مدیریت آب و آبیاری
دوره ۱۱ ■ شماره ٤ ■ زمستان ۱٤۰۰
صفحه‌های ۷۳۷-۷۲۵
DOI: 10.22059/jwim.2022.326446.899

مقاله پژوهشی:

بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی دشت مهران براساس محدودیت‌های منابع آب، سطح زیرکشت و تنوع زیستی

جواد سروریان[1*]، پریسا سلیمانی[2]
۱. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایران.
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۰۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۶

چکیده
به‌علت محدودیت منابع آبی و سطح زیرکشت، تعیین الگوی کشت همواره یکی از چالش‌های اصلی کشور در بخش کشاورزی بوده است. در این پژوهش بهینه‌سازی الگوی کشت دشت مهران واقع در استان ایلام براساس محدودیت‌های منابع آبی، سطح زیرکشت و تنوع زیستی توسط الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود. مدل بهینه‌ساز بر روی سه سناریو که با ترکیب قیود مختلف ایجاد شدند، به‌کار برده شد. نتایج بیانگر آن بود که در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵، الگوی کشت بهینه نبوده و شاخص تنوع زیستی نیز بسیار پایین می‌باشد. سود حاصله و تنوع زیستی در تمامی سناریوها بیش‌تر از شرایط موجود دشت مهران است. مقدار افزایش سود در سناریوهای یک، دو و سه به‌ترتیب ۷۰، ۱۰۱ و ۱۳۲ درصد بیش‌تر از سود الگوی کشت موجود است و از منظر تنوع زیستی، معیار شانون- وینر در تمامی سناریوها بیش‌تر از دوبرابر معیار شانون- وینر در الگوی کشت موجود دشت مهران است. گندم، کلزا، کنجد و بامیه در اکثر الگوهای کشت بهینه حضور قابل‌توجهی دارند. گندم بیش‌ترین سطح زیرکشت و گوجه‌فرنگی و یونجه و ذرت کم‌ترین سطح زیرکشت را به خود اختصاص داده‌اند که دلیل آن سود پایین و مصرف بالای آب این محصولات می‌باشد. محصولاتی مانند ذرت، کنجد، بامیه و خیار، در الگوی کشت بهینه دارای سطوح زیرکشت قابل‌توجهی هستند و می‌توان از این محصولات به‌عنوان محصولات جایگزین کشت فعلی به‌منظور افزایش سود کشاورزی استفاده نمود.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم ژنتیک، الگوی کشت بهینه، سطح زیرکشت، شاخص تنوع زیستی، مصرف آب.

Optimization of cropping pattern, taking into account limited water resources, cultivated area and biodiversity in the Mehran Plain

Javad Sarvarian[1*], Parisa Soleimani[2]
1. Associate Professor, Department of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran.
2. M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of agriculture, Ilam University, Ilam, Iran.
Received: June, 30, 2021 Accepted: January, 06, 2022

Abstract
Due to limited water resources in Iran, the optimal use of water resources and improvement of water use efficiency is necessary, especially in agriculture. In current work, cropping pattern optimization was carried out in Mehran Plain of Ilam Province based on water resources, cultivated area and biodiversity constraints using genetic algorithm. The optimization model was applied to three different scenarios based on a combination of different constraints. The results showed that the cropping pattern in 2016-17 was not optimal and the biodiversity index was low. The resulting profit and biodiversity in all scenarios are higher than the current situation in Mehran plain. The amount of profit increase in combinations one, two and three is 70, 101 and 132% higher than the profit of the existing cropping pattern, respectively, and in terms of biodiversity, the Shannon-Wiener criterion is more than twice as high as the Shannon-Wiener criterion in the existing simple cropping pattern in all scenarios. Wheat, canola, sesame and okra are strongly represented in most optimal cropping patterns. Wheat has the largest acreage and tomato and alfalfa and corn have the least acreage due to the low profit and high water consumption of these products. Crops such as corn, sesame, okra and cucumber are strongly represented in the optimal cropping patterns and can be used as alternatives to the current crops to increase agricultural profits.

Keywords: Algorithm Genetic, Biodiversity index, Cultivated area, Optimal crop pattern, Water consumption.

* نویسنده مسئول Email: j.sarvarian@ilam.ac.ir

مقدمه

با توجه به محدودیت‌های منابع آب موجود در ایران، استفاده بهینه از ذخایر آبی و افزایش راندمان مصرف آب به‌ویژه در بخش کشاورزی ضروری می‌باشد. حفظ پایداری تولید محصولات در کنار منابع محدود آب ممکن نیست، مگر آن‌که منابع آب موجود را مدیریت کرد. برای رسیدن به این هدف، باید محصولاتی انتخاب شوند که با مصرف آب کم‌تر، پایداری در تولید و امنیت در تأمین غذا محقق شود. یکی از مهم‌ترین مسائل در زمینه افزایش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی اصلاح الگوی کشت محصولات زراعی است (Mohammadi *et al*., 2012). با ایجاد الگوی کشت بهینه، ضمن بهره‌برداری اصولی از ظرفیت‌های آب، خاک و اقلیم، تولید محصولات کشاورزی به ثبات و پایداری خواهد رسید (Osama *et al*., 2017).

مدیریت الگوی کشت یک مسأله چند متغیره و پیچیده می‌باشد و در این زمینه پژوهش‌های مهمی در سراسر دنیا صورت گرفته است. روش‌های متنوعی هم‌چون برنامه‌ریزی، شبیه‌سازی بهینه‌سازی و مدل‌سازی به‌منظور تعیین بهترین الگوی کشت به‌کار گرفته شده‌اند (Singh, 2012; Ghasemi *et al*., 2016; Mohammadrezapou *et al*., 2017).

در مطالعه‌ای، Srivastava & Singh (2015) برای حل مسأله بهینه‌سازی چندهدفه از روش برنامه‌ریزی فازی[1] با کارکردهای عضویت خطی، نمایشی و هایپربولیک[2] استفاده کردند. آن‌ها نتایج حاصل از تکنیک‌های مختلف بهینه‌سازی (تک‌هدفه، چندهدفه) و عملکردهای مختلف عضویت را مورد بحث و مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که الگوی بهینه محصول به در دسترس‌بودن آب و محدودیت‌های دیگر مانند سطح زیرکشت، خصوصیات خاک، استفاده از کود، شرایط اقتصادی و اجتماعی محلی بستگی دارد.

در پژوهشی توسط Jafarzadeh *et al*. (2016) الگوی بهینه کشت دشت بیرجند تا سال ۱۴۱۸ شمسی به‌منظور افزایش سود با لحاظ‌کردن کاهش تراز آب، تعیین شد. به این منظور از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات[3] و برای شبیه‌سازی رفتار مؤلفه‌های اقلیمی از خروجی‌های مدل BCM2 و سناریوی انتشار B1 استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد الگوی کشت بهینه علاوه بر افزایش سود حاصل از فروش محصولات باغی و زراعی به جلوگیری از افت سطح آب در آبخوان نیز کمک می‌کند.

