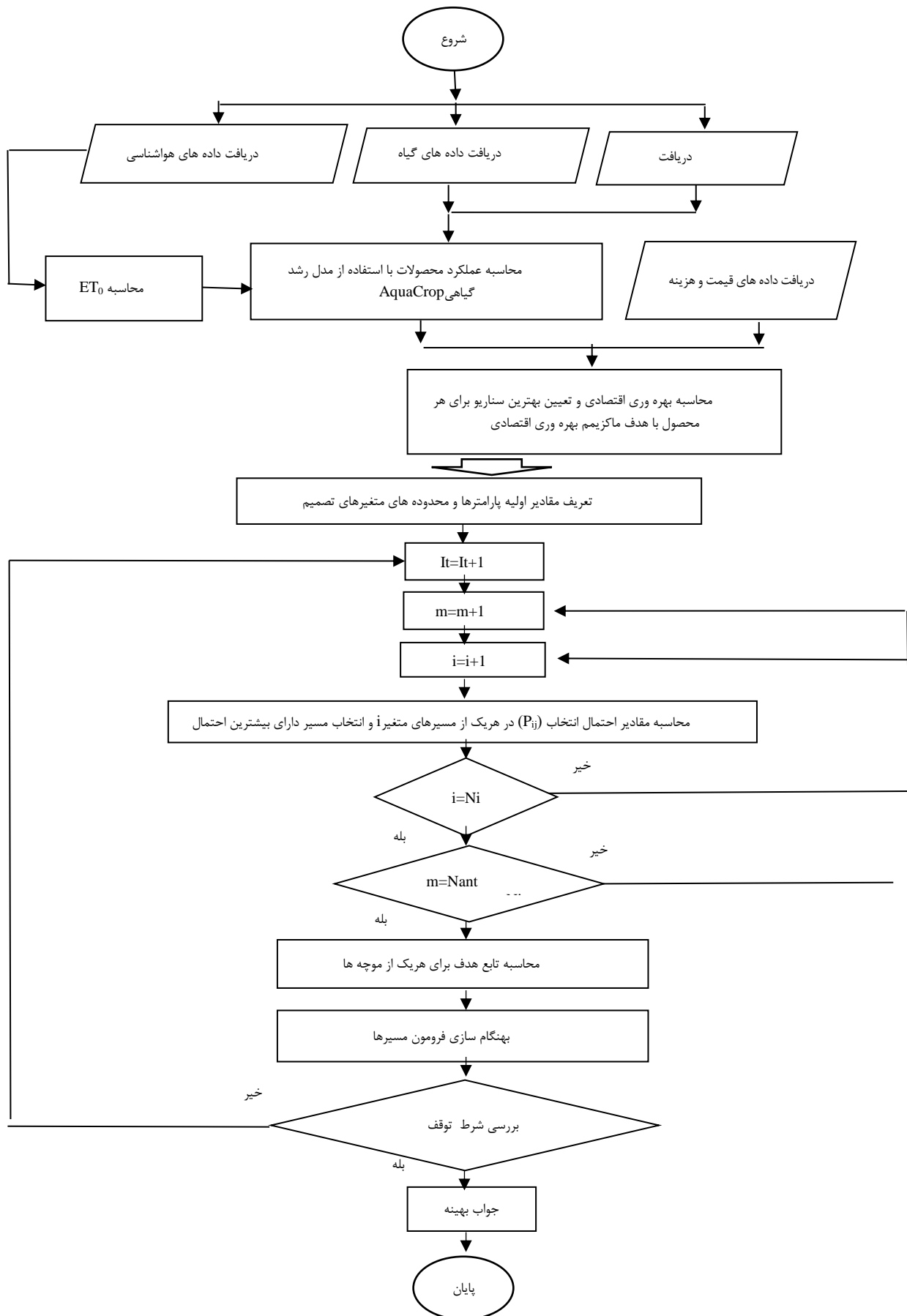
محدودیت برای حداقل و حداکثر مساحت مجاز هر گیاه

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{1iMin} \leq A_{1i} \leq A_{1iMax} \\ A_{2iMin} \leq A_{2i} \leq A_{2iMax} \end{array} \right\} \quad (\text{رابطه } ۸)$$

محدودیت حجم آب در دسترس

$$\sum_{i=1}^3 W_{1i} A_{1i} + \sum_{i=1}^6 W_{2i} A_{2i} \leq W \quad (\text{رابطه } ۹)$$

