

بهینه سازی الگوی زراعی با تأکید بر پایداری و محدودیت آب در استان کرمان

سید مهدی خیاط حسینی^۱

حمید محمدی^۲

وحید دهباشی^{۳*}

vahideconomy@gmail.com

علیرضا سرگزی^۱

محمد جواد مهدی زاده راینی^۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳

چکیده

زمینه و هدف: در شرایط محدودیت منابع آب، علاوه بر توسعه پایدار منطقه ای و حفظ محیط زیست لزوم تامین حداکثر منافع اقتصادی حاصله برای کشاورزان نیز باید مورد توجه قرار گیرد. هدف مطالعه حاضر، بهره گیری از الگوی برنامه ریزی چندهدفه غیرخطی فازی به منظور بررسی امکان مصالحه میان آرمان های حداکثرسازی بازده اقتصادی، حفظ محیط زیست (از طریق کاهش مصرف کودهای شیمیایی (و توسعه ی پایدار منابع آب) با کاهش مصرف آب (در تعیین الگوی کشت شهرستان بردسیر استان کرمان است.

روش بررسی: داده های مورد نیاز با استفاده از روش نمونه گیری خوشه ای دو مرحله ای از بهره برداران شهرستان بردسیر در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ جمع آوری گردید.

یافته ها: نتایج مطالعه نشان داد که سطح زیر کشت محصول لوبیا در الگوی حداقل مصرف آب و الگوی حداقل مصرف کود شیمیایی و همچنین مصالحه اهداف به ترتیب از ۲۲/۱۲ به ۴۴/۲۲ و ۲۳/۲۰ افزایش یافته است. در محصول چغندر قند با نیاز آبی بالا سطح زیر کشت در الگوی جاری ۳۴/۲۱ است در حالی که در الگوی حداقل کننده مصرف آب و الگوی حداقل مصرف کود شیمیایی و الگوی مصالحه اهداف به سطح ۲۶/۱۱ کاهش یافته است. در رابطه با محصول جو سطح زیر کشت در الگوی کاهش مصرف آب از سطح زیر کشت در الگوی جاری کمتر در حالی که در الگوی حداقل مصرف کود شیمیایی و الگوی مصالحه اهداف سطح زیر کشت از الگوی جاری افزایش می یابد. در مورد محصول گندم نیز فقط در الگوی مصالحه اهداف سطح زیر کشت از ۴۳/۵۶ به ۵۸/۶۰ افزایش می یابد در حالی که در الگوهای حداقل مصرف آب و حداقل مصرف کود شیمیایی به ترتیب به ۴۵/۲۸ و ۳۶/۲۷ کاهش می یابد. در رابطه با محصول ذرت علوفه ای سطح زیر کشت هم در الگوی کاهش مصرف آب و هم در الگوی کاهش مصرف کود شیمیایی سطح زیر کشت کاهش در حالی که در الگوی مصالحه اهداف سطح زیر کشت نسبت به الگوی جاری افزایش می یابد.

بحث و نتیجه گیری: استفاده از اجرای الگوی مصالحه اهداف در تحقق اهداف متضاد حداکثر بازده برنامه ای، کاهش مصرف آب (پایداری) و کاهش مصرف کود شیمیایی (حفظ محیط زیست) نسبت به الگوهای دیگر از درجه برتری بالاتری با توجه به تابع مرکب ارمانی (فازی) برخوردار است.

واژه های کلیدی: پایداری، الگوی برنامه ریزی غیر خطی فازی، محیط زیست و بردسیر.

^۱ دانشجوی دکتری اقتصاد کشاورزی گرایش منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه زابل، زابل، ایران

^۲ گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

^۳ گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران* (مسوول مکاتبات)

Optimizing the agricultural pattern with emphasis on sustainability and water limitation in Kerman province

Seyed Mehdi Khayat Hoseini¹

Hamid Mohammadi²

Vahid Dehbashi^{3*}

vahideconomy@gmail.com

Alireza Sargazi¹

Mohaammad Javad Mehdizadeh Rayeni¹

Accepted Date: September 9, 2025

Date Received: April 23, 2025

Abstract

Background and Objective: In conditions of limited water resources, in addition to sustainable regional development and environmental protection, the need to ensure maximum economic benefits for farmers should also be considered. The aim of the present study is to use a fuzzy nonlinear multi-objective programming model to investigate the possibility of a compromise between the goals of maximizing economic efficiency, environmental protection (by reducing the use of chemical fertilizers), and sustainable development of water resources (by reducing water consumption) in determining the cultivation pattern of Bardsir County, Kerman Province.

Research Method: The required data were collected from farmers in Bardsir County in 1402-1403 using a two-stage cluster sampling method.

Findings: The results of the study showed that in the minimizing water consumption model to maintain the planned yield at the current yield level, the share of barley, beans, lentils, sugar beet peas and fodder corn in the crop composition was similar to the maximizing planned yield model, and the reduction in water consumption was achieved only by reducing the area under wheat cultivation to 38.43%. Also, the results obtained from the minimizing chemical fertilizer consumption cultivation model show that in this model, the level of beans, peas, lentils, sugar beet and fodder corn is equivalent to the level achieved by minimizing water consumption.

Discussion and Conclusion: The implementation of this model can have significant effects in increasing the planned yield, sustainability (reducing water consumption) and also protecting the environment (reducing chemical fertilizer consumption).

Keywords: Sustainability, Fuzzy Nonlinear Programming Model, Environment and Sustainability.

Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran

[†] PhD Student in Agricultural Economics, Natural Resources and Environment, University of Zabol, Zabol, Iran

[‡] Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran*
(Corresponding Author)

