نشریه علوم آب و خاک
سال بیست و هفتم / شماره دوم / تابستان ۱۴۰۲ / مقاله علمی- پژوهشی: صفحات ۱۶۳ تا ۱۷۷

بهینه‌سازی معیارهای الگوی کشت مبتنی بر توسعه پایدار و افزایش بهره‌وری آب کشاورزی در حوضه آبریز تجن

علی شاهنظری و سونیا صادقی[1*]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۱۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۸)

چکیده

در مقاله حاضر با چشم انداز توسعه پایدار و با هدف افزایش بهره‌وری آب کشاورزی، هفت معیار به‌عنوان معیارهای اصلی زیست‌محیطی و اقتصادی، انتخاب شده و برای محصولات مهم و راهبردی در حوضه آبریز تجن استان مازندران اولویت‌بندی و بررسی شدند. اولویت‌بندی معیارها با استفاده از بهینه‌سازی از طریق الگوریتم ژنتیک با تابع هدفی مبتنی بر توسعه پایدار انجام شد. سپس به‌منظور تعیین میزان بهره‌وری، شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی، بهره‌وری زمین و اقتصادی محاسبه شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، در وضعیت موجود، در انتخاب الگوی کشت، ابتدا دسته معیارهای اقتصادی و در نهایت دسته معیارهای زیست‌محیطی مورد توجه کشاورزان قرار گرفته است. اما در الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، اگرچه هر یک از محصولات ترتیب معیارهای مختص به خود را دارند، اما تمامی اولویت‌ها دارای ترتیبی مشابه از نقطه‌نظر زیست‌محیطی و سپس اقتصادی هستند. با این اولویت‌بندی به‌طور متوسط معیارهای سطح زیر کشت، حجم آب مصرفی و میزان کود شیمیایی به‌ترتیب ۲۶، ۳۴ و درصد کاهش و معیارهای عملکرد محصول و سوددهی به‌ترتیب ۴۳ و ۶۱ درصد افزایش یافته است. این اولویت‌بندی علاوه بر تأمین معیارهای زیست‌محیطی و افزایش توسعه پایدار، به‌طور متوسط سبب افزایش بهره‌وری فیزیکی به میزان ۱۴۸ درصد، افزایش بهره‌وری زمین به میزان ۹۵ درصد و افزایش بهره‌وری اقتصادی به میزان ۱۳۰ درصد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تابع هدف، شبکه آبیاری و زهکشی، منابع آب، نرم‌افزار متلب

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Sonia_6812@yahoo.com

مقدمه

با توجه به کمبود شدید منابع آب در بیشتر حوضه‌های آبریز کشور و آشکارشدن اثرات سوء نابودی ذخایر آبی، پژوهشگران و کارشناسان به ارائه راهکارهایی از جمله تغییر یا اصلاح الگوی کشت، افزایش بهره‌وری آب به خصوص در کشاورزی، برای مصرف بهینه آب پرداختند (۱۰). اما تعیین الگوی کشت برای یک منطقه کشاورزی با مجهولات فراوانی همراه است. در این بین به تأثیر و نقش معیارها در تعیین الگوی کشت کمتر توجه شده است. اعلام معیار می‌تواند نشان‌دهنده نوع نگاه اظهارکننده راجع به موضوع باشد و همچنین معیارهای متفاوت در توجیه ارجحیت کشت محصول به نتایج بسیار متفاوتی منجر می‌شوند. از طرف دیگر استفاده بیش از اندازه آب می‌تواند هزینه تولید و آلودگی زیست‌محیطی را افزایش دهد. بنابراین، افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی بسیار مهم است. عده زیادی از پژوهشگران معتقدند که افزایش بهره‌وری آب کشاورزی یک رهیافت کلیدی برای جبران کمبود آب و کاهش مسائل زیست‌محیطی (توسعه پایدار) است (۱۰). در کشور ایران به علت ساختار ویژه اقتصادی آن، که حول محور کشاورزی قرار دارد و به‌دلیل محدودبودن منابع آب شیرین، برنامه‌ریزی‌ها و پژوهش‌ها بایستی برای افزایش بهره‌وری آب باشد. از سوی دیگر میزان کشت محصولات کشاورزی در یک منطقه باید با توجه به منابع موجود، قیمت محصولات، هزینه‌های تولید، عملکرد محصولات، نیاز کشور و سیاست‌های درست انجام شود و تصمیم‌گیری در انتخاب گیاهان زراعی یا باغی مناطق مختلف بر اساس زیرساخت‌های موجود، مسائل اجتماعی- اقتصادی و سطح تکنولوژی با حفظ منابع پایه تولید برای تأمین نیازهای اساسی کشور باشد. بنابراین، انتخاب الگوی کشت از اهمیت زیادی برخوردار است و تمامی پارامترهای مؤثر در آن باید مد نظر قرار گیرند. در این راستا برای شناسایی معیارهای مختلف تعیین الگوی کشت که مورد توجه پژوهشگران و برنامه‌ریزان قرار گرفته است، به بررسی پژوهش‌های مختلف در این مورد پرداخته شده است. نصابیان و همکاران (۱۲)، با استفاده از الگوی برنامه‌ریزی چندهدفه غیرخطی فازی، الگوی کشت مناطق مورد مطالعه خود را با اهداف کاهش مصرف آب و کودشیمیایی، افزایش بازده برنامه‌ای، کمینه‌سازی خطر تولید و افزایش منافع اجتماعی از طریق افزایش سطح اشتغال نیروی کار، تعیین و اجرا کردند. صادقی طبس و همکاران (۱۳)، از معیارهای اقتصادی و اجتماعی شامل حداکثر کردن درآمد خالص، اشتغال نیروی کار و حداقل کردن آب مصرفی، هزینه محصولات و مقدار آب مجازی صادراتی برای تعیین الگوی کشت بهینه در دشت بیرجند با استفاده از الگوریتم فراکاوشی جهش ترکیبی قورباغه استفاده کردند. نتایج نشان داد که در سناریوی اول زعفران، محصولات جالیزی، زیره سبز و سبزیجات بیشترین حد مربوطه از سطح زیر کشت را به خود اختصاص دادند، اما در سناریوی دوم که محدودیت اختصاص سطح زیر کشت به محصولات کاهش یافت، ابتدا زعفران و سپس محصولات جالیزی به‌ترتیب با مقادیر ۳۴/۸ و ۳۲/۵ درصد از کل سطح زیر کشت، بیشترین سطح را به خود اختصاص دادند. همچنین، با توجه به اقلیم خشک منطقه میزان آب مصرفی نسبت به الگوی کشت پایه در سناریوی اول و دوم به‌ترتیب ۱۴ و ۲۰ درصد کاهش داشت. فلاحی و قلی نژاد (۵)، در مطالعه خود معیارهای اساسی تأثیرگذار بر الگوی کشت را سوددهی، اشتغال‌زایی، سازگاری منطقه‌ای، مهارت و تخصص، مصرف آب، اثرات زیست‌محیطی و خطر معرفی کردند. سپس با الگوی تلفیقی AHP و مدل برنامه‌ریزی خطی الگوی بهینه کشت را تعیین کردند. بیرهان یو و همکاران (۳)، به‌منظور تخصیص بهینه آب سد کوگا واقع در حوضه بالادست رود نیل برای بهینه‌سازی الگوی کشت منطقه کوگا، با استفاده از مدل خطی با محدودیت تصادفی (CCLP) به کمک نرم‌افزار LINGO14 تحت چهار سناریو، با اهداف افزایش عملکرد، افزایش سود، افزایش بهره‌وری آب و افزایش راندمان آبیاری مناطق زیر کشت برای محصولات ذرت، گندم، سیب‌زمینی، پیاز و فلفل انجام دادند. نتایج نشان داد که راندمان آبیاری تمام سناریوها بیشتر از حالت فعلی بود و نیز با بهینه‌سازی الگوی