مساحت تحت کشت آبی شبکه آبیاری دشت قزوین بدون در نظر گرفتن مساحت باغ‌ها ۴۱۰۰۰ هکتار است. قیمت و هزینه تولید هر گیاه و حداقل و حداکثر مساحت در نظر گرفته شده برای هر گیاه در جدول (۱) ارائه شده است. قیمت آب ۵۱۸ ریال به ازای هر مترمکعب است. با استفاده از تابع هدف معادله (۷) و قيودات مربوط به حجم آب قابل دسترس و مساحت، الگوی کشت به گونه‌ای تعیین شد که بیشینه سود خالص حاصل شود. با توجه



شکل ۱- فلوجارت گام‌های اصلی در متدولوژی

جدول ۴- بهره‌وری اقتصادی محصولات در سناریوهای مختلف آبیاری (هزار ریال/مترمکعب)

سناریو	گندم	جو	ذرت دانهای	ذرت علوفه	کلزا	سیب‌زمینی	گوجه	لوبیا	چغندر قند
۱	۰/۸۷	۶۵/۰	۱/۵	۰/۶۷	۰/۵۳	-	-	-	-
۲	۰/۹۹	۰/۸۸	۱/۱۵	۱/۱۷	۰/۴۶	-	-	-	-
۳	۰/۸۹	۰/۷۸	۲/۴۷	۱	۰/۳۷	-	-	-	-
۴	۱/۰۰	۰/۶۹	۰	۰/۷۱	۰/۴۳	-	-	-	-
۵	۰/۶۹	۱/۱۱	۰	۰	۰/۲۲	-	-	-	-
۶	۰/۸۷	۰/۶۸	۰/۸۷	۰/۴۳	۰/۶۶	۰/۰۴	۳	۰/۹۷	۰/۳۳
۷	۰/۹۶	۰/۷۶	۰/۹۶	۰/۴۹	۰/۶۸	۰/۸۷	۲/۵۲	۰/۷۲	۰/۰۳
۸	۰/۹۶	۰/۸۶	۱/۱	۰/۵۵	۰/۶۸	۰/۶۱	۲/۰۱	۰/۴۶	۰/۳۸
۹	۰/۹۵	۰/۹۹	۱/۲۶	۰/۶۴	۰/۶۶	۰/۳۷	۱/۵۵	۰/۱۹	۰/۷۲
۱۰	۰/۹۳	۰/۸۷	۰/۹۴	۰/۴۵	۰/۵۴	۰/۵۷	۲/۶۸	۰/۸۷	۰/۲۱
۱۱	۰/۸۹	۱/۰۷	۱/۰۸	۰/۴۹	۰/۵۳	۰/۹۱	۲/۸۹	۰/۹۲	۰/۲۷
۱۲	۰/۸۸	۱/۱۱	۱/۱۶	۰/۵۹	۰/۵۴	۰/۰۴	۲/۱۷	۰/۷۸	۱/۷۹
۱۳	۰/۸۴	۱/۲۴	۰/۷۶	۰/۷۷	۰/۲۸	-	-	-	-
۱۴	۰/۷۲	۱/۳۹	۰/۷۶	۰/۴۸	۰/۶۸	۰/۲۵	۰/۵۹	۰/۷۹	۱/۰۶
۱۵	۰/۸۹	۰/۷	۰/۹۵	۰/۴۳	۰/۸۱	۰/۱۹	۰/۴۳	۰/۲۲	۰/۰۵
۱۶	۰/۸۹	۰/۶۹	۰/۹۱	۰/۴۸	۰/۶۹	۰/۹	۱/۷۵	۰/۶۶	۰/۲۱
۱۷	۰/۹	۰/۷۷	۱/۳	۰/۶۶	۰/۵۵	۰/۱۳	۱/۲۷	۰/۴۹	۰/۷۲
۱۸	۱/۰۱	۰/۸۹	۱/۲۷	۰/۶۶	۰/۵	۰/۴۶	۲	۰/۷۱	۰/۷۳
۱۹	۰/۸۶	۰/۸۲	۱/۳۱	۰/۶۵	۰/۲۹	۰/۳۹	۱/۴۵	۰/۵۷	۰/۷۳
۲۰	۱/۰۳	۰/۹۵	۱/۰۷	۰/۷۳	۰/۶۴	۰/۱۴	۱/۲۹	۰/۵	۰/۷۳
۲۱	۱/۰۶	۰/۹۴	۱/۰۸	۰/۵۸	۰/۴۶	۰/۷۵	۱/۶۸	۰/۶۴	۰/۱۷

* اعداد منفی بیانگر بیشتر بودن هزینه نسبت به درآمد است.