در پژوهشی، Osama *et al*. (2017) یک مدل بهینه‌سازی خطی را برای به حداکثر رساندن بازده خالص سالانه در سه منطقه قدیمی مصر تهیه نمودند. داده‌ها برای ۲۸ محصول به‌مدت پنج سال موردبررسی قرار گرفت. تغییرات مکانی محصولات زراعی، عملکرد محصول، نیاز غذایی و آبیاری، در مدل گنجانده شد. نتایج نشان داد که کاهش قابل‌توجهی در مناطق اختصاص‌یافته برای شنبلیله، جو، لوپن، کتان، عدس، نخود، پیاز و سیر به‌عنوان محصولات غیر استراتژیک وجود دارد. از طرف دیگر، مناطق اختصاص‌یافته برای محصولات استراتژیک مانند شبدر، پنبه، ذرت، برنج، محصولات قندی و گندم تقریباً یکسان باقی ماند. اما برای محصولاتی با بازده خالص بالا هم‌چون گوجه‌فرنگی، به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت.

در مطالعه دیگری Rafiee *et al*. (2017) با ادغام الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی[4] و مدل شبیه‌سازی SWAT و HS-SWAT، الگوی کشت محصولات کشاورزی در دشت آزادگان را بهینه کردند. موضوع در چارچوب دو سناریو بررسی شد. در سناریو نخست الگوی کشت بهینه به‌منظور حداکثرسازی سود سالانه و با در نظرگرفتن محدودیت‌های مقدار آب مصرفی و حداکثر زمین قابل کشت مشخص شد. در سناریوی دوم تخصیص بهینه آبیاری برای الگوی کشت فعلی بررسی شد. سود خالص سالانه در سناریوی اول

۳۱٤ درصد و در سناریوی دوم ۲۳ درصد در مقایسه با سناریو فعلی افزایش پیدا کرد. به‌علاوه، حجم آب مصرفی در سناریوی اول ۲۸ درصد و در سناریوی دوم ٤۹ درصد نسبت به وضعیت جاری کاهش یافت. نتایج این پژوهش نشان داد که با پیاده‌سازی الگوی کشت مناسب برای محصولات کشاورزی علاوه بر افزایش سود ناشی از تولید محصولات، میزان آب مصرفی برای فرآورده‌های کشاورزی نیز کاهش خواهد یافت.

در پژوهشی، Bahadori *et al.* (2019) با به‌کاربردن مدل برنامه‌ریزی خطی[5] و استفاده از مدل‌های ریسک موتاد[6]، موتاد پیشرفته و تارگت موتاد، الگوی کشت بهینه محصولات زراعی شهرستان ری را تعیین نمودند. نتایج به‌دست‌آمده از مدل خطی نشان داد که استفاده فعلی از منابع موجود مطلوب نبوده و در صورت به‌کارگیری الگوی کشت بهینه امکان افزایش سود برای فعالیت‌های زراعی تا ٦/٦۹ درصد وجود دارد.

در مطالعه‌ای که توسط Kumar & Yadav (2019) انجام گرفت، از مدل‌های تعیین الگوی کشت بهینه به‌منظور حداکثرسازی سود خالص سالانه استفاده شد. نتایج بیانگر آن بود که برای دستیابی به سود بیش‌تر، بایستی سطح زیرکشت محصولاتی هم‌چون پنبه، موز، نیشکر و بادام‌زمینی را افزایش داد.

در مطالعه‌ای دیگر، Najafabadi *et al.* (2019) مدلی را به‌منظور بهینه‌سازی الگوی کشت منطقه‌ای ارائه دادند و اهداف مختلف اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی را به‌طور مشترک و جداگانه موردبررسی قرار دادند. به‌منظور بررسی مدل پیشنهادی، زمین‌های قابل کشت محصولات کشاورزی در ۲۳ شهرستان استان اصفهان برای مطالعه انتخاب شدند. نتایج نشان داد که در گروه‌های اصلی علوفه و غلات، کاهش قابل‌توجهی در سطح محصول مدل چندهدفه به‌ترتیب ۲٦ و پنج درصد مشاهده شد. افزایش سطح محصولات باغی تا ۱۰ درصد در الگوی بهینه مدل چندهدفه یکی دیگر از عوامل مهم در تجزیه و تحلیل نتایج بود. به‌طورکلی، به‌منظور دستیابی به اهداف اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی در چارچوب یک برنامه‌ریزی چندهدفه، کاهش ۱٦ درصدی سطح زیرکشت در استان اصفهان اجتناب‌ناپذیر بود. نتایج این اقدام، افزایش سود تا ۵۸ درصد، افزایش تولید تا ۱۱ درصد و کاهش مصرف آب آبیاری تا ۱۷ درصد، بود.

مطالعه‌ای تحقیقاتی توسط Haq *et al.* (2020) به‌منظور دستیابی به سودمندترین الگوی کشت در منطقه هونزا[7] انجام شد و حداکثرسازی سود خالص در سال برای سه محصول عمده گندم، سیب‌زمینی و یونجه صورت گرفت. پس از جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار اکسل، تجزیه و تحلیل داده‌ها انجام شد و این داده‌ها برای توسعه مدل ریاضی مورد ارزیابی قرار گرفتند. از این روش برای یافتن راه‌حل بهینه مدل استفاده شد که ۱۰/۱۸ درصد افزایش درآمد خالص را نشان داد.

در پژوهشی، Sabzzadeh & Shourian (2020) به‌منظور حداکثرسازی سود خالص محصولات کشاورزی دشت، از یک روش جدید بهینه‌سازی استفاده کردند. در این روش، مدل‌های SWAT و MODFLOW به‌عنوان مدل‌های زراعی و شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی، به‌همراه الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به‌کار گرفته شدند. نتایج نشان داد که با اعمال سطح زیرکشت بهینه و هم‌چنین برنامه‌ریزی آبیاری، می‌توان سود خالص را در مقایسه با وضعیت موجود به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد.

در بسیاری از این پژوهش‌های اشاره‌شده فوق، رویکرد هزینه- فایده[8] استفاده شده است. هدف اصلی در این رویکرد، حداکثرسازی سود (فایده) بوده و بقیه معیارها مانند مصرف آب، مصرف کود، تراز آب زیرزمینی، سطح زیرکشت، مشخصات خاک و شرایط

اقتصادی و اجتماعی یا به‌عنوان هدف ثانی در نظر گرفته شده‌اند و یا به‌عنوان قیود در مسأله بهینه‌سازی لحاظ شده‌اند. از طرف دیگر، معیار تنوع زیستی[9] در تعیین الگوی کشت، تاکنون در هیچ مقاله‌ای لحاظ نشده است. علاوه بر این، ترکیب هم‌زمان قیود منابع آبی، سطح زیرکشت و تنوع زیستی نوآوری دیگر مقاله حاضر خواهد بود.

