Agricultural Economics and Development
Vol. 34, No. 133, Spring 2026

Research Paper

Multi-Criteria Optimization of Cropping Pattern in Qazvin Plain Based on Land Suitability Potential

E. Nasr Esfahani [1], Kh. Kalantari [2], A. Asadi, [3] A. Nikouei [4]

Received: 27 September, 2025 Accepted: 18 April, 2026

Introduction: Land suitability evaluation plays a crucial role in land use planning by ensuring the proper use of soil for different crops. Cropping patterns are shaped by natural factors such as climate, water, and soil resources as well as economic, social, environmental, and policy considerations. Therefore, developing a comprehensive cropping pattern model is essential. Despite the long-standing importance and fertility of Qazvin Plain of Iran, previous studies in this region have mainly focused on specific aspects and have not integrated economic, social, and environmental goals. Moreover, land suitability evaluation has not been utilized as a basis for regional cropping pattern design. This study addressed these gaps by optimizing the cropping pattern of field crops in the Qazvin Plain through an integrated approach, considering the economic, social, environmental, and food security objectives based on the land suitability evaluation.

Materials and Methods: To determine the cropping pattern based on land capabilities and potentials, land suitability maps were used from Soil and Water Research Institute of Ministry of Agriculture-Jahad (MAJ). Additional data were collected through surveys and documentary sources and processed for programming model. Corp production costs and revenues data were obtained via questionnaires completed by farmers and local experts in 2024,

1. Ph.D Student in Agricultural Management and Development, Faculty of Agricultural Economics and Development, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Corresponding Author and Professor, Department of Agricultural Management and Development, Faculty of Agricultural Economics and Development, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran (khkalan@ut.ac.ir).
3. Professor, Department of Agricultural Management and Development, Faculty of Agricultural Economics and Development, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
4. Faculty Member, Department of Economic, Social and Extension Research, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Isfahan, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran.

DOI: 10.30490/aead.2026.367520.1692

while complementary data were gathered from agricultural yearbooks and reports of MAJ, the Qazvin Agricultural Jihad Organization, Agricultural Planning, Economics and Rural Development Research Institute (APERDRI), and Qazvin Regional Water Organization. A multi-objective fuzzy nonlinear programming model was applied to develop the cropping pattern, with linear programming used in other cases. The weights for solving the multi-criteria programming model were estimated from expert opinions in the agricultural sector using the Analytic Hierarchy Process (AHP) technique.

Results and Discussion: The implementation of the model and the trade-off analysis among objectives revealed modest changes in the distribution of crop groups relative to the current cropping pattern. The shares of cereals, forages, and vegetable-summer crops increased, while those of industrial crops and legumes declined. However, the model led to more substantial adjustments within the composition of the 22 crops cultivated in the plain. Notably, the cultivation area of rice decreased considerably, whereas the cultivation areas of sorghum and tomato increased relative to the current cropping pattern. The proposed model also generated several advantages compared to the current cropping pattern, including: net economic profit increased by 18.1 percent, water consumption decreased by 2 percent, energy production (as a proxy for the food security index) rose by 7.3 percent, employment improved by 0.5 percent, and environmental impacts were reduced by 0.6 percent. These results highlight the potential of the optimized cropping pattern to achieve higher levels of economic, social, and environmental sustainability in the Qazvin Plain.

Conclusion and Suggestions: Both cropping pattern optimization and land suitability evaluation aim to identify the most efficient use of land resources. Since the objectives and variables of this study were developed based on land suitability evaluation and aligned with the principles of sustainable agriculture, the proposed cropping pattern is expected to deliver greater sustainability than that of the current system in economic, social, and environmental dimensions. Moreover, incorporating land suitability results into cropping pattern optimization facilitates more accurate implementation and monitoring for planners and decision-makers. Accordingly, it is recommended that crop pattern design in different regions be carried out in full alignment with the land suitability evaluation. Such an integrated approach improves the accuracy of crop selection according to environmental capacities, ensures optimal use of resources, enhances production, and promotes more scientific and efficient management of the agricultural sector; thereby, fostering agricultural sustainability. In practice, this approach will be most effective when combined with cadastral studies of farming units in the Qazvin Plain. Therefore, for future research, it is suggested that the cropping pattern design be developed based on both land potential and cadastral information of agricultural lands in the plain. This can contribute to production planning, improvement of agricultural product distribution systems, and

optimal water and soil management within the framework of integrated regional governance.

Keywords: *Cropping Pattern, Multi-Objective Planning, Land Suitability, Qazvin Plain.*

JEL Classification: C61, Q15, Q18

اقتصاد کشاورزی و توسعه

سال ۳۴، شماره ۱۳۳، بهار ۱۴۰۵

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی چندمعیاره الگوی کشت محصولات زراعی دشت قزوین مبتنی بر توان تناسب اراضی

اسماعیل نصراصفهانی[۱]، خلیل کلانتری[۲]، علی اسدی[۳]، علیرضا نیکویی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۹