کشت با راندمان آبیاری ۴۸ درصد امکان آبیاری ۵۹۰۴/۳ به ۸۰۵۱ هکتار از زمین با احتمال ۸۰ درصد وجود دارد. و این الگو افزایش عملکرد محصول از ۱۰۸ درصد به ۱۵۳ درصد و سود از ۱۵۳ درصد به ۲۰۸ درصد و بهره‌وری فیزیکی آب از ۲۰۵ درصد به ۲۴۱ درصد نسبت به حالت فعلی می‌رساند. بوجانگ و همکاران (۴)، مطالعه خود را در منطقه نجاوا در کشور گامبیا، که یکی از آسیب‌پذیرترین مناطق از لحاظ خشکسالی به علت بارش کم و توزیع نامتقارن باران و همچنین تغییرات آب و هوایی است، انجام دادند. با توجه به نقش حیاتی که کشاورزی در اقتصاد این کشور دارد و به‌منظور بهبود سطح امنیت غذایی و کاهش فقر، با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و نرم‌افزار LINGO ، الگوی بهینه کشت را برای محصولات ارزن، ذرت، سورگوم، بادام زمینی و کاساوا تحت محدودیت‌های آب و سطح کشت تعیین کردند و نتایج نشان داد که مساحت بهینه برای کاساوا، ذرت، سورگوم، ارزن و بادام زمینی به‌ترتیب ۸۵، ۱۸، ۱۵، ۱۲ و صفر هکتار بودند در نهایت این الگو باعث کاهش ۵۰ درصدی مصرف آب شد.

عبدالقادر و همکاران (۲) در مطالعه‌ای به بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی در عربستان پرداختند. در این مطالعه، اهدافی از قبیل حداکثرسازی بازده برنامه سالانه، کاهش مصرف آب و تخصیص کارآمد زمین‌های زراعی در میان محصولات رقیب در نظر گرفته شد که با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی ریاضی به بهینه‌سازی الگوی کشت با توجه به اهداف پرداخته شد. نتایج نشان داد در الگوی کشت بهینه، بازده برنامه در حدود ۲/۴۲ میلیارد دلار آمریکا در سال افزایش و مصرف آب حدود ۵۳ درصد کاهش یافت.

در اغلب مطالعات مربوط به تعیین الگوی کشت معیار اقتصادی سوددهی به‌عنوان معیار اصلی تعیین الگوی کشت مدنظر قرار داده شده است. برخی از پژوهشگران از جمله (هائو و همکاران، ۸)، تنها از این معیار استفاده کرده‌اند که بر این اساس محصول ذرت را نسبت به سیب‌زمینی، گندم، دانه‌های روغنی و پنبه به‌عنوان محصولی که بیشترین سطح زیر کشت باید به آن اختصاص داده شود، معرفی کرده‌اند. فسخودی و نوری (۶) تصریح می‌کنند که به‌دلیل پیچیدگی سامانه‌های زراعی باید از ابعاد و جوانب مختلف الگوی کشت را بررسی کرد، بنابراین معیار اشتغال به‌ازای حجم آب مصرفی را نیز برای تعیین الگوی کشت بهینه مد نظر قرار می‌دهند. همچنین، معیارهای سود و مقدار آب مصرفی با وزن‌های مختلف توسط فتحی و زیبایی (۷) برای تعیین الگوی کشت مورد استفاده قرار گرفتند.

وانی و همکاران (۱۵) درزمینه اهمیت توسعه پایدار منابع محیط زیستی بر تقویت و توسعه کشت محصولات و همچنین زندگی بهتر در مناطق استوایی و نیمه‌خشک کشور هندوستان تحقیق کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که به‌منظور حفظ منابع محیط‌زیست موجود در خاک رعایت آیش‌بندی زمین در کشت محصولات کشاورزی، حفظ ساختار شکل زمین و همچنین تغذیه کردن خاک با عناصر معدنی نظیر سیدیم، منیزیم، پتاسیم و فسفر ضروری است.

در مطالعاتی که مورد بررسی قرار گرفت، تمرکزی بر روی جامع‌نگری و یکپارچه دیدن معیارهای الگوی کشت وجود نداشت و در هر مطالعه تعدادی از معیارها مورد بررسی قرار گرفته است. درصورتی که برای یک برنامه‌ریزی یکپارچه در راستای توسعه پایدار باید تمام معیارهای مؤثر بر الگوی کشت به نحوی مد نظر قرار گیرند که در این مطالعه تمرکز بر مورد اخیر است. همچنین، در مطالعات قبلی شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی برای افزایش بهره‌وری آب کشاورزی مورد توجه نبوده است. درصورتی که یکی از سیاست‌های کلی نظام و محورهای قانون بودجه در سال ۱۴۰۱ ارتقای بهره‌وری است. در این راستا برای جامع‌نگری و یکپارچه‌دیدن موضوع تعیین الگوی کشت ابتدا معیارهای مختلف الگوی کشت از مطالعات و منابع مختلف استخراج شده سپس با الهام از طبقه‌بندی انجام شده در توسعه پایدار معیارها دسته‌بندی شدند تا به شکل جامع و یکپارچه مورد بررسی قرار گیرند. تعیین اولویت معیارها با بهره‌گیری از تعریف یک تابع هدف و بهینه‌سازی آن با استفاده

از الگوریتم ژنتیک در حوضه آبریز تجن واقع در استان مازندران برای چهار محصول مهم و استراتژیک برنج، گندم، کلزا و سویا انجام شده است. در نهایت با محاسبه شاخص‌های بهره‌وری به مقایسه میزان بهره‌وری آب و زمین در شرایط موجود و شرایط بهینه پرداخته می‌شود. اطلاعات لازم برای پژوهش حاضر از طریق جست‌وجو در کتابخانه‌های معتبر، پایگاه‌های اینترنتی مختلف، رجوع به مقالات و مصاحبه با افراد مطلع و همچنین با مراجعه به ادارات و سازمان‌هایی از قبیل آب منطقه‌ای و سازمان جهاد کشاورزی به‌دست آمده است.

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر تعدادی از محصولات مهم و راهبردی منطقه مورد مطالعه شامل برنج، گندم، سویا و کلزا برای بررسی معیارهای معرفی شده انتخاب شدند. سپس معیارهای انتخابی با استفاده از روش بی‌مقیاس‌سازی خطی، نرمالایز شده تا همسنگ شوند. برای به‌دست آوردن اولویت بهینه معیارها، مدل کامپیوتری بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک در محیط متلب تهیه شد. تابع هدف بر اساس رسیدن به توسعه پایدار تعریف شده و به بهینه‌سازی آن تابع پرداخته و اولویت معیارهای انتخابی تعیین شد. در نهایت با محاسبه شاخص‌های بهره‌وری معرفی شده به محاسبه و مقایسه میزان بهره‌وری آب کشاورزی در شرایط فعلی و شرایط پس از بهینه‌سازی پرداخته شد. با توجه به مطالب مطرح شده روندنمای کلی پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است.