در مقاله حاضر، الگوی کشت بهینه براساس حداکثرسازی سود محصولات کشاورزی دشت مهران در استان ایلام، با در نظرگرفتن محدودیت‌های منابع آب، سطح زیرکشت و تنوع زیستی تعیین شد. بدین منظور روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک[10] بر روی داده‌های آماری کشاورزی در سال‌های گذشته و داده‌های منابع آبی اعمال شده و نتیجه حاصله با شرایط الگوی کشت موجود مورد مقایسه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی

دشت مهران در غرب ایران با مساحتی حدود ۳۰۰ کیلومترمربع و مختصات جغرافیایی ″۳۷ ′۱۸ °۳۳ تا ″۰۲ ′۰۳ °۳۳ عرض شمالی و ″۲۳ ′۰۷ °۴۶ تا ″۴۰ ′۲۶ °۴۶ طول شرقی در استان ایلام واقع شده است (شکل ۱). این دشت اقلیمی گرم و خشک دارد که زمستان‌های آن کوتاه، معتدل و اندکی مرطوب است و تابستان‌هایی طولانی، خشک و خیلی گرم دارد. تأمین آب کشاورزی دشت مهران، توسط منابع آب زیرزمینی (چاه‌ها) و هم‌چنین رودخانه‌های کنجانچم و گاوی می‌باشد که رودخانه‌های مذکور پس از عبور از دشت مهران وارد خاک کشور عراق می‌شوند.

در سال‌های اخیر به‌دلیل برداشت‌های زیاد از آبخوان‌های این منطقه، تراز آب‌های زیرزمینی منفی شده است (Heidarizad *et al.*, 2019). هم‌چنین به‌دلیل کمبود بارش طی سالیان اخیر، استفاده از آب رودخانه‌ها کاهش شدیدی داشته است. با توجه به محدودیت منابع آبی در دشت مهران، تعیین الگوی کشتی که ضمن رعایت محدودیت‌های منابع آبی و سطح زیرکشت، بیش‌ترین سود را نصیب کشاورزان نماید، ضرورت خواهد یافت.

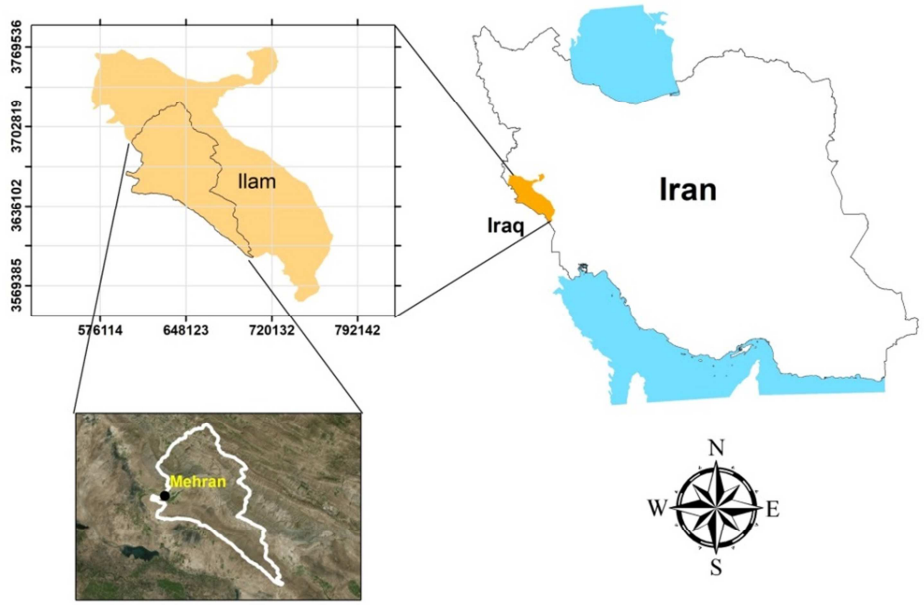

Figure 1. Study area of Mehran Plain, Ilam Province, Iran

الگوی کشت موجود

در این مقاله نُه محصول کشاورزی رایج در دشت مهران از جمله گندم، جو، ذرت دانه‌ای، یونجه خشک، کلزا، کنجد، بامیه، خیار و گوجه‌فرنگی انتخاب شدند و اطلاعاتی مانند عملکرد در واحد سطح، هزینه تولید، قیمت فروش و میزان مصرف آب از اداره جهاد کشاورزی استان ایلام و شهرستان مهران، اداره هواشناسی استان ایلام و هم‌چنین از طریق تکمیل پرسشنامه برای سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ جمع‌آوری شد (جدول ۱). بر این اساس گوجه‌فرنگی بیش‌ترین و کنجد کم‌ترین عملکرد در واحد سطح را در بین محصولات مختلف دارا می‌باشند.

مصرف آب

در مناطق خشک و نیمه‌خشک که مسأله کمبود آب یکی از معضلات کشاورزی می‌باشد تبخیر و تعرق اساسی‌ترین فرایندی است که در زنجیره آب–خاک–گیاه صورت می‌گیرد (Alizadeh, 2007). مقدار مصرف آب محصولات کشاورزی در یک منطقه رابطه مستقیمی با مقدار تبخیر و تعرق در آن منطقه دارد. در پژوهش حاضر به‌منظور تعیین مقدار تبخیر و تعرق و نیاز آبی محصولات منتخب، از نرم‌افزار کراپ‌وات[11] استفاده شد و نیاز آبی خالص محصولات کشاورزی براساس داده‌های هواشناسی و اقلیمی، خاک و گیاه به‌دست آمد. در نهایت با در نظرگرفتن راندمان آبیاری برابر با ۴۰ درصد، نیاز آبی ناخالص[12] محاسبه شد (Abbasi *et al*., 2017) که نتیجه آن در جدول (۱) آورده شده است.

هزینه‌ها و فایده

هزینه‌های تولید محصولات کشاورزی شامل اجاره‌بهای آب و زمین، هزینه‌های آماده‌سازی زمین (شخم، رفع عوارض و موانع)، هزینه‌های مرحله کاشت (نیروی انسانی، اجاره‌بهای ماشین، بذر، سم قبل از کاشت)، هزینه‌های مرحله داشت (کود، آبیاری، وجین) و هزینه‌های مرحله برداشت (کرایه حمل، کارمزد ماشین، آماده‌سازی مزرعه) می‌باشد. علاوه بر این قیمت تعیین‌شده برای محصولات کشاورزی تابع عوامل مختلفی هم‌چون کمیت و کیفیت تولید، نسبت عرضه به تقاضا، سیاست‌های حمایتی دولت و ... می‌باشد. در جدول (۱) هزینه تولید (ریال بر هکتار)، قیمت فروش (ریال بر تن) و سود حاصله (ریال) محصولات منتخب آورده شده است. هم‌چنین در شکل (۲) تغییرات سود محصولات کشاورزی به‌ازای واحد سطح زراعی نشان داده شده است.