چکیده

خاک از مهم‌ترین منابع تولید کشاورزی است که توان (پتانسیل) و توانایی آن نقشی تعیین‌کننده در تولید محصولات دارد. ارزیابی تناسب اراضی فرآیندی کلیدی در برنامه‌ریزی کاربری زمین و رویکردی مؤثر برای اطمینان از مناسب بودن خاک برای تولید محصولات مختلف است. مطالعه حاضر، در سال ۱۴۰۳، به‌منظور بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات زراعی دشت قزوین با اهداف اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و امنیت غذایی، بر مبنای نتایج ارزیابی تناسب اراضی و با بهره‌گیری از یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی فازی چندهدفه (MOFNLP) انجام گرفت. داده‌های مطالعه از طریق ترکیب مطالعات اسنادی (داده‌های رسمی دستگاه‌های مختلف) و پیمایش میدانی (تکمیل ۳۷۹ پرسشنامه) جمع‌آوری شد. نتایج حاصل از اجرای مدل و تحلیل مصالحه بین اهداف نشان داد که گروه‌های غلات و

۱- دانشجوی دکتری مدیریت و توسعهٔ کشاورزی، دانشکدهٔ اقتصاد و توسعهٔ کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲- نویسندهٔ مسئول و استاد گروه مدیریت و توسعهٔ کشاورزی، دانشکدهٔ اقتصاد و توسعهٔ کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران (khkalan@ut.ac.ir).

۳- استاد گروه مدیریت و توسعهٔ کشاورزی، دانشکدهٔ اقتصاد و توسعهٔ کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۴- عضو هیئت علمی گروه تحقیقات اقتصادی، اجتماعی و ترویجی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران.

DOI: 10.30490/aead.2026.367520.1692

نباتات علوفه‌ای (که ۹۳ درصد از الگوی کشت محصولات دشت را به خود اختصاص داده‌اند)، به‌ترتیب، با کاهش و افزایش سطح زیر کشت مواجه‌اند؛ در بین سایر محصولات نیز کاهش سطح زیر کشت برنج و افزایش سطح زیر کشت سورگوم و گوجه‌فرنگی قابل توجه بوده و همچنین، دستاوردهای الگوی پیشنهادی شامل افزایش ۱۸/۱ درصدی سود خالص اقتصادی، کاهش دو درصدی مصرف آب، افزایش ۷/۳ درصدی انرژی تولیدی (شاخص امنیت غذایی)، افزایش ۰/۵ درصدی اشتغال و کاهش ۰/۶ درصدی اثرات زیست‌محیطی است. از آنجا که اهداف و متغیرهای مد نظر مطالعهٔ حاضر بر پایه نتایج ارزیابی تناسب اراضی و منطبق با اصول کشاورزی پایدار است، می‌توان انتظار داشت که اجرای الگوی پیشنهادی، نسبت به وضعیت فعلی، پایداری بیشتری در ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به‌همراه داشته باشد. افزون بر این، با بهره‌گیری از نقشه‌ها و مکان‌های مناسب تولید محصولات مختلف بر اساس ارزیابی تناسب اراضی، امکان تسهیل و دقت بیشتر در پیاده‌سازی و نظارت بر اجرای الگو در دشت قزوین فراهم می‌شود.

کلیدواژه‌ها: *الگوی کشت، برنامه‌ریزی چندهدفه، تناسب اراضی، دشت قزوین.*

طبقه‌بندی JEL : C61, Q15, Q18

مقدمه

«منابع طبیعی» پایه و اساس رشد اقتصاد ملی به‌شمار می‌روند و نحوه استفاده از آنها بر توسعه، امنیت اقتصادی و امنیت ملی تأثیر می‌گذارد (Song et al., 2023). خاک، به‌عنوان منبع طبیعی تجدیدناپذیر، سرمایه ملی و بستر حیات، از مهم‌ترین عوامل زیربنایی اقتصاد هر کشوری محسوب می‌شود (Kelley, 1983; Meenambal, 2019). «زمین» پایه‌ای محکم برای بقای انسان بوده و استفاده پایدار از زمین برای توسعه اقتصادی جامعه بشری مهم است (Liu, 2018). امنیت غذایی و تغذیه ذاتاً با خاک مرتبط است (Pozza & Field, 2020). تلاش برای تأمین تقاضای رو به رشد غذا، افزایش فشار جمعیت و شهرنشینی سریع و همچنین، شیوه‌های مدیریتی ناپایدار و تغییرات آب‌وهوایی جهانی به‌گونه‌ای نگران‌کننده منجر به کاهش زمین‌های قابل کشت باکیفیت، تخریب حاصل‌خیزی خاک، بیابان‌زایی و نیز فرسایش و شوری خاک شده است (Foley et al., 2005; Liu et al., 2014; Long et al., 2012; Zhang et al., 2007).

تولید محصولات کشاورزی به توانایی خاک برای پشتیبانی از نظام‌ها و عملکردهای خاص کشاورزی بستگی دارد. اگر خاک قادر به پشتیبانی از تولید نباشد، اغلب از مداخله انسانی برای غلبه بر این مشکل استفاده می‌شود (برای نمونه، از طریق افزودن کود یا استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک)؛ برای کاهش نیاز به مداخله و نهاده‌های انسانی در طول زمان، باید کاربردهای کشاورزی برای خاک یا توانایی آن، بر اساس آنچه خاک قادر به پشتیبانی از آن است، تنظیم شود (Pozza & Field, 2020).