جدول ۵- تعریف سناریوهای کم آبیاری و درصد کاهش آب در دوره‌های مختلف رشد مربوط به محصولات (سیب‌زمینی، گوجه‌فرنگی، لوبیا و چغندر قند)

سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
کسر کاهش (%)	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۳۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۳۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۳۰
مرحله رشد	۱			۲			۳			۴			۵		
سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
کسر کاهش (%)	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۳۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۳۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۳۰
مرحله رشد	۱			۲			۳			۴			۵		
سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
کسر کاهش (%)	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۳۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۳۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۳۰
مرحله رشد	۱			۲			۳			۴			۵		
سناریو	۴۲	۴۳	۴۴	۴۵	۴۶	۴۷	۴۸	۴۹	۵۰	۵۱	۵۲	۵۳	۵۴	۵۵	۵۶
کسر کاهش (%)	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
مرحله رشد	۱			۲			۳			۴			۵		

چغندر قند به ترتیب ۳/۲۲، ۳/۱، ۱/۰۱، ۰/۳۳ که هر کدام مربوط به سناریوهای آبیاری ۵٪ کم آبیاری ۵٪ کم آبیاری در مرحله اولیه رشد، ۳۰٪ کم آبیاری در مرحله توسعه، ۵٪ کم آبیاری در مرحله توسعه و ۵٪ کم آبیاری در مرحله ابتدایی رشد می‌باشد.

تعیین الگوی بهینه کشت تحت حالت‌های مختلف تأمین آب به شبکه

سناریوهای تعریف شده در جدول (۵) آورده شده‌اند. کم آبیاری در ۵ دوره رشد گیاه از ۵٪ تا ۳۰٪ اعمال شد. همچنین در دوره‌های اول و رسیدگی کامل به طور همزمان کم آبیاری با ترکیب‌های مختلف ۵٪ تا ۳۰٪ مطابق جدول (۵) اعمال شد. نتایج بهره‌وری اقتصادی سناریوهای آبیاری نشان می‌دهد بیشینه بهره‌وری اقتصادی محصولات سیب‌زمینی، گوجه، لوبیا و

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 (۶) انتخاب شدند.

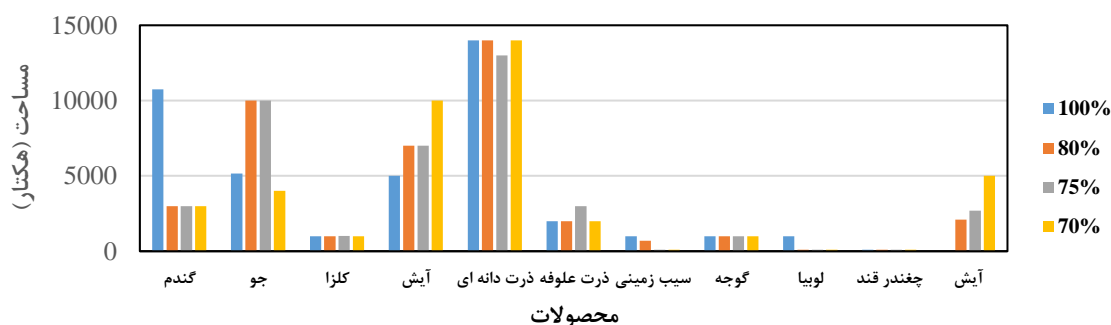
الگوی کشت بهینه توسط ACO و الگوی کشت وضع موجود و الگوی پیشنهادی جهاد کشاورزی در جدول (۷) آورده شده است. در حالت وضع موجود (سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳) لوبیا و کلزا کشت نشده‌اند، اما جزو محصولات هستند که کشاورزان اغلب مایل به کشت آنها هستند؛ بنابراین این دو محصول نیز در تعیین الگوی کشت بهینه در نظر گرفته شدند. نتایج نشان می‌دهد که الگوی کشت در حالت وضع موجود حجم آب مصرفی از حجم آب در دسترس بیشتر بوده و این موضوع بیانگر تأمین آب مازاد مورد استفاده از آب چاه می‌باشد. همچنین در الگوی پیشنهادی جهاد کشاورزی، حجم آب کمتری نسبت به حجم آب موجود استفاده شده است ولی سود خالص کمتری نیز نسبت به الگوی کشت بهینه دارا می‌باشد. الگوی کشت بهینه به قدر حجم آب موجود، آب مصرف و سود خالص بیشتری را تولید کرده است. الگوی کشت بهینه در شرایط حجم آب در دسترس متفاوت در جدول (۸) آورده شده است. در حجم آب ۱۰۰٪ مدل بیشترین مساحت را به گندم (۱۰۷۴۰ هکتار) و کمترین را به چغندر قند (۱۰۰ هکتار) اختصاص داده است. با توجه به الگوی کشت بهینه توسط ACO بیشینه حجم آب استفاده شده ۱۲۷۸۷۷۲۰۰ مترمکعب می‌باشد که تقریباً برابر با حجم کلی آب در دسترس (۱۲۷۸۷۷۲۰۰ مترمکعب) است. با استفاده از این الگوی کشت سود خالص محصولات شبکه برابر با ۱۷۸۱۰۲۰ میلیون ریال می‌باشد. در الگوی بهینه توسط مدل در مقایسه با الگوی جهاد کشاورزی، ۱۱٪ حجم آب کمتر مورد استفاده قرار گرفته است و سود خالص ۴۷٪ افزایش داشته است.