براساس جدول (۱) و شکل (۲)، گوجه‌فرنگی بیش‌ترین هزینه و کم‌ترین سود و بامیه کم‌ترین هزینه و بیش‌ترین سود را در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ داشته است. هم‌چنین یونجه و جو به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مصرف آب را در بین محصولات منتخب به خود اختصاص داده‌اند. محصول گندم به‌عنوان محصول غالب در دشت مهران بیش‌ترین سطح زیرکشت، سود و آب مصرفی را داراست. کل سود حاصله محصولات کشاورزی در این سال، ۱۴۸ میلیارد ریال، سطح زیرکشت ۹۴۲۳ هکتار و کل آب مصرفی ۵۷/۶ میلیون متر مکعب می‌باشد.

Table 1. Data and information on selected agricultural products in the Mehran Plain

Crops	Cultivated area (ha)	Yield (ton/ha)	Selling price (Rials/ton)	Production cost (Rials/ha)	Gross water requirement (M^3/ha)
Wheat	8,000	3.4	13.00	30.00	5750
Barley	200	2.7	10.30	23.40	4830
Corn	330	6.06	10.65	46.00	14360
Alfalfa	0	8.0	9.00	63.03	22000
Canola	750	2.063	27.83	28.50	6000
Sesame	60	0.9	102.08	18.50	8100
Okra	40	4.0	30.00	18.00	11000
Tomato	30	22.0	4.37	205.82	12150
Cucumber	13	16.0	11.27	146.90	11000

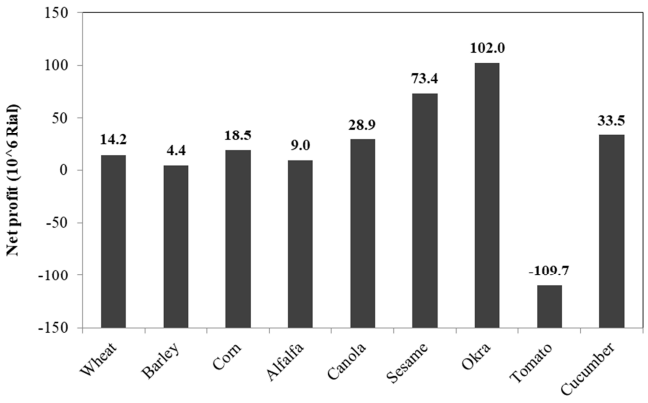

Figure 2. Profit changes of different agricultural products (million Rials) per unit of agricultural area (hectares)

مدل ریاضی

پژوهش حاضر یک مسأله بهینه‌سازی تک‌هدفه می‌باشد و برای ارزیابی فضای جواب‌های مسأله، از تابع ارزیاب سود محصولات کشاورزی استفاده می‌شود. در ادامه المان‌های مسأله بهینه‌سازی شامل توابع هدف[۱۳]، متغیرهای تصمیم[۱۴] و قیود[۱۵] بهینه‌سازی تشریح می‌شوند.

تابع هدف و متغیرهای تصمیم

هدف مسأله بهینه‌سازی این پژوهش، حداکثرسازی سود حاصله از تولید و فروش نُه محصول منتخب در دشت مهران است. شکل ریاضی تابع سود به‌صورت زیر می‌باشد:

$$B = \sum_{i=1}^{9} y_i A_i (P_i - C_i) \qquad (۱)$$

در رابطه فوق، B سود (ریال)، y_i عملکرد محصول i ام در واحد سطح (تن بر هکتار)، A_i سطح زیرکشت محصول i ام (هکتار)، P_i قیمت فروش محصول i ام (ریال بر تن) و C_i هزینه تولید محصول i ام (ریال بر هکتار) است. ازآنجاکه الگوریتم‌های بهینه‌سازی بر مبنای کمینه‌سازی می‌باشند،به‌جای حداکثرسازی سود از حداقل‌سازی عکس سود استفاده شده و تابع هدف به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Min } F = \frac{1}{\sum_{i=1}^{9} y_i A_i (P_i - C_i)} \qquad (۲)$$

که در آن، F تابع هدف (ریال/۱) می‌باشد. در روابط فوق، با تغییر نوع و سطح زیرکشت محصولات کشاورزی، مقدار توابع سود و هدف تغییر خواهند کرد و از این‌رو، در پژوهش حاضر به‌عنوان متغیرهای تصمیم لحاظ خواهند شد.

قیود

اصلی‌ترین محدودکننده‌های الگوی کشت در یک منطقه، سطح زیرکشت و منابع آبی در دسترس اعم از سطحی و زیرزمینی می‌باشد. قید مربوط به سطح زیرکشت محصولات مختلف به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\sum_{i=1}^{9} A_i \le A_t \qquad (۳)$$

که در آن؛ A_i سطح زیرکشت گیاه iام و A_t کل سطح زیرکشت (۹۵۲۳ هکتار) می‌باشد. علاوه بر این به‌دلیل بحث امنیت غذایی، حداقل سطح زیرکشت حاکم بر محصول گندم و کلزا به‌ترتیب برابر با ۴۰ و ۲۰ درصد کل سطح زیرکشت منظور شد (سازمان جهاد کشاورزی استان ایلام) و این مقادیر به‌عنوان قید حداقل در مسأله بهینه‌سازی لحاظ شد.

قید مربوط به مقدار آب در دسترس شامل منابع آبی سطحی و زیرزمینی به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\sum_{i=1}^{9} AW_i \le AW_t \qquad (٤)$$

که در آن، AW_i آب موجود برای محصول iام و AW_t کل آب مصرفی یا کل آب در دسترس است. براساس داده‌های اخذشده، کل آب مصرفی در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ برابر با ۵۷/۶ میلیون مترمکعب و کل آب در دسترس ۶۵ میلیون مترمکعب می‌باشد.

تعیین الگوی کشت بهینه بدون در نظرگرفتن تنوع زیستی محصولات کشاورزی، ممکن است باعث حصول شرایط تک‌محصولی شود که این امر می‌تواند پیامدهای مخربی از نظر تولید مواد غذایی، مدیریت آفات و بیماری‌های گیاهی، علف‌های هرز، حاصلخیزی خاک و ... داشته باشد (Di Falco *et al*., 2010). مفهوم تنوع زیستی کشاورزی شامل گونه‌هایی است (از جمله گیاهان، جانوران و میکروارگانیسم‌ها) که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم برای تغذیه انسان و جانوران اهلی و تهیه موادی چون غذا، کود، فیبر و دارو مورد استفاده قرار می‌گیرند (FAO, 1999). تنوع زیستی در کشاورزی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در ایجاد و افزایش پایداری در سیستم‌های تولید غذا محسوب می‌شود (Soares *et al*., 2020). بنابراین سومین محدودیت در پژوهش حاضر، حفظ تنوع زیستی الگوی کشت بهینه می‌باشد. تنوع زیستی گیاهان و افزایش گوناگونی آن‌ها در جهت تولید غذا و فعالیت‌های کشاورزی حائز اهمیت بوده به‌طوریکه یکی از مهم‌ترین اهداف کشاورزی پایدار، بالابردن تنوع محصولات کشاورزی به‌تبع آن رسیدن به ثبات عملکرد و حداکثرسازی تولید می‌باشد.