خاک ممکن است برای نظام‌های تولیدی متعدد مناسب باشد که به‌طور بالقوه، منجر به رقابت بین نظام‌های تولیدی مختلف می‌شود. «ارزیابی تناسب اراضی» رویکردی مفید برای اطمینان از مناسب بودن خاک به‌منظور استفاده‌های مورد نظر است (Tilman et al., 2009).

گیاهان زراعی بهترین رشد و عملکرد خود را در مناطقی نشان می‌دهند که شرایط آب‌وهوایی و عوامل خاکی نیازهای رشدی آنها را به بهترین نحو تأمین و برآورده کنند (Vafa et al., 2018). تحلیل تناسب اراضی[1] از فرآیندهای کلیدی برنامه‌ریزی کاربری زمین بوده (Yu et al., 2011) و پیش‌نیازی برای دستیابی به استفاده بهینه از منابع اراضی کشاورزی موجود است (Kihoro et al., 2013). تناسب اراضی با توسعه پایدار مرتبط است (Matori & Chandio, 2011) و عدم تجزیه‌وتحلیل مناسب می‌تولند منجر به الگوهای کشت نامناسب و تخریب زمین شود؛ از این‌رو، برای برنامه‌ریزی مؤثر در کشاورزی، باید تناسب زمین و آب‌وهوا نیز در نظر گرفته و لحاظ شود (Akinsunmade & Ejieji, 2021). یکی از دلایل پایین بودن بهره‌وری در بخش کشاورزی ایران استفاده نامناسب از زمین و عدم تطبیق نیاز محصول با منابع موجود از جمله خاک زراعی است. بنابراین، بهره‌گیری از تناسب اراضی در برنامه‌ریزی تولید برای حفظ و ارتقای بهره‌وری اراضی کشاورزی ضروری است، ولی متاسفانه در مطالعات و برنامه‌ریزی‌های تولید و الگوی کشت محصولات بدان کمتر توجه می‌شود.

در تعیین الگوی کشت محصولات، عوامل مختلف شامل عوامل و منابع طبیعی (اقلیم، منابع آب و خاک و ...)، عوامل اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و سیاست‌گذاری‌های دولت‌ها تأثیرگذارند (Majid, 1996; Rahman, 2020; Wardlow & Egbert, 2002). این مسئله لزوم طراحی یک مدل فراگیر الگوی کشت محصولات کشاورزی را آشکار می‌کند (Joulaei et al., 2005; Mardani Najafabadi et al., 2019).

آب نیز مانند خاک از مهم‌ترین منابع تولید کشاورزی و ثروت حقیقی کشورها به‌شمار می‌رود و شیوه بهره‌برداری از آن می‌تواند به افزایش یا کاهش این ثروت منجر شود (Itoh et al., 2003). با توجه به موقعیت جغرافیایی کشور، کمبود آب و بهره‌برداری‌های نامناسب از منابع آبی آب را به چالش عمده برای بخش‌های اقتصادی کشور و به‌ویژه بخش کشاورزی تبدیل کرده است.. در شرایطی که توجه زیادی به راه حل‌های سازه‌ای و مدیریت آب مانند بهبود آبیاری شده، به انطباق الگوی کشت برای صرفه‌جویی در مصرف آب چندان توجه نشده است (Nouri et al., 2020)؛ این در حالی است که نقش تهیه و اجرای الگوی کشت مناسب در مصرف آب آبیاری درخور اهمیت است (Zeng et al., 2010).

امروزه، در محافل علمی، کشاورزی به‌عنوان یک تهدید برای زیست‌بوم‌ها مطرح می‌شود، به‌گونه‌ای که در حال حاضر، مهم‌ترین جنبه‌های زیست‌محیطی نگران‌کننده در فعالیت‌های کشاورزی استفاده بیش از حد از نهاده‌هایی مانند انواع کودها و سموم شیمیایی است (Tudi et al., 2021)، در حالی که پایداری نظام‌های کشاورزی منوط به حفظ محیط زیست و سلامت مصرف‌کنندگان مواد غذایی است. بخش عمدهٔ بهینه‌سازی مصرف این نهاده‌ها از طریق انتخاب مناسب سطح

1. land suitability analysis

فعالیت‌های زراعی در الگوی کشت محصولات صورت می‌پذیرد، که باید در بهینه‌سازی الگوی کشت بدان توجه کرد.

بسترسازی برای ایجاد فضای مناسب اشتغال یکی از عوامل مهم در ایجاد رشد اقتصادی و در نهایت، افزایش رفاه اقتصادی و اجتماعی مردم است (Ojaghi et al., 2024). اشتغال از کارکردهای بخش کشاورزی قلمداد می‌شود و الگوی کشت به‌عنوان یکی از اجزای نظام کشاورزی می‌تواند نقشی مؤثر در دستیابی به اهداف توسعه کشاورزی و روستایی که همانا بهبود زندگی کشاورزان و رفاه حال آنهاست، داشته باشد. از آنجا که تولید محصولات مختلف با نیروی کار متفاوت انجام می‌شود، یکی از راه‌های تنظیم اشتغال در این زیربخش تغییر الگوی کشت است.