ابتدا بهترین سناریو انتخاب شد و همان سناریو برای شرایط مختلف حجم آب در دسترس به عنوان عمق آب بهینه در مدل بهینه‌سازی وارد شد، به عبارت دیگر پس از محاسبه بهره‌وری اقتصادی هر یک از گیاهان تحت سناریوهای مختلف آبیاری، برنامه وارد فاز بهینه‌سازی می‌شود و با استفاده از سناریوی‌های آبیاری که بهترین بهره‌وری اقتصادی را برای هر گیاه دارا هستند، عملکرد گیاهان محاسبه و سپس الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان مساحت بهینه برای هر یک از گیاهان، با هدف بیشینه‌سازی سود خالص برآورد می‌کند. مجموع حجم آب تحویلی کانال‌های شبکه آبیاری دشت قزوین ۲۵۵۷۵۴/۴ هزار مترمکعب بوده است. که با در نظر گرفتن راندمان ۵۰٪ آبیاری حجم آب خالص ۱۲۷۸۷۷/۲ هزار مترمکعب می‌باشد و مساحت تحت کشت آبی شبکه ۴۱۰۰۰ هکتار بوده است. در این مطالعه حجم آب در دسترس با حالت‌های مختلف تأمین آب ۱۰۰٪ و ۸۰٪، ۷۵٪ و ۷۰٪ کاهش در نظر گرفته شد و مساحت‌ها و حجم آب بهینه با هدف بیشینه‌سازی سود خالص برآورد شد. قابل ذکر است که در دشت قزوین از آب‌های زیرزمینی برای کشت محصولاتی که خارج از الگوی کشت هست استفاده می‌شود. سعی شد کلیه محصولات غالبی که کشاورزان کشت می‌کنند فقط با حجم آب سطحی در نظر گرفته شود و در این شرایط بهترین برنامه‌ریزی آبیاری و الگوی کشت تعیین شود. از طرفی هم با توجه به آماری که از آب منطقه‌ای قزوین جمع‌آوری شد، حجم آب زیرزمینی مجاز مورد استفاده به صورت میانگین ۲۴ میلیون مترمکعب بود و در مقایسه با حجم آب سطحی مقدار زیادی نبود و برای برداشت غیرمجاز آب زیرزمینی نیز امکان برنامه‌ریزی وجود ندارد.

روش‌های فراکاوشی به دلیل ماهیت تصادفی آن‌ها دارای پارامترهای آزادی هستند که با تغییر مقدار این پارامترها، عملکرد مدل، همگرایی و مرغوبیت جواب‌های تولیدشده تغییر خواهد