برای بررسی تنوع زیستی شاخص‌های مختلفی از جمله سیمپسون، شانون- وینر[۱۶] و ... وجود دارد. با توجه به این‌که شاخص شانون- وینر معیار مناسبی برای بررسی تعداد، یکنواختی و غنای گونه‌ای می‌باشد (Magurran, 2013)، در این پژوهش از این شاخص به‌منظور بررسی تنوع زیستی محصولات کشاورزی منتخب استفاده می‌شود. در این روش شاخص تنوع زیستی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H = -\sum_{i=1}^{9} \frac{A_i}{A_t}\left[\ln\left(\frac{A_i}{A_t}\right)\right] \qquad (٥)$$

در این معادله، A_i سطح زیرکشت گونه iام، A_t کل سطح زیرکشت محصولات و H شاخص شانون- وینر می‌باشد. شاخص تنوع شانون به‌طور معمول مقداری بین یک ونیم تا سه و نیم دارد (Moutsambote *et al*., 2016). براساس محدودیت‌های آب و سطح زیرکشت و به‌منظور ایجاد جواب‌های امکان‌پذیر در مسأله بهینه‌سازی، مقدار معیار شانون- وینر در مقاله حاضر یک و نیم انتخاب می‌شود.

علاوه بر قیود فوق، سود جداگانه هر یک از محصولات کشاورزی منتخب نباید منفی باشد. علاوه بر این سود حاصله از ترکیب بهینه نیز نبایستی منفی شود. شکل ریاضی قیود ذکرشده به‌صورت زیر خواهند بود:

$$y_i A_i (P_i - C_i) \ge 0 \quad , \quad i = 1 \text{ to } n \qquad (٦)$$

$$\sum_{i=1}^{n} y_i A_i (P_i - C_i) \ge 0 \qquad (٧)$$

ازآنجاکه هدف بهینه سازی الگوی کشت، افزایش سود حاصله با لحاظ کاهش مصرف آب است، بنابراین در این مقاله برای قید آب، دو حالت "کل آب مصرفی" و "کل آب در دسترس" در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ مدنظر قرار گرفت. هم‌چنین به‌منظور بررسی تأثیر تنوع زیستی بر الگوی کشت دشت مهران، وجود و یا عدم وجود این قید نیز برای شرایط موجود در دشت مهران موردبررسی قرار گرفت. بر این اساس سه سناریوی زیر حاصل خواهد شد (جدول ۲).

Table 2. Optimal cropping pattern scenarios

Scenarios	Water Cons.	Cultivated area Cons.	Biodiversity Cons.
1	Total consumption water	Total available area	Yes
2	Total consumption water	Total available area	No
3	Total available water	Total available area	Yes

حل مسأله

به‌منظور حل مسأله بهینه‌سازی در این مقاله از روش فرواکاوشی الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. روش ژنتیک عبارت است از یک جستجوی چندجانبه موازی هدایت‌شده براساس نظریه تکامل که با شبیه‌سازی فرایندهای بقای اصلح در علم زیست‌شناسی اقدام به یافتن متکامل‌ترین پاسخ به یک مسأله می‌نماید (Goldberg & Holland, 1988). در روش ژنتیک مجموعه‌ای از متغیرهای تصمیم (کروموزوم‌ها) که مؤثر بر تابع هدف می‌باشند، جمعیت اولیه را در فضای متغیرها تشکیل می‌دهند. سپس با اجرای عملگرهای ژنتیک مانند انتخاب[17]، تلاقی[18] و جهش[19] بر روی کروموزوم‌های جمعیت اولیه، نسل جدیدی که شایستگی بالاتری دارد تولید می‌شود. بدین ترتیب بعد از تکرار چند نسل، شایسته‌ترین نسل که همان پاسخ بهینه مسأله می‌باشد، تولید خواهد شد. در نهایت برای پایان‌یافتن الگوریتم لازم است که شرط توقف مسأله نیز تعریف شود.

به‌منظور برآوردن اهداف پژوهش حاضر، کد بهینه‌سازی روش الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب[20] تهیه شد که در آن ضمن اخذ داده‌های الگوی کشت محصولات نُه‌گانه دشت مهران و هم‌چنین پارامترهای الگوریتم ژنتیک، الگوی کشت بهینه سناریوهای جدول فوق تعیین می‌شود. در شکل (۳) فلوچارت مراحل انجام پژوهش حاضر نشان داده شده است.

انتخاب پارامترهای عملگرهای الگوریتم ژنتیک

در مقاله حاضر از روش تاگوچی[21] به‌منظور انتخاب صحیح اندازه جمعیت (تعداد کروموزوم‌ها)، نرخ جهش و نرخ تلاقی استفاده می‌شود. تاگوچی یک روش طراحی آزمایش‌ها را ارائه کرد که در آن تعداد آزمایش‌های موردنیاز به‌طور معناداری کاهش می‌یابد. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از این روش، یک رویکرد ساده، مؤثر و نظام‌مند برای تعیین پارامترهای بهینه‌سازی فراهم می‌نماید. مزیت روش تاگوچی نسبت به دیگر روش‌های طراحی آزمایش‌ها، تعیین بهترین مقادیر پارامترها در کم‌ترین زمان ممکن خواهد بود (Roy, 2001).

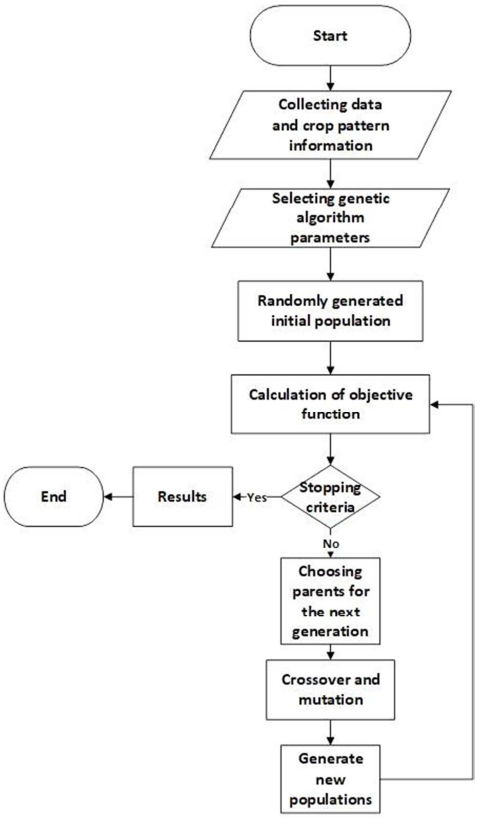

Figure 3. Flowchart of the research method

در روش تاگوچی از مفهوم آرایه‌های متعامد[22] با تعداد آزمایش‌های کم‌تر، برای بررسی تأثیر دامنه متغیرها استفاده می‌شود. در این روش نتایج آزمایش‌ها با نسبتی به نام سیگنال به پارازیت[23] (S/N) که در حقیقت نسبتی از متوسط انحراف معیار است، سنجیده می‌شوند. این نسبت می‌تواند به سه طریق مختلف "مقدار کوچک‌تر بهتر"، "مقدار بزرگ‌تر بهتر" و "مقدار اسمی بهتر" محاسبه شود. ازآنجاکه مسأله بهینه‌سازی پژوهش حاضر از نوع کمینه‌سازی می‌باشد، نسبت مذکور به‌صورت زیر تعریف