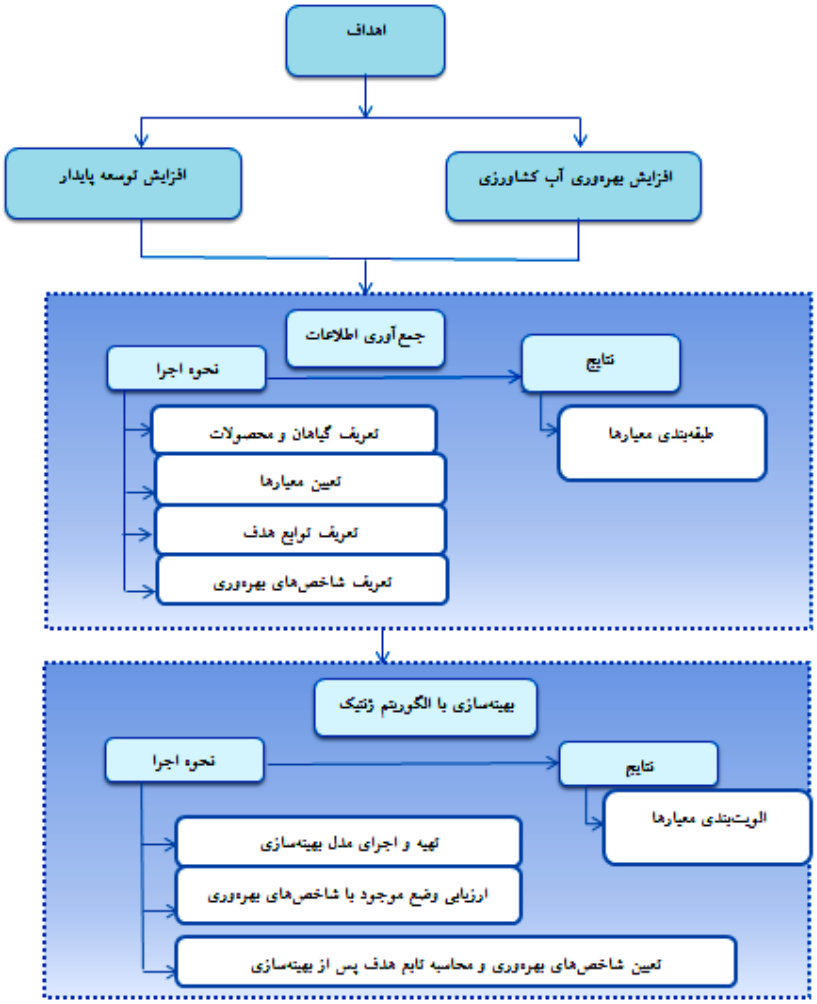
محدوده مورد مطالعه

شبکه آبیاری و زهکشی تجن در شهرستان ساری استان مازندران قرار دارد (شکل ۲). این شبکه که به‌عنوان شبکه کانال‌های آبرسان تلقی می‌شود، آب ذخیره و تنظیم شده رودخانه تجن را در محل سد انحرافی ساری دریافت و در چهار واحد عمرانی در سواحل چپ و راست رودخانه تجن برای تغذیه کانال‌های فرعی آبیاری درجه دو و سه و انهار سنتی اصلی و همین طور آبندان‌ها در سطح دشت منتقل و توزیع می‌نماید. ۷۰ درصد کشت غالب اراضی محدوده مطالعاتی، برنج است. سایر محصولات کشاورزی شامل غلات، سویا، کلزا، پنبه، علوفه، سبزیجات و صیفی‌جات و باغات میوه هستند (۱۴). بر اساس تقسیم‌بندی توزیع آب، واحدهای عمرانی شبکه مذکور را می‌توان به دو بخش بالادست و پایین‌دست تقسیم کرد.

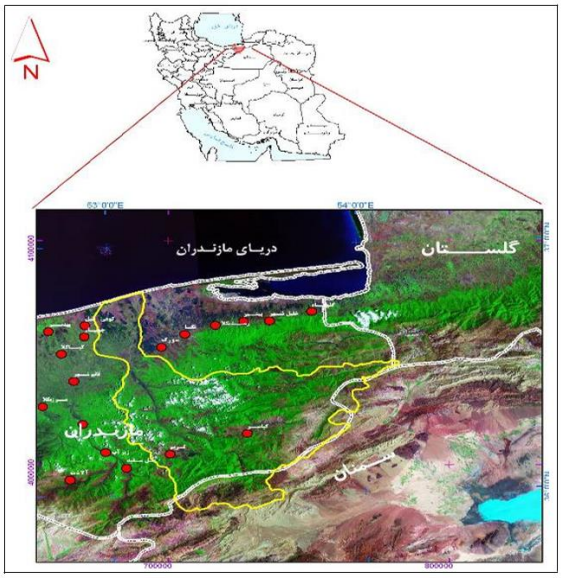
انتخاب و دسته‌بندی معیارهای الگوی کشت

با مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه معیارهای الگوی کشت مشخص شد که معیارهای مختلفی مورد توجه پژوهشگران قرار داشته‌اند، اما سؤال اصلی این است که از میان معیارهای مختلف، کدام معیارها برای تعیین الگوی کشت باید انتخاب شوند؟ برای پاسخ به این سؤال و رسیدن به یک طبقه‌بندی منسجم، همچنین ارائه فهرستی از معیارهای لازم و کافی برای تعیین الگوی کشت، در پژوهش حاضر از الگوی توسعه پایدار بهره گرفته شد. بر اساس تعریف ارائه شده در گزارش برانتلند با عنوان "آینده مشترک ما" توسعه پایدار، برآوردن نیازهای نسل حاضر بدون به مخاطره‌انداختن نیازهای نسل آینده است (۱۶). توسعه پایدار مبتنی بر مدیریت یکپارچه و جامع‌نگر است. در پژوهش حاضر بر اساس توسعه پایدار، معیارهای زیست‌محیطی و اقتصادی در نظر گرفته شد. با توجه به آنچه که مطرح شد و همچنین محدودیت‌ها در به‌دست آوردن اطلاعات، از میان معیارهای موجود برای الگوی کشت، هفت معیار به‌عنوان نماینده معیارهای زیست محیطی و اقتصادی انتخاب شدند. که در جدول ۱ نشان داده شده است.

معیار کود شیمیایی، میزان مصرف کود شیمیایی در هکتار را مورد توجه قرار می‌دهد که در محصولات مختلف بسته به نوع آنها می‌تواند تغییر کرده یا با کودهای آلی جایگزین شود. نیاز آبی گیاه معیار زیست‌محیطی بسیار مهم دیگری است که باید مورد توجه قرار گیرد. این معیار اشاره به مقدار آب مورد نیاز برای جبران تلفات تبخیر و تعرق گیاه در مزرعه دارد. مقدار نیاز آبی گیاه وابسته به تبخیر و تعرق در اثر اقلیم محلی و نیز



شکل ۱. روندنمای کلی تحقیق (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز تجن (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۱. طبقه‌بندی معیارها بر اساس توسعه پایدار

معیارهای زیست‌محیطی	معیارهای اقتصادی
میزان مصرف کود شیمیایی	میزان سوددهی
نیاز آبی گیاه	سطح زیرکشت
حجم آب مصرفی	عملکرد محصول
راندمان آبیاری	

شرایط رشد گیاه تغییر می‌کند، در نتیجه نیاز آبی گیاه نیز به‌صورت زمانی و مکانی متغیر است. همچنین، توزیع زمانی برداشت از منابع آب با توجه به نیاز آبی محصولات انتخابی در ماه‌های مختلف سال، متفاوت است. معیار حجم آب مصرفی شامل حجم مصرف آب از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی برای تولید محصولات زراعی و باغی به‌صورت فاریاب و دیم است. معیار راندمان آبیاری درصدی از مقدار آب تأمین شده برای مزرعه است که بتواند مفید واقع شود و جز مهم‌ترین معیارهای زیست‌محیطی است که اشاره به استفاده مناسب از منابع آبی دارد. معیار سوددهی که مقدار سود ناخالص محصول در هکتار است، مهم‌ترین معیار اقتصادی محسوب می‌شود. معیار سطح زیر کشت در واقع میزان کل تولید و درآمد کلی را مدنظر قرار می‌دهد. معیار عملکرد محصول مقدار محصول به‌دست آمده در واحد سطح است که تحت تأثیر شرایط متعدد و عواملی همچون اقلیم است. این معیار که به‌طور مستقیم بر درآمد کشاورزان تأثیرگذار است، بسیار مهم محسوب می‌شود. در مرحله بعدی به این سؤال پاسخ داده می‌شود که آیا معیارهای انتخابی برای تعیین الگوی کشت ارزش یکسانی دارند و یا به‌عبارت دیگر اولویت معیارهای انتخابی چگونه باید باشد. برای پاسخ به این سؤال و بررسی اهمیت هر یک از معیارها و اولویت‌بندی آن‌ها یک تابع هدف چند شاخصه تعریف و با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شد. تابع هدف به‌صورت شاخص توسعه پایدار تعریف شد که باید، بیشینه شود. شاخص توسعه پایدار به‌صورت یک کسر تعریف شد که در صورت کسر معیارهای عملکرد محصول، سوددهی و راندمان آبیاری که افزایش آنها در راستای توسعه پایدار است، قرار گرفت و در مخرج کسر، حجم آب مصرفی، کود شیمیایی، سطح زیر کشت و نیاز آبی گیاه قرار گرفت که کاهش آن در راستای توسعه پایدار است. تصمیم‌گیری‌های چند شاخصه عموماً مبتنی بر معیارهای مختلفی هستند که درنهایت هر تصمیم در نتیجه اولویت‌بخشی و ارجحیت آن‌ها نسبت به هم به‌دست می‌آید. از آنجا که مقایسه و اولویت‌بندی معیارها با بعدهای مختلف به سختی قابل بیان خواهد بود، می‌توان از بی‌مقیاس‌سازی خطی و نرمال کردن داده‌ها استفاده کرد. برخی معیارها از جنس سود بوده و بعد ریالی دارند و در مقابل برخی دیگر از جنس نهاده مصرفی آب بوده و بعد مترمکعب دارند. مقایسه مستقیم اعداد با بعد ریال و مترمکعب نتیجه مشخصی در برنخواهد داشت. برای بی‌مقیاس‌سازی خطی در معیارهایی با مطلوبیت افزایشی همچون سود، ابتدا بیشینه اعداد مربوط به آن معیار خاص مشخص می‌شود، سپس اعداد آن بر بیشینه تقسیم می‌شود. اگر مطلوبیت، مقدار کمینه باشد، کمینه معیار مورد نظر بر اندازه معیار مورد نظر تقسیم می‌شود (۹).

تابع هدف بهینه‌سازی بر پایه بیشینه‌سازی شاخص کلی توسعه پایدار، به‌صورت رابطه (۱) تعریف شد، متغیرهای تصمیم مسئله بهینه‌سازی ۷ معیار انتخابی ذکر شده است:

$$\text{Maximize } F = \frac{\frac{x_6}{x_5} + \frac{x_7}{x_5} + x_4}{\frac{x_1}{x_5} + \frac{x_2}{x_5} + \frac{x_3}{x_5} + x_5} + \sum_{i=1}^{n} \text{Penalty function}_i \quad (1)$$

در رابطه (۱) F مقدار تابع هدف، $\frac{x_1}{x_5}$ مقدار کود شیمیایی در

(کیلوگرم در هکتار)، $\frac{x_2}{x_5}$ نیاز آبی گیاه (مترمکعب در هکتار)، $\frac{x_3}{x_5}$ حجم آب مصرفی (مترمکعب در هکتار)، x_4 راندمان آبیاری (درصد)، x_5 سطح زیر کشت (هکتار)، $\frac{x_6}{x_5}$ مقدار سوددهی (تومان در هکتار) و $\frac{x_7}{x_5}$ عملکرد محصول (کیلوگرم هکتار) است. Penalty function مقدار جریمه‌هایی هستند که در صورت ارضانشدن قیدها در تابع هدف اعمال می‌شود. قیدهای مسئله همان محدوده معیارها در هر محصول است که شامل محدوده میزان کود شیمیایی، آب در دسترس و سطح زیر کشت است که به‌صورت توابع جریمه به تابع هدف مسئله اضافه می‌شود (۱۲). به‌طور کلی اگر α به‌عنوان یک معیار در نظر گرفته شود که در محدوده مشخص $A_{min} \le \alpha \le A_{max}$ تعریف شده باشد، اعمال توابع جریمه به‌صورت رابطه (۲) و(۳) زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$P_{max} = \lambda \min\left(\left(1-\frac{\alpha_i}{A_{max}}\right),0\right) \qquad (۲)$$

$$P_{min} = \lambda \min\left(\left(\frac{\alpha_i}{A_{min}}-1\right),0\right) \qquad (۳)$$

در روابط فوق P_{max}، P_{min} به‌ترتیب قیود مربوط به حداکثر و حداقل معیار و λ پارامتر جریمه مربوط به معیار مورد نظر است. مقدار این پارامتر در یک فرایند تکراری سعی و خطا به کمک اجراهای آزمایشی به‌گونه‌ای تخمین زده می‌شود که راندمان بهینه‌سازی افزایش یابد.

معرفی شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب و زمین

بهره‌وری عبارت از ارتباط فیزیکی میان مقدار تولید ایجاد شده (ستانده) و مقدار منابع به کار رفته (نهاده) در آن در دوره تولید است. به عبارت دیگر، از حداقل مواد، حداکثر محصول برداشت شود یا از مقدار معینی مواد، محصولی با کیفیتی بهتر تولید شود. اگر به تعریف ارائه شده برای بهره‌وری توجه شود جزء دیگر آن کار درست انجام دادن است که به آن اثربخشی می‌گویند. برای نمونه، ممکن است با مصرف کمتر مواد، محصول بیشتری تولید کرد اما این محصول کیفیت مطلوب مورد نظر مشتری را نداشته باشد. در این حالت کارایی واقع شده است اما چون محصول فاقد کیفیت لازم است از این‌رو اثربخش نبوده و نمی‌تواند رضایت مصرف‌کننده را جلب کند. بنابراین، ملاحظه می‌شود که دستیابی کارایی و یا اثربخشی به تنهایی موجب افزایش بهره‌وری نخواهد شد. به عبارت دیگر در مقوله بهره‌وری باید ابتدا کاری که انجام می‌شود کار درستی (یعنی مفیدی) باشد و سپس این کار به بهترین نحو انجام شود. با دستیابی این دو شرط می‌توان اطمینان حاصل کرد که بهره‌وری ایجاد شده است. پس بهره‌وری بیشتر به مفهوم تولید بیشتر از مقدار معینی از نهاده یا تولید مقدار مشخصی از محصول با استفاده از مقدار کمتری نهاده است.