جدول ۶- مقادیر انتخاب شده پارامترهای ACO بر اساس آنالیز حساسیت

مقدار انتخابی	مقادیر مورد بررسی	پارامتر
۴۵	۲۰، ۳۰، ۴۰، ۴۵، ۵۰	تعداد مورچه
۲	۰/۲، ۵/۱، ۲/۰، ۰/۱، ۰/۵	فاکتور تأثیر فرمون (α)
۰	.	فاکتور تأثیر تابع هیوریستیک (β)
۵	۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲، ۰/۱، ۵	فرمون اولیه (ζ)
۰/۱	۰/۹، ۰/۸، ۰/۷، ۰/۶، ۰/۵، ۰/۴، ۰/۳، ۰/۲، ۱	ضریب تبخیر فرمون (ρ)
۷	۰/۵، ۲، ۵، ۷، ۱۰، ۲۰	پاداش فرمون (q)
۸۵۰۰	۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰، ۶۵۰۰، ۸۰۰۰، ۸۵۰۰، ۹۰۰۰	ارزیابی



شکل ۳- تغییرات مساحت کشت محصولات در حجم‌های مختلف آب در دسترس با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان

جدول ۷- مقایسه الگوی کشت و حجم آب مصرفی در شبکه آبیاری قزوین در سال ۹۴-۱۳۹۳ و تغییرات الگوی کشت تحت حجم ۱۰۰٪ آب در دسترس با استفاده از ACO

محصولات											سود خالص	متغیر تصمیم	درصد حجم آب m ³	ACO
کل	آیش	چغندر قند	لوبیا	گوجه	سیب‌زمینی	ذرت علوفه	ذرت دانه‌ای	آیش	کلزا	جو				
۴۱۰۰۰	۰	۱۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۱۴۰۰۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰	۵۱۶۰	۱۰۷۴۰	۱۷۸۰۰۰۰	۱۰۰٪ مساحت (ha) آب ۱۲۷۸۷۷۲۰۰ (mm/ha)	
۱۲۷۸۷۶۰۰۰	۰	۹۴۳	۵۴۸/۸	۷۶۶/۴	۷۳۱	۱۸۶/۲	۴۱۰	۰	۲۹۰	۱۴۲	۳۲۷	۱۷۶۰۰۰۰	۱۰۰٪ مساحت (ha) آب ۱۲۷۸۷۷۲۰۰ (mm/ha)	وضع موجود
۴۱۰۰۳	۰	۱۴۸۱	۰	۲۵۷۹	۱۳۹	۹۶۳	۴۰۵	۳۶۹۰	۰	۴۲۷۶	۲۷۴۷۰	۱۷۶۰۰۰۰	۱۰۰٪ مساحت (ha) آب ۱۲۷۸۷۷۲۰۰ (mm/ha)	الگوی پیشنهادی
۱۳۵۰۷۰۲۸۰	۰	۹۴۵/۳	۰	۷۸۶/۱	۷۷۳/۲	۶۸۹	۶۴۵	۰	۰	۲۴۰	۳۴۳	۱۲۱۰۰۰۰	۱۰۰٪ مساحت (ha) آب ۱۲۷۸۷۷۲۰۰ (mm/ha)	جهاد کشاورزی
۴۱۰۰۰	۰	۱۲۳۲	۰	۱۲۳۲	۰	۲۸۷۶	۳۲۸۶	۱۱۲۹۱	۶۱۶۲	۲۲۸۳	۱۲۶۳۸	۱۲۱۰۰۰۰	۱۰۰٪ مساحت (ha) آب ۱۲۷۸۷۷۲۰۰ (mm/ha)	
۱۱۵۰۸۹۴۸۰	۰	۳/۹۴۵	۰	۱/۷۸۶	۲/۷۷۳	۶۸۹	۶۴۵	۰	۳۱۷	۲۶۰	۳۰۱			