می‌شود و هرچه مقدار این نسبت کم‌تر باشد، آن سطح مطلوب‌تر خواهد بود (Roy, 2001).

$$S/N = -10 \times \log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right] \quad (۸)$$

در جدول (۳) سطوح در نظر گرفته شده برای پارامترهای الگوریتم ژنتیک آورده شده است. بر مبنای جدول استاندارد تاگوچی، برای سه معیار سه سطحی، می‌توان از طرح L9 استفاده نمود که نحوه طراحی آن در جدول (٤) آورده شده است. پس از انتخاب طرح مناسب، برنامه الگوریتم ژنتیک برای هر آزمایش و بدون در نظرگرفتن قیود تعریف شده اجرا و نتیجه نهایی در ستون آخر جدول (٤) آورده شده است.

با معرفی جدول فوق به نرم‌افزار مینی‌تب[۲٤]، نسبت S/N به‌منظور تعیین سطح بهینه هر یک از پارامترهای الگوریتم ژنتیک تعیین شد که نتیجه آن در شکل (٤) نشان داده شده است. در این شکل محور افقی، سطوح عملگرهای الگوریتم ژنتیک و محور قائم، مقدار S/N می‌باشد. در این اشکال سطوحی که نسبت S/N آن‌ها بیش‌تر باشد انتخاب می‌شود.

براساس شکل فوق و ازآنجاکه در این مقاله هدف کمینه‌سازی تابع هدف (بیشینه‌سازی تابع سود) می‌باشد، برای پارامتر اندازه جمعیت سطح شماره دو و برای پارامترهای شدت تلاقی و جهش سطح شماره یک انتخاب می‌شود. ترکیبات مناسب براساس کم‌ترین مقدار نسبت S/N به‌صورت جدول (۵) خواهد بود.

Table 3. Levels of the parameters of the genetic algorithm

Parameter	Level1	Level2	Level3
Population size	20	50	100
Crossover rate	0.4	0.6	0.8
Mutation rate	0.05	0.1	0.2

Table 4. Experimental design using the orthogonal array L9

Test No.	Level			Objective function
	Population size	Crossover rate	Mutation rate	
1	1	1	1	0.000379
2	1	2	1	0.000383
3	1	3	1	0.000413
4	2	1	2	0.000373
5	2	2	2	0.000371
6	2	3	2	0.00037
7	3	1	3	0.00037
8	3	2	3	0.000373
9	3	3	3	0.000371

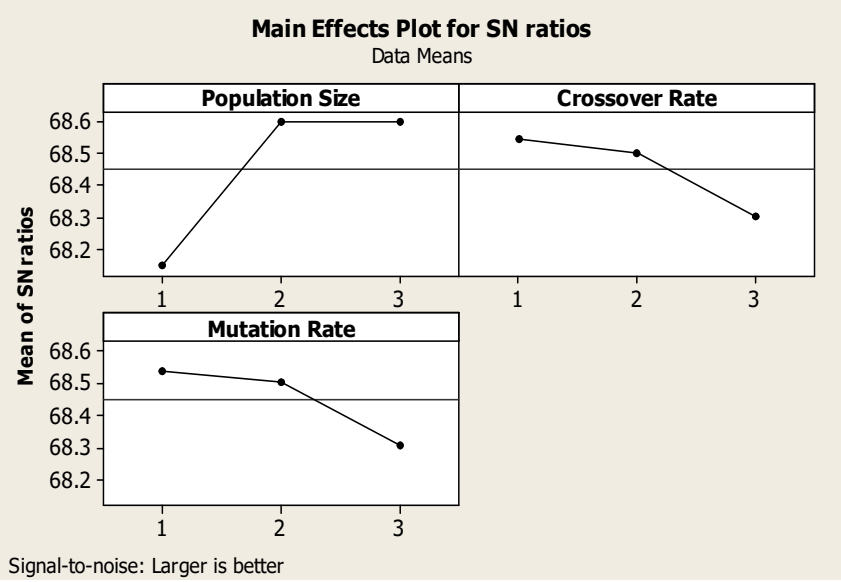

Figure 4. S/N ratio variations for different levels of the optimization parameters

Table 5. Final values of the genetic algorithm parameters

Parameter	Population size	Crossover rate	Mutation rate
The value	50	0.4	0.05

نتایج و بحث

الگوی کشت بهینه

در جدول (٦) نتایج الگوی کشت بهینه براساس اعمال قیود مختلف ارائه شده است. هم‌چنین مقادیر آب مصرفی، کل مساحت زیرکشت و شاخص شانون- وینر نیز در جدول (٧) آورده شده است.

براساس جداول فوق، گندم بیش‌ترین سطح زیرکشت و گوجه‌فرنگی و یونجه و ذرت کم‌ترین سطح زیرکشت را به‌خود اختصاص داده‌اند. پس از گندم، کلزا دارای بیش‌ترین سطح زیرکشت در بین سناریوها می‌باشد. مصرف آب و سطح زیرکشت در سناریوی سوم بیش‌تر از بقیه ترکیب‌ها است و بنابراین سود حاصله در این سناریو نیز بیش‌تر از بقیه ترکیب‌ها می‌باشد. شاخص شانون- وینر در سناریوهای اول و سوم که قید تنوع زیستی لحاظ شده است، بیش‌تر از سناریوی دوم می‌باشد. در تمامی ترکیب‌های فوق، قید سطح زیرکشت خودبه‌خود برقرار شده است و از این‌رو، وقتی الگوی کشت براساس میزان آب مصرفی و تنوع زیستی مقید شود، قید سطح زیرکشت نیز خودبه‌خود برقرار خواهد بود. در نهایت، محصول گوجه‌فرنگی به‌واسطه سود منفی (زیان) در هیچ یک از الگوهای کشت بهینه وجود ندارد.

در شکل (٥) الگوی‌های کشت بهینه با الگوی کشت موجود دشت مهران مورد مقایسه قرار گرفته است. علاوه بر این در شکل (٦) درصد تغییرات سود، آب مصرفی، سطح زیرکشت و شاخص شانون- وینر در سناریوهای بهینه نسبت به الگوی کشت موجود دشت مهران نشان داده شده است.