مقدمه

در سال‌های اخیر، توجه فزاینده‌ای به تغییر سیستم غذایی-کشاورزی، به ویژه در زمینه امنیت کشاورزی، غذایی و تغذیه‌ای معطوف شده است. سیستم غذایی جهانی باید تغییراتی در هنجارهای اجتماعی و فناوری تجربه کند تا پایداری محیط‌زیستی و تولید کافی برای حمایت از جمعیت رو به رشد جهان محقق شود. تعامل عوامل متعدد منجر به تغییرات گذار شده است، مانند کاهش بهره‌وری برخی محصولات و افزایش سریع تقاضا برای غذاهای فراوری‌شده. بنابراین، تحول فوری سیستم‌های غذایی و کشاورزی جهانی در جهت کشاورزی پایدار ضروری است و یکی از چالش‌برانگیزترین وظایف بشر به شمار می‌آید. از این رو، تضمین امنیت غذایی آینده در راستای کشاورزی پایدار اهمیت ویژه‌ای دارد. تأمین غذا برای جمعیت رو به رشد جهانی یکی از چالش‌های اصلی است. تولید غذا باید تا سال ۲۰۵۰ بین ۳۵ تا ۵۶ درصد افزایش یابد تا با تقاضای فزاینده هماهنگ شود. متأسفانه، شدت‌بخشی کشاورزی به شدت به ورودی‌های بالای منابع متکی است تا تولید غذا افزایش یابد، که این امر اغلب به قیمت آسیب به محیط زیست و توسعه پایدار انجام می‌شود. تغییرات محیطی جهانی ناشی از کشاورزی فشرده، تولید کشاورزی را از طریق رخدادهای شدید جوی و کاهش منابع تهدید می‌کند. بنابراین، سیستم‌های کشاورزی مدیریت‌شده به‌طور فزاینده باید اصلاح شوند تا اهداف توسعه پایدار محقق شود. این چالش‌ها شامل تعاملات بنیادی بین تأمین غذا و حفاظت از محیط زیست هستند. از سویی بحران آب در ایران، به‌عنوان کشوری واقع در نواحی خشک و نیمه‌خشک، همواره یکی از چالش‌های اساسی در مسیر توسعه پایدار محسوب می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بیش از ۸۰ درصد منابع آب قابل استحصال کشور در بخش کشاورزی مصرف می‌شود، که این امر اهمیت بهینه‌سازی استفاده از آب و مدیریت منابع آبی را در این بخش دوچندان می‌کند. استفاده ناپایدار از این منابع می‌تواند اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی قابل توجهی به دنبال داشته باشد و ضرورت بهره‌گیری از راهکارهای علمی و مدیریتی برای افزایش کارایی مصرف آب را برجسته می‌سازد. با این حال، راندمان آبیاری در این بخش بسیار پایین بوده و تنها حدود یک‌سوم آب مصرفی به مصرف واقعی گیاه می‌رسد؛ در حالی که بخش قابل توجهی از آن به دلیل به‌کارگیری روش‌های سنتی و غیراصولی آبیاری، از طریق تبخیر و نفوذ عمقی هدر می‌رود. مطالعات انجام‌شده بیانگر آن است که در صورت تداوم وضعیت موجود، بخش کشاورزی کشور تا سال ۱۴۰۰ با کمبودی معادل ۵۴ میلیارد مترمکعب آب مواجه خواهد شد؛ چراکه بیش از ۹۳ درصد کل منابع آبی در این بخش مصرف می‌شود. بر این اساس،

مدیریت کارآمد منابع آب یکی از ارکان اصلی توسعه اقتصادی به‌شمار می‌رود و اهمیت آن در کشورهایی نظیر ایران، که با محدودیت‌های شدید آبی روبه‌رو هستند، دوچندان است. لذا، اتخاذ رویکردهای مدیریتی و راهبردهای بهینه‌سازی مصرف آب، به‌ویژه در شرایط کم‌آبی و خشکسالی، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر دارد. از سوی دیگر، به دلیل هزینه پایین و دسترسی آسان به کودهای نیتروژنه در کشور، مصرف بی‌رویه آن‌ها در بین کشاورزان رواج یافته است. این مسئله سبب افزایش تلفات نیتروژن از طریق فرآیندهای تصعید و آبشویی شده و در نتیجه، منجر به آلودگی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی و بروز پیامدهای زیست‌محیطی گسترده می‌گردد. بر این مبنا، در نظام تولید محصولات کشاورزی و مدیریت آبیاری، می‌توان میزان مصرف نیتروژن یا کود اوره را به‌عنوان شاخصی زیست‌محیطی در نظر گرفت؛ به‌طوری‌که حداقل میزان مصرف نیتروژن در دوره رشد گیاه، معیاری برای دستیابی به وضعیت زیست‌محیطی پایدار تلقی شود (۱). در این پژوهش، پایداری به‌عنوان میزان آب باقیمانده برای آبیاری و یا حداقل مقدار مصرف آب تعریف شده است. وو و همکاران (۲۰۲۵) مطالعه‌ای تحت عنوان به سوی کشاورزی پایدار: طراحی سیستم‌های کشاورزی عمودی سازگار با محیط زیست، اقتصادی و مدولار انجام دادند. افزایش جمعیت و شهرنشینی مداوم، امنیت غذایی را به یکی از عوامل کلیدی در توسعه پایدار تبدیل کرده است. از این رو، استراتژی‌های کشاورزی کارآمد با ردپای محیط‌زیستی پایین برای پاسخ به نیازهای غذایی به‌طور فزاینده‌ای مورد نیاز هستند. این مطالعه طراحی سیستم‌های کشاورزی عمودی دوستدار محیط‌زیست، اقتصادی و مدولار را ارائه می‌دهد که در آن سبزیجات در جو غنی از دی‌اکسید کربن (CO_2) که توسط جذب مستقیم هوا (DAC) تأمین شده است، کشت می‌شوند و در معرض نور مصنوعی قرار می‌گیرند. ما یک سامانه کشاورزی عمودی ایجاد کرده و آزمایش‌هایی را برای شناسایی استراتژی‌های کشت پربازده با تنظیم نوردهی، غلظت CO_2 ، کاربرد بیوپار و گونه‌های گیاهی انجام دادیم. علاوه بر این، از یک جاذب چرخشی DAC خودتوسعه‌یافته برای دستیابی به غنی‌سازی پایدار و کارآمد CO_2 استفاده شد. در مقایسه با گروه کنترل، وزن تازه سبزیجات در گروه‌های آزمایشی تا ۵۷/۵٪ افزایش یافت. علاوه بر این، ارزیابی جامع طراحی انجام شد و نشان داده شد که ادغام واحدهای فوتوولتائیک-حرارتی (PVT) و DAC، ارزش خالص فعلی (NPV) سیستم را تا ۱۵۷٪ در مقایسه با طراحی معمولی بدون این واحدها افزایش می‌دهد. مهم‌تر آنکه، مشخص شد که حفظ ردپای کربن پایین سیستم (۰/۴۶۸ کیلوگرم معادل CO_2 به ازای هر کیلوگرم سبزیجات) در فرایند تولید امکان‌پذیر است.