از سوی دیگر، سودآوری اقتصادی یکی از ضوابط اصلی تصمیم‌گیری کشاورز به‌شمار می‌رود (Fleming et al., 2016). کشاورز، به‌منظور حداکثرسازی درآمد خود، الگویی را در دستور کار قرار می‌دهد که بیشترین منافع اقتصادی را برای او داشته باشد (Brosseau et al., 2021). بنابراین، جنبه‌های اقتصادی و حداکثرسازی منافع اقتصادی از جمله اهداف اصلی الگوی کشت و لزوم طراحی آن تلقی می‌شود. نکته حائز اهمیت دیگری که باید بدان توجه شود، هماهنگی سیاست‌ها و برنامه‌های ملی هنگام پرداختن به دستور کار پایداری نظام‌های غذایی بسیار مهم است (Fehér et al., 2020; Hussain et al., 2022). به دیگر سخن، در برنامه‌ریزی تولید محصولات کشاورزی، هم‌راستایی تولیدات منطقه‌ای با سیاست‌های کلان ملی و امنیت غذایی کشور در اولویت است. بر اساس تعریف سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO)، امنیت غذایی به معنی دسترسی پایدار همه افراد به غذای سالم و مغذی برای داشتن زندگی فعال و سالم است (Aliaga & Chaves-Dos-Santos, 2014). یکی از شاخص‌های اصلی این مفهوم عبارت است از تولید انرژی (کالری) که ظرفیت نظام کشاورزی در تأمین نیازهای کالری جامعه و پایداری تغذیه را نشان می‌دهد؛ مقیاسی دقیق‌تر در زمینهٔ توان تأمین غذا نیز نسبت به سنجه‌های صرفاً وزنی، ارائه می‌دهد و در تحلیل‌های برنامه‌ریزی الگوی کشت و سیاست‌های امنیت غذایی اهمیت دارد (FAO, 2017; Tilman et al., 2011). رویکردهای نوین برنامه‌ریزی کشاورزی بر تلفیق اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و انرژی غذایی تأکید دارند تا تعامل میان منابع آب، انرژی و غذا در مسیر دستیابی به امنیت غذایی پایدار لحاظ شود (Loni & Sharifzadeh, 2022). افزایش تولید انرژی از محصولات زراعی نیز شاخصی مؤثر در سنجش امنیت غذایی و هم‌سو با هدف دوم توسعه پایدار[1] است، زیرا کفایت کالری بیانگر تاب‌آوری نظام غذایی در برابر محدودیت منابع و تغییرات اقلیمی محسوب می‌شود (Manikas et al., 2023; Okola et al., 2025). در این زمینه، پژوهش‌های مختلف به بررسی رابطه میان تولید انرژی، امنیت غذایی و کارآیی الگوی کشت پرداخته‌اند (Manikas et al., 2023; Porter et al., 2014; Roser et al., 2013). در

1. Sustainable Development Goal 2 (SDG2)

چارچوب برنامه‌ریزی چندهدفه الگوی کشـــت، حاجی‌ســـلیمان و اوزگر (Hacısüleyman & Özger, 2024)، با اســـتفاده از مدل‌های چندهدفه، تأثیر هم‌زمان مصـــرف انرژی، آب و بازده اقتصـــادی را تحلیل کرده، نشـــان دادند که تلفیق هدف تولید انرژی با ســـایر اهداف موجب تصـمیم‌گیری دقیق‌تر می‌شـود (Hacısüleyman & Özger, 2024). همچنین، ویوکاناندان و ویسواناتان (Vivekanandan & Viswanathan, 2007)، با بهینه‌سازی الگوی کشت از منظر ســود اقتصـــادی، افزایش تولید پروتئین و کالری محصـــولات، بر نقش شـــاخص‌های انرژی در تصمیم‌گیری پایدار کشاورزی تأکید کرده‌اند.

بخش کشـــاورزی با چالش‌ها و مســـائل مختلف برای تولیدات کشـــاورزی از جمله تغییر اقلیم، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب و خاک، کاربرد بیش از حد کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها و ... روبه‌روست. این مسائل برای دستیابی به پایداری کشاورزی، با استفاده عاقلانه از منابع، یک چالش بزرگ محسـوب می‌شـود (Mandal et al., 2020). متأسـفانه این مسـائل در بسـیاری از مناطق کشور مشاهده می‌شود و به‌نظر می‌رسد که مجموعه اراضی دشت قزوین نیز از این قاعده مستثنی نیست. بر اساس گزارش شرکت مدیریت منابع آب ایران (IWRMC, 2019)، در حوزه مطالعاتی شرکت آب منطقه‌ای قزوین، دشت قزوین با افت متوسط سالانه ۱/۴ متر و میزان کسری حجم مخزن ۳۳۳/۲۲ میلیون متر مکعب به‌عنوان دشـــت ممنوعه بحرانی طبقه‌بندی شـــده اســـت. بدیهی است که مدیریت کشـاورزی در مناطق کم‌آب مسـتلزم بهینه‌سـازی الگوهای کشـت برای تضـمین بهره‌برداری پایدار از منابع خاک و آب و حداکثرسازی بهره‌وری است (Abdelbaki & Alzahrani, 2024).

تـاکنون پژوهش‌هـای گونـاگون در زمینـه الگوی کشـــت بـا اهـداف مختلف از جملـه حداکثرسازی سود، حداقل‌سازی تبخیر و تعرق و حداکثرسازی بهره‌وری آب (Hao et al., 2018; Kousar et al., 2023; Li et al., 2017; Varade & Patel, 2018)، افزایش بازده اقتصادی، کاهش مصـرف آب و کاهش اثرات زیسـت‌محیطی (Chen et al., 2022; Li et al., 2020; Nikouei et al., 2022; Yu et al., 2021)، حداکثرســـازی ســـود ناخالص و اشـــتغال و حداقل‌ســـازی مصـــرف آب، کودهای شـــیمیایی و ســـموم آفت‌کش (Joolaie et al., 2017; Mardani Najafabadi et al., 2019)، بهینه‌سازی راهبردهای آبیاری با مصالحه بین مصرف آب و عملکرد محصـولات (Lyu et al., 2022)، تعادل بین اهداف کیفیت خاک، تولید و کارآیی آب (Yang et al., 2025)، بهینه‌سازی ساختار کشت در تعادل بین اهداف آب، اقتصاد و اثرات کربنی (Hou et al., 2026) مورد بررسـی محققان قرار گرفته اسـت. بر این اسـاس، در مطالعات الگوی کشت، اعتقاد بر این است که باید مسائل مدیریتی و سیاستی در چارچوب‌های برنامه‌ریزی چندهدفه بررسی شوند.

دشـت قزوین، از دیرباز، یکی از دشـت‌های مهم و حاصـل‌خیز کشـور بوده اسـت. تاکنون مطالعات مختلف در بخش کشـاورزی و اصـلاح الگوی کشـت در مناطق مختلف و دشـت قزوین

انجام شـــده، که هر کدام زمینه‌ای خاص را بررســـی کرده اســـت. برخی از محققان به بررســـی جنبه‌های اقتصـــادی الگوی کشـــت پرداخته‌اند. برای نمونه، پرهیزکاری (Parhizkari, 2021) به ارزیابی پیامدهای اقتصادی اثرات توسعه سطح زیر کشت زعفران در الگوی زراعی دشت قزوین، مردانی نجف‌آبـادی و میرزایی (Mardani Najafabadi & Mirzaei, 2019) بـه ارزیـابی اثر برنامه‌های سیاستی برای دستیابی به هدف پایداری منابع آب و شعبان‌زاده خوشرودی و همکاران (Shabanzadeh Khoashrody et al., 2019) به بررسی چرخش از سیاست خرید تضمینی به قیمت تضمینی و آثار آن بر الگوی کشت محصولات زراعی دشت قزوین پرداختند. همچنین، اکبری و همکاران (Akbari et al., 2019) اثرات تغییر اقلیم و خشـــکســـالی بر الگوی کشـــت و اثرات مخاطره (ریسک) درآمدی آن را بررسی کردند. شیرشاهی و همکاران (Shirshahi et al., 2021) بهینه‌سازی تخصیص آب در شبکه آبیاری و زهکشی دشت قزوین و احسانی کلی‌کند و همکاران (Ehsani Kolikand et al., 2023) نیز بهینه‌سازی الگوی کشت در چاه‌های کشاورزی با قیود تحویل حجمی ماهانه و سالانه را بررسی کردند. افزون بر این پژوهش‌ها، بلوک‌آزاری و همکاران (Bulukazari et al., 2022) به بررسی بهینه‌سازی تخصیص آب و زمین و افزایش کارآیی اقتصادی در سطح مزرعه در دشت قزوین پرداختند. میرزایی بافتی و همکاران (Mirzaei Bafti et al., 2019) نیز با هدف تعیین ارزش اقتصـادی آب آبیاری در شـرایط خشـکسـالی، الگوی کشـت و برآورد سـود ناخالص کشاورزان دشت قزوین را تعیین کردند. یزدانی و همکاران (Yazdani et al., 2016)، به بررســـی آثار اقتصـــادی ســـیاســـت غیرقیمتی بر کاهش عرضـــه آب و محمودی و پرهیزکاری (Mahmoodi & Parhizkari, 2016) نیز به تحلیل اقتصـــادی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد محصولات، الگوی کشت و سود ناخالص کشاورزان در دشت قزوین پرداختند.

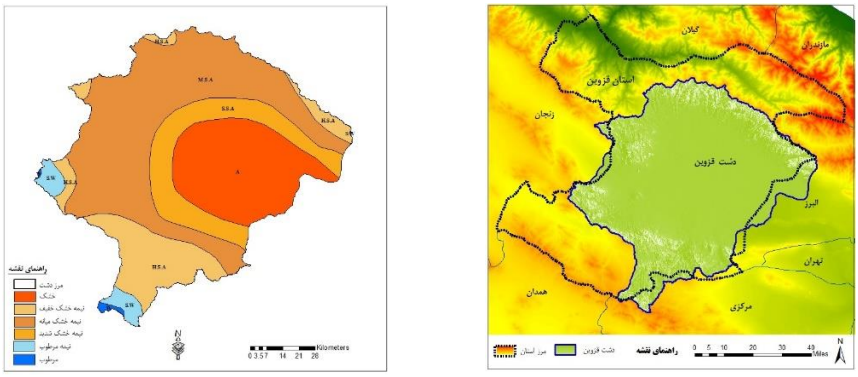
از میان تحقیقات انجام‌شـــده در زمینهٔ دشـــت قزوین، در پژوهش غلامی و همکاران (Gholami et al., 2018)، اولویت‌بندی کشـــت محصـــولات عمده زراعی این دشـــت با توجه به هزینه‌های انرژی و آب انجام شد و در برخی دیگر از پژوهش‌ها، اثرات زیست‌محیطی بر الگوی کشت در کانون توجه قرار گرفت، به‌گونه‌ای که اسعدی و همکاران (Asaadi et al., 2019) اثر کم‌آبیاری توأم با محدودیت مصرف کود و سموم شیمیایی بر تغییر الگوی کشت زراعی شبکه آبیاری قزوین را بررسی کردند. همچنین، احمدی (Ahmadi, 2022) به بررسـی تأثیر افزایش راندمان مصـرف آب بر بهبود وضـعیت منابع آب زیرزمینی و شـکوهی و همکاران (Shokoohi et al., 2016) به تعیین ترکیب کشت بهینه دشت قزوین با استفاده از حسابداری ردپای آب پرداختند.

با توجه به بحرانی بودن وضعیت آب دشت قزوین و لزوم تمرکز الگوی کشت محصولات زراعی بر مسـائل زیسـت‌محیطی، پایداری تولید و سـلامت جامعه، تدوین الگوی کشـت مناسـب تولید محصـولات مبتنی بر توان (پتانسـیل) و ظرفیت‌های منطقه‌ای به‌گونه‌ای که بتواند ضـمن کاهش سـرعت تخریب منابع پایه تولید، تحقق اهداف کشـاورزی پایدار را در بلندمدت تضـمین کند، یکی از اولویت‌های کشاورزی دشت قزوین است.

همان‌گونه که از پیشـــینهٔ پژوهش در زمینهٔ دشـــت قزوین مشـــخص اســـت، مطالعات انجام‌شده به تمرکز بر برخی اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی یا منابع آب پرداخته‌اند، اما تاکنون پژوهشی که به‌طور هم‌زمان، اهداف اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و امنیت غذایی را بر پایه نتایج ارزیابی تناسب اراضی در طراحی الگوی کشت منطقه‌ای تلفیق کرده باشد، گزارش نشده است. از این‌رو، نوآوری اصلی پژوهش حاضر در ارائه یک چارچوب یکپارچه مبتنی بر تناسب اراضی برای بهینه‌سازی الگوی کشت با رویکرد چندهدفه نهفته است.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر، به‌منظور بهینه‌سازی الگوی کشت با هدف افزایش سود ناخالص، کاهش اثرات زیست‌محیطی، افزایش اثرات اجتماعی و امنیت غذایی بر مبنای قابلیت‌ها و توان اراضی در دشـــت قزوین اجرا شـــد. دشـــت قزوین، به‌عنوان یک محدوده از ۶۰۹ محدوده مطالعاتی در طبقه‌بندی وزارت نیرو، با وسعت تقریبی ۴۸۹ هزار هکتار، بخش‌هایی از شـهرسـتان‌های قزوین، آبیک، تاکستان، البرز، بویین‌زهرا و آوج در استان قزوین و همچنین، بخش‌هایی از شهرستان‌های ساوجبلاغ، نظرآباد، اشتهارد، زرندیه و ابهر در استان‌های مجاور را دربرمی‌گیرد (شکل ۱– الف). اقلیم نیمه‌خشک شدید بخشی قابل توجه از پهنه اقلیمی دشت مرکزی قزوین و شهرهای آبیک و تاکستان را دربرگرفته است. خشک‌ترین منطقه استان در مناطقی از بویین‌زهرا و آبیک بوده که دارای اقلیم خشک است. این در حالی است که در مناطق ارتفاعی آوج، اقلیم‌های مرطوب غالب است (شکل ۱– ب).



الف– نقشه موقعیت دشت و استان قزوین

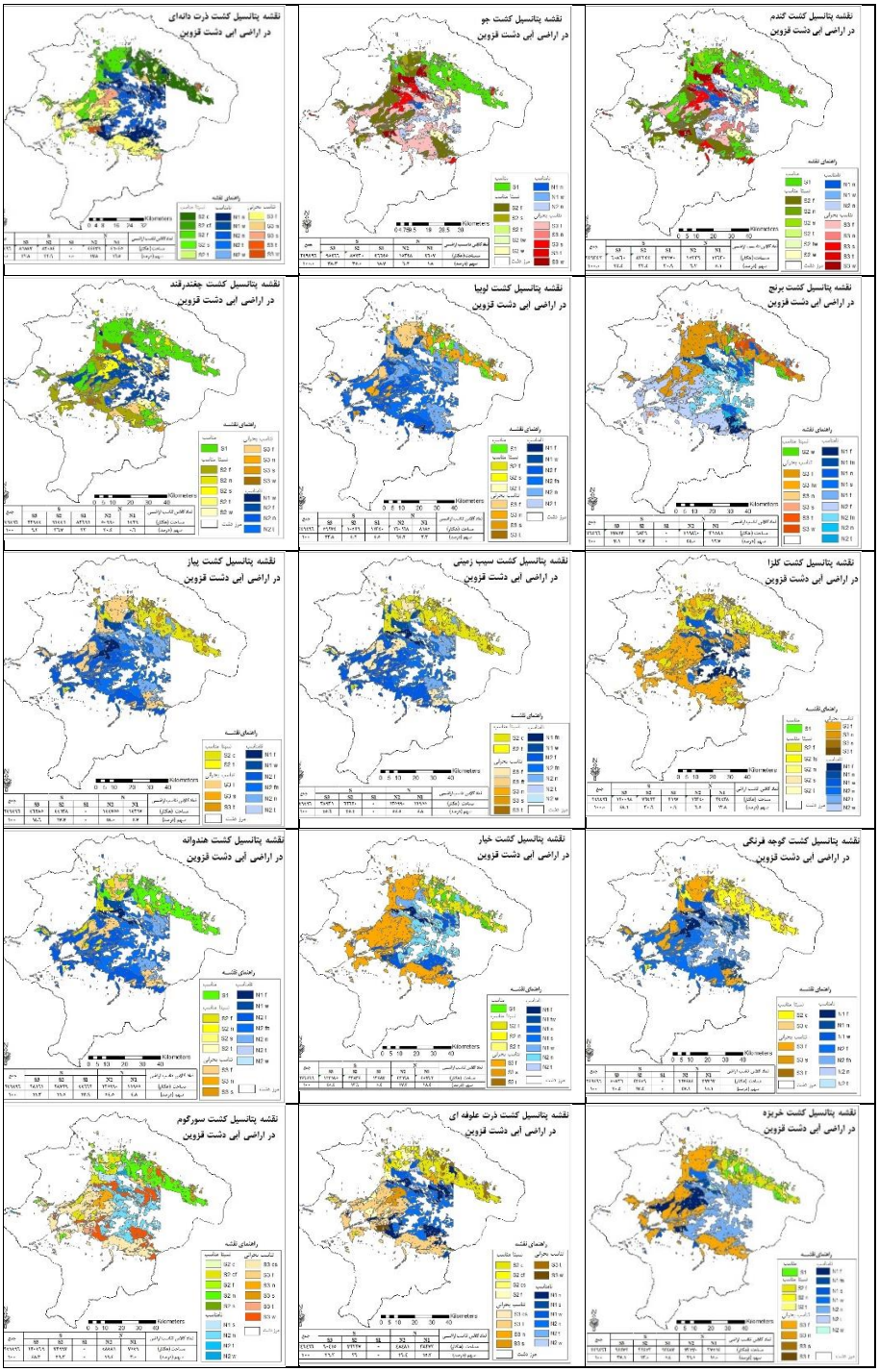
ب– نقشه اقلیم دشت قزوین

شکل ۱– نقشه موقعیت دشت و استان قزوین

داده‌های مورد اسـتفاده در مطالعهٔ حاضـر که در سـال ۱۴۰۳ با هدف بهینه‌سـازی الگوی کشـت محصـولات زراعی آبی دشـت قزوین انجام شـده، از ترکیب مطالعات اسـنادی و پیمایش

میدانی گردآوری شـده اسـت. داده‌های پایه شـامل آمار تولید، سـطح زیر کشـت و میزان انرژی محصولات از منابع رسمی وزارت جهاد کشاورزی، سازمان جهاد کشاورزی استان قزوین، مؤسسه پژوهش‌های برنامه‌ریزی، اقتصـاد کشـاورزی و توسـعه روسـتایی و انسـتیتو تحقیقات تغذیه‌ای و صـنایع غذایی کشـور اسـتخراج شـده و همچنین، برای آب قابل برنامه‌ریزی، از داده‌های رسـمی شـرکت آب منطقه‌ای قزوین استفاده شده است. اطلاعات هزینه‌ها و درآمدهای کشاورزی نیز از داده‌های میدانی از طریق تکمیل پرسشـنامه ساخت‌یافته توسط ۳۷۹ کشاورز و کارشناس دشت قزوین برای محصـولات مورد بررسـی شـامل گندم، جو، برنج و ذرت دانه‌ای (گروه غلات)، نخود، عدس و لوبیا (گروه حبوبات)، کلزا، پنبه، چغندرقند، آفتابگردان، گلرنگ (گروه نباتات صـــنعتی)، گوجه‌فرنگی، خیار، سـیب‌زمینی، پیاز، هندوانه و خربزه (گروه سـبزی و صـیفی) و ذرت علوفه‌ای، سورگوم، یونجه، شبدر (گروه نباتات علوفه‌ای) در سال ۱۴۰۳ جمع‌آوری شده است. داده‌ها، پس از پالایش و بازبینی صحت، مبنای مدل‌سازی و بهینه‌سازی الگوی کشت قرار گرفتند.

به‌منظور تعیین الگوی کشت محصـولات زراعی آبی دشت قزوین با اهداف تعیین‌شده و بر مبنای قابلیت‌ها و توان اراضـی، از نتایج مطالعات ارزیابی تناسـب اراضـی کل کشـور که به سـفارش معاونت امور زراعت وزارت جهاد کشاورزی توسط مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور انجام گرفته، اسـتفاده شـده است. همچنین، برای طبقه‌بندی تناسـب اراضـی بر پایه روش فائو و روش پارامتریک ریشه دوم، از اطلاعات گردآوری‌شده شامل اطلاعات اقلیمی، اطلاعات خاک (داده‌های استخراج‌شده از گزارش‌های خاک‌شـناسـی) و اطلاعات محصـولات زراعی متشـکل از دوره‌های پدیده‌شـناختی (فنولوژی) محصـولات بر پایه پهنه‌بندی اقلیمی یونسـکو و نیز نیازهای رویشـی خاک و اقلیمی هر گیاه استفاده شده است (MAJ, 2015). در این ارتباط، نقشه‌های توان کشت محصولات زراعی در محدوده دشت قزوین تهیه و مساحت طبقات تناسب اراضی برای محصولات زراعی در رده مناسب (S) شامل سه طبقه S1 (مناسب)، S2 (نسبتاً مناسب)، S3 (تناسب بحرانی) و رده نامناسب (N) شامل دو طبقه N1 و N2 شناسایی شد (جدول ۱ و شکل ۲).



مأخذ: وزارت جهاد کشاورزی (MAJ, 2015)؛ یافته‌های پژوهش

شکل ۲– نقشه‌های توان محصولات زراعی در اراضی آبی دشت قزوین

جدول ۱- مساحت تناسب اراضی محصولات زراعی دشت قزوین (هکتار)

محصول	طبقات تناسب				
	S1	S2	S3	N1	N2
گندم	۷۷۱۷۰	۸۳۳۴۴	۶۰۸۶۰	۱۲۶۳۰	۱۵۳۳۹
جو	۴۶۶۴۵	۸۷۴۳۰	۹۵۴۶۶	۴۶۰۷	۱۵۳۴۸
برنج	۰	۶۸۳۹	۱۷۸۱۷	۳۱۵۸۱	۱۱۹۸۶۰
ذرت دانه‌ای	۰	۸۲۰۸۴	۸۱۸۸۷	۴۱۰۴۵	۴۴۴۷۹
لوبیا	۱۱۳۴۰	۱۰۵۲۹	۵۹۲۷۴	۸۱۸۵	۱۶۰۱۶۸
چغندرقند	۸۲۶۹۱	۹۱۴۴۱	۲۲۹۴۴	۱۴۲۹	۵۰۹۹۰
کلزا	۲۱۹۷	۷۶۴۲۳	۱۲۰۰۹۸	۳۴۴۳۸	۱۶۳۴۰
سیب‌زمینی	۰	۶۲۶۲۰	۳۸۹۳۱	۱۱۹۵۵	۱۳۵۹۹۰
پیاز	۰	۴۴۱۳۸	۴۶۲۸۵	۱۴۳۱۷	۱۴۴۷۵۵
گوجه‌فرنگی	۰	۴۳۴۵۹	۵۰۸۳۶	۲۷۷۱۷	۱۱۷۴۸۴
هندوانه	۴۴۶۶۲	۲۸۷۲۹	۲۸۱۶۱	۱۱۹۵۵	۱۳۵۹۹۰
خربزه	۲۱۹۷	۷۶۴۲۳	۱۲۰۰۹۸	۳۴۴۳۸	۱۶۳۴۰
خیار	۱۳۴۸۷	۲۳۸۳۴	۱۱۳۱۸۵	۴۵۷۹۲	۴۳۱۹۸
ذرت علوفه‌ای	۰	۷۲۳۲۷	۹۰۴۱۵	۳۸۲۷۳	۴۸۴۸۱
سورگوم	۰	۷۲۹۹۷	۱۲۰۴۶۹	۷۵۴۹	۴۸۴۸۱

مأخذ: وزارت جهاد کشاورزی (MAJ, 2015)؛ یافته‌های پژوهش

با توجه به اهداف تحقیق، برای تدوین الگوی کشت محصولات زراعی آبی دشت قزوین، از تحلیل توصیفی و مدل برنامه‌ریزی ریاضی متناسب با هدف استفاده شده است. بدین منظور، برای تدوین الگوی کشت محصولات زراعی آبی دشت بر اساس اهداف چندگانه، از یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی فازی چندهدفه[1] و برای تحلیل‌های مقایسه‌ای هر هدف به‌صورت تک‌هدفه، از برنامه‌ریزی ریاضی خطی استفاده شده که در نهایت، الگوریتم‌های ریاضی الگوی برنامه‌ریزی در محیط بسته نرم‌افزاری GAMS توسعه داده شده است. برای شناخت وضع موجود الگوی کشت، توانایی‌ها و محدودیت‌های دشت قزوین، از نرم‌افزارهای Excel و ArcGIS بهره‌گیری شده است.

1. Multi-Objective Fuzzy Non-Linear Programming (MOFNLP)

نمادهای مجموعه‌ها، متغیرها و پارامترها

با توجه به تعداد زیاد نمادهای مورد استفاده در مطالعهٔ حاضر و همچنین، برای درک بهتر مدل‌ســـازی مســـئله، نمادهای مربوط به هر کدام از مجموعه‌ها، متغیرها و پارامترها در جدول ۲ توضیح داده شده‌