جدول ۸- تغییرات الگوی کشت تحت حجم ۸۰٪، ۷۵٪ و ۷۰٪ آب در دسترس با استفاده از ACO

محصولات											سود خالص	متغیر تصمیم	درصد حجم آب m ³	
کل	آیش	چغندر قند	لوبیا	گوجه	سیب‌زمینی	ذرت علوفه	ذرت دانه‌ای	آیش	کلزا	جو				گندم
۴۱۰۰۰	۰	۱۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۱۴۰۰۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰	۵۱۶۰	۱۰۷۴۰	۱۷۸۰۰۰۰	۱۰۰٪ مساحت (ha) آب ۱۲۷۸۷۷۲۰۰ (mm/ha)	
۱۲۷۸۷۶۰۰۰	۰	۹۴۳	۵۴۸/۸	۷۶۶/۴	۷۳۱	۱۸۶/۲	۴۱۰	۰	۲۹۰	۱۴۲	۳۲۷	۱۵۲۲۸۴۰	۸۰٪ مساحت (ha) آب ۱۱۵۰۸۹/۴۸ (mm/ha)	
۴۱۰۰۰	۲۱۰۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰۰	۶۹۹	۲۰۰۰	۱۴۰۰۰	۷۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰۰	۳۰۰۰	۱۴۴۰۰۰۰	۷۵٪ مساحت (ha) آب ۱۰۲۳۰۱/۷۶ (mm/ha)	
۱۰۲۲۹۹۴۹۰	۰	۹۴۳	۵۴۸/۸	۷۶۶/۴	۷۳۱	۱۸۶/۲	۴۱۰	۰	۲۹۰	۱۴۲	۳۲۷	۱۴۴۰۰۰۰	۷۵٪ مساحت (ha) آب ۱۰۲۳۰۱/۷۶ (mm/ha)	
۴۱۰۰۰	۲۶۹۶	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰	۳۰۰۰	۱۳۰۰۰	۷۰۰۰	۱۰۰۴	۱۰۰۰۰	۳۰۰۰	۱۴۴۰۰۰۰	۷۵٪ مساحت (ha) آب ۱۰۲۳۰۱/۷۶ (mm/ha)	
۹۵۶۹۴۴۰۰	۰	۹۴۳	۵۴۸/۸	۷۶۶/۴	۷۳۱	۱۸۶/۲	۴۱۰	۰	۲۹۰	۱۴۲	۳۲۷	۱۴۴۰۰۰۰	۷۵٪ مساحت (ha) آب ۱۰۲۳۰۱/۷۶ (mm/ha)	
۴۰۳۰۰	۵۰۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰	۲۰۰۰	۱۴۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰	۴۰۰۰	۳۰۰۰	۱۲۵۰۰۰۰	۷۰٪ مساحت (ha) آب ۸۹۵۱۴/۴ (mm/ha)	
۸۹۴۰۰۸۰۰	۰	۹۴۳	۵۴۸/۸	۷۶۶/۴	۷۳۱	۱۸۶/۲	۴۱۰	۰	۲۹۰	۱۴۲	۳۲۷			

می‌باشد که سود خالص ۱۳۵۰۰۰۰۰ میلیون ریال را موجب می‌شود.

وقتی حجم آب اولیه کاهش پیدا می‌کند مدل مساحت گندم را به حداقل تعریف شده کاهش می‌دهد و مساحت جو را که بهره‌وری اقتصادی بالاتری دارد، بیشتر در نظر می‌گیرد. همچنین در هر سه جدول مشاهده می‌شود که مساحت چغندر قند به حداقل مساحت تعریف شده کاهش یافته است و دلیل آن این است که چغندر قند در بین محصولات ذکر شده کمترین مقدار بهره‌وری اقتصادی را دارا می‌باشد. تغییرات مساحت کشت محصولات در حجم‌های مختلف آب در دسترس در شکل (۲)، مورد مقایسه قرار گرفت، البته تحلیل این نمودار

الگوی کشت محصولات با در نظر گرفتن ۸۰٪، ۷۵٪ و ۷۰٪ حجم آب در دسترس در جدول (۸) آورده شده است. زمانی که حجم آب در دسترس ۸۰٪ شود مدل الگوی کشت را به کاهش مساحت گندم و افزایش مساحت جو تغییر می‌دهد و بیشینه سود خالص در این شرایط ۱۵۳۲۸۴۰ میلیون ریال می‌باشد. در صورتی که حجم آب در دسترس ۷۵٪ شود مدل الگوی کشتی را پیشنهاد می‌دهد که در آن سطح زیر کشت ذرت دانه‌ای کاهش و سطح زیر کشت ذرت علوفه افزایش یافته است و در این صورت سود بیشینه ۱۴۴۰۰۰۰ میلیون ریال می‌باشد. زمانی که حجم آب در دسترس به ۷۰٪ کاهش می‌یابد بهترین الگوی کشت پیشنهادی توسط مدل کاهش مساحت جو و همچنین افزایش مساحت آیش