مطالعات پارامتریک و تحلیل کاربرد جهانی نشان می‌دهد که این استراتژی قابلیت سازگاری گسترده‌ای با شرایط مختلف دارد. این یافته‌ها، همراه با ویژگی‌های مدولار سیستم‌های کشاورزی عمودی، پتانسیل امیدوارکننده این طراحی برای افزایش امنیت غذایی و تقویت کشاورزی پایدار را برجسته می‌کنند (۲). راج و همکاران (۲۰۲۴) مطالعه‌ای با عنوان بهینه‌سازی امنیت غذایی و پایداری زیست‌محیطی با استفاده از کشاورزی اکولوژیک و استراتژی‌های بهره‌وری پایدار انجام دادند. این ارزیابی مقایسه‌ای بین کشاورزی اکولوژیک و فشرده‌سازی پایدار بر تأثیر مثبت هر دو راهبرد در ارتقای بهبود اقتصادی، پایداری محیط‌زیست و امنیت غذایی جهانی تمرکز دارد. استفاده از استراتژی‌های فشرده‌سازی پایدار، مانند مدیریت یکپارچه سیستم خاک-محصول و سیستم‌های مدیریت نیتروژن، نتایج با کیفیت بالایی را در افزایش عملکرد محصولات کشاورزی نشان داده است. در حالی که همزمان تخریب محیط‌زیست کاهش یافته است. از سوی دیگر، کشاورزی اکولوژیک مقاومت در برابر تغییرات اقلیمی را افزایش داده و پایه‌ای پایدار برای ارتقای عدالت اجتماعی، قابلیت اقتصادی، سلامت خاک و تنوع زیستی فراهم می‌کند. تعامل بین فشرده‌سازی پایدار و کشاورزی اکولوژیک نشان‌دهنده ضرورت ایجاد راهبردهای جامع و یکپارچه است که از ایده‌های بوم‌شناختی، پیشرفت‌های فنی و دانش بومی برای ایجاد سیستم‌های غذایی غنی و پایدار بهره ببرند. اطمینان از حفاظت محیط‌زیست، امنیت غذایی و عدالت اجتماعی از طریق ترکیب اصول کشاورزی اکولوژیک و فشرده‌سازی پایدار قابل تحقق است. این اهداف از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند، با توجه به مشکلات مداوم در تأمین غذای جمعیت رو به رشد جهانی و چالش‌هایی که در قالب تغییرات اقلیمی و منابع طبیعی محدود باقی مانده است (۳). کاستیلو و همکاران (۲۰۲۴) مطالعه‌ای با عنوان کمی‌سازی پایداری در سیستم کشاورزی غذایی: چارچوب روشی جامع و رویکرد اجماع کارشناسان انجام دادند. مدل پیشنهادی شامل ۷۰ شاخص است که به ویژه بر شاخص‌های زیست‌محیطی تأکید دارد و با اجماع پل کارشناسان همسو است. شاخص ترکیبی حاصل و مجموعه شاخص‌های همراه، درک دقیق‌تری از پایداری کسب‌وکارهای کشاورزی فراهم می‌کند. یافته‌های مطالعه بر لزوم اولویت‌دهی به ملاحظات زیست‌محیطی در ارزیابی پایداری کسب‌وکارهای کشاورزی تأکید دارند. مدل پیشنهادی امکان تدوین برنامه‌های عملیاتی برای افزایش قابلیت زیست‌پذیری کسب‌وکارهای کشاورزی و انطباق آن‌ها با تغییرات اجتماعی و سیاسی را فراهم می‌کند. این انطباق برای پاسخگویی به نیازهای روزافزون به کاهش اثرات زیست‌محیطی مرتبط با تولید و فرآوری غذا ضروری است. روش‌شناسی توسعه‌یافته به

هم‌راستایی و استانداردسازی روش‌های ارزیابی پایداری کمک کرده و رویکردی جامع‌تر و هماهنگ‌تر در کل بخش کشاورزی-غذایی ایجاد می‌کند (۴). بی‌شک، کشاورزی اهمیت بسیار بالایی در تضمین حیات انسان‌ها دارد. از آغاز تمدن، کشاورزی نقش عمده‌ای ایفا کرده است که با گذر زمان به شکل قابل توجهی تکامل یافته و امروزه به دلیل استفاده از روش‌های مدرن کشاورزی، نیازمند دقت و توجه بیشتری است. افزایش مداوم جمعیت جهانی باعث افزایش تقاضا برای محصولات کشاورزی شده و مشکل کمبود غذا را تشدید کرده است. پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰ جمعیت جهانی از ۹ میلیارد نفر فراتر رود و تولید کشاورزی ۵۰٪ افزایش یابد، که در نهایت نیاز به افزایش ۱۵٪ در مصرف آب را به همراه خواهد داشت. کشاورزی حدود ۷۰٪ از منابع آب شیرین جهان را مصرف می‌کند، با این حال این منابع روز به روز کمیاب‌تر می‌شوند. علاوه بر این، کودها و سموم شیمیایی به طور گسترده استفاده می‌شوند، در حالی که منابع طبیعی مانند خاک و آب برای پاسخگویی به نیازهای کشاورزی جمعیت رو به رشد، به طور نادرست بهره‌برداری شده‌اند. معرفی کودهای نیتروژنی طی ۵۰ سال گذشته مسیر پیشرفت در کشاورزی را هموار کرده است؛ با این حال، براساس داده‌های فعلی، سالانه حدود ۲/۵ میلیون تن کود مورد نیاز است که نشان‌دهنده افزایش ۸۰٪ در مصرف کودهای نیتروژنی است. کودهای شیمیایی سنتی دارای بهره‌وری پایینی هستند، زیرا تنها ۳۰-۳۵٪ از مواد مغذی توسط محصولات جذب می‌شود. علاوه بر این، ۵۰-۷۰٪ کودهای نیتروژنی اعمال‌شده از طریق فرار، دنتریفیکاسیون و شست‌وشوی خاک از بین می‌روند و خطرات زیست‌محیطی جدی مانند آلوده کردن منابع آب زیرزمینی و کاهش کیفیت خاک را به همراه دارند. تغییرات اقلیمی نیز باعث تخریب محیط زیست شده و بیابان‌زایی به طور گسترده‌ای بر تولیدات کشاورزی تأثیر گذاشته است. بنابراین، تولید محصولات کشاورزی کافی در حالی که محیط زیست حفظ شود، یک چالش جهانی است.

روش بررسی

در کنار تحقق هدف اصلی پژوهش، یعنی حداکثرسازی سود یا تأمین سطح معینی از درآمد، در این مطالعه اهداف فرعی دیگری نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ از جمله کاهش مصرف آب به‌منظور ارتقای پایداری تولید و کاهش مصرف کود اوره در راستای صیانت از محیط‌زیست. با توجه به آن‌که این اهداف از ماهیت‌های ناهمگن و در برخی موارد متعارض برخوردارند، ضروری است پیش از انجام تحلیل، به‌شیوه‌ای مناسب استانداردسازی و مقیاس‌پذیرسازی شوند. در چارچوب برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری

آنگاه» برآورد می‌شود. استدلال و استنتاج فازی شامل ترکیب منطقی خروجی‌های قواعد است، به‌گونه‌ای که هر ورودی تابع عضویت، با دارا بودن شرایط مشخص در قسمت «اگر»، خروجی متناظری تولید می‌کند. در این مرحله، ترکیب هم‌زمان متغیرها بر نتایج خروجی فازی تأثیر می‌گذارد و منطق فازی از تمامی قواعد تعریف‌شده برای برآورد خروجی بهره می‌گیرد. مقدار نهایی خروجی فازی، از طریق ترکیب منطقی نتایج قواعد و تشکیل سطح منحنی فازی حاصل می‌شود. در ادبیات علمی مرتبط با بهینه‌سازی، نوع مدل تصمیم‌گیری مناسب برای چنین شرایطی معمولاً در یکی از دسته‌های چندمعیاره، چندهدفه، اهداف متقابل، یا چندخصی طبقه‌بندی می‌شود. وجه مشترک تمام این روش‌ها آن است که در محیط‌های پیچیده، به‌ندرت توافق کامل بر یک هدف واحد و مشخص حاصل می‌شود و لذا استفاده از منطق فازی به‌عنوان روشی مؤثر برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت، بسیار کاربردی است (۸). در این زمینه، استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی ریاضی برای ارائه الگوی کشت بهینه دارای مزایای قابل توجهی است و در مطالعات متعدد به عنوان یک ابزار کارآمد مورد استفاده قرار گرفته است. این روش امکان تحلیل سیستماتیک منابع، بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها و افزایش بهره‌وری اقتصادی و محیط‌زیستی را فراهم می‌آورد (۹). با توجه به اینکه بسیاری از اهداف مورد نظر نامتجانس هستند، لذا لازم است بگونه‌ای متجانس گردند. در برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌های چند هدفی می‌توان از منطق فازی برای همجنس کردن اهداف استفاده کرد (۱۰). از این روش تاکنون در مطالعات و تصمیم‌گیری چند هدفه استفاده‌های گسترده‌ای شده است (۱۱). منطق فازی به‌عنوان یک فناوری نوین، روشی جایگزین برای طراحی و مدل‌سازی سیستم‌هایی ارائه می‌دهد که در حالت معمول نیازمند محاسبات ریاضی پیچیده و پیشرفته هستند. این روش با استفاده از مقادیر زبانی و دانش خبرگان حوزه مربوطه، امکان تحلیل و تصمیم‌گیری در سیستم‌های پیچیده را به‌صورت ساده‌تر و کارآمدتر فراهم می‌سازد (۹). با بهره‌گیری از این تئوری نوین، می‌توان سطوح هدف برنامه‌ریزان را که معمولاً به‌صورت مبهم و با زبان طبیعی بیان می‌شوند، به شکل کمی و قابل سنجش تعریف نمود. اهداف مورد نظر در این مطالعه شامل حداکثرسازی بازده برنامه‌ای، حداقل مصرف آب (به منظور پایداری منابع)، و حفظ محیط‌زیست می‌باشند. برای دستیابی به این اهداف سه‌گانه، در ابتدا لازم است مقادیر بهینه هر یک از اهداف منفرد تعیین گردد. منظور از مقدار بهینه عبارت است از: حداکثر بازده برنامه‌ای، حداقل مصرف آب، حداقل مصرف کود اوره و حداقل ریسک، و حداکثر اشتغال. در این راستا: حداکثر بازده برنامه‌ای مشروط بر سطح فعلی منابع آب و سایر نهاده‌های

چندهدفه، یکی از رویکردهای مؤثر برای هم‌ترازسازی اهداف گوناگون، بهره‌گیری از منطق فازی است. این روش با فراهم‌سازی امکان مقایسه و ادغام اهداف دارای ماهیت‌های متفاوت، شرایط لازم برای دستیابی به راه‌حل‌های بهینه‌تر در مدیریت منابع و تخصیص نهاده‌ها را فراهم می‌سازد (۵). منطق فازی تاکنون در مطالعات گوناگون و در چارچوب تصمیم‌گیری‌های چندهدفه مرتبط با مدیریت منابع آب در شرایط عدم قطعیت، کاربردهای گسترده‌ای یافته است. یافته‌های این پژوهش‌ها بیانگر آن است که به‌کارگیری منطق فازی می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد و انعطاف‌پذیر در تحلیل و تصمیم‌گیری در محیط‌های دارای ابهام، نوسان و داده‌های ناقص مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد با توانایی خود در مدل‌سازی عدم قطعیت و ارتقای قابلیت اعتماد نتایج تحلیلی، نقش بسزایی در بهبود دقت و کارایی مدل‌های مدیریتی ایفا می‌کند (۶). منطق فازی به‌عنوان یکی از فناوری‌های نوین در حوزه مدل‌سازی و تصمیم‌گیری، با اتکا بر مقادیر زبانی و دانش خبرگان در حوزه مورد مطالعه، چارچوبی جایگزین برای طراحی و تحلیل سیستم‌هایی پیچیده و غیرقطعی فراهم می‌سازد؛ سیستم‌هایی که در شرایط متعارف، مستلزم محاسبات سنگین و مدل‌های ریاضی پیشرفته هستند. این رویکرد از طریق به‌کارگیری منطق تقریبی و ساده‌سازی فرآیند مدل‌سازی، امکان تحلیل و تفسیر پدیده‌های پیچیده و نامعین را به‌صورت کارآمدتر و انعطاف‌پذیرتر فراهم می‌کند (۷). با بهره‌گیری از این تئوری نوین، می‌توان سطوح هدف و معیارهای مورد نظر برنامه‌ریزان را که معمولاً به‌صورت مبهم و در قالب زبان طبیعی بیان می‌شوند، به‌صورت کمی و کمی‌سازی‌شده تعریف و مدل‌سازی کرد. این رویکرد با فراهم‌سازی امکان تبدیل ادراکات و تجربیات کیفی خبرگان به داده‌های قابل تحلیل، زمینه را برای کاربرد آن‌ها در مدل‌سازی‌های کمی و تصمیم‌گیری‌های ساختاریافته مهیا می‌سازد. به‌این‌ترتیب، منطق فازی پلی میان داده‌های کیفی و کمی ایجاد کرده و به ارتقای دقت، شفافیت و قابلیت اعتماد نتایج تصمیم‌گیری کمک می‌کند (۸). روش منطق فازی معمولاً شامل سه مرحله اصلی است: فازی‌سازی ورودی‌ها، فرآیند فازی، و تبدیل خروجی فازی به غیرفازی. در مرحله فازی‌سازی، داده‌های ورودی توسط کنترل‌گر فازی تفسیر و تبدیل می‌شوند. این مرحله شامل دو بخش اساسی است: توابع عضویت و طبقه‌بندی داده‌ها. کنترل‌گر منطق فازی در طی فازی‌سازی، داده ورودی را دریافت کرده و مطابق توابع عضویت تعیین‌شده توسط کاربر، آن را به مقادیر فازی تبدیل می‌کند. توابع عضویت می‌توانند اشکال مختلفی داشته باشند و بسته به ماهیت داده و سیستم مورد نظر تعریف شوند. در مرحله فرآیند فازی، خروجی با توجه به توابع عضویت و بر اساس قواعد «اگر-

$$\text{Max} : \lambda = \left[\sum_{j=1}^M w_j \lambda_j^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad \text{رابطه (۶)}$$

Subject to:

$$\lambda_j (Z_j^{\text{Max}} - Z_j^{\text{Min}}) + Z_j(x) \leq Z_j^{\text{Max}} \quad \text{When } Z_j^{\text{Min}} \text{ is best} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$Z_j(x) - \lambda_j (Z_j^{\text{Max}} - Z_j^{\text{Min}}) \geq Z_j^{\text{Min}} \quad \text{When } Z_j^{\text{Max}} \text{ is best} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$A_{hi} x_i \leq b_h \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$x_i \geq 0 \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$0 \leq \lambda \leq 1 \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, 5 \quad h = 1, 2, \dots, q$$

