نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۸، بهمن - اسفند ۱۴۰۳، ص. ۱۰۲۲-۱۰۰۷

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.6, Vol. 18, Feb.-Mar. 2025, p. 1007-1022

مقاله علمی-پژوهشی

بهینه‌سازی چندهدفه الگوهای کشت در حوضه هیرمند با تأکید بر استراتژی واردات آب مجازی: تحلیل اقتصادی، بهره‌وری آب و پایداری زیست‌محیطی

عباس راهدان[۱]، مریم محمدرضایی*[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴

چکیده

کشاورزی رکن اصلی اقتصادی حوضه هیرمند است اما با کمبود شدید آب ناشی از مصرف ناپایدار مواجه است. مطالعات قبلی الگوهای کشت را بر اساس عوامل اقتصادی و آبی در مناطق خشک بهینه کرده‌اند. با این حال، شرایط منحصربه‌فرد هیرمند نیازمند یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه متناسب با ادغام عوامل اقتصادی، اکولوژیکی و محیطی است. این مطالعه یک مدل ریاضی چندهدفه را برای تعیین الگوی کشت بهینه برای هیرمند توسعه می‌دهد تا سود کشاورز را به حداکثر برساند و در عین حال مصرف آب و اثرات زیست‌محیطی را به حداقل برساند. این مدل مناطق کشت را برای محصولات عمده منطقه‌ای با استفاده از برنامه‌ریزی خطی چندهدفه شبیه‌سازی می‌کند. در این راستا برای به‌دست آوردن الگوی کشت بهینه با اهداف موردنظر از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک روش بهینه‌سازی تصادفی استفاده شد. اطلاعات موردنظر از سازمان جهادکشاورزی و آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان و محاسبات مربوطه در نرم‌افزار MATLAB وCROPWAT صورت گرفت. سال‌زراعی تعیین شده در این پژوهش سال ۱۳۹۷-۱۳۹۸ و محصولات‌منتخب شامل گندم، ذرت، جو، انگور سیاه، خیار، بادمجان، پیاز، حبوبات و گیاهان دارویی می‌باشند. نتایج نشان‌می‌دهد که الگوی کشت‌بهینه، مصرف سالانه آب را ۲۹ درصد، شست‌شوی نیتروژن را تا ۱۴ درصد کاهش می‌دهد و بازده‌اقتصادی را ۱۱ درصد در مقایسه با شیوه های فعلی افزایش می‌دهد. واردات آب‌مجازی‌گندم و ذرت مصرف آب محلی را ۱۸ درصد کاهش می‌دهد و بازده‌اقتصادی را تا ۵ درصد بهبود می‌بخشد. این رویکرد مدل‌سازی یکپارچه، پشتیبانی تصمیم‌گیری مبتنی بر سناریو و داده‌محور را برای هدایت سیاست‌گذاری در مورد استراتژی‌های بهینه‌کشت فراهم می‌کند. نتایج نشان‌دهنده قابلیت بهینه‌سازی چندهدفه همراه با واردات آب‌مجازی برای تقویت پایدار کشاورزی با وجود کمبود آب است. این مطالعه می‌تواند به‌عنوان یک نقشه راه برای سیاست‌گذاران و کشاورزان در جهت بهبود و پایداری کشاورزی در حوضه‌هیرمند مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آب مجازی، الگوهای کشت، بهره وری اقتصادی، بهینه سازی چندهدفه، کشاورزی پایدار.

مقدمه

حوضه‌هیرمند به‌عنوان یکی از مناطق مهم کشاورزی، با کمبود حاد آب‌شیرین مواجه است که تهدیدی جدی برای پایداری اقتصاد مبتنی بر کشاورزی منطقه محسوب‌می‌شود. رشد سریع جمعیت، محدودیت‌های فزاینده در دسترسی به زمین‌های زراعی، و اثرات تغییرات آب و هوایی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای فشار بر منابع آبی این حوضه را افزایش داده است (Rastegaripour et al., 2024). با وجود این چالش‌ها، کشاورزی همچنان بیش از ۹۰ درصد از مصرف آب هیرمند را به خود اختصاص می‌دهد و روش‌های سنتی و ناکارآمد آبیاری، به‌ویژه آبیاری غرقاب، شرایط کمبود آب را تشدید کرده‌اند (Goes et al., 2016). تحقیقات گذشته نشان می‌دهند که بهینه‌سازی الگوهای کشت می‌تواند بهره‌وری مصرف آب در مناطق کم‌آب را تا حدود قابل توجهی بهبود بخشد (Jain et al., 2021; Huang et al., 2023). با این حال، اغلب مطالعات موجود بر بهینه سازی صرفاً اقتصادی تمرکز دارند که ممکن است منجر به افزایش تقاضای آب و اثرات منفی محیط زیستی شود (Ritzel et al., 1994; Loucks & Van Beek, 2017; Haggerty et al., 2023). این محدودیت‌ها، ضرورت استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه را برجسته می کند، زیرا این روش می‌تواند به‌طور همزمان به تعادل بین معیشت کشاورزان، بهره‌وری منابع و حفاظت از محیط‌زیست کمک کند (Bastian et al., 2002; Bratman et al., 2012). روش‌های بهینه

۱- دانشجوی دکتری آبخیزداری، گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲ - دانشجوی دکتری آبخیزداری، گروه علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: Mrezaei501@yahoo.com)

سازی ریاضی، به‌ویژه برنامه‌ریزی خطی چندهدفه (MOLP)[1] به عنوان یک ابزار قدرتمند برای حل مسائل پیچیده کشاورزی با اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اکولوژیکی متضاد شناخته می‌شوند (Tabesh et al., 2013). برنامه‌ریزی خطی چندهدفه توانسته است به‌طور موفقیت‌آمیزی در بهینه‌سازی سیستم‌های کشاورزی در کشورهای کم‌آب مانند ایران، هند و سوریه به کار گرفته شود. این مدل‌ها با بهینه‌سازی تخصیص منابع محدود، همزمان چندین تابع هدف، مانند سود اقتصادی، بهره‌وری آب و کاهش اثرات محیط زیستی را در نظر می‌گیرند (Kumar & Sharma, 2023., 2011; Tabesh & Asadzadeh, 2013; Elshall et al., 2020). بهینه سازی چندهدفه به فرآیند همزمان بهینه‌سازی چندین هدف متضاد اشاره دارد (Ritzel et al., 1994; Haggerty et al., 2023). در کشاورزی، هدف‌های اساسی شامل حداکثرسازی سود اقتصادی، افزایش بهره‌وری آب و حفظ پایداری محیط‌زیست در بازه بلند مدت هستند (Bratman et al., 2012). این نوع بهینه‌سازی می‌تواند الگوهای کشت را تعیین کند که تعادل مطلوبی میان اهداف مختلف ایجاد نماید. برای حل مسائل بهینه‌سازی در کشاورزی، عموماً از روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی استفاده می‌شود. برنامه‌ریزی خطی (LP) و برنامه‌ریزی خطی چندهدفه (MOLP) به‌طور خاص برای بهینه‌سازی الگوهای کشت که دربردارنده اهداف، منابع و محدودیت های گوناگون هستند، مناسب می‌باشند. مدل‌های LP دارای توابع هدف و شرایطی هستند که به‌وسیله روابط ریاضی خطی تبیین می شوند. با حل این مدل‌ها، تخصیص بهینه منابع برای دست‌یابی به اهداف تحت محدودیت‌ها مشخص می‌شود .کشاورزی در حوضه هیرمند به‌شدت وابسته به منابع آبی سطحی است، در حالی که منابع سطحی مانند رودخانه هیرمند با بحران کم‌آبی شدید و کاهش جریان آب رودخانه مواجه هستند (Soltani & Khajehpour., 2020). آبیاری ناکارآمد و مصرف بالای آب برای کشت محصولات کم‌ارزش و پرآب، به‌ویژه گندم و ذرت، منجر به استفاده نادرست از منابع آبی شده و بهره‌وری کشاورزی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده است (Nations, 2011). این ناهماهنگی بین الگوی کشت، میزان در دسترس بودن آب و بهره‌وری آبی، پایداری کشاورزی منطقه را به خطر انداخته و نیاز به اصلاح الگوی کشت را برای مدیریت بهینه منابع آبی محدود نشان‌می‌دهد. استراتژی‌های بهینه‌سازی اقتصادی به‌تنهایی، همان‌طور که در برخی مطالعات اشاره شده‌است، تقاضای کل آب کشاورزی را افزایش می‌دهند و اثرات محیط زیستی را در نظر نمی‌گیرد (Qureshi, 2004; Iqbal et al., 2018; Aliyar et al., 2022). بنابراین، نیاز به رویکردی چندهدفه برای بهینه‌سازی سیستم کشاورزی حوضه هیرمند کاملاً مشهود است. علاوه بر این، مسائل زیست‌محیطی مانند شسته شدن کودهای نیتروژنی به منابع آبی و تأثیرات اکولوژیکی ناشی از آن، وضعیت محیط‌زیستی حوضه را بحرانی‌تر کرده است (Faisal Basiri, 2009; Tewabe & Dessie, 2020). در حالی که برخی از مطالعات به بررسی بهره‌وری اقتصادی پرداخته‌اند، تحقیقات کمی به‌طور جامع عوامل زیست‌محیطی را در بهینه‌سازی الگوهای کشت لحاظ کرده‌اند. در این راستا، پژوهش‌های زیادی در ایران و جهان از LP و MOLP به‌منظور بهینه‌سازی‌های مختلف در کشاورزی بهره برده‌اند، که در ادامه به چند نمونه اشاره می شود. عبد شاهی و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از مدل بهینه‌سازی چندهدفه و تئوری عدم قطعیت، الگوی کشت بهینه در ملا ثانی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش سطح انحراف از محدودیت ها باعث کاهش منافع ناخالص و ایجاد تعادل بین سود و حفظ الگوی کشت می‌شود. صالحی شفا و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه، مدل بهینه‌سازی برای دشت شهریار طراحی کردند. نتایج نشان داد بهره‌برداری بهینه از منابع آبی، سطح زیر کشت و مصرف آب را به‌ترتیب ۲۰/۴۴ و ۳۹/۷۱ درصد کاهش می‌دهد. جهان تیغ (۱۴۰۱) با بررسی سه سناریوی بهینه‌سازی کشت در گرگان نشان داد که مدیریت مصرف آب می‌تواند میزان آب کشاورزی را از ۲۱۳/۶۲۰ میلیون مترمکعب به ۲۳/۴۲۷ میلیون مترمکعب کاهش دهد. این روش بازده اقتصادی و تولید را بهینه می‌کند. شاه‌نظری و صادقی (۱۴۰۲) با بررسی معیارهای زیست‌محیطی و اقتصادی در حوضه تجن نشان دادند که کاهش سطح زیر کشت و مصرف آب به ترتیب ۲۶ و ۳۴ درصد، باعث افزایش ۶۱ درصدی سوددهی و بهبود بهره‌وری فیزیکی، زمین و اقتصادی شد. اعظمی و همکاران (۱۴۰۳) با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی فازی برای بهینه‌سازی کشت در شهرستان صحنه نشان دادند که الگوی فعلی از نظر زیست‌محیطی بهینه نیست. اصلاح تدریجی کشت می‌تواند مصرف آب را کاهش داده و در عین حال سود و عملکرد محصول را بهبود بخشد.Al-Zahrani. و همکاران (۲۰۱۶) با مدل‌سازی چندهدفه توزیع آب در ریاض نشان دادند که با افزایش تقاضای آب تا ۲۰۵۰، مصرف آب شیرین‌شده و فاضلاب تصفیه‌شده باید افزایش یابد، در حالی که منابع آب زیرزمینی از ۲۰۳۵ به‌بعد با کمبود مواجه خواهند شد (Al-Zahraniet al., 2016). Li و همکاران (۲۰۱۷) با توسعه مدل برنامه ریزی فازی چندهدفه در مناطق خشک چین نشان دادند که این مدل سود اقتصادی را ۷/۰۵ تا ۱۶/۶۵ درصد افزایش و تبخیر و تعرق را ۲۰/۹۶ تا ۲۳.۱۰ درصد کاهش می‌دهد و در مدیریت عدم قطعیت‌ها بهتر از روش‌های سنتی عمل می‌کند (Li et al., 2017). Najafabadi و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ساختاری چندهدفه (MOSP) برای بهینه‌سازی کشت در استان اصفهان نشان دادند که این مدل مصرف آب را ۱۷ درصد کاهش و سود و تولید را به‌ترتیب ۵۸ و ۱۱ درصد افزایش می‌دهد

1- Multi-objective linear optimization

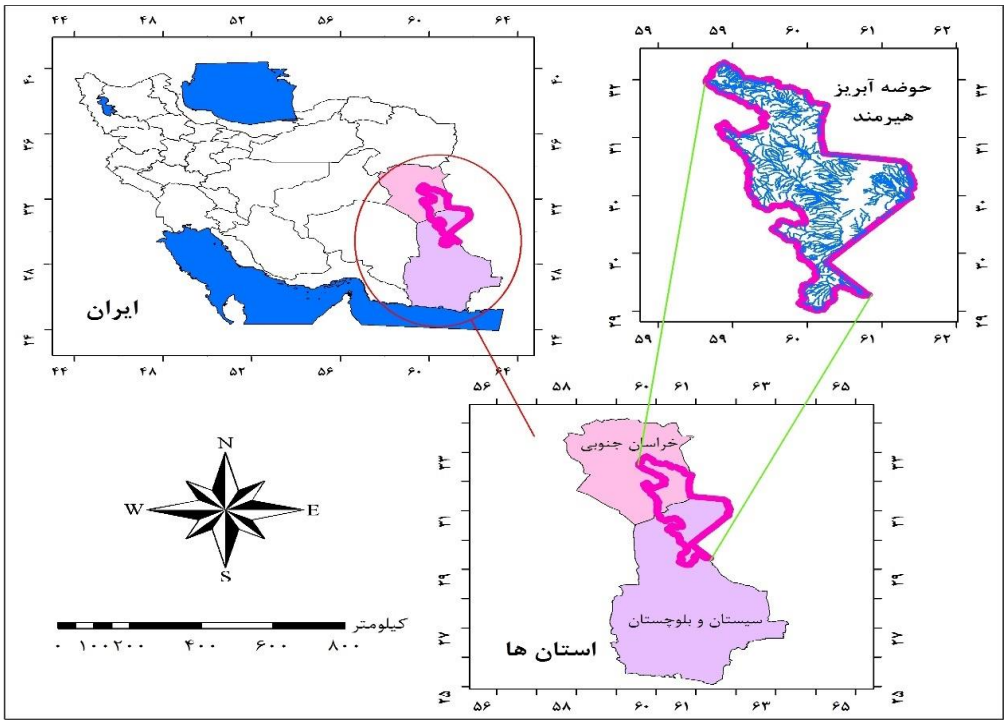
(Najafabadi et al., 2019). Shirshahi و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از مدل بهینه‌سازی دوسطحی در قزوین نشان دادند که کاهش ۱۰ درصدی آب آبیاری باعث افزایش ۲۵ دلار به‌ازای هر مترمکعب بهره‌وری اقتصادی شد و سود خالص ۶۴ درصد نسبت به الگوی فعلی افزایش یافت. همچنین، مصرف آب از ۱۰۰ درصد به ۸۰ درصد کاهش یافت (Shirshahi et al., 2020). Kaleeswaran و همکاران (۲۰۲۱) با طراحی مدل بهینه‌سازی ازدحام ذرات دوتایی (MCS-BPSO) برای انتخاب محصولات، نشان دادند که این الگوریتم در شرایط خاص مانند محدودیت سطح برداشت و دسترسی به آب مؤثر است و به کشاورزان کمک می‌کند تا محصول مناسب تری انتخاب کنند و سود و بهره‌وری را افزایش دهند Mohammadzadeh(Kaleeswaran et al., 2021) و همکاران (۲۰۲۲) با تعیین الگوی کشت بهینه در دشت مراغه – بناب نشان دادند که کاهش مصرف آب در سناریوهای مختلف منجر به افزایش بازده خالص، بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی، و بهره‌وری زمین شد. همچنین، اثرات منفی مانند کاهش اشتغال و گرمایش جهانی کاهش یافت (Mohammadzadeh et al., 2022). Kumar و (2023) Sharma نشان دادند که در سیستم‌های کشاورزی مناطق کوهستانی هیماچال پرادش، منابع به‌طور کامل استفاده نمی‌شوند و با بهینه‌سازی استفاده از منابع از طریق برنامه‌ریزی خطی، درآمد خالص کشاورزان افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش دسترسی به منابع کمیاب به بهبود معیشت و درآمد آن‌ها کمک می‌کند (Kumar & Sharma, 2023). با این حال، اگرچه مطالعات پیشین مفید بوده‌اند، اکثر آن‌ها تنها به عوامل اقتصادی و منابع آب پرداخته و اثرات زیست‌محیطی را نادیده گرفته‌اند. برای ارائه نگاهی جامع به پایداری اقتصادی، اکولوژیکی و زیست‌محیطی، نیاز به مدلی است که این جنبه‌ها را نیز در نظر بگیرد. منطقه هیرمند با ویژگی‌های خاص منابع آب و خاک، نیازمند یک مدل بهینه‌سازی سفارشی است. این پژوهش به توسعه یک مدل ریاضی چندهدفه برای بهینه‌سازی الگوهای کشت در این منطقه پرداخته که شامل سه هدف اصلی: حداکثرسازی بازده اقتصادی، حداقل‌سازی مصرف آب و شست‌شوی نیتروژن است. این مدل می تواند نواحی کشت بهینه‌ای برای محصولات منطقه تعیین کند که بهترین تعادل را میان سودآوری، کارایی مصرف آب و پایداری محیطی برقرار سازد. علاوه بر این در پژوهش حاضر، با استفاده از مدل‌سازی یکپارچه و برنامه‌ریزی خطی چندهدفه به بهینه‌سازی همزمان اهداف اقتصادی، بهره‌وری آب و پایداری زیست‌محیطی می پردازد. این مدل با هدف تعیین الگوی بهینه کشت در منطقه، تخصیص بهینه‌ای برای افزایش سود کشاورزان، کاهش مصرف آب و حداقل‌سازی اثرات زیست‌محیطی ارائه می‌دهد. علاوه بر این، استراتژی تعیین الگوی کشت با در نظر گرفتن آب مجازی برای جبران کمبود منابع آبی از طریق تجارت محصولات نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. این رویکرد، با ایجاد چارچوبی جامع برای بهینه سازی چندهدفه و تعیین ارزش اقتصادی آب، بینش‌های جدیدی برای توسعه سیاست‌های کشاورزی پایدار در مناطق کم‌آب فراهم می‌کند. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به بهبود استراتژی‌های مدیریت آب و غذا در سطح جهانی کمک نماید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه:

حوضه آبریز هیرمند با مساحتی بالغ بر ۳۸۰۰۰۰ کیلومتر مربع بین سه کشور ایران (۱۲٪) افغانستان (۸۴ ٪) و پاکستان (۴٪) مشترک می‌باشد. این حوضه بین طول ″۳۳ ′۵۹ °۵۹ تا ″۳۳ ′۶۹ °۶۹ و عرض شمالی ′۶ °۲۹ تا ′۱۵ °۳۴ واقع شده‌است. رودخانه‌های این حوضه از کوه‌های بابا یغما از سلسله کوه‌های هندوکش در شصت کیلومتری غرب کابل سرچشمه می‌گیرد و بعد از طی مسافت ۱۰۵۰ کیلومتری به دریاچه هامون در سیستان ایران می‌رسد. رودخانه‌های اصلی در حوضه هیرمند، ارغنداب، خاش‌رود و فراه‌رود می‌باشند که در انتها به هامون هیرمند، هامون پوزک و هامون صابری می‌ریزند (زارع‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸). اراضی کشاورزی در این حوضه بالغ بر ۱۵۰۰۰ کیلومتر مربع گزارش شده که طیف متنوعی از محصولات زراعی و باغی را شامل می‌شود. مجموع کل کشت محصولات آبی در این منطقه، از میزان با ۱۰۳ هزار هکتار در سال ۱۹۹۰ به حدود ۱۶۷ هزار هکتار در سال ۲۰۱۱ ، با حدود ۶۲ درصد افزایش رسیده است (پور اصغر سنگاچین و ابراهیمی‌خوسفی، ۱۳۹۷). شکل (۱) موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز فرامرزی هیرمند را نشان‌می‌دهد.

تحقیق حاضر با هدف بهینه‌سازی الگوهای کشت در حوضه آبریز هیرمند، یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه (MOLP) طراحی کرده است. برنامه ریزی خطی چندهدفه، روشی برای بهینه‌سازی مسائل است، که در آن چندین هدف باید به‌طور همزمان بهینه شوند. این اهداف معمولاً با یکدیگر تضاد دارند، مانند حداکثرسازی سود، کاهش مصرف آب و حفظ محیط‌زیست. در یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه، تصمیم‌گیرنده باید تعادلی میان این اهداف پیدا کند. این روش برای مسائل پیچیده‌ای که نیاز به تصمیم‌گیری در شرایط مختلف دارند، مانند کشاورزی و مدیریت منابع‌طبیعی، کاربرد دارد (Deb et al., 2016). در این پژوهش، مدل مذکور به‌منظور بهینه سازی الگوهای کشت در حوضه آبریز هیرمند، سه هدف کلیدی را دنبال می‌کند؛ این اهداف شامل حداکثر کردن بازده اقتصادی کل، به حداقل رساندن کل مصرف آب و همچنین به حداقل رساندن شست شوی نیتروژن می‌باشد. اینها نشان دهنده اهداف حیاتی اقتصادی، کشاورزی و محیط زیستی برای برنامه ریزی کشاورزی پایدار در منطقه است. مدل MOLP به‌صورت زیر فرموله شده‌است (رابطه ۱، ۲ و ۳):



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز فرامرزی هیرمند

$$Maximize\ Z1 = \sum Ri\ xi \quad \text{(حداکثر بازده اقتصادی کل)} \qquad (۱)$$

$$Minimize\ Z2 = \sum Wi\ xi \quad \text{(آب کل مصرف حداقل سازی)} \qquad (۲)$$

$$Minimize\ Z3 = \sum Ni\ xi \quad \text{(نیتروژن: شست شوی حداقل سازی)} \qquad (۳)$$

در اینجا:

Z1 = کل بازده اقتصادی سالانه محصولات (ریال)	Z2 = کل مصرف آب سالانه محصولات کشاورزی (متر مکعب)
Z3 = شست‌شوی کل نیتروژن سالانه از کود (کیلوگرم)	Ri = بازده اقتصادی به‌ازای هر هکتار محصول i (ریال در هکتار)
Wi = نیاز آبی در هر هکتار محصول i (متر مکعب در هکتار)	Ni = شست‌شوی نیتروژن در هکتار برای محصول i (کیلوگرم در هکتار)
xi = سطح زیر کشت محصول i (هکتار)	

متغیرهای تصمیم‌گیری:

متغیرهای تصمیم در این مدل، سطح زیر کشت هر محصول (هکتار) است. بر اساس آمار کشاورزی، محصولات عمده کشت‌شده در منطقه شامل گندم، ذرت، جو، انگور سیاه، خیار، بادمجان، پیاز، حبوبات و گیاهان دارویی است. بنابراین مدل ۹ متغیر تصمیم‌گیری دارد که سطح زیر کشت هر محصول را مشخص می‌کند:

$x1$ = سطح زیر کشت گندم	$x2$ = سطح زیر کشت ذرت
$x3$ = سطح زیر کشت جو	$x4$ = سطح زیر کشت انگور سیاه
$x5$ = سطح زیر کشت خیار	$x6$ = سطح زیر کشت بادمجان
$x7$ = سطح زیر کشت پیاز	$x8$ = سطح زیر کشت حبوبات
$x9$ = سطح زیر کشت گیاهان دارویی	

محدودیت‌ها:

$$\sum xi \leq X \quad \sum Wi\, xi \leq W \quad xi \geq 0$$

در اینجا:

X = کل زمین کشاورزی موجود (هکتار)

W = کل آب موجود برای آبیاری (مترمکعب)

آمار و اطلاعات مورد نیاز تحقیق شامل سطح زیر کشت هر محصول (هکتار) در منطقه، آب مصرفی هر محصول (مترمکعب در هکتار)، نیاز آبی محصول (مترمکعب در هکتار)، میزان شست‌شوی نیتروژن (کیلوگرم در هکتار)، با مراجعه به سازمان جهاد کشاورزی و سازمان آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان به‌دست آمده است. الگوی کشت در این تحقیق بر اساس آمار سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ تدوین شده‌است. محاسبه نیاز آبی هر محصول با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT و با استفاده از روش متداول تحت عنوان FAO Penman-Monteith محاسبه شد. در این روش میزان خالص آب مورد نیاز گیاهان زراعی متناسب با خصوصیات گیاه و اقلیم منطقه تعیین شد و با منظور نمودن راندمان آبیاری ۴۰ درصد میزان ناخالص آب مورد نیاز محاسبه گردید. داده‌های اقلیمی مورد نظر از اداره هواشناسی استان مورد نظر استخراج شد. پارامترهای محاسبه بازده اقتصادی محصول شامل ۱- قیمت فروش محصول (دلار)، ۲- میانگین عملکرد (کیلوگرم در هکتار) و ۳- هزینه‌های تولید محصولات کشاورزی شامل اجاره بهای آب و زمین، هزینه‌های آماده سازی زمین (شخم، رفع عوارض و موانع)، هزینه‌های مرحله کاشت (نیروی انسانی اجاره بهای ماشین بذر، سم قبل از کاشت، هزینه‌های مرحله داشت، کود آبیاری وجین) و هزینه‌های مرحله برداشت (کرایه، حمل کارمزد ماشین آماده سازی مزرعه) و سایر هزینه‌های تولید نیز از سازمان جهادکشاورزی استان سیستان و بلوچستان گردآوری شد. در جدول (۱) اطلاعات مربوط به سطح زیر کشت هر محصول (هکتار) در منطقه، آب مصرفی هر محصول (مترمکعب در هکتار)، نیاز آبی محصول (مترمکعب در هکتار) و میزان شست‌شوی نیتروژن (کیلوگرم در هکتار) و در جدول (۲) پارامترهای محاسبه بازده اقتصادی محصول با اقتباس از سازمان‌های مربوطه و نرم‌افزار CROPWAT آورده شده‌است. اعداد در جدول به‌صورت تقریبی و گرد شده برای انجام بهینه سازی آسان‌تر نگارش شده‌اند. برای حبوبات و گیاهان دارویی گیاهان منتخب بررسی شد.

جدول ۱- اطلاعات مربوط به الگوی کشت مشاهده‌شده در سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ (منبع: سازمان جهاد کشاورزی استان سیستان و بلوچستان و نرم‌افزار CROPWAT)

مشخصات	محصول‌های منتخب در الگوی کشت مشاهده‌شده								
	گندم	ذرت	جو	انگور سیاه	خیار	بادمجان	پیاز	حبوبات	گیاهان دارویی
سطح زیر کشت (هکتار)	۵۰۰۰	۴۰۰۰	۳۰۰۰	۲۰۰۰	۲۵۰۰	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۵۰۰
آب مصرفی محصول (مترمکعب در هکتار)	۵۵۰۰	۷۲۰۰	۴۲۰۰	۴۸۰۰	۵۳۰۰	۵۷۰۰	۶۳۰۰	۲۶۰۰	۲۸۰۰
نیاز آبی محصول (مترمکعب در هکتار)	۶۲۰۰	۶۸۰۰	۴۹۰۰	۴۴۰۰	۶۱۰۰	۶۳۰۰	۶۴۰۰	۲۴۰۰	۲۵۰۰
میزان شست‌شوی نیتروژن (کیلوگرم در هکتار)	۹۵	۸۰	۷۵	۵۵	۶۰	۵۰	۴۵	۲۵	۱۵

جدول ۲- پارامترهای بازده اقتصادی محصول (منبع: سازمان جهاد کشاورزی استان سیستان و بلوچستان و مصاحبه و تکمیل پرسش‌نامه)

مشخصات	محصول‌های منتخب در الگوی کشت مشاهده‌شده								
	گندم	ذرت	جو	انگور سیاه	خیار	بادمجان	پیاز	حبوبات	گیاهان دارویی
متوسط عملکرد محصول (تن در هکتار)	۳/۹	۴/۶	۲/۶	۱۲/۳	۲۴/۷	۲۶/۲	۳۳/۸	۲/۸	۳/۱
قیمت فروش (ریال بر تن)	۱۲۰	۴۵	۷۰/۵	۵۱۵	۴۹۵	۲۶۰	۲۳۰	۸۴۵	۳۷۰
هزینه تولید (ریال بر تن)	۴۹۰	۳۸/۵	۱۷۰	۴۲۰	۳۴۰	۳۹۰	۴۴۰	۲۴۰	۱۶۰

برای تخصیص بهینه آب و زمین با توجه به محدودیت‌ها و قیدهای مسئله، الگوی بهینه اراضی از روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک استفاده شده‌است. الگوریتم ژنتیک در بهینه سازی مسائل پیچیده و غیر خطی مانند بهینه سازی الگوی کشت مورد توجه پژوهشگران مختلف قرار گرفته است (عبد شاهی و همکاران، ۱۳۹۹: حسینی و مازندرانی زاده، ۱۴۰۱: شاه نظری و صادقی، ۱۴۰۲). این الگوریتم یک متد آماری برای بهینه سازی و جزئی از هوش مصنوعی است که اساس آن بر مبنای فرایند تکامل است. مشابه سیر تکامل

بیولوژیکی الگوریتم ژنتیک نیز یک سیر تکاملی دارد که با تولید نسل های مجموعه جواب‌های متعدد از جواب‌های امکان‌پذیر، سعی می‌کند به‌سوی جواب بهینه عمومی حرکت کند. با این روش در نسل‌ها به جواب‌های مناسب‌تر و بهتر، امکان بقا و مشارکت در تولید جواب‌ها و نسل‌های جدید داده‌می‌شود (وفایی‌نژاد، ۱۳۹۵).

در تحقیق حاضر جهت طبقه بندی آمار و اطلاعات تحقیق از نرم افزار Excel و برای کدنویسی و حل توابع هدف الگوریتم ژنتیک از نرم‌افزار MATLAB بهره گیری شد. برای دست‌یابی به پاسخ بهینه و مناسب در الگوریتم ژنتیک نیاز به تنظیم پارامترهایی مانند اندازه جمعیت، تعداد تکرار، میزان جهش و نرخ تقاطع است. مقادیر بهینه پارامترهای اولیه الگوریتم ژنتیک بر اساس تجربه از تکرارهای متعدد اجرای الگوریتم و به‌صورت آزمون و خطا به‌دست آمده است. با تغییر این پارامترها و مقایسه نتایج پاسخ‌های بهینه توابع هدف در هر حالت بهترین مقادیر برای این پارامترها برآورد شد (جدول ۳).

جدول ۳- مقادیر پارامترهای استفاده شده در الگوریتم ژنتیک

تعداد تکرار	اندازه جمعیت اولیه	احتمال تقاطع	احتمال جهش
۵۰۰	۲۰۰	۰/۵	۰/۲

معرفی و تحلیل سناریو

این مدل برای تحلیل سناریوهای مختلف جهت ارائه بینش‌های عملی و معنادار استفاده خواهد شد. این تحلیل شامل بررسی تأثیر تغییرات پارامترهایی مانند میزان آب موجود و اقتصاد محصولات بر الگوهای بهینه کشت است. سناریوهای مورد بررسی شامل:

سناریوی پایه: استفاده از شرایط فعلی شامل میزان آب موجود، بازده محصولات، هزینه‌ها و مناطق کشت.

سناریوی کاهش دسترسی به آب: کاهش ۲۰ درصدی کل آب موجود برای آبیاری.

سناریوی ارتقای کارایی مصرف: کاهش ۲۰ درصدی نیاز آبی هر محصول از طریق اصلاح روش‌های آبیاری.

سناریوی تغییرات اقتصادی محصول: افزایش یا کاهش ۲۰ درصدی قیمت بازار و هزینه‌های تولید هر محصول.

سناریوی محاسبه الگوی کشت مبتنی بر آب مجازی و واردکردن محصولات آب‌بر و کم بازده: تعیین ارزش اقتصادی آب و حذف کشت محصولات آب‌بر با واردکردن آنها

در این پژوهش، بخش کلیدی محاسبه الگوی کشت مبتنی بر آب مجازی است که در سناریوی نهایی بررسی می‌شود و این امر به‌عنوان نوآوری تحقیق محسوب می‌گردد. مفهوم آب مجازی به مقدار آبی اشاره دارد که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم در فرآیند تولید یک محصول مصرف می‌شود (Sun et al., 2021). این مفهوم می‌تواند در تعیین الگوی کشت بهینه مورد استفاده قرار گیرد و با توجه به آن، می‌توان به این سؤال پاسخ داد که چه محصولی، در کجا، به چه میزان و در چه بازه زمانی تولید شود. استفاده از مفهوم آب مجازی در تعیین الگوی کشت بهینه در سطح یک منطقه می‌تواند تأثیر قابل توجهی در دست‌یابی به توسعه پایدار کشاورزی داشته‌باشد. همچنین، تهدید امنیت غذایی، کمبود منابع آبی و افزایش نیاز به کشاورزی از جمله عواملی هستند که نیاز به مدیریت بهینه منابع آب را ضروری می‌سازند. بنابراین، دست‌یابی به الگوی کشت بهینه به‌منظور افزایش بهره‌وری و کاهش مصرف آب، امری حیاتی است (کلاه‌ی و همکاران، ۱۴۰۱). به همین دلیل، یکی از اهداف اصلی این مطالعه، تعیین الگوی کشت بهینه بر اساس مفهوم آب مجازی است که کشت بهینه در سطح منطقه را با توجه به اهداف پژوهش مشخص می‌کند.

در این پژوهش مقدار آب مجازی مربوط به هر یک از محصولات با کمک رابطه (۴) به‌دست آمد: (Champagian and Hoekstra, 2003).

$$Vw_c = \frac{CWR}{Ya} \quad (۴)$$

در رابطه بالا Vw_c میزان آب مجازی گیاه برحسب متر مکعب بر تن، CW_R نیاز آبی گیاه برحسب متر مکعب بر هکتار و Ya میزان عملکرد گیاه برحسب تن‌برهکتار می‌باشد. پس از محاسبه میزان آب مجازی، سود دهی محصولات براساس نسبت سود به هزینه‌ها محاسبه می‌شود. درآمدی که از هر محصول به‌دست می‌آید، براساس عملکرد و قیمت محصولات محاسبه می‌شود. رابطه‌ای که برای محاسبه سود دهی محصولات استفاده شده‌است به‌صورت زیر می باشد:

$$P = \frac{BTotal}{CTotal} \quad (۵)$$

در رابطه بالا، B_{Total} درآمد کل برحسب ریال، C_{Total} هزینه کل برحسب ریال و P سوددهی محصول می‌باشند.

در پژوهش حاضر، هم چنین ارزش اقتصادی آب‌بر اساس ویژگی های گیاه و اقلیم از رابطه (۶) به‌دست آمد (گل پذیر و همکاران، ۱۴۰۲). پارامترهای تعیین ارزش اقتصادی محصول، نیز از اداره هواشناسی و هم چنین سازمان جهادکشاورزی استان سیستان و بلوچستان استخراج شد. متوسط ارزش اقتصادی آب کشاورزی استفاده شده نیز از روش وزن دهی به سه روش زیر محاسبه شد. ۱- وزنده‌ی بر اساس مساحت زیر کشت هر محصول ۲- وزن دهی بر اساس میزان درآمد حاصل ازهر محصول و ۳- وزنده‌ی بر اساس آب مصرفی هر محصول.

$$P_W = \frac{P_Y \times (K_Y \times Y_m)}{ET_0} \quad (۶)$$

در رابطه بالا، Y_m حداکثر عملکرد، ET_0 تبخیر و تعرق مرجع، K_Y فاکتور حساسیت محصول به آبیاری و P_Y و P_W به‌ترتیب ارزش محصول و آب می‌باشد.

در این سناریو محصولات آب‌بر با محاسبات مربوط به آب مجازی تعیین می‌شوند و به‌جای کشت آنها از استراتژی واردات آب مجازی استفاده می‌شود و در نهایت بهینه سازی با حذف محصولات آب‌بر انجام‌می‌شود.

نتایج و بحث

سناریوی پایه

نتایج نشان‌می‌دهد که الگوی کشت بهینه در شرایط اولیه، کاهش ۶۰ تا ۷۰ درصدی کشت پرآب‌ترین محصولات مانند ذرت، خیار و بادمجان را به‌دنبال دارد (جدول ۴). این محصولات به‌ازای هر واحد درآمد اقتصادی، مصرف آب بالایی دارند. در مقابل، محصولات مانند انگور، پیاز و گیاهان دارویی به‌دلیل بازده اقتصادی بالا در هر متر مکعب آب مصرفی، ۸۰ تا ۱۴۰ درصد افزایش سطح زیر کشت بهینه را تجربه می‌کنند. محصولات عمده مانند گندم و جو با کاهش ۴ تا ۷ درصدی در سطح فعلی خود حفظ می‌شوند، زیرا به آب نسبتاً کمی نیاز دارند و برای امنیت غذایی ضروری هستند. این بهینه‌سازی به نفع محصولاتی است که بازده اقتصادی بالاتری را به‌ازای هر واحد آب مصرفی ارائه می‌دهند. بنابراین، محصولات با شدت آب بالا، مانند ذرت، خیار و بادمجان، به حداقل می‌رسند، در حالی که محصولات کم آب‌بر، از جمله انگور، پیاز و گیاهان دارویی به حداکثر می‌رسند. این نتایج نشان‌دهنده نیاز به بهینه‌سازی منابع آبی در شرایط کمبود آب و اهمیت توجه به بازده اقتصادی محصولات در برنامه‌ریزی کشاورزی است. شکل شماره (۲) مقایسه مساحت کنونی و مساحت بهینه‌شده محصولات کشاورزی را نشان‌می‌دهد. بر اساس جدول شماره (۴) و شکل شماره (۲) گندم با مساحت کنونی ۵۰۰۰ هکتار به ۴۸۰۰ هکتار در حالت بهینه کاهش یافته که تغییر چندانی نداشته‌است (۴- درصد). کاهش چشم‌گیری در سطح زیر کشت ذرت مشاهده می‌شود که از ۴۰۰۰ هکتار به ۱۲۰۰ هکتار رسیده (۷۰- درصد). جو نیز کاهش اندکی داشته و از ۳۰۰۰ به ۲۸۰۰ هکتار رسیده است (۷- درصد). در مقابل، برخی محصولات افزایش قابل توجهی در سطح کشت بهینه داشته‌اند. انگور با ۱۰۰ درصد افزایش از ۲۰۰۰ به ۴۰۰۰ هکتار رسیده است. پیاز نیز ۸۰ درصد افزایش داشته و از ۱۰۰۰ به ۱۸۰۰ هکتار رسیده است. چشمگیرترین افزایش مربوط به گیاهان دارویی است که با ۱۴۰ درصد رشد از ۵۰۰ به ۱۲۰۰ هکتار افزایش یافته‌است. این تغییرات نشان‌می‌دهد که الگوی کشت بهینه به‌سمت محصولاتی مانند انگور، پیاز و گیاهان دارویی متمایل شده، در حالی که سطح زیر کشت محصولاتی مانند ذرت، خیار و بادمجان کاهش یافته‌است.

نتایج نشان‌می‌دهد که در مقایسه با الگوی کشت فعلی، الگوی بهینه مصرف سالانه کل آب را ۲۹ درصد و آب‌شویی نیتروژن را ۱۴ درصد کاهش می‌دهد. این تغییر به‌سمت گیاهان دارویی که نیاز کمتری به آب و نیتروژن دارند، منجر می‌شود. همچنین، تغییر به‌سمت محصولات با ارزش بالاتر مانند انگور و گیاهان دارویی باعث افزایش ۱۱ درصدی بازده اقتصادی نسبت به روش‌های فعلی می‌شود (جدول ۵). این نتایج نشان‌دهنده پیشرفت قابل توجهی در تحقق اهداف پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی است. بهینه‌سازی چندهدفه یک الگوی کشت برتر را شناسایی می‌کند که به کاهش استفاده از منابع و اثرات زیست‌محیطی کمک می‌کند و همزمان با حمایت از محصولات با ارزش بالا و کم‌نیاز، کارایی اقتصادی را افزایش می‌دهد. این یافته‌ها به وضوح قدرت بهینه‌سازی مبتنی بر داده را در شناسایی راه‌حل‌های برد- برد نشان‌می‌دهد.

جدول ٤- الگوهای کشت بهینه

محصول	مساحت کنونی (هکتار)	مساحت بهینه‌شده (هکتار)	تغییر درصدی
گندم	۵۰۰۰	۴۸۰۰	٪-۴
ذرت	۴۰۰۰	۱۲۰۰	٪-۷۰
جو	۳۰۰۰	۲۸۰۰	٪-۷
انگور	۲۰۰۰	۴۰۰۰	٪۱۰۰
خیار	۲۵۰۰	۹۰۰	٪-۶۴
بادمجان	۱۵۰۰	۶۰۰	٪-۶۰
پیاز	۱۰۰۰	۱۸۰۰	٪۸۰
حبوبات	۱۵۰۰	۱۲۰۰	٪-۲۰
گیاهان دارویی	۵۰۰	۱۲۰۰	٪۱۴۰

شکل ۲- مقایسه سطوح زیر کشت محصولات در دو حالت فعلی و بهینه

جدول ۵- تأثیر الگوی کشت بهینه‌شده بر معیارهای اقتصادی و زیست‌محیطی

معیار	جریان بهینه‌شده	جریان کنونی	تغییر درصدی
بازگشت اقتصادی کل	۷۸ میلیون دلار	۷۰ میلیون دلار	٪۱۱
مصرف آب کل	۱۰۷ میلیون مترمکعب	۱۵۰ میلیون متر مکعب	٪-۲۹
شست و شوی نیتروژن	۲۱۵۰ تن	۲۵۰۰ تن	٪-۱۴

سناریوی بهبود راندمان مصرف آب

بهبود راندمان آبیاری باعث افزایش کشت انگور، پیاز و گیاهان دارویی و کاهش کشت ذرت و خیار می‌شود. با افزایش کارایی مصرف آب، زمین‌های بیشتری می‌توان به محصولات پربازده و کم‌مصرف اختصاص داد، به‌طوری که همان مقدار آب با مصرف کمتر در هکتار مورد استفاده قرار گیرد. در سناریوی بهبود راندمان آبیاری، با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته مانند آبیاری قطره‌ای و بهبود شیوه‌های کشاورزی، نیاز به آب محصولات تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. با در دسترس بودن ۱۵۰ میلیون متر مکعب آب، این کاهش مصرف آب در هکتار به تخصیص بیشتر زمین به انگور، پیاز و گیاهان دارویی منجر می‌شود، که این محصولات دارای عملکرد اقتصادی بالا و نیاز آبی نسبتاً کمی هستند. در این سناریو، سطح زیر کشت این محصولات ۲/۵ تا ۳ درصد نسبت به الگوی پایه بهینه افزایش می‌یابد. در عین حال، محصولات پرآب مانند ذرت و خیار با کاهش ۶ تا ۸ درصدی در سطح زیر کشت بهینه مواجه هستند (جدول ۶). صرفه‌جویی در مصرف آب به‌دلیل افزایش بهره‌وری باعث می‌شود تا زمین بیشتری به محصولاتی با عملکرد بالاتر و مصرف آب کمتر اختصاص یابد. بهبود راندمان آبیاری با همان دسترسی به آب، مدل بهینه‌سازی را به نفع محصولاتی می‌سازد که بازده بیشتری در هر قطره ارائه می‌دهند. در نهایت، افزایش کشت انگور، پیاز و گیاهان دارویی و کاهش تولید ذرت و خیار به حفظ سود و مدیریت بهتر منابع آب کمک می‌کند. نمودار ۴ براساس جدول ۶، مقایسه سطح بهینه پایه و سطح بهینه با عملکرد بهبودیافته محصولات کشاورزی را نشان‌می‌دهد. در بیشتر محصولات، تغییرات اندکی در سطح کشت بهینه با بهبود کارایی آبیاری مشاهده می‌شود. گندم با افزایش از ۵۰۰۰ به ۵۱۰۰ هکتار، انگور با افزایش از ۴۰۰۰ به ۴۱۰۰ هکتار، و گیاهان دارویی با افزایش از ۱۸۰۰ به ۱۸۵۰ هکتار، روند مثبتی را نشان می‌دهند. در مقابل، برخی محصولات کاهش اندکی داشته‌اند، مانند ذرت که از ۱۵۰۰ به ۱۴۰۰ هکتار و خیار که از ۱۲۰۰ به ۱۱۰۰ هکتار کاهش یافته‌است. مجموع سطح زیر کشت در هر دو حالت برابر با ۱۶۵۰۰ هکتار است، که نشان‌می‌دهد بهبود کارایی آبیاری بیشتر بر توزیع مجدد سطح کشت بین محصولات مختلف تأثیر گذاشته است تا افزایش کل سطح زیر کشت.

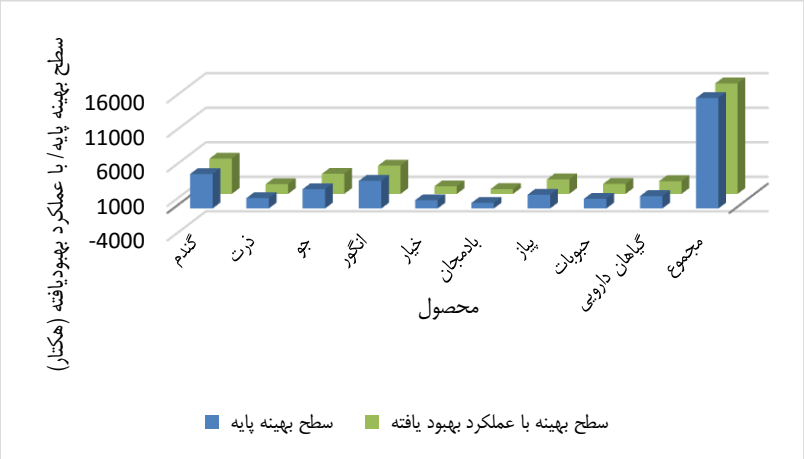
سناریوی کاهش در دسترس بودن آب

با کاهش ۲۰ درصدی در دسترس بودن آب آبیاری، مدل بهینه‌سازی سطح زیر کشت فشرده‌ترین محصولات، مانند ذرت و خیار، را ۱۷ تا ۲۰ درصد نسبت به راه‌حل بهینه پایه کاهش می دهد. در مقابل، پیازها و سبزی‌ها ۴ تا ۱۰ درصد افزایش در سطوح بهینه را تجربه می‌کنند (جدول ۷). این الگوی کشت به‌گونه‌ای تطبیق می‌یابد که با حفظ سودآوری و به حداقل رساندن مصرف آب در شرایط عرضه کمتر، بهینه باشد. این فرآیند تضمین می‌کند که الگوی کشت به‌رغم کمبود آب، از نظر اقتصادی مولد باقی بماند. در شرایط کم‌آبی، تأمین آب به نفع محصولات با مصرف آب کمتر به‌ازای هر واحد درآمد اقتصادی می‌شود. به همین ترتیب، تخصیص مجدد زمین از محصولات پرآب به محصولات کم‌آب موجب حفظ درآمد مزرعه و

در عین حال کاهش نیازهای آبیاری می‌گردد. شکل (۴) چگونگی تغییرات سطح کشت محصولات در شرایط کمبود آب را نشان‌می‌دهد. در این شرایط، برخی محصولات افزایش و برخی کاهش سطح کشت داشته‌اند، اما مجموع سطح زیر کشت همچنان ۱۶۵۰۰ هکتار باقی مانده‌است.

جدول ٦- تأثیر بهبود کارایی آبیاری بر تخصیص محصولات

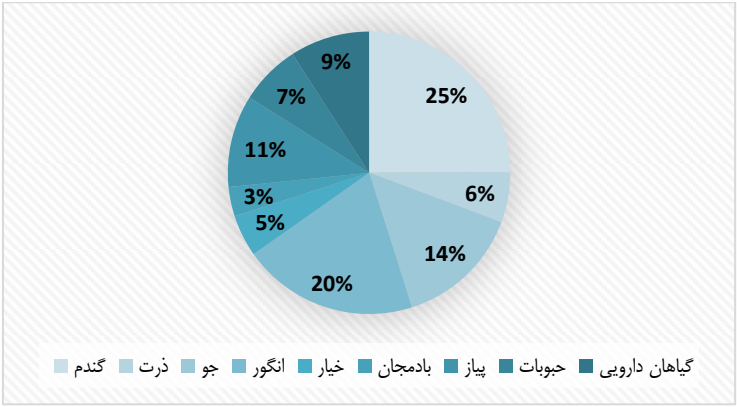
محصول	سطح بهینه پایه (هکتار)	سطح بهینه با عملکرد بهبود یافته (هکتار)
گندم	۵۰۰۰	۵۱۰۰
ذرت	۱۵۰۰	۱۴۰۰
جو	۲۸۰۰	۲۹۰۰
انگور	۴۰۰۰	۴۱۰۰
خیار	۱۲۰۰	۱۱۰۰
بادمجان	۸۰۰	۷۰۰
پیاز	۲۰۰۰	۲۱۰۰
حبوبات	۱۴۰۰	۱۴۵۰
گیاهان دارویی	۱۸۰۰	۱۸۵۰
مجموع	۱۶۵۰۰	۱۶۵۰۰



شکل ۳- تأثیر راندمان آبیاری بر محصولات مختلف

جدول ۷- تأثیر کمبود آب‌بر تخصیص محصول: پایه در مقایسه با کاهش دسترسی به آب

محصول	مساحت بهینه با کاهش آب (هکتار)	درصد تغییر
گندم	۵۲۰۰	٪۴
ذرت	۱۲۰۰	٪-۲۰
جو	۳۰۰۰	٪۷
انگور	۴۲۰۰	٪۵
خیار	۱۰۰۰	٪-۱۷
بادمجان	۷۰۰	٪-۱۳
پیاز	۲۲۰۰	٪۱۰
حبوبات	۱۴۵۰	٪۴
گیاهان دارویی	۱۹۰۰	٪۶
مجموع	۱۶۵۰۰	



شکل ٤- تغییرات سطح زیر کشت محصولات در سناریوی کاهش در دسترس بودن آب

سناریوی اقتصادی محصول: افزایش یا کاهش ۲۰ درصدی قیمت بازار و هزینه‌های تولید هر محصول

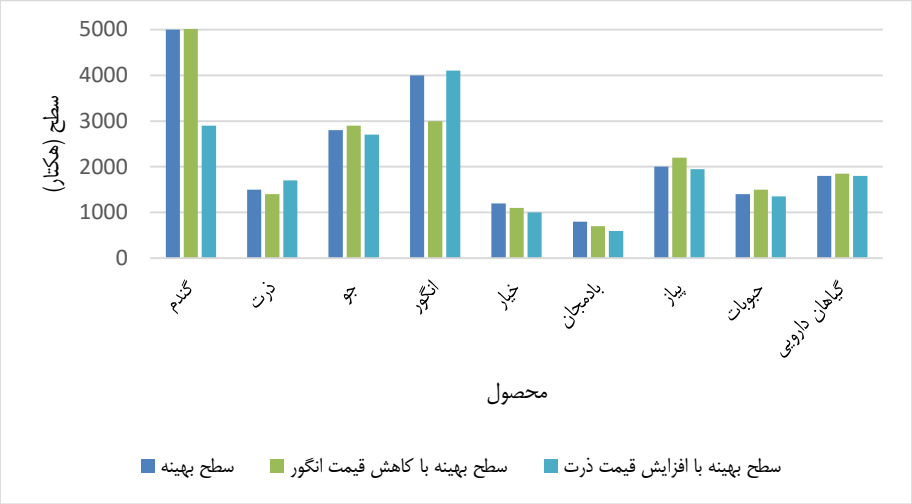
وقتی قیمت انگور ۲۰ درصد کاهش پیدا می‌کند، سود کمتری عاید کشاورزان می‌شود. در پاسخ به این تغییر، مدل بهینه‌سازی با تخصیص مساحت بیشتری به محصولاتی که اکنون نسبتاً اقتصادی‌تر هستند، مانند گندم، جو، پیاز و حبوبات، واکنش نشان می‌دهد. در این سناریو، سطح زیر کشت این محصولات ۴ تا ۷ درصد نسبت به سطح پایه افزایش می‌یابد. کاهش سودآوری انگور همچنین منجر به کاهش ۲۵ درصدی در سطح زیر کشت بهینه آن می‌شود. برعکس، زمانی که قیمت ذرت ۲۰ درصد افزایش می‌یابد، مدل سطح زیر کشت بهینه ذرت را ۱۳ درصد نسبت به خط پایه افزایش می‌دهد (جدول ۸، شکل ۵). این افزایش به جایگزینی محصولاتی که نسبتاً کم‌سود مانند خیار و بادمجان هستند، منجر می‌شود که سطوح بهینه آن‌ها به‌ترتیب ۱۷ و ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. این تغییرات در قیمت محصولات بازار باعث تعدیل‌های منطقی مورد انتظار در حوزه‌های بهینه محصول بر اساس سودآوری می‌شود. محصولاتی که از نظر اقتصادی مطلوب‌تر می‌شوند، تخصیص زمین بیشتری دریافت می‌کنند، در حالی که محصولات کم‌سودتر کاهش تخصیص زمین را تجربه می‌کنند. این روند نشان‌دهنده واکنش چابک مدل به تغییرات در اقتصادهای مختلف محصولات است.

سناریوی محاسبه الگوی کشت مبتنی بر آب مجازی

در جدول (۸) ارزش اقتصادی محصولات زراعی و در جدول (۹) میانگین ارزش اقتصادی آنها ارائه شده‌است. مطابق جدول (۸) بیش ترین ارزش اقتصادی آب متعلق به حبوبات و گیاهان دارویی می‌باشد. بر اساس روش مبتنی بر درآمد بیش‌ترین وزن متعلق به حبوبات و گیاهان دارویی و کم‌ترین وزن متعلق به گندم و جو می‌باشد. در روش محاسبه ارزش اقتصادی بر اساس آب مصرفی بیش‌ترین وزن متعلق به گندم، ذرت، بادمجان و پیاز و کم‌ترین وزن به حبوبات و گیاهان دارویی و در روش مبتنی بر مساحت بیش‌ترین وزن متعلق به گندم و جو و کم‌ترین متعلق به گیاهان دارویی و پیاز می‌باشد. بر طبق جدول (۹) بیش‌ترین میزان ارزش اقتصادی آب از روش وزن دهی منطبق بر درآمد به‌دست آمد.

جدول ۸- تغییرات تخصیص محصول: واکنش‌های اقتصادی به نوسانات قیمت بازار

محصول	سطح بهینه	سطح بهینه با کاهش قیمت انگور	سطح بهینه با افزایش قیمت ذرت
گندم	۵۰۰۰	۵۲۰۰	۲۹۰۰
ذرت	۱۵۰۰	۱۴۰۰	۱۷۰۰
جو	۲۸۰۰	۲۹۰۰	۲۷۰۰
انگور	۴۰۰۰	۳۰۰۰	۴۱۰۰
خیار	۱۲۰۰	۱۱۰۰	۱۰۰۰
بادمجان	۸۰۰	۷۰۰	۶۰۰
پیاز	۲۰۰۰	۲۲۰۰	۱۹۵۰
حبوبات	۱۴۰۰	۱۵۰۰	۱۳۵۰
گیاهان دارویی	۱۸۰۰	۱۸۵۰	۱۸۰۰
مجموع	۱۶۵۰۰	۱۶۵۰۰	۱۶۵۰۰



شکل ۵- تأثیر نوسانات قیمت بر سطح زیر کشت محصولات

جدول ۹- ارزش اقتصادی محصولات زراعی و وزن محاسبه شده برای هر محصول

مشخصات	محصول‌های منتخب در الگوی کشت مشاهده‌شده								
	گندم	ذرت	جو	انگور سیاه	خیار	بادمجان	پیاز	حبوبات	گیاهان دارویی
ارزش اقتصادی آب (ریال بر مترمکعب)	۱۹۵۴۰۰	۶۳۷۵۴۰	۱۶۵۰۸۰	۱۸۲۰۴۰۰	۹۴۳۵۶۰	۸۲۸۹۱۷	۱۱۳۷۸۷۰	۱۶۵۳۹۲۰	۲۴۶۸۳۴۰
درصد وزنی بر حسب درآمد	۲/۶۰	۲/۷۴	۱/۷۸	۱۷/۶۶	۸/۲۸	۴/۹۲	۴/۳۰	۲۰/۸۷	۳۶/۸۵
درصد وزنی بر حسب آب مصرفی	۱۲/۰۴	۱۵/۷۵	۹/۲۰	۱۰/۵۱	۱۱/۵۹	۱۲/۴۷	۱۳/۷۸	۷/۸۹	۶/۷۸
درصد وزنی بر حسب مساحت	۲۳/۸۱	۱۹/۰۸	۱۴/۲۹	۹/۵۴	۱۱/۹۴	۷/۱۶	۴/۷۲	۷/۱۶	۲/۳۰

جدول ۱۰- میانگین ارزش اقتصادی آب محصولات زراعی در حوضه آبریز هیرمند

حوضه آبریز	ارزش اقتصادی آب (ریال بر مترمکعب)			مساحت تحت کشت (هکتار)	کل حجم آب مصرفی خالص (میلیون متر مکعب)
	روش محصول با وزن دهی مساحت تحت کشت	روش محصول با وزن دهی با حجم آب مصرفی	روش محصول با وزن دهی درامد محصول		
هیرمند	۷۶۶۸۵۳/۲۹	۹۹۷۸۲۰/۸۸	۱۷۶۹۵۶۴/۳۴	۲۱۰۰۰	۴۵۷۰۰

جدول ۱۱- آب مجازی (مترمکعب بر تن) و سود دهی محصولات در حوضه آبریز مورد مطالعه

مشخصات	محصول‌های منتخب در الگوی کشت مشاهده‌شده								
	گندم	ذرت	جو	انگور سیاه	خیار	بادمجان	پیاز	حبوبات	گیاهان دارویی
آب مجازی (مترمکعب برتن)	۱۵۸۹/۷۴	۱۴۷۸/۲۶	۱۸۸۴/۶۱	۳۵۷/۷۲	۲۴۶/۹۶	۲۴۰/۴۵	۱۸۹/۳۴	۸۵۷/۱۴	۸۰۶/۴۵
سود دهی	۰/۲۴	۱/۱۷	۰/۴۱	۱/۲۲	۱/۴۵	۰/۶۶	۰/۵۲	۳/۵۲	۲/۳۱

در این پژوهش پس از محاسبه ارزش‌اقتصادی آب به محاسبه آب مجازی و سوددهی محصولات‌زراعی پرداخته شد. در جدول (۱۱) نتایج مربوط به این بخش ارائه شده‌است.

باتوجه به جدول (۱۱) بیش‌ترین آب‌مجازی مربوط به دو محصول گندم و جو و کمترین میزان آب‌مجازی متعلق به دو محصول پیاز و بادمجان می‌باشد. هم چنین طبق نتایج این جدول بیش‌ترین سود دهی را حبوبات و گیاهان دارویی دارند. با توجه به نتایج جدول (۱۱) و آب‌بر بودن محصولاتی مثل گندم، ذرت و جو و هم چنین سوددهی پایین این محصولات‌زراعی واردکردن این محصولات صرفه اقتصادی بالایی دارد.

واردات محصولات زراعی آب‌برو کم بازده مثل گندم، جو و ذرت از مناطق دیگر با آب بیشتر، به‌عنوان گزینه‌ای مؤثر در مدیریت منابع آبی به‌شمار می‌رود. این رویکرد به‌معنای استفاده از آب‌مجازی است، که به آب‌موجود در محصولات وارداتی اشاره دارد. با واردات گندم و

ذرت، می‌توان تولید محلی را کاهش داده و مصرف آب‌آبیاری در منطقه هیرمند را به حداقل رساند. با این حال، واردات محصولات زراعی متحمل هزینه‌های حمل و نقل و ذخیره‌سازی در هر تن خواهد بود. این سناریو می‌تواند بینشی درباره این‌که آیا واردات محصولات پرمصرف آب، در مقایسه با تولیدات داخلی، در شرایط کمبود شدیدآب مطلوب است یا خیر، ارائه دهد. بهینه‌سازی ارزش واردات به شناسایی محصول ایده‌آل کمک می‌کند که می‌تواند تأثیرات اقتصادی و زیست محیطی را به‌طور همزمان در نظر بگیرد (جدول ۱۲). این رویکرد می تواند به کشاورزان و سیاست‌گذاران کمک کند تا تصمیمات بهتری در راستای مدیریت منابع آبی اتخاذ کنند و از واردات به‌عنوان یک ابزار استراتژیک برای مقابله با کمبود آب بهره ببرند.

جدول ۱۲- سناریوی واردات آب مجازی

محصول	تولید کشاورزی محلی (هکتار)	واردات (تن)
گندم	۲۰۰۰	۵۰۰۰۰
ذرت	۸۰۰	۳۰۰۰۰
جو	۲۸۰۰	-
انگور	۴۰۰۰	-
خیار	۹۰۰	-
بادمجان	۶۰۰	-
پیاز	۲۰۰۰	-
حبوبات	۱۴۰۰	-
گیاهان دارویی	۱۸۰۰	-
مجموع	۱۳۵۰۰	۸۰۰۰۰

راه حل بهینه‌شده تحت سناریوی آب مجازی، شامل واردات ۵۰،۰۰۰ تن گندم و ۳۰،۰۰۰ تن ذرت است. این اقدام باعث جابجایی ۶۰ درصد از تولید گندم محلی و ۴۷ درصد از تولید ذرت‌محلی در مقایسه با راه حل بهینه پایه می‌شود. محصولات محلی عمدتاً با واردات جایگزین می‌شوند و این امکان را فراهم می‌کنند تا کشت محلی انگور، پیاز، حبوبات و گیاهان دارویی افزایش یابد. پس از در نظر گرفتن هزینه‌های واردات، بازده اقتصادی کل نسبت به سطح پایه ۵ درصد افزایش یافته‌است. هم‌چنین، مصرف آب محلی به‌دلیل تولید کمتر گندم و ذرت ۱۸ درصد کاهش یافت و شست‌شوی نیتروژن نیز ۹ درصد کاهش نشان داد. واردات آب مجازی به‌صورت گندم و ذرت در این منطقه کم‌آب، بسیار مطلوب است. برای کاهش آبیاری محلی و شست‌شوی نیتروژن، باید تولید محلی محصولات آب‌بر و پرکود جابه‌جا شود. صرفه‌جویی در مصرف آب می‌تواند برای توسعه تولید محصولات با ارزش بالاتر و کم مصرف آب، مانند انگور و پیاز، اختصاص یابد. به‌طور کلی، واردات آب مجازی به بهبود کارایی اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی کمک کرده و یک مکانیسم مؤثر برای کاهش چالش‌های کمبود آب محلی از طریق تجارت فراهم می کند. با واردات آب مجازی، مصرف آب محلی ۱۸ درصد (۱۹ میلیون متر مکعب) در مقایسه با حالت بهینه پایه کاهش می‌یابد. بازده اقتصادی ۵ درصد (۴ میلیون دلار) افزایش یافته‌است. این افزایش بازده اقتصادی با تولید بیشتر محصولات با ارزش بالا مانند انگور، پیاز و حبوبات که با صرفه‌جویی در مصرف آب امکان‌پذیر می‌شود، جبران می‌گردد. همچنین، شست‌شوی نیتروژن به‌دلیل کاهش تولید گندم و ذرت محلی ۹ درصد (۲۰۰ تن) کاهش می‌یابد. محصولات جدیدی مانند انگور و پیاز نیاز به نیتروژن کمتری دارند (جدول ۱۳).

نتایج این مطالعه نشان‌می‌دهد که مدل‌سازی بهینه‌سازی چندهدفه، ابزاری مؤثر برای طراحی الگوهای کشت پایدار در حوزه آبخیز هیرمند است. با بهینه‌سازی اهداف اقتصادی، مصرف آب و پایداری زیست‌محیطی، می‌توان راه‌حل‌های برد - بردی شناسایی کرد که هم به بهبود سودآوری کشاورزان کمک کند و هم کارایی مصرف آب و پایداری اکولوژیکی را افزایش دهد. الگوی جدید کشت‌بهینه، کاهش ۲۹ درصدی مصرف آب را نسبت به شیوه‌های فعلی فراهم می آورد که تأثیر قابل توجهی بر پایداری آب کشاورزی در این منطقه با کمبود آب شدید دارد. این کاهش تقاضای آب، به نوبه خود، تقاضای انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با پمپاژ آب‌های زیرزمینی برای آبیاری را کاهش می‌دهد و بدین ترتیب مزایای زیست‌محیطی بیشتری به‌همراه دارد. همچنین، کاهش ۱۴ درصدی در شست‌شوی نیتروژن، دستاورد قابل توجهی است، چرا که آلودگی نیتروژن تهدیدی جدی برای سلامت انسان و اکوسیستم‌های منطقه‌ای به‌شمار می‌رود. مدل بهینه‌سازی، یک راه‌حل مؤثر با کاهش کشت محصولات کود فشرده مانند ذرت و خیار به نفع کشت انگور و پیاز که نیاز کمتری به نیتروژن دارند، ارائه می‌کند. در عین حال، بازده اقتصادی کلی

کشاورزان حفظ شده یا حتی افزایش یافته‌است. الگوی کشت جدید از سودآوری بیشتر برخی محصولات مانند انگور و گیاهان دارویی و کاهش نیاز آن‌ها به آب بهره می‌برد، که این موضوع پایداری اقتصادی بلندمدت و پایداری اجتماعی کشاورزی منطقه را تضمین می کند.

جدول ۱۳- مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی واردات آب مجازی

نتایج سناریو	شاخص پایه	واردات آب مجازی بهینه	تغییر بهینه
استفاده از آب محلی (میلیون متر مکعب)	۸۸	۱۰۷	٪-۱۸
بازگشت اقتصادی (میلیون دلار)	۸۲	۷۸	٪۵
شست و شوی نیتروژن (تن)	۱۹۵۰	۲۱۵۰	٪-۹
مساحت گندم (هکتار)	۲۰۰۰	۵۰۰۰	٪-۶۰
واردات گندم (تن)	۵۰۰۰۰	۰	۵۰۰۰۰
مساحت ذرت (هکتار)	۸۰۰	۱۵۰۰	٪-۴۷
واردات ذرت (تن)	۳۰۰۰۰	۰	۳۰۰۰۰
مساحت انگور (هکتار)	۴۲۰۰	۴۰۰۰	٪۵
مساحت پیاز (هکتار)	۲۱۰۰	۲۰۰۰	٪۵

تحلیل سناریو همچنین بینش‌های عملی برای سیاست‌گذاری ارائه می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده پتانسیل قوی برای بهبود راندمان آبیاری در این منطقه کم‌آب از طریق استفاده از تکنیک‌های پیشرفته ای چون آبیاری قطره‌ای و کاربرد دقیق است. صرفه‌جویی در مصرف آب محصول ناشی از افزایش بهره‌وری می‌تواند به توسعه محصولات با عملکرد بالاتر اختصاص یابد. سناریوی کاهش دسترسی به آب نیز نشان‌می‌دهد که در صورت افزایش خطرات خشک‌سالی یا کاهش انحرافات آب در بالادست، تعدیل الگوهای کشت برای استراتژی‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی ضروری خواهد بود. گسترش کشت انگور، پیاز و سایر محصولات کم‌آب می‌تواند درآمد مزرعه را با وجود کاهش منابع آبی حفظ کند.

مفهوم آب‌مجازی به‌معنای واردات محصولات کشاورزی یا غذایی حاوی آب پنهان از مناطق یا کشورهای دارای مزیت نسبی در منابع آب است (Hekmatnia et al, 2024). این مفهوم بر این ایده استوار است که نه‌تنها کالاهای فیزیکی در سطح بین‌المللی معامله می‌شوند، بلکه منابع آبی مورد نیاز برای تولید آن کالاها نیز مورد معامله قرار می‌گیرد. آب مجازی به آب پنهان یا غیرمستقیم اشاره دارد که برای تولید کالاهای مختلف، از جمله محصولات زراعی و دامی، استفاده می‌شود (Hekmatnia et al, 2023). به‌کارگیری مفهوم آب مجازی با واردات محصولات پرمصرف آب مانند گندم، ذرت و جو راهبردی علمی برای کاهش کمبود آب در مناطقی مانند هیرمند ارائه می‌دهد. این رویکرد به تخصیص مجدد منطقی منابع آب با جابجایی تولید محلی محصولات با نیاز آبی بالاتر و برون‌سپاری ردپای آب آن‌ها به مناطق پرآب‌تر، تأکید دارد (Hekmatnia et al, 2022).

افزایش بهره‌وری اقتصادی مشاهده‌شده، حتی با در نظر گرفتن هزینه‌های حمل و نقل و ذخیره‌سازی، تأکید بر قابلیت این استراتژی دارد و نشان‌می‌دهد که مزایای ناشی از کاهش مصرف آب و افزایش تنوع کشاورزی، بیشتر از هزینه‌های مرتبط است. علاوه بر این، کاهش ۱۸ درصدی مصرف آب محلی و کاهش ۹ درصدی در شست شوی نیتروژن، تأثیر زیست‌محیطی مثبت فوری واردات محصولات کم مصرف آب را نشان‌می‌دهد. این رویکرد، منابع آب ارزشمند را حفظ می‌کند و از کشت محصولات با ارزش حمایت می‌نماید و در نتیجه انعطاف‌پذیری و پایداری کشاورزی را ارتقا می‌دهد. استفاده از مکانیسم‌های تجاری برای واردات آب مجازی، با رویکردی کل‌نگر به مدیریت آب، همسو با بهینه‌سازی تخصیص منابع، پویایی تجارت و نظارت بر محیطزیست، به‌طور مؤثری به چالش‌های چندوجهی کمبود آب می‌پردازد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه ابتکاری را به‌منظور برنامه‌ریزی کشاورزی پایدار در منطقه حوضه آبخیز هیرمند طراحی کرده است. این مدل به‌طور همزمان الگوهای بهینه کشت را برای حداکثر کردن بازده اقتصادی، به حداقل رساندن مصرف آب و کاهش آلودگی نیتروژن محیطی تعیین می‌کند. نتایج نشان‌می‌دهد که اتخاذ این مدل می‌تواند درآمد کشاورزان را تا ۱۱ درصد افزایش دهد و مصرف آب آبیاری را تا ۲۹ درصد و آب‌شویی نیتروژن را تا ۱۴ درصد کاهش دهد. این موارد نشان‌دهنده پتانسیل قابل‌توجه مدل در بهبود اقتصاد کشاورزی، مدیریت منابع آب و پایداری محیطزیست در این منطقه است. علاوه بر این، تحلیل‌های سناریو بینش‌های عملی را برای هدایت سیاست‌گذاری در شرایط مختلف کشاورزی- اقتصادی ارائه می‌دهند. این مطالعه همچنین یک روش عملی و مبتنی بر داده را برای حمایت از برنامه‌ریزی توسعه کشاورزی و مدیریت پایدار آب

در منطقه هیرمند معرفی می‌کند. به‌علاوه، این مدل به‌عنوان یک اثبات مفهوم، می‌تواند به‌عنوان الگویی برای برنامه‌ریزی کشاورزی پایدار در سایر مناطق کم‌آب در سراسر جهان تطبیق داده شود.

منابع

اعظمی، آ.، می‌رک زاده، ع ا. و آذری، آ.۱۴۰۳. بهینه سازی الگوی کشت محصولات زراعی شهرستان صحنه براساس محدودیت منابع. جغرافیا و برنامه ریزی محیطی. ۳۵(۲): ۸۷-۱۱۴.

پور اصغر سنگاچین، ف. و ابراهیمی‌خوسفی، م. ۱۳۹۷. بررسی تأثیرات برنامه‌های تنظیم آب کشورهای همسایه در حوضه‌های مشترک مرزی بر ایران. مرکز پژوهش‌های توسعه و آینده‌نگری. سازمان برنامه و بودجه کشور.

جهان تیغ، ح. ۱۴۰۱. بهینه سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی در راستای مدیریت مصرف آب در شهرستان گرگان. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۲(۳): ۳۶۹-۳۸۵.

حسینی، س. م. و مازندرانی زاده، ح. ۱۴۰۱. بررسی تأثیر بهینه‌سازی توأم توزیع آب و الگوی کشت بر درآمد کشاورزان (مطالعه موردی: شبکه قزوین). نشریه علوم و مهندسی آبیاری. ۴۵(۲): ۴۷-۶۱.

زارع‌زاده، م.، مرید، س.، کریمی، ن.، مدنی، ک. و فاطمی، فرشاد.۱۳۹۷. روند توسعه اراضی کشاورزی در حوضه هیرمند افغانستان و چشم‌انداز آن با استفاده از طبقه‌بندی شی‌پایه تصاویر ماهواره‌ای و مدل ژئومد. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱(۱۲): ۲۰۹-۲۲۱.

شاه نظری، ع. و صادقی، س. ۱۴۰۲. بهینه سازی معیارهای الگوی کشت مبتنی بر توسعه پایدار و افزایش بهره وری آب کشاورزی در حوضه آبریز تجن. نشریه علوم آب و خاک. ۲۷(۲): ۱۶۳-۱۷۷.

صالحی شفا، ن.، بابازاده، ح، آقا یاری.، ف. و صارمی، ع.۱۴۰۱. تعیین الگوی کشت مطلوب با تأکید بر مصارف بهینه آب کشاورزی در دشت شهریار تهران. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۶(۱): ۱۱۹-۱۳۳.

عبد شاهی.، ع. مردانی نجف‌آبادی.، م. و زینالی، م.۱۳۹۹. تعیین الگوی بهینه کشت محصولات کشاورزی در شهرستان ملاثانی: کاربرد مدل بهینه‌سازی چندهدفه استوار. اقتصاد کشاورزی و توسعه. ۲۸(۳): ۱۷۵-۲۰۳.

کلاه‌ی، م.، حسینعلی، ف. و کریمائی طبرستانی، م. ۱۴۰۱. تعیین الگوی بهینه کشت با هدف حداقل‌سازی آب مجازی و حداکثرسازی سود اقتصادی محصولات: مطالعه موردی دشت عمرانی در خراسان‌رضوی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۶(۶): ۱۲۲۱-۱۲۳۲.

گل پذیر، م.، ابراهیمی، ک.، مدرسی، ف.، و شمسی، م. ۱۴۰۲. کمی سازی ارزش اقتصادی منابع آب کشاورزی استان اصفهان با رویکرد اصلاح الگوی کشت و بر مبنای آب مجازی. مجله تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران. ۵۴(۳)، ۵۷۵-۵۹۲.

وفایی‌نژاد، ع. ۱۳۹۵. بهینه سازی الگوی کشت با استفاده از روش TOPSIS و الگوریتم ژنتیک بر مبنای قابلیت‌های GIS (مطالعه موردی: اراضی بخش جلگه، استان اصفهان). اکو هیدرولوژی. ۳(۱): ۶۹-۸۲.

Aliyar, Q., Zulfiqar, F., Datta, A., Kuwornu, J. K. and Shrestha, S. 2022. Drought perception and field-level adaptation strategies of farming households in drought-prone areas of Afghanistan. International Journal of Disaster Risk Reduction. 72: 102862.

Al-Zahrani, M., Musa, A. and Chowdhury, S. 2016. Multi-objective optimization model for water resource management: a case study for Riyadh, Saudi Arabia. Environment, development and sustainability. 18: 777-798.

Bastian, C. T., McLeod, D. M., Germino, M. J., Reiners, W. A. and Blasko, B. J. 2002. Environmental amenities and agricultural land values: a hedonic model using geographic information systems data. Ecological economics. 40(3): 337-349.

Bratman, G. N., Hamilton, J. P. and Daily, G. C. 2012. The impacts of nature experience on human cognitive function and mental health. Annals of the New York academy of sciences.1249(1): 118-136.

Deb, K., Sindhya, K. and Hakanen, J. 2016. Multi-objective optimization. In Decision sciences (pp. 161-200). CRC Press.

Elshall, A. S., Arik, A. D., El-Kadi, A. I., Pierce, S., Ye, M., Burnett, K. M. and Chun, G. 2020. Groundwater sustainability: A review of the interactions between science and policy. Environmental Research Letters. 15(9): 093004.

Faisal Basiri, A. 2009. Options for improving irrigation water allocation and use: A case study in hari rod river basin, Afghanistan (Doctoral dissertation, AIT).

Goes, B. J. M., Howarth, S. E., Wardlaw, R. B., Hancock, I. R. and Parajuli, U. N. 2016. Integrated water resources management in an insecure river basin: a case study of Helmand River Basin, Afghanistan. International Journal of Water Resources Development. 32(1): 3-25.

Haggerty, R., Sun, J., Yu, H., & Li, Y. 2023. Application of machine learning in groundwater quality modeling-A comprehensive review. Water

land allocation to crop production in different decision priorities and water availability scenarios: East Azerbaijan province of Iran. Archives of Agronomy and Soil Science. 68(5): 597-614.

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.

34. Rastegaripour, F., Tavassoli, A., Babaeian, M., Fernández-Gálvez, J. and Caballero-Calvo, A. 2024. Assessing the impacts of climate change on water resource management and crop patterns in Eastern Iran. *Agricultural Water Management*, *295*, 108774.

Ritzel, B. J., Eheart, J. W. and Ranjithan, S. 1994. Using genetic algorithms to solve a multiple objective groundwater pollution containment problem. Water resources research. 30(5): 1589-1603.

Qureshi, A. S. and Akhtar, M. 2004. A survey of drought impacts and coping measures in Helmand and Kandahar provinces of Afghanistan. Lahore & Tehran: International Water Management Institute.

Soltani, H. A., & Khajehpour, E. 2020. Optimal cropping pattern in Afghanistan considering environmental sustainability. International Journal of Agricultural Management and Development (IJAMAD). 10(4): 333-346.

Sun, J. X., Yin, Y. L., Sun, S. K., Wang, Y. B., Yu, X. and Yan, K. 2021. Review on research status of virtual water: The perspective of accounting methods, impact assessment and limitations. Agricultural Water Management. 243: 106407.

Shirdeli, A. and Dastvar, S. 2014. An optimization technique for cropping patterns and land consolidation: A case study for irrigation network. Management Science Letters.4(9): 2087-2092.

Tabesh, M. and Asadzadeh, A. 2013. A multi-objective optimization model for crop planning and virtual water trade: A case study from Iran. Journal of cleaner production. 52: 408-417.

Tewabe, D. and Dessie, M. 2020. Enhancing water productivity of different field crops using deficit irrigation in the Koga Irrigation project, Blue Nile Basin, Ethiopia. Cogent Food & Agriculture. 6(1): 1757226.

United Nations. 2011. Managing Afghanistan's transboundary waters. UNEP in Afghanistan.

Ward, F. A., & Pulido-Velazquez, M. 2008. Water conservation in irrigation can increase water use. Proceedings of the National Academy of Sciences. 105(47): 18215-18220.

Research, 233, 119745.

Hekmatnia, M., Safdari, M., Ahmadi, A. and Monibi, H. 2022 National savings in freshwater consumption in Iran by virtual water imports (a case study on cereals). Water and Environment Journal. 36(4): 656-666

Hekmatnia, M., Isanezhad, A., Ardakani, A. F., Ghojghar, M. A. and Ghaleno, N. D. 2023. An attempt to develop a policy framework for the global sustainability of freshwater resources in the virtual water trade. Sustainable Production and Consumption. 39: 311-325.

Hekmatnia, M., Ardakani, A. F., Isanezhad, A. and Monibi, H. 2024. A novel classification of virtual water trade for the sustainability of global freshwater resources. Environment, Development and Sustainability. 26(3): 7377-7408.

Chapagain, A. K. and Hoekstra, A. Y. 2003. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to trade of livestock and livestock products, Value of water Research Report Series No.13, UNESCO-IHE, pp. 49-76.

Huang, H., Xie, P., Duan, Y., Wu, P. and Zhuo, L. 2023. Cropping pattern optimization considering water shadow price and virtual water flows: A case study of Yellow River Basin in China. Agricultural Water Management. 284: 108339.

Iqbal, M. W., Donjadee, S., Kwanyuen, B. and Liu, S. Y. 2018. Farmers' perceptions of and adaptations to drought in Herat Province, Afghanistan. Journal of Mountain Science. 15(8): 1741-1756.

Jain, S., Ramesh, D., & Bhattacharya, D. 2021. A multi-objective algorithm for crop pattern optimization in agriculture. Applied Soft Computing, 112: 107772.

Kumar, S., & Sharma, R. 2023. Resource use efficiency optimization of major farming systems in hills of Himachal Pradesh. Indian Journal of Ecology.50(3): 893-899.

Kaleeswaran, V., Dhamodharavadhani, S. and Rathipriya, R. 2021. Multi-crop selection model using binary particle swarm optimization. In Innovative Data Communication Technologies and Application: Proceedings of ICIDCA 2020 (pp. 57-68). Springer Singapore.

Li, X., Kang, S., Niu, J., Du, T., Tong, L., Li, S. and Ding, R. 2017. Applying uncertain programming model to improve regional farming economic benefits and water productivity. Agricultural Water Management. 179: 352-365.

31. Loucks, D. P., & Van Beek, E. 2017. Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models, and applications. Springer.

Mohammadzadeh, A., Vafabakhsh, J., Mahdavi Damghani, A. and Deihimfard, R. 2022. Optimal

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.6, Vol. 18, Feb.-Mar. 2025, p. 1007-1022

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۸، بهمن - اسفند ۱۴۰۳، ص. ۱۰۲۲-۱۰۰۷

Multi-Objective Optimization Analysis of Cropping Patterns in the Helmand Basin: The Role of Virtual Water Import Strategy

A. Rahdan [1], M. Mohammadrezaei[2]*
Recived: Nov.14, 2024 Accepted: Dec.24, 2024

Abstract

Agriculture is the main economic pillar of the Helmand Basin; however, it faces severe water scarcity due to unsustainable consumption. Previous studies have optimized cropping patterns based on economic and water factors in arid regions. However, the unique conditions of Helmand require a multi-objective optimization approach that integrates economic, ecological, and environmental factors. This study develops a multi-objective mathematical model to determine the optimal cropping pattern for Helmand to maximize farmer profits while minimizing water consumption and environmental impacts. The model simulates cropping areas for major regional crops using multi-objective linear programming. In this regard, to obtain the optimal cultivation pattern with the desired objectives, the genetic algorithm was used as a random optimization method. The desired information was obtained from the Agricultural and Jihad Organization and Regional Water of Sistan and Baluchestan Province, and the relevant calculations were performed in MATLAB and CROPWAT software. The crop year determined in this study is 2018-2019 and the selected crops include wheat, corn, barley, black grapes, cucumber, eggplant, onion, legumes, and medicinal plants. Results indicate that the optimal cropping pattern reduces annual water consumption by 29%, nitrogen leaching by up to 14%, and increases economic yield by 11% compared to current practices. Virtual water imports of wheat and corn reduce local water consumption by 18% and improve economic yield by up to 5%. This integrated modeling approach provides data-driven scenario-based decision support for guiding policies on optimal cropping strategies. The findings demonstrate the potential of multi-objective optimization combined with virtual water imports to sustainably enhance agriculture despite water scarcity. This study can be used as a road map for policy makers and farmers to improve and sustain agriculture in Hirmand basin.

Keywords: Cropping patterns, Economic efficiency, Multi-objective optimization, Sustainable agriculture. Virtual water

1- Ph.D. Candidate in watershed management, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2 - Ph.D. Candidate in watershed management, Department of Watershed Science and Engineering, Faculty of Rangeland and Watershed Management, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
(*-Corresponding Author Email: Mrezaei501@yahoo.com)