به‌طورکلی بهره‌وری آب از دیدگاه‌های مختلفی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد، معمول‌ترین این دیدگاه‌ها بهره‌وری از دیدگاه فیزیکی و بهره‌وری از دیدگاه مالی است. مفهوم بهره‌وری از دیدگاه فیزیکی: بر اساس این دیدگاه، بهره‌وری بیشتر آب کشاورزی به معنای تولید محصول بیشتر به‌ازای واحد حجم آب است. بهره‌وری از دیدگاه مالی: بر اساس این دیدگاه بهره‌وری بیشتر آب کشاورزی به معنای کسب سود بیشتر به‌ازای واحد حجم آب است. در این پژوهش ابتدا شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و شاخص بهره‌وری اقتصادی برای وضع موجود منطقه محاسبه می‌شود. سپس بهینه‌سازی اولویت‌بندی معیارهای الگوی کشت انجام خواهد شد و دوباره شاخص‌های بهره‌وری پس از بهینه‌سازی اولویت‌بندی معیارها محاسبه و با شرایط فعلی مقایسه می‌شود.

شاخص‌های فیزیکی بهره‌وری

شاخص تولید محصول به‌ازای مترمکعب آب یا CPD: این شاخص از تقسیم مقدار محصول به میزان آب مصرفی به‌دست می‌آید (۹). این شاخص را می‌توان به‌صورت رابطه (۴) نشان داد:

$$CPD=\frac{Q}{W} \qquad (۴)$$

شاخص بهره‌وری تبخیر- تعرق یا WP_{ET}: این شاخص را

می‌توان به‌صورت رابطه (۵) نشان داد:

$$WP_{ET} = \frac{Y}{ET} \quad (۵)$$

در رابطه فوق Y میزان تولید بر حسب کیلوگرم بر هکتار و ET مقدار تبخیر– تعرق طی فصل زراعی است.

شاخص‌های اقتصادی بهره‌وری

شاخص سود خالص به‌ازای مترمکعب آب یا NPBD: این شاخص نه تنها میزان سود خالص را به ازای واحد حجم آب مصرف شده تعیین می‌نماید، بلکه این شاخص اهمیت زیادی در برنامه‌ریزی الگو و ترکیب کشت در مواجه با محدودیت شدید آب دارد. چرا که از این طریق می‌توان منابع کمیاب آب را به کشت‌هایی اختصاص داد که با کمترین واحد مصرف آب بیشترین سود را نصیب بهره‌برداران نماید. این شاخص را می‌توان به‌صورت رابطه (۶) نشان داد:

$$NBPD = \frac{NGR}{W} \quad (۶)$$

که در رابطه فوق، NGR ارزش خالص تولید بر حسب ریال و W مقدار آب مصرفی بر حسب مترمکعب است.

شاخص بهره‌وری زمین

شاخص بهره‌وری زمین، میزان محصولات تولید شده نسبت به زمین کشاورزی استفاده شده را نشان می‌دهد که به‌صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود:

$$LPI = \frac{Y}{LU} \quad (۷)$$

در رابطه فوق، LPI، شاخص بهره‌وری زمین، Y میزان تولید محصول و LU کل زمین مورد استفاده برای کشت محصول است.

بحث و نتایج

تعیین پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

به‌منظور تخمین بهترین تعداد برای جمعیت اولیه در الگوریتم مورد بررسی، اجراهای متفاوت با جمعیت اولیه از ۵۰ تا ۳۰۰ مورد آزمون قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی در شکل ۳ آمده است.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، الگوریتم با تعداد جمعیت اولیه ۲۵۰ جمعیت، مناسب‌ترین مقدار تابع هدف را ارائه کرده است. سپس مقدار پارامترهای الگوریتم ژنتیک برای بهترین پاسخ‌های به‌دست آمده در جدول ۲ ارائه شده است.

مسئله بهینه‌سازی مبتنی بر تابع هدف پیشنهادی، برای چهار محصول برنج، گندم، کلزا و سویا به‌عنوان محصولات مهم و راهبردی در منطقه مطالعاتی حل شد.

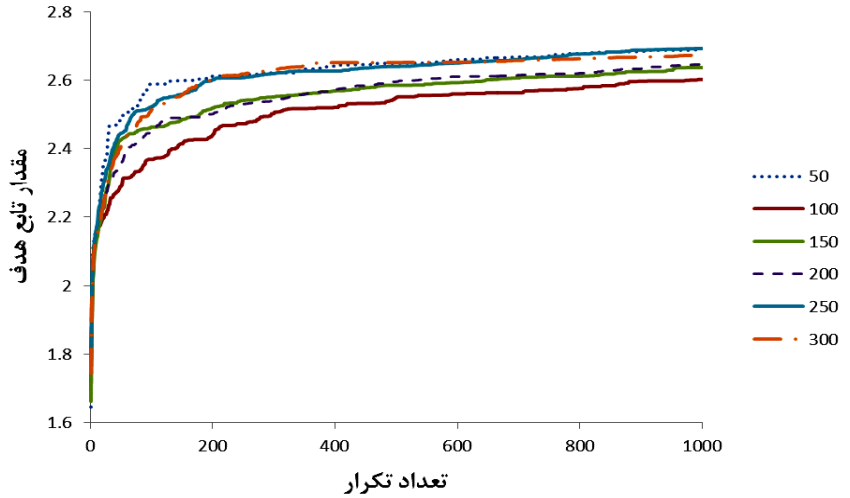
ابتدا برای مشخص‌شدن اولویت معیارهای مورد توجه کشاورزان در وضعیت فعلی، برای کشت محصولات در منطقه، به نرمال‌کردن معیارهای محصولات پرداخته شد. برای به‌دست آوردن اندازه بهینه معیارهای انتخاب شده از الگوریتم ژنتیک تهیه شده در محیط متلب استفاده شد. در ادامه نتایج هر محصول به تفکیک بیان خواهد شد.

نتایج محصول برنج

نتایج بهینه‌سازی در جدول ۳ ارائه شده است. اندازه تابع هدف نیز ۲/۸ است. با توجه به جدول ۳ معیارهای سطح زیر کشت ۱۱ درصد، حجم آب مصرفی ۲۲ درصد، نیاز آبی گیاه ۰/۵ درصد و کود شیمیایی ۴۹ درصد کاهش، همچنین معیارهای عملکرد محصول ۴۵ درصد و سوددهی ۷۲ درصد افزایش یافته است. در جدول ۴ مقدار شاخص‌های بهره‌وری محاسبه شده در شرایط موجود و شرایط بهینه و میزان تغییر آن‌ها نیز نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده مقدار شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی در شرایط بهینه و با اولویت‌بندی بهینه معیارهای انتخابی افزایش یافته است. بنابراین، با بهینه‌سازی اولویت معیارهای انتخابی محصولات علاوه بر تأمین معیارهای محیط زیستی مانند آب و خاک میزان بهره‌وری آب کشاورزی نیز افزایش می‌یابد.

نتایج محصول گندم

نتایج بهینه‌سازی در جدول ۵ ارائه شده است. اندازه تابع هدف نیز ۵/۴ است. با توجه به جدول ۶ معیارهای سطح زیر کشت ۶ درصد، حجم آب مصرفی ۱۱ درصد، نیاز آبی گیاه ۰/۸ درصد و



شکل ۳. روند تغییرات مقدار تابع هدف با جمعیت‌های متفاوت (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۲. مقادیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک

تعداد تکرار	اندازه جمعیت	تعداد ژن‌ها	نرخ جهش ژنی	نرخ تزویج
۱۰۰۰	۲۵۰	۷	۰/۰۲	۰/۹

جدول ۳. اندازه بهینه معیارهای برنج با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

معیار	اندازه فعلی معیار*	اندازه بهینه معیار	الویت فعلی معیار	اولویت بهینه معیار
سطح زیر کشت	۲۷۷۴۱ هکتار	۲۳۹۶۶ هکتار	۳	۲
حجم آب مصرفی	۱۳۴۲۷مترمکعب در هکتار	۱۰۴۳۰ مترمکعب در هکتار	۵	۱
نیاز آبی گیاه	۸۹۹۰ متر مکعب در هکتار	۸۹۴۰ مترمکعب در هکتار	۲	۵
عملکرد محصول	۴۳۰۹ کیلوگرم در هکتار	۷۸۱۸ کیلوگرم در هکتار	۱	۷
کود شیمیایی	۲۹۰ کیلوگرم در هکتار	۱۴۸ کیلوگرم در هکتار	۶	۶
سوددهی	۵۷۹۸۶ هزار ریال در هکتار	۲۱۰۱۸۶ هزار ریال در هکتار	۴	۴
راندمان آبیاری	٪۸۰	٪۸۰	۷	۳

* آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی استان مازندران (۲)

جدول ۴. مقادیر شاخص‌های بهره‌وری در وضعیت موجود و بهینه برای محصول برنج

شاخص بهره‌وری	مقدار در وضعیت موجود	مقدار در وضعیت بهینه	میزان تغییر
CPD	۰/۳۳	۰/۸۸	+۱۶۶٪
WP_{ET}	۰/۵	۰/۸۷	+۷۴٪
NBPD	۹/۳	۲۳/۸	+۱۵۵٪
LPI	۱/۹	۴/۴۳	+۱۳۳٪

جدول ۵. اندازه بهینه معیارهای گندم با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

معیار	اندازه فعلی معیار*	اندازه بهینه معیار	اندازه فعلی معیار	اولویت بهینه معیار
سطح زیر کشت	۱۸۶۸ هکتار	۱۷۵۷ هکتار	۲	۴
حجم آب مصرفی	۲۰۳۲مترمکعب در هکتار	۱۸۱۳ مترمکعب در هکتار	۱	۱
نیاز آبی گیاه	۱۲۳۸ متر مکعب در هکتار	۱۱۳۰ مترمکعب در هکتار	۷	۲
عملکرد محصول	۳۵۷۹ کیلوگرم در هکتار	۷۷۹۵ کیلوگرم در هکتار	۵	۵
کود شیمیایی	۲۹۰ کیلوگرم در هکتار	۲۵۰ کیلوگرم در هکتار	۶	۶
سوددهی	۱۶۲۲۷ هزار ریال در هکتار	۳۱۶۱۰ هزار ریال در هکتار	۳	۷
راندمان آبیاری	٪۵۲	٪۶۰	۴	۳

* آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی استان مازندران (۲)

جدول ۶. مقادیر شاخص‌های بهره‌وری در وضعیت موجود و بهینه برای محصول گندم

شاخص بهره‌وری	مقدار در وضعیت موجود	مقدار در وضعیت بهینه	میزان تغییر
CPD	۱/۹۷	۴/۳	+۱۱۸٪
WP_{ET}	۱۹/۱۶	۳۹/۵	+۱۰۶٪
NBPD	۸/۹	۱۷/۴۳	+۹۵٪
LPI	۱/۹	۴/۴۳	+۱۳۳٪

کود شیمیایی ۱۴ درصد کاهش، همچنین معیارهای عملکرد محصول ۵۴ درصد، راندمان آبیاری ۱۳ درصد و سوددهی ۴۹ درصد افزایش یافته است.

حجم آب مصرفی در کشت گندم در هر دو حالت وضعیت موجود و شرایط بهینه در اولویت اول قرار دارد. این بدین معنی است که کشاورزان در صورت دسترسی به آب کافی اقدام به کشت گندم خواهند کرد. که این مسئله در شرایط بهینه نیز مدنظر قرار گرفته و اولویت معیار انتخابی مربوط به حجم آب مصرفی است. پس از دسترسی به آب کافی اولویت فعلی کشاورزان برای کشت گندم مربوط به معیارهای اقتصادی همچون سطح زیر کشت و سوددهی است. نتایج حاکی از آن است که کشاورزها از معیارهای زیست محیطی مانند راندمان آبیاری، کودشیمیایی و بهره‌وری آب غافل بودند، اگر این روند ادامه یابد در دراز مدت باعث از بین رفتن مزارع فعلی می‌شود اما این اولویت‌بندی پس از بهینه‌سازی به دسته معیارهای زیست‌محیطی مانند نیاز آبی گیاه و راندمان آبیاری اختصاص دارد. با انتخاب این اولویت معیارهای اقتصادی مانند سوددهی و عملکرد محصول نیز افزایش می‌یابد. در جدول ۶ مقدار شاخص‌های بهره‌وری محاسبه شده در شرایط موجود و شرایط بهینه و میزان تغییر آنها نیز نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده شده است، میزان شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و بهره‌وری اقتصادی نیز با انجام بهینه‌سازی و اولویت‌بندی معیارهای الگوی کشت افزایش یافته است.

نتایج محصول کلزا

نتایج بهینه‌سازی در جدول ۷ ارائه شده است. اندازه تابع هدف نیز ۱/۹ است. با توجه به جدول ۷ معیارهای سطح زیر کشت ۶۰ درصد، حجم آب مصرفی ۷۴ درصد ، نیاز آبی گیاه

جدول ۷. اندازه بهینه معیارهای کلزا با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

معیار	اندازه فعلی معیار*	اندازه بهینه معیار	الویت فعلی معیار	اولویت بهینه معیار
سطح زیر کشت	۵۷۵۰ هکتار	۲۳۲۶ هکتار	۴	۳
حجم آب مصرفی	۵۰۸۳مترمکعب در هکتار	۱۳۰۳ مترمکعب در هکتار	۷	۱
نیاز آبی گیاه	۱۳۳۸ متر مکعب در هکتار	۱۰۳۱ مترمکعب در هکتار	۶	۲
عملکرد محصول	۲۳۷۴ کیلوگرم در هکتار	۳۵۶۳ کیلوگرم در هکتار	۱	۵
کود شیمیایی	۳۰۰ کیلوگرم در هکتار	۲۶۷ کیلوگرم در هکتار	۵	۶
سوددهی	۴۹۷۶ هزار ریال در هکتار	۱۴۸۵۹ هزار ریال در هکتار	۲	۷
راندمان آبیاری	٪۶۴	٪۶۵	۳	۵

* آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی استان مازندران (۲)

جدول ۸. مقادیر شاخص‌های بهره‌وری در وضعیت موجود و بهینه برای محصول کلزا

شاخص بهره‌وری	مقدار در وضعیت موجود	مقدار در وضعیت بهینه	میزان تغییر
CPD	۰/۹۶	۲/۷۳	+۱۸۴٪
WP_{ET}	۱/۳۷	۳/۴۵	+۱۵۱٪
NBPD	۵/۰۳	۱۱/۴	+۱۲۶٪
LPI	۰/۵۲	۱/۵۳	+۱۹۴٪

۲۳ درصد و کود شیمیایی ۱۱ درصد کاهش، همچنین معیارهای عملکرد محصول ۳۳ درصد، راندمان آبیاری ۱/۵ درصد و سوددهی ۶۶ درصد افزایش یافته است. در جدول ۸ مقدار شاخص‌های بهره‌وری محاسبه شده در شرایط موجود و شرایط بهینه و میزان تغییر آنها نیز نشان داده شده است.

نتایج محصول سویا

نتایج بهینه‌سازی در جدول ۹ ارائه شده است. اندازه تابع هدف نیز ۵/۹ است. با توجه به جدول ۹ معیارهای سطح زیر کشت ۲۷ درصد، حجم آب مصرفی ۲۷ درصد ، نیاز آبی گیاه ۵۳ درصد و کود شیمیایی ۱۱ درصد کاهش، همچنین معیارهای عملکرد محصول ۳۸ درصد و سوددهی ۵۵ درصد افزایش یافته است. مقادیر شاخص‌های بهره‌وری نیز در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

در حالت موجود، دسته معیارهای اقتصادی مانند عملکرد محصول و سطح زیر کشت بیشتر و دسته معیارهای زیست محیطی مانند راندمان آبیاری و حجم آب مصرفی کمتر مورد توجه کشاورزان قرار گرفته است. این الویت‌بندی با توجه به خشکسالی‌های اخیر و بحران آب سبب از بین رفتن منابع آب و خاک که جزء منابع زیست‌محیطی است خواهد شد. اما اولویت معیارها در الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک ابتدا با توجه به دسته معیارهای زیست محیطی است و معیارهایی همچون حجم آب مصرفی و راندمان آبیاری را مقدم بر سطح زیر کشت و میزان سوددهی می‌داند. با انتخاب این اولویت معیارهای اقتصادی مانند سوددهی و عملکرد محصول نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، علاوه بر تأمین معیارهای زیست‌محیطی میزان شاخص‌های بهره‌وری آب و زمین نیز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با مصرف حجم آب کمتر میزان تولید محصولات و به تبع آن

جدول ۹. اندازه بهینه معیارهای سویا با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

معیار	اندازه فعلی معیار*	اندازه بهینه معیار	الویت فعلی معیار	اولویت بهینه معیار
سطح زیر کشت	۳۰۲۲ هکتار	۲۱۹۲ هکتار	۲	۴
حجم آب مصرفی	۱۲۰۸ مترمکعب در هکتار	۸۷۳ مترمکعب در هکتار	۶	۱
نیاز آبی گیاه	۲۴۵۰ متر مکعب در هکتار	۱۱۳۱ مترمکعب در هکتار	۷	۲
عملکرد محصول	۴۴۲۶ کیلوگرم در هکتار	۷۱۳۴ کیلوگرم در هکتار	۱	۷
کود شیمیایی	۲۷۹ کیلوگرم در هکتار	۲۵۰ کیلوگرم در هکتار	۴	۵
سوددهی	۹۸۴۳ هزار ریال در هکتار	۲۱۷۴۴ هزار ریال در هکتار	۵	۶
راندمان آبیاری	٪۶۵	٪۶۵	۳	۳

* آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی استان مازندران (۲)

جدول ۱۰. مقادیر شاخص‌های بهره‌وری در وضعیت موجود و بهینه برای محصول سویا

شاخص **بهره‌وری**	مقدار در وضعیت موجود	مقدار در وضعیت بهینه	میزان تغییر
CPD	۳/۶۶	۸/۱۷	+۱۲۳٪
WP_{ET}	۳/۸۱	۹/۷۱	+۱۵۴٪
NBPD	۱۰/۱۴	۲۴/۹	+۱۴۵٪
LPI	۱/۴۶	۳/۲۵	+۱۷۹٪

سود اقتصادی حاصل از آن نیز افزایش می‌یابد و در کنار آن معیارهای زیست‌محیطی مانند منابع آب و خاک نیز حفظ خواهد شد. نتایج پژوهش حاضر با نتایج کاظمی و همکاران (۱۰) در حوضه کویر درانجیر استان کرمان مطابقت دارد. ایشان یازده معیار را به‌عنوان معیارهای اصلی انتخاب کرده و برای دو محصول پسته و گل‌محمدی بررسی کردند. تحلیل نتایج آنها نشان می‌دهد که الویت معیارها برای تعیین الگوی کشت به‌ترتیب دسته معیارهای زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی است. این الویت‌بندی در پژوهش حاضر هم مشاهده می‌شود. همچنین محمدیان و همکاران (۱۱) الگوی زراعی شهرستان تربت جام در استان خراسان رضوی را شناسایی و معرفی کردند، به‌گونه‌ای که ضمن تثبیت درآمد کشاورزان، میزان برداشت از منابع آبی دشت نیز کاهش یابد. الویت الگوی کشت منتخبی به‌ترتیب میزان آب مصرفی، درآمد خالص، هزینه‌های مصرفی و نیروی کار بود که با نتایج پژوهش حاضر هماهنگ است. در پژوهشی دیگر با در نظر گرفتن هفت معیار اصلی متشکل از معیارهای اقتصادی، مالی، بازاریابی، زیست محیطی، فنی، سیاسی و اجتماعی، سی و یک زیر معیار تعیین کردند. نتایج نشان داد که معیارهای زیست‌محیطی و اقتصادی، مهمترین معیار و معیار فنی کم اهمیت‌ترین معیار شناخته شد (۷). نتایج این پژوهش نیز با توجه به اهمیت معیارهای زیست محیطی با نتایج پژوهش حاضر انطباق دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به انتخاب و ارزیابی بهینه معیارهای الگوی کشت در حوضه آبریز تجن واقع در استان مازندران پرداخته شد. در همین راستا با تأکید بر الگوی توسعه پایدار، هفت معیار الگوی کشت انتخاب شده و اولویت معیارها برای چهار محصول مهم و استراتژیک برنج، گندم، کلزا و سویا، مشخص شد. وضعیت فعلی گویای این بود که در انتخاب الگوی کشت،

ابتدا دسته معیارهای اقتصادی، و در نهایت دسته معیارهای زیست‌محیطی مانند حجم آب مصرفی و راندمان آبیاری مورد توجه کشاورزان قرار گرفته است. اما اولویت معیارها در الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، اگرچه هر یک از محصولات ترتیب معیارهای مختص به خود را دارند، اما تمامی اولویت‌ها دارای ترتیبی مشابه از نقطه نظر زیست محیطی و سپس اقتصادی هستند. به‌طوری که توجه به دسته معیارهای زیست‌محیطی همچون معیار حجم آب مصرفی، نیاز آبی گیاه و راندمان آبیاری را مقدم می‌داند. سپس توجه به دسته معیارهای اقتصادی همچون عملکرد محصول و سوددهی را نشان می‌دهد. با این اولویت‌بندی به‌طور متوسط معیارهای سطح زیر کشت، حجم آب مصرفی و میزان کود شیمیایی به‌ترتیب ۲۶ درصد، ۳۴ درصد و ۲۱ درصد کاهش و معیارهای عملکرد محصول و میزان سوددهی به‌ترتیب ۴۳ درصد و ۶۱ درصد افزایش یافته است. بنابراین، در شرایط موجود سیاست‌گذاری‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که بتواند چالش‌های محدودیت منابع آبی را تأمین کند، یعنی به دسته معیارهای زیست‌محیطی و به پایداری منابع آبی توجه بیشتری داشته باشد که در درازمدت این سیاست‌گذاری به نفع معیارهای اقتصادی و اجتماعی نیز است. زیرا همان‌گونه که نتایج محاسبه شاخص‌های بهره‌وری نشان داد، این اولویت‌بندی علاوه بر تأمین معیارهای زیست‌محیطی و افزایش توسعه پایدار، به‌طور متوسط سبب افزایش بهره‌وری فیزیکی به میزان ۸۴ درصد و افزایش بهره‌وری اقتصادی به میزان ۷۲ درصد می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود، اولویت‌بندی معیارهای گیاهان دیگر و برای مناطق مختلف نیز با روش‌های بهینه‌سازی تعیین شود تا بتوان به توسعه پایدار و افزایش بهره‌وری دست پیدا کرد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری تحت قرارداد با شماره ۰۸-۱۴۰۱-۰۲ انجام شد که به این وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Agha, S.R., G. Latifa, H.A. Nassar and R.Y. Shehada 2012. Multi criteria governmental crop planning problem: an analytic hierarchy approach. *Management* 2(4): 96-105.
2. Abdulkader, M., I. Al-Amoud and S. Awad. 2012. Optimization of the cropping pattern in Saudi Arabia using a mathematical programming sector model. *Agricultural Economics* 58(2):56-60.
3. Birhanu, K., T. Alamirew, M. Olumana, S. Ayalew and D. Aklog. 2015. Optimizing cropping pattern using chance constraint linear programming for Koga irrigation Dam, Ethiopia. *Irrigation and Drainage Systems Engineering* 4(134): 2-18.
4. Bojang, P.O., P. S. Yu, T. C. Yang and C. M. Kuo. 2016. Optimal cropping patterns for profit maximization using a linear programming model: A case study in Njawara Village, The Gambia. *In:* 12th International Conference on Hydro Science and Engineering, Taiwan.
5. Fallahi, E. and S. Gholinezhad. 2016. Optimal cropping pattern based on multiple economic, regional, and agricultural sustainability criteria in Sari, Iran: Application of a Consolidated Model of AHP and Linear Programming. *Journal of Agricultural Economics and Development* 30(1):37-49 (In Persian).
6. Fasakhodi, A. A. and S. Nouri. 2011. Sustainability assessment and cropping pattern determination in farming systems based on the optimization of soil and water resources utilization using non-linear mathematical programming models. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 15(55): 99-111.
7. Fathi, F. and M. Zibaei. 2012. Water Resources Sustainability using Goal Programming Approach in optimizing Crop Pattern, Strategy and Irrigation Method. *Iran-Water Resources Research* 8(1): 10-19 (In Persian).
8. Hao, L. N., X. L. Su and V. P. Singh. 2018 Cropping pattern optimization considering uncertainty of water availability and water saving potential. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 11(1): 178-186.
9. Habibi, M. M., A. Bani Habib and S. Hashemi. 2013. Optimization model of water resource allocation in

agriculture, industry and service sectors using advanced GAPSO algorithm. *Water and Soil Journal* 27: 680-691.
10. Kazemi Korani, E., M. Samareh Hashem, S. Golestani Kermani and S. Samareh Ghasem Shabjareh. 2019. Assessment and optimum selection of crop pattern criteria relying on sustainable development. *Iran-Water Resources Research* 15 (2): 98-108 (In Farsi).
11. Mohammadian, F., N. Shahnooshi Forushani, M. Ghorbani and H. Aqeel. 2010. Choosing a potential crop pattern by using AHP analysis model (case study: torbat-e-jam plain). *Journal of Sustainable Agriculture Knowledge* 1(19):169-187.
12. Nasabian, S. H. Mohammadi and A. Kikha. 2014. The effect of modifying the cultivation pattern on the reduction of fertilizer and agricultural activities. *Environmental Science and Technology* 16 (3):75-91.
13. Sadeghi Tabas, S. A., M. Khashai Seyuki. Bailandi and H. Hashemi. 2015. The influence of social, political and economic criteria in optimizing the pattern of saffron cultivation using the combined frog mutation algorithm. *Saffron Research Journal* 3(2): 123-133.
14. Statistics of Agriculture. 2018. Ministry of agriculture jihad. Deputy of Planning and Economic, Information and Communication Technology Center, Tehran, Iran.
15. Wani, S.P., G. Chander, K.L. Sahrawat, D. Pal, P. Pathak and G. Pardhasaradhi. 2016. Sustainable use of natural resources for crop intensification and better livelihoods in the rainfed semi-arid tropics of Central India. NJAS-*Wageningen Journal of Life Sciences* 78: 13-9.
16. World Commission on Environment and Development (WCED). 1987. Our common future (The Brundtland Report). UN. Secretary-General, Oxford University Press, New York, USA.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 27, No. 2, Summer 2023, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Optimizing the Criteria of Crop Pattern Based on Sustainable Development and Increasing Agricultural Water Productivity in Tajan Catchment Basin

A. Shahnazari and S. Sadeghi[1*]

(Received: December 4-2022 ; Accepted: January 28-2023)

Abstract

In the present paper, crop pattern criteria have been evaluated relying on sustainable development to increase agricultural water productivity. Seven criteria were selected as the main environmental and economic criteria and were prioritized and reviewed for important and strategic products in the Tajan catchment of Mazandaran province. Criteria prioritization was done using optimization through a genetic algorithm with an objective function based on sustainable development. Then, physical and economic productivity indices were calculated to determine the productivity value. Based on the results, in the selection of the crop pattern, firstly, the category of economic criteria and finally the category of environmental criteria have been given attention to the farmers in the current situation. But in the genetic optimization algorithm, all priorities have a similar order from the environmental point of view and then from the economic point of view although each product has its order of criteria. By this prioritization, the parameters of the cultivated area, the volume of water consumed, and the amount of chemical fertilizers have decreased on average by 26%, 34%, and 21%, respectively, and the parameters of product performance and profitability have increased by 43% and 61%, respectively. In addition to providing environmental standards and increasing sustainable development, this prioritization causes an average increase in physical productivity by 84% and an increase in economic productivity by 72%.

Keywords: Objective function, Irrigation and drainage network, Water resources, MATLAB software

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Mazandaran, Iran.
*: Corresponding author, Email: Sonia_6812@yahoo.com