در روابط فوق، $w_j \geq 0$ ، $\sum_{j=1}^M w_j = 1$ ، w_j وزن هدف j و P

عامل تعادلی اهداف است. این عامل به نوعی درجه جانشینی بین اهداف را مشخص می‌کند. در حالت P برابر ۱، بیشترین درجه جانشینی و در حالت P برابر ۳، اهداف از کمترین درجه جانشینی برخوردارند. همچنین، Z_j^{Max} و Z_j^{Min} به ترتیب حداقل و حداکثر هدف j ام، $Z_j(x^*)$ مقدار هدف بهینه و x^* جواب بهینه است و اختلاف Z_j^{Max} و Z_j^{Min} را با عنوان حد تحمل تعریف می‌کنند. λ_j نیز مقدار آرمانی هدف j ام، A_{hi} ضریب فنی i امین محصول برای h امین محدودیت و b_h موجودی h امین محدودیت مدل می‌باشد. محدودیت‌های الگو شامل محدودیت زمین، آب، نیروی کار، سرمایه، تناوب زراعی و محدودیت‌های ریسکی و محدودیت‌های خاص روش حل مقید برنامه‌ریزی چند هدفی (شامل محدودیت سطح بازده مشخص و میزان معین از مصرف آب) است. پس از تعیین الگوی مورد استفاده برای بهینه سازی با توجه به اهداف مورد نظر بایستی محدودیت‌ها و معیارهای تصمیم‌گیری را مشخص می‌نماییم که ترجیحات تصمیم‌گیرندگان را در نظر گرفته شد. برای این منظور وزن‌هایی متفاوتی را با توجه به اهداف مورد نظر داده می‌شود (۱۱).

تصمیم‌گیرنده باید تا جایی که ممکن است، نسبت وزنی و رابطه هر یک از توزیع کننده‌ها را نشان دهد. با توجه به ناهمگن بودن اهداف مورد استفاده، ضروری است که این اهداف به شکلی همگن تبدیل شوند. در این مطالعه، با استفاده از روش پیشنهادی سریولی و زانی^۲ برای تعیین تابع عضویت اهداف، میانگین وزنی هندسی به صورت زیر محاسبه گردید (۱۲):

$$\mu(i) = \sum_{j=1}^M w_j \mu_j(i)$$

در دسترس محاسبه شد. حداقل مصرف آب با شرط تأمین سطح فعلی بازده برنامه‌ای تعیین گردید. حداقل مصرف کود شیمیایی نیز مشروط بر سطح فعلی بازده برنامه‌ای، منابع آب و سایر نهاده‌ها به دست آمد. حداقل ریسک مشروط بر سطح فعلی بهره‌برداری از نهاده‌ها و تأمین سطح فعلی بازده برنامه‌ای محاسبه شد. حداکثر اشتغال نیز به‌عنوان یکی دیگر از اهداف قابل اندازه‌گیری لحاظ گردید. تعیین مقادیر بهینه اهداف منفرد، پیش‌نیاز تعریف دامنه فازی هر هدف و تشکیل توابع عضویت آن‌ها در الگوریتم فازی است. برای هر هدف، حداقل و حداکثر مقدار بر اساس سطح فعلی بهره‌بردار و نهاده‌های در دسترس تعیین گردید؛ به‌گونه‌ای که برای بازده برنامه‌ای، حداقل مقدار برابر با سطح فعلی بازده بهره‌بردار و برای مصرف آب و کود، حداکثر مقدار نیز معادل سطح فعلی منابع و نهاده‌ها لحاظ شد. با این روش، الگویی فازی شکل می‌گیرد که اهداف سه‌گانه و دیگر معیارهای کلیدی مانند ریسک و اشتغال را به صورت همزمان مدنظر قرار می‌دهد و امکان تصمیم‌گیری بهینه در شرایط چندهدفه و نامطمئن را فراهم می‌سازد. رابطه شماره ۵ نیز بیانگر محدودیت نیروی کار است. در روابط ۱ تا ۵، Y عملکرد محصول، F میزان استفاده از کود شیمیایی، W میزان آب مصرفی و L نفر روز کار بکار گرفته شده در یک هکتار کشت است. P قیمت واحد محصول، C هزینه‌های متغیر سایر نهاده‌ها به جز نهاده‌های کودشیمیایی و آب، P_F قیمت کودشیمیایی، P_W قیمت آب، می‌باشند. علاوه براین، σ نیز نشان‌دهنده ماتریس واریانس-کوواریانس بازده حاصل از تولید محصول، X سطح فعالیت محصول و اندیسهای i و k نیز نشان‌دهنده نوع محصول می‌باشند. پس از تعیین تابع عضویت هر یک از اهداف، با استفاده از رابطه ۱، که در مطالعه بارنز و جانز مورد استفاده قرار گرفته است، بیشینه مسافت مرکب آرمانی^۱ تابع عضویت اهداف یاد شده مشروط بر محدودیت‌های موجود (روابط ۶ تا ۱۱) تعیین گردید (۱۱):

$$\text{Max} : Z_1 = \sum_{i=1}^n (Y_i P_i - C_i - P_F F_i - P_W W_i) X_i \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{Min} : Z_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \sigma_{ik} X_i X_k \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\text{Min} : Z_3 = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\text{Min} : Z_4 = \sum_{i=1}^n F_i X_i \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\text{Max} : Z_5 = \sum_{i=1}^n L_i X_i \quad \text{رابطه (۵)}$$

^۲ Cerioli and Zani

^۱ Fuzzy composite distance

از اطلاعات جمع‌آوری شده الگوریتم‌های لازم برای رسیدن به الگوی چند هدفه فازی مصالحه‌ای این مطالعه در بسته نرم افزاری GAMS نوشته شد (۱۴). با یک اجرای نهایی، نتایج مورد نظر به دست آمد. داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز این مطالعه بر اساس روش نمونه‌گیری خوشه‌ای از کشاورزان شهرستان بردسیر در سال‌های ۱۴۰۲-۱۴۰۳ جمع‌آوری شد. بخش عمده‌ای از اراضی آبی این شهرستان به کشت هفت محصول اصلی شامل گندم، جو، لوبیا، نخود، عدس، چغندر قند و ذرت علوفه‌ای اختصاص یافته است. با توجه به اهمیت کشت این محصولات و برای پرهیز از تأثیرگذاری محصولات کم‌اهمیت‌تر بر ترکیب کلی الگوی کشت، الگوریتم‌های برنامه‌ریزی با فرض عدم تغییر در سطح زیرکشت سایر محصولات اجرا شد. جدول ۲ نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های برنامه‌ریزی با اهداف مختلف در شهرستان بردسیر را نشان می‌دهد. در فرآیند تصمیم‌گیری برای تعیین الگوی کشت محصولات زراعی در مناطق مختلف، تصمیم‌گیری منطقی زراعی شامل در نظر گرفتن تمامی اهداف کلیدی مطرح شده است. در این منطقه نیز با اجرای الگوی مصالحه‌ای، تلاش شد تا بر اساس وزن‌های اختصاص داده شده به اهداف مختلف، ترکیب بهینه کشت حاصل گردد و همزمان بازده اقتصادی، مصرف آب و سایر شاخص‌های محیط‌زیستی بهینه شود.