Table 6. Results of the optimal cropping pattern in different scenarios

Scenarios	Optimal cultivated area (ha)									Net profit
	Wheat	Barley	Corn	Alfalfa	Canola	Sesame	Okra	Tomato	Cucumber	(10^9 Rials)
1	3809.2	839.2	219.1	21.1	1974.6	996.2	502.5	0.0	271.7	252.6
2	3809.2	673.7	0.0	0.0	2082.9	1294.1	799.6	0.0	97.1	297.0
3	3850.8	338.7	28.3	0.0	2277.7	1178.6	1173.3	0.0	427.0	343.0

Table 7. The amount of optimization constraints in different scenarios

Scenarios	Total water consumption (MM3)	Total cultivated area (ha)	index Shannon-Wiener
1	57.6	8633.6	1.50
2	57.6	8756.6	1.41
3	65.0	9274.3	1.50

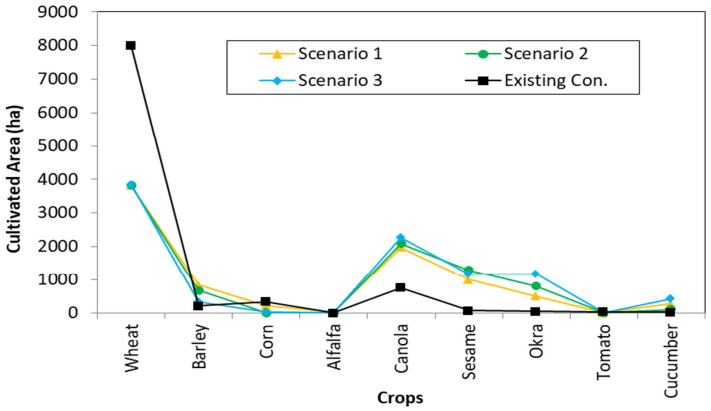

Figure 5. Trend of cultivated areas for agricultural products in the Mehran Plain compared to the existing cultivation pattern

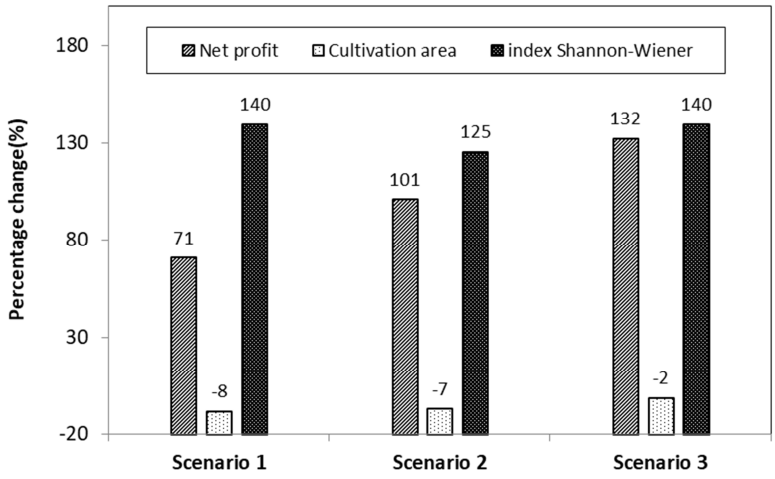

Figure 6. Percentage change in cropping pattern parameters compared to existing conditions

براساس شکل (۵) روند تغییرات سطح زیرکشت محصولات کشاورزی دشت مهران در الگوهای بهینه و الگوی کشت موجود برای بعضی از محصولات مانند گندم، جو،یونجه، کلزا و گوجه تا حد زیادی شبیه به یکدیگر می‌باشند. محصولاتی مانند ذرت، کنجد، بامیه و خیار، در الگوی کشت بهینه دارای سطوح زیرکشت قابل‌توجهی هستند، درحالی‌که در الگوی کشت موجود، سطح زیرکشت محصولات مذکور بسیار ناچیز می‌باشد.

با توجه به شکل (٦) سود حاصله در تمامی سناریوها بیش‌تر از سود سطح زیرکشت موجود (١٤٨ میلیارد ریال) است. مقدار افزایش سود در ترکیب‌های یک، دو و سه به‌ترتیب ۷۰، ۱۰۱ و ۱۳۲ درصد بیش‌تر از سود الگوی کشت موجود است. این در حالی است که در سناریوهای یک و دو، آب مصرفی در الگو، برابر با کل آب مصرفی در سال ۹٦-۱۳۹۵ دشت مهران می‌باشد.

از منظر تنوع زیستی نیز، معیار شانون- وینر در تمامی سناریوها بیش‌تر از دوبرابر معیار شانون- وینر در الگوی کشت موجود دشت مهران است. سطح زیرکشت در تمامی سناریوها کم‌تر از سطح زیرکشت موجود دشت مهران است.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی دشت مهران در استان ایلام با توجه به محدودیت‌های منابع آبی، سطح زیرکشت و تنوع زیستی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شد. مدل بهینه‌ساز بر روی سه سناریو مختلف که براساس ترکیب قیود مختلف ایجاد شده‌اند، اعمال شد و در هر سناریو اطلاعاتی مانند سطح زیرکشت، سود، مصرف آب و تنوع زیستی برای بهینه‌ترین ترکیب به‌دست آمد. نتایج حاصله بیانگر آن بود که الگوی کشت موجود بهینه نیست و سود آن از تمامی سناریوهای در نظر گرفته شده در این مقاله کم‌تر می‌باشد. مشابه این نتیجه توسط سایر پژوهش‌گران پس از اعمال الگوی کشت بهینه نیز به‌دست آمده است (Mohammadi *et al*., 2012; Srivastava & Singh, 2015; Jafarzadeh *et al*., 2016; Rafiee *et al*., 2017). علاوه بر این الگوی کشت بهینه تابع مستقیمی از محدودیت‌های حاکم بر مسأله می‌باشند و با افزایش قیود، سود حاصله کاهش می‌یابد و برعکس. بیش‌ترین مصرف آب، سطح زیرکشت و سود مربوطه به سناریوی سوم که در آن کل

آب در دسترس لحاظ شده است، می‌باشد و کم‌ترین سود وقتی است که علاوه بر لحاظ‌کردن قید آب به‌صورت آب مصرفی، قید تنوع زیستی نیز بر مسأله بهینه‌سازی الگوی کشت اعمال گردیده است. از منظر تنوع زیستی، معیار شانون- وینر در تمامی سناریوها بیش‌تر از دوبرابر معیار شانون- وینر در الگوی کشت موجود دشت مهران است.