می‌کنند در شرایط مختلف حجم آب در دسترس مورد بررسی قرار داده شود. قبل از استفاده از تابع بهینه‌سازی، سناریوهای مختلف آبیاری و کم آبیاری برای گیاهان غالب دشت قزوین در نظر گرفته شد و با استفاده از مدل تدوین‌شده در متلب و ارتباط آن با مدل رشد گیاهی، سناریوی آبیاری که باعث بیشینه بهره‌وری اقتصادی می‌شود برای هر یک از گیاهان مشخص شد و سپس با استفاده از عمق آب بهینه و تابع هدف و قیودات مساحت و حجم آب با استفاده از الگوریتم ACO بهترین الگوی کشت در شرایط مختلف حجم آب در دسترس، تعیین شد. نتایج نشان می‌دهد مدل تدوین‌شده جهت تعیین بهترین برنامه آبیاری و الگوی بهینه کشت با هدف بیشینه‌سازی سود خالص، خوب عمل می‌کند و قابلیت انعطاف‌پذیری در شرایط کم‌آبی را دارا می‌باشد. نتایج مدل با نتایج محققین قبلی همخوانی خوبی دارد و هیچ‌گونه تعارضی وجود ندارد. مدل برای شرایط طبیعی با الگوی کشتی که از طرف مدیریت شبکه اعمال می‌شود و منابع آب در اختیار شبکه که منابع سطحی از سد و مقدار مجاز آب برداشتی از منابع آب زیرزمینی است محدودیتی ندارد و در صورت عدم رعایت الگوی کشت و برداشت آب غیرمجاز از منابع آب زیرزمینی دارای محدودیت است و پاسخگو نیست.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Afshar, A., Massoumi, F. and Mariño, M.A. (2015). State of the art review of Ant Colony Optimization applications in water resource management, *Journal of Water Resources Management*, 29(11), 3891-3904.
- Amiri, E., Khorsand, A., Daneshian, J. and Yousefi, M. (2017). Prediction biomass and grain yield canola under different water regimes and fertilizer using AquaCrop model. *Journal of Science and Irrigation Engineering*, 1(41), 57-72. (In Farsi)
- Charnes, A. and Cooper, W. (2014). An application of linear programming model for planning dry-seasonal irrigation system. *Trends in Applied Sciences Research* (vol 5). (Pp.64-70).
- Delavar, D. Morid, S. and Moghadasi, M. (2015). Optimization of Water Allocation in Irrigation Networks Considering Water Quantity and Quality Constrains, Case Study: Zayandehroud Irrigation Networks. *Iran-Water Resources Research*. 11(9): 83-96. (In Farsi)
- Doorenbos, J. and Kassam, A.H. (1979). Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper no.33. FAO, Rome.
- Farhadi Bansaole, B. (1998). Effects of deficit irrigation on Barley yield in Karaj region and determination of production function. M.S. dissertation, University of Tehran. pp. 120. (In Farsi)
- García-Vila, M., Fereres, E., Mateos, L., Orgaz, F. and Steduto, P. (2009). Deficit Irrigation Optimization of Cotton with AquaCrop. *Journal of Agron*, (101), 477-487.
- Ghahraman, B. and Sepaskhah, A. R. (1997). Optimum deficit irrigation of cotton and potato fields in a semi-arid region. Iran. *Journal of Sci. Technol*, 21(4), 395-405.
- Golkar, H.R. (1998). Determination of production of wheat and study of the effect of water stress on yield in Karaj region. M.S. dissertation, University of Tehran. pp. 122. (In Farsi)
- Hanks, R. J. (1983). Yield and Water-Use Relationships. In: Lange, O. L., Kappen, L. and Schulze, E. D. (Eds.) Ecological Studies. Analysis and Synthesis. (Vol. 19). Water and Plant Life. Springer-Verlag. Berlin.
- Heng, L.K., Evett, S.R., Howell, T.A. and Hsiao, T.C. (2009). Calibration and testing of FAO AquaCrop model for maize in several locations. *Journal of Agron*, (101), 488-498.
- Kanooni, A., Monem, M.J. (2016). Allocation and water delivery scheduling optimization in irrigation networks. *Journal of Irrigation and Drainage*, 1(10): 12-23. (In Farsi)
- Meyer, S. J., Hubbard, K. G. and Wilhite, D. A. (1993). A crop specific drought index for corn: I, Model

باید با در نظر گرفتن حداقل و حداکثر مساحت انتصابی با محصولات باشد چرا به فرض حداقل مساحت برای چغندر قند که کمترین بهره‌وری اقتصادی را دارا می‌باشد، ۱۰۰ هکتار لحاظ شده و مدل نمی‌تواند مقدار کمتری از آن را در نظر بگیرد و یا برای گوجه‌فرنگی که بهره‌وری اقتصادی بالایی دارد حداکثر مساحت ۱۰۰۰ هکتار بوده است و مسلماً مدل مقدار بیشتری را نمی‌توانسته در نظر بگیرد. بنابراین به‌طور کلی می‌توان گفت بیشترین مساحت‌ها به محصولاتی با بهره‌وری اقتصادی بالاتر اختصاص داده شده است. این در حالی است که اگر حداقل مساحت اختصاص داده شده به برخی محصولات با بهره‌وری اقتصادی پایین‌تر صفر قرار داده شود، حداکثر سود خالص بیشتر و حجم آب مصرفی کمتر و یا مساحت کشت برخی محصولات با بهره‌وری اقتصادی بالاتر افزایش خواهد یافت، اما در این مطالعه سعی شد کلیه محصولاتی که در آن منطقه مورد کشت توسط کشاورزان قرار می‌گیرد لحاظ گردد.

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه در شبکه آبیاری دشت قزوین کشاورزان تمایلی به تغییر نوع کشت ندارند، بنابراین در این مطالعه سعی شد الگوی بهینه کشت برای گیاهان غالبی که کشاورزان در منطقه کشت

- development and validation. *Journal of Agron*, (85), 388-395.
- Mirlatifi, S.M. And Sotoodena, A.(2002). Simulation the impact of irrigation on Corn yield. Final report of the applied research plan of the deputy of research of Iranian Resources Management Organization Ministry of Energy. pp. 221. (In Farsi)
- Mirzaie, Sh. Zakerinia, M. Sharifan, H. and Shahabifar, M. (2015). The Determination of Optimal Crop Pattern with Max-Min Ant System method (Case Study: Golestan Dam Irrigation and Drainage network). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 1(9):66-74. (In Farsi)
- Moghaddasi, M., Morid, S., Araghinejad, S., and Agha Alikhani, M. (2010). Assessment of irrigation water allocation based on optimization and equitable water reduction approaches to reduce agricultural drought losses: The 1999 drought in the ZayandehRud irrigation system (IRAN). *Irrigation and Drainage*. 59.4: 377-387(In Farsi)
- Mushtagh, Sh. and Moghaddasi, M. (2011). Evaluating the potentials of deficit irrigation as an adaptive response to climate change and environmental demand. *Environmental Science and Policy*, Australia College of Agriculture 14(2):1139-1150.
- 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.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Journal of Agron*, (101), 438-447.
- Rahimikhoob, H., Sotoodehnia, A. and Massahbavani, A.R. (2014). Calibration and evaluation of AquaCrop for Maize in Qazvin Region. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 1(8), 108-115. (In Farsi)
- Ramezani Etedali, h., Ababaei, B. and Kaviani, A. (2017) the effect of increasing CO constraction on yield, transpiration and water use efficiency of main cereals in Ghazvin. *Journal of Water Resources Engineering*, (11), 39-48. (In Farsi)
- Rao, N., Sarma, P. and Chander, S. (1988). Irrigation scheduling under a limited water supply, *Agricultural Water Management*, 15 (2), 165-175, doi:10.1016/0378-3774(88)90109-6
- Salemi, H. R., Soom, M. A. M., Lee, T. S., Mousavi, S. F., Ganji, A. and Yusoff, M. K. (2011). Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of winter wheat in arid region. *African Journal Agric.Res*, (610) , 2204-2215.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. and Fereres, E. (2009). AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Journal of Agron*, (101), 426-437.
- Tanner, C. B. and Sinclair, T. R. (1983). Efficient Water Use in Crop Production: Research or Re-Search? In: Taylor, H. M., Jordan, W. R. and Sinclair, T. R. (Eds.) Limitations to Efficient Water Use in Crop Production. ASA, CSSA and SSSA. Madison. WI.
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Therese Abi Saab, M., Stockle, C. and Steduto, P. (2009). Assessment of AquaCrop, CropSyst and WOFOST Models in the simulations of Sinflower growth under different water regimes. *Journal of Agron*. (101),509-521.
- Vafaienejhad, A., Yousefzade, J., Yousefi, H. and Mohammadi Varzane, N. (2014). Using GIS and linear programming to manage water distribution in irrigation Networks (Case Study: Downstream Lands of Aqchay Dam). *Journal of Ecohydrology*, (2), 123-132. (In Farsi)
- Vivekanandan, N., Viswanathn, K., and Sanjeev, G. (2015). Optimization of cropping pattern using goal programming approach, OPSEARCH, (vol3). (pp.25)