چیاپرو مارتینتی معتقد است مقادیر وزن اهداف باید بین حداکثر و حداقل باشد. بر این اساس وزن اهداف بصورت زیر تعریف می‌گردد (۱۳):

$$w_j = \ln\left(\frac{1}{\mu_j}\right) / \sum_{j=1}^M \ln\left(\frac{1}{\mu_j}\right) \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

در روابط فوق w_j تابعی معکوس از میانگین سطح اهداف نسبت به هدف j است. تابع لگاریتمی نشان می‌دهد که اولویت هر الگوی بهینه به صورت یک تابع غیرخطی از اهداف مورد نظر بیان می‌شود. در مرحله نخست، مدیر یا تصمیم‌گیرنده تعیین محدودیت‌ها و معیارهای تصمیم‌گیری لازم برای دستیابی به اهداف هر گزینه امری ضروری است. این فرآیند به‌طور کلی ذهنی و مبتنی بر تجربه بوده و به طور کامل قابل مستندسازی نمی‌باشد؛ بنابراین تا حد زیادی وابسته به دانش، تجربه و ترجیحات تصمیم‌گیرنده است. برای لحاظ کردن دانش و ترجیحات تصمیم‌گیرنده، وزن‌هایی متناسب با اهمیت هر یک از اهداف در نظر گرفته می‌شود. این وزن‌ها معمولاً از طریق گفت‌وگو و تبادل نظر با تصمیم‌گیرندگان تعیین شده و در تحلیل‌های بعدی به‌عنوان مقیاس اهمیت نسبی اهداف استفاده می‌شوند (۱۰). در فرآیند تصمیم‌گیری، لازم است تصمیم‌گیرنده نسبت‌های وزنی و روابط میان هر یک از توزیع‌کننده‌ها را تا حد امکان به‌صورت دقیق تعیین نماید. بدین منظور، باید توجه شود که مجموع مقادیر این توزیع‌ها برابر با عدد یک بوده و ارزش هر یک از آن‌ها در بازه‌ی صفر تا یک قرار گیرد. در مطالعه‌ی حاضر، اوزان نسبی اهداف آرمانی بر اساس یافته‌های حاصل از مطالعات میدانی تعیین شده و مقادیر مربوطه در جدول (۱) ارائه گردیده است. مطابق داده‌های این جدول، فاکتور توازن برابر با یک در نظر گرفته شد؛ به این معنا که بیشترین درجه‌ی امکان جانشینی میان اهداف در مدل برقرار است. چنین رویکردی امکان می‌دهد تا اهداف مختلف با انعطاف‌پذیری مناسب در چارچوب تصمیم‌گیری چندهدفه جایگزین یکدیگر شوند و در نتیجه، تحلیل حساسیت میان اهداف با دقت بالاتری انجام پذیرد.

جدول ۱- وزن اهداف در نظر گرفته شده در مدل برنامه‌ریزی
Table 1- Weight of objectives considered in the planning model

اهداف	وزن نسبی	فاکتور توازن
حداکثر بازده برنامه‌ای	۰/۴۰	۱
حداقل مصرف آب	۰/۵۰	
حداقل مصرف کود نیتروژنه	۰/۱۰	

یافته‌ها

بخش عمده‌ای از اراضی آبی این شهرستان به کشت هفت محصول اصلی شامل گندم، جو، لوبیا، نخود، عدس، چغندر قند و ذرت علوفه‌ای اختصاص یافته است. با توجه به اهمیت کشت این محصولات و برای پرهیز از تأثیرگذاری محصولات کم‌اهمیت‌تر بر ترکیب کلی الگوی کشت، الگوریتم‌های برنامه‌ریزی با فرض عدم تغییر در سطح زیرکشت سایر محصولات اجرا شد. جدول ۲ نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های برنامه‌ریزی با اهداف مختلف در شهرستان بردسیر را نشان

جدول ۲- الگوی کشت مدل‌های مختلف در نظر گرفته شده در شهرستان بردسیر

نام محصول	جاری	حداقل‌کننده مصرف آب	حداقل کننده مصرف کود شیمیائی	مصلحه اهداف
لوبیا	22/12	22.44	44/22	23/20
چغندر قند	34/21	36/11	36/11	26/11
گندم	43/56	45/28	36/27	58/60
ذرت علوفه ای	98/.	38/.	38/.	56/2
نخود	48/.	24/.	24/.	24/.
جو	86/3	23/2	96/9	45/2
عدس	76/6	45/3	46/3	7.17
آیش	0.00	46/18	19.00	08/0

در الگوی کاهش مصرف کود شیمیائی سطح زیر کشت کاهش در حالی که در الگوی مصالحه اهداف سطح زیر کشت نسبت به الگوی جاری افزایش می‌یابد.

در جدول 3، تاثیر نتایج حاصل از اجرای الگوهای برنامه‌ریزی با تاکید بر اهداف سه گانه مورد مطالعه آمده است. در این جدول فاصله شاخصها تا آرمان در نظر گرفته شده و حدبحرانی آمده است. با توجه به اینکه حدبحرانی تمامی اهداف مورد نظر الگوی جاری کشت محصولات فرض شده لذا تابع مسافت مرکب آرمانی در الگوی جاری برابر صفر می‌باشد. در الگوی حداقل کننده مصرف آب، رسیدن به آرمانهای کاهش مصرف آب و همچنین به طور تقریبی، حداقل سازی مصرف کودشیمیائی تحقق یافته است. بنابراین مسافت مرکب آرمانی این الگو از حد بحرانی، 8/9 درصد کمتر شده است. بر اساس نتایج به دست آمده برای الگوی حداقل کننده مصرف کود شیمیائی، هدف حداکثر بازده برنامه‌ای در حد بحرانی خود ثابت مانده و تا رسیدن به سایر آرمانها

بر اساس نتایج جدول 2 سطح زیر کشت محصول لوبیا در الگوی حداقل مصرف آب و الگوی حداقل مصرف کود شیمیائی و همچنین مصالحه اهداف به ترتیب از 22/12 به 44/22 و 23/20 افزایش یافته است. در محصول چغندر قند با نیاز آبی بالا سطح زیر کشت در الگوی جاری 34/21 است در حالی که در الگوی حداقل‌کننده مصرف آب و الگوی حداقل مصرف کود شیمیائی و الگوی مصالحه اهداف به سطح 26/11 کاهش یافته است. در رابطه با محصول جو سطح زیر کشت در الگوی کاهش مصرف آب از سطح زیرکشت در الگوی جاری کمتر در حالی که در الگوی حداقل مصرف کود شیمیائی و الگوی مصالحه اهداف سطح زیر کشت از الگوی جاری افزایش می‌یابد. در مورد محصول گندم نیز فقط در الگوی مصالحه اهداف سطح زیر کشت از 43/56 به 58/60 افزایش مییابد در حالی که در الگوهای حداقل مصرف آب و حداقل مصرف کود شیمیائی بترتیب به 45/28 و 36/27 کاهش مییابد. در رابطه با محصول ذرت علوفه‌ای سطح زیر کشت هم در الگوی کاهش مصرف آب و هم

همچنان فاصله وجود دارد. بنابراین مسافت مرکب آرمانی این الگو از حد بحرانی، 45/23 درصد کمتر شده است.