منابع آبی محدود باعث جلوگیری از کاربرد تمامی سطح زیرکشت خواهد شد. در این حالت اگر تنوع زیستی نیز محدود شود، سطح زیرکشت کوچک‌تر و سود حاصله نیز کم‌تر خواهد شد. محدودیت منابع آبی با محدودیت سطح زیرکشت تناقضی ندارد. به‌عبارت دیگر، اگر الگوی کشت براساس منابع آبی محدود شود، قید سطح زیرکشت نیز خودبه‌خود برقرار خواهد شد. گندم، کلزا، کنجد و بامیه در اکثر الگوهای کشت بهینه حضور قابل‌توجهی دارند. گندم بیش‌ترین سطح زیرکشت و گوجه‌فرنگی و یونجه و ذرت کم‌ترین سطح زیرکشت را به‌خود اختصاص داده‌اند که دلیل آن سود پایین و مصرف بالای آب این محصولات می‌باشد. محصولاتی مانند ذرت، کنجد، بامیه و خیار، در الگوی کشت بهینه دارای سطوح زیرکشت قابل‌توجهی هستند و می‌توان از این محصولات به‌عنوان محصولات جایگزین کشت فعلی به‌منظور افزایش سود کشاورزی استفاده نمود.

سود حاصله در تمامی سناریوها بیش‌تر از سود سطح زیرکشت موجود (۱۴۸ میلیارد ریال) است. مقدار افزایش سود در ترکیب‌های یک، دو و سه به‌ترتیب ۷۰، ۱۰۱ و ۱۳۲ درصد بیش‌تر از سود الگوی کشت موجود است. این در حالی است که در سناریوهای یک و دو، آب مصرفی در الگو، برابر با آب مصرفی موجود (۹۶-۱۳۹۵) درشت مهران می‌باشد. مشابه همین نتیجه توسط Rafiee *et al.* (2017) برای الگوی کشت بهینه دشت آزادگان حاصل شد.

پی‌نوشت‌ها

1. Fuzzy programming approach
2. Hyperbolic
3. MOPSO
4. Harmony Search
5. Linear Programming
6. MOTAD
7. Hunza
8. Cost - Benefit
9. Biodiversity
10. Genetic algorithm
11. Cropwat
12. Gross water requirement
13. Objective Function
14. Decision variables
15. Constraints
16. index Shannon-Wiener
17. Selection
18. Crossover
19. Mutation
20. MATLAB
21. Taguchi
22. Orthogonal arrays
23. Signal to noise
24. Minitab

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Abbasi, F., Sohrab, F., & Abbasi, N. (2017). Evaluation of irrigation efficiencies in Iran. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 17(67), 113-120.
2. Alizadeh, A. (2007). *Surface irrigation system design*. Mashhad: Imam Reza University.
3. Bahadori, M., Joolaie, R., Eshraghi, F., & Rezaee, A. (2019). Optimization of cropping pattern regarding risk in Rey county of Iran. *Agricultural Economics and Development*, 27(107), 131-161. (In Persian).
4. CROPWAT. (1992). A computer program for irrigation planning and management (No. 46). *Food and Agriculture Organization*.
5. Di Falco, S., Bezabih, M., & Yesuf, M. (2010). Seeds for livelihood: crop biodiversity and food production in Ethiopia. *Ecological Economics*, 69(8), 1695-1702.

6. FAO. (1999). Agrobiodiversity. Multilingual Glossary Forest Genetic Resources. Available in: http://www.iufro-archive.boku.ac.at/silvavoc/glossary/af2_1en.html
7. Ghasemi, M.M., Karamouz, M., & Shui, L.T. (2016). Farm-based cropping pattern optimization and conjunctive use planning using piece-wise genetic algorithm (PWGA): a case study. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(1), 25.
8. Goldberg, D. E., & Holland, J.H. (1988). Genetic algorithms and machine learning. *Machine Learning*, 3, 95–99.
9. Haq, F., Parveen, A., Hussain, S., & Hussain, A. (2020). Optimization of the Cropping Pattern in District Hunza, Gilgit-Baltistan. *Sarhad Journal of Agriculture*, 36(2).
10. Heidarizad, Z., Mohamadi, A., & Yaghobi, S. (2019). Evaluating the Groundwater Status of Mehran Plain and Factors Affecting the Quantity of these Resources. *Journal of Hydrogeology*, 3(2), 59-68.
11. Ifo, S. A., Moutsambote, J. M., Koubouana, F., Yoka, J., Ndzai, S. F., Bouetou-Kadilamio, L. N. O., ... & Joel, L. J. (2016). Tree species diversity, richness, and similarity in intact and degraded forest in the tropical rainforest of the Congo Basin: case of the forest of Likouala in the Republic of Congo. *International Journal of Forestry Research*.
12. Jafarzadeh, A., Khaseii, A., & Shahidi, A. (2016). Designing a multi objective decision-making model to determine optimal crop pattern influenced by climate change phenomenon (case study: Birjand plain). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(4), 849-859. (In Persian).
13. Kumar, V., & Yadav, S.M. (2019). Optimization of cropping patterns using elitist-Jaya and elitist-TLBO algorithms.*Water Resources Management*, 33(5), 1817-1833.
14. Magurran, A.E. (2013). *Measuring biological diversity*. John Wiley and Sons.
15. Mohammadi, H., Boustani, F., & Kafilzadeh, F. (2012). Optimal cropping pattern using a multi-objectives fuzzy non-linear optimization algorithm: a case study. *Journal of water and wastewater*, 23(84), 43-55. (In Persian).
16. Mohammadrezapour, O., Yoosefdoost, I., & Ebrahimi, M. (2017). Cuckoo optimization algorithm in optimal water allocation and crop planning under various weather conditions (case study: Qazvin plain, Iran). *Neural Computing and Applications*, 31(6), 1879-1892.
17. Najafabadi, M.M., Ziaee, S., Nikouei, A., & Borazjani, M.A. (2019). Mathematical programming model (MMP) for optimization of regional cropping patterns decisions: A case study. *Agricultural Systems*, 173, 218-232.
18. Osama, S., Elkholy, M., & Kansoh, R.M. (2017). Optimization of the cropping pattern in Egypt. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4), 557-566.
19. Rafiee, V., Shourian, M., and Attari, J. (2017). Optimum crop patterning by integrating SWAT and the harmony search optimization algorithm. *Iran-Water Resources Research*, 13(3), 73-88. (In Persian).
20. Roy, R.K. (2001). *Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*. John Wiley & Sons.
21. Sabzzadeh, I., & Shourian, M. (2020). Maximizing crops yield net benefit in a groundwater-irrigated plain constrained to aquifer stable depletion using a coupled PSO-SWAT-MODFLOW hydro-agronomic model. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121349.
22. Singh, A. & Panda, S.N. (2012). Development and application of an optimization model for the maximization of net agricultural return. *Agricultural water management*, 115, 267-275.
23. Soares, F. M., Saraiva, A. M., & Drucker, D. P. (2020). Linking agrobiodiversity data through metadata standards. In Embrapa Informática Agropecuária-Resumo em anais de congresso (ALICE). *Biodiversity Information Science and Standards*, 4, 1-3.
24. Srivastava, P., & Singh, R.M. (2015). Optimization of cropping pattern in a canal command area using fuzzy programming approach. *Water Resources Management*, 29(12), 4481-4500.