جدول ۳- تأثیر الگوی کشت بر شاخص‌های مختلف در شهرستان بردسیر

Table 3 – The effect of cultivation pattern on various indicators in Bardsir County

مصلحهٔ اهداف	حداقل کننده مصرف کود شیمیائی	حداقل کننده مصرف آب	هدف الگو	شرح متغیر
			جاری	
نام شاخص				
۵۱۴۷۸۸۶۰	۴۸۸۵۲۲۴۰	۴۸۸۵۲۲۴۰	۴۸۸۵۲۲۴۰	بازده برنامه‌ای (ریال در هکتار)
۱۷۱۰	۱۷۵۰	۱۶۸۰	۲۰۸۸	مصرف آب (مترمکعب در هکتار)
۴۰۵	۵۰۶	۵۰۶	۷۲۰	کودشیمیائی (کیلوگرم در هکتار)
فاصله تا آرمان				
۳۰	۷۰	۰	۴۰۸	حداقل مصرف آب (متر مکعب)
۱۰۱	۰	۰	۲۱۴	حداقل مصرف کود شیمیائی (کیلوگرم)
فاصله تا حد بحرانی				
۳۷۸	۳۳۸	۴۰۸	۰	حداقل مصرف آب (متر مکعب)
۳۱۵	۲۱۴	۲۱۴	۰	حداقل مصرف کود شیمیائی (کیلوگرم)
۷۴/۷۶	۴۵/۲۳	۴۹/۴۵	۰,۰۰	مسافت مرکب آرمانی (فازی)

الگوی بهینه که این اهداف متضاد را تا حد بالاتری از دو اکوی دیگر محقق ساخته است را در نظر گرفت.

پس از مشخص شدن الگوی برتر به بررسی تأثیر کلی اجرای آن بر اهداف مورد نظر پرداخته شد. نتایج این بررسی در جدول ۴ آمده است. همانطور که در این جدول آمده است با استفاده از اجرای الگوی مصالحه کننده بین اهداف حداقل شدن مصرف آب (پایداری) و (حداقل مصرف کود شیمیائی) محیط زیست، میزان مصرف آب کمتر حدود ۹/۸ میلیون مترمکعب آب و مصرف کمتر کود شیمیائی (محیط زیست) مقدار ۳/۵ تن بدست خواهد آمد.

نتایج این الگوها نشان می‌دهد که در الگویی حداقل مصرف آب (پایداری) میزان مصرف کود تا حد بهینه الگوی حداقل کننده مصرف کود شیمیائی (حافظت محیط زیست) است هر چند هدف حداکثر بازده برنامه ای محقق نشده است. تابع مسافت مرکب از ۵۰ درصد کمتر است. این در حالی که در این الگو حداکثر بازده برنامه ای تا حد آرمان ۲۶۲۶۲۰ واحد فاصله دارد. ر الگوی محیط زیست میزان مصرف آب تا حد آرمان ۷۰ واحد فاصله دارد. در این الگو نیز حداکثر بازده برنامه ای محقق نشده است و این امر باعث شده تا فاصله مرکب آرمانی نسبت به شرایط موجود، ۴۵/۲۳ درصد ارتقاء یابد. در الگوی مصالحه کننده با توجه به اینکه تابع مسافت آرمانی نسبت به وضع موجود و نسبت به اهداف حداقل مصرف آب و حداقل مصرف کود شیمیائی تا حدود ۷۴ درصد ارتقا یافته است این الگو را می توان به عنوان

جدول ۴- تأثیر نهائی الگوی کشت مصالحه کننده آرمان‌ها نسبت وضعیت جاری در منطقه مورد مطالعه

Table 4 – The final effect of the ideals compromise cultivation model compared to the current situation in the study area

شهرستان		شرح متغیر
بردسیر		
۶۷۸۶۵	۱	سطح زیر کشت (هکتار)
فاصله تا حد بحرانی		
۸۹۳۹۹۱۶۵	۱۴۵	مصرف آب (متر مکعب)
۵۳۳۳۶۰۶	۵۸/۵۶	مصرف کود شیمیائی (کیلوگرم)

بحث و نتیجه‌گیری

کشاورزی پایدار نیازمند تخصیص استراتژیک عوامل تولید است تا ضمن حفظ بهره‌وری اقتصادی، تأثیرات زیست‌محیطی به حداقل برسند. در مناطق کم‌آب، بهینه‌سازی الگوهای کشت برای برقراری این تعادل ضروری است. شیوه‌های کشاورزی سنتی عمدتاً بر حداکثرسازی خروجی اقتصادی تمرکز داشته‌اند که اغلب به بهای کاهش پایداری زیست‌محیطی همراه بوده و منجر به کاهش منابع، آلودگی و تغییرات اقلیمی شده است. در ایران، جایی که کشاورزی به شدت به منابع غیرقابل تجدید وابسته است، این روند غیرپایدار چالش‌های قابل توجهی ایجاد می‌کند. هدف مدیر زراعی در انتخاب فعالیت‌های مختلف کشاورزی معمولاً محدود به یک هدف واحد نیست و همواره لازم است تعادلی میان نتایج و خروجی‌های تصمیم برقرار شود، به‌ویژه زمانی که این نتایج با یکدیگر در تضاد یا نقطه مقابل قرار دارند. تصمیم‌گیری در شرایطی که چندین هدف مشخص پیش روی مدیران واحدهای کشاورزی قرار دارد، علاوه بر بهره‌گیری از ابزارهای تصمیم‌سازی، مستلزم دسترسی به داده‌ها و اطلاعات متنوع می‌باشد. طراحی و پیاده‌سازی سازوکار یک نظام مدیریتی مبتنی بر چنین اطلاعات و اهداف چندگانه، در طول زمان و در مناطق مختلف پیچیده است و نیازمند روشی است که بتواند با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از داده‌ها و اهداف متنوع، مدیر را در اتخاذ تصمیمی منطقی، مستدل و مبتنی بر شواهد هدایت نماید. استفاده گسترده از آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی در سیستم‌های کشاورزی متعارف، تهدیدی جدی برای سلامت عمومی و محیط‌زیست به شمار می‌آید. برای مقابله با این چالش‌ها، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی به‌عنوان یکی از ابزارهای ضروری برنامه‌ریزی مطرح شده است تا اطمینان حاصل شود که پروژه‌های کشاورزی با قوانین و مقررات زیست‌محیطی قابل اجرا هم‌راستا باشند. بنابراین، یکی از الزامات اساسی بخش کشاورزی، تعیین الگوهای کشت است که ضمن افزایش بهره‌وری، به دغدغه‌های زیست‌محیطی نیز پاسخ دهند. در این راستا، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی الگوهای کشت نقش حیاتی در دستیابی به اهداف توسعه پایدار ایفا می‌کند. در این زمینه، حفظ محیط‌زیست از طریق کاهش مصرف کود شیمیایی و توسعه پایدار از طریق کاهش مصرف آب معمولاً از مهم‌ترین اهداف در تصمیم‌گیری برای انتخاب الگوی کشت محسوب می‌شوند. مطالعه حاضر با استفاده از الگوی برنامه‌ریزی غیرخطی فازی، امکان تأمین این اهداف در قالب الگوهای بهینه تک‌هدفه و الگوهای مصالحه‌کننده چندهدفه را مورد بررسی قرار داد. مقایسه شاخص‌های به‌دست‌آمده برای هر یک از اهداف در الگوهای مصالحه‌کننده با معادل آن‌ها در الگوهای تک‌هدفه نشان داد که

هرچند امکان تأمین کامل اهداف در بسیاری از موارد در الگوهای مصالحه‌کننده وجود ندارد، اما با در نظر گرفتن برآیند نتایج و اختصاص وزن مرتبط به هر هدف توسط مدیران واحدهای کشاورزی که در قالب تابع فاصله مرکب آرمانی نمایان می‌شود، این الگوها نسبت به الگوی جاری و حتی الگوهای تک‌هدفه در تحقق کلی اهداف چندگانه برتری دارند. بر این اساس، در منطقه مورد مطالعه، با ایجاد مصالحه بین اهداف در نظر گرفته‌شده، الگوی بهینه زراعی ارائه شد که حداکثر برآیند تحقق اهداف را تأمین می‌کند. نتایج اجرای این الگو بر کل اراضی زراعی نشان داد که استفاده از آن تأثیر قابل توجهی بر کاهش مصرف آب (پایداری) و کود شیمیایی (حفظ محیط‌زیست) در منطقه دارد. این نتایج با نتایج مطالعات وو و همکاران (۲۰۲۵)، راج و همکاران (۲۰۲۴) و کاستیلو و همکاران (۲۰۲۴) مطابقت دارد. بنابراین تدوین الگوی بهینه کشت با تمرکز بر پایداری زیست‌محیطی یک راهبرد کلیدی برای افزایش بهره‌وری، کاهش اثرات منفی محیط‌زیستی و تضمین امنیت غذایی در بلندمدت است. این رویکرد، با بهره‌گیری از اصول کشاورزی اکولوژیک، فشرده‌سازی پایدار و مدیریت منابع طبیعی، امکان استفاده بهینه از زمین، آب و انرژی را فراهم می‌کند و از تخریب خاک، آلودگی آب و انتشار گازهای گلخانه‌ای جلوگیری می‌نماید. تعیین الگوی کشت بهینه باید بر اساس شاخص‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی انجام شود تا علاوه بر افزایش عملکرد و سوددهی، عدالت اجتماعی و حفظ تنوع زیستی نیز تأمین گردد. استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر داده، تجزیه و تحلیل اثرات زیست‌محیطی و مشارکت فعال کشاورزان در طراحی الگوها، از عناصر حیاتی موفقیت این رویکرد است. در نهایت، تدوین الگوی بهینه کشت با تأکید بر پایداری زیست‌محیطی، یک گام اساسی در جهت توسعه کشاورزی پایدار، کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و تضمین تولید غذا برای نسل‌های آینده محسوب می‌شود. این رویکرد، هم امنیت غذایی و هم سلامت اکوسیستم‌ها را تقویت می‌کند و مسیر کشاورزی هوشمند و مسئولانه را هموار می‌سازد. بهینه‌سازی تدریجی الگوهای کشت دارای پتانسیل قابل توجهی برای تقویت پایداری کشاورزی، حفظ منابع آب و ارتقای رفاه اقتصادی است. نتایج این مطالعه می‌تواند راهنمایی برای سیاست‌گذاران، پژوهشگران و کشاورزان در تدوین استراتژی‌های مؤثر برای استفاده بهینه از منابع در بخش کشاورزی شهرستان بردسیر باشد.

References

- [1] Barnes, E.M. and D. Jones. Fuzzy composite programming to combine remote sensing and crop models for decision support in precision

- [7] Azar, A., Faraji, H. Fuzzy management science. 2002, Tehran: Ejtemae Publishing.
- [8] Zadeh, L. A. Fuzzy sets. Information and Control 8. 1965, 338-353.
- [9] Francisco, S. R., A. Mubarik. Resource allocation tradeoffs in Manila's peri-urban vegetable production systems: An application of multiple objective programming. 2006, *Agricultural System*. 87, 147-168.
- [10] Asadpour, A. Theory and application of fuzzy programming model in agricultural production. 2005. *Quarterly Journal of Agricultural Economics and Development, Special Issue on Productivity and Efficiency*.
- [11] Bender, M. J., S. P. Simonovic. A fuzzy compromise approach to water resource systems planning under uncertainty. 2000, *Fuzzy Sets and Systems*, 115: 35-44.
- [12] Cerioli, A., Zani, S. A fuzzy approach to the measurement of poverty. In C. Dagum, & M. Zenga (Eds.), *Income and wealth distribution, inequality and poverty*, 1990, 272-284, Berlin: Springer- Verlag.
- [13] Chiappero Martinetti, E. Standard of living evaluation based on Sen's Approach: Some methodological suggestions. 1996, *Notizie di Politeia*, 12: 37-53.
- [14] Brooke, A., D. Kendrick A. Meeraus. GAMS: A Users's Guide. 1988, The Scientific Press.
- crop management. 2000, *Agricultural System*, 65: 137-158.
- [2] Wu, J., Cheng, Y. W., Lin, G., Xu, D., Wang, Y., Chong, C., Dai, Y., Wang, C-H., & Ge, T. (2025). Toward Sustainable Agriculture: The Design of Environmentally Friendly, Economical, and Modular Vertical Farming Systems. *Engineering*.
- [3] Raj, V. H., Kumar, S. V., Sabir, M., Yadav, D. K., Sharma, S., Alabdeli, H., & Arun, V. (2024). *Optimizing Food Security and Environmental Sustainability via Agroecology and Sustainable Intensification Strategies*. In E3S Web of Conferences, 507, Article 01059. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450701059>
- [4] Castillo-Díaz, F. J., Belmonte-Ureña, L. J., López-Serrano, M. J., & Camacho-Ferre, F. (2024). *Quantifying sustainability in the agri-food system: A comprehensive methodological framework and expert consensus approach*. *Agricultural and Food Economics*, 12, Article 20. <https://doi.org/10.1186/s40100-024-00314-w>
- [5] Hannan, E.L. On Fuzzy goal programming. 1981, *Decision Science*, 12 (3): 522-531.
- [6] Ghosh, S. and P.P. Mujumdar. Risk minimization in water quality control problems of river system. 2006, *Advances in water Resources*, 29: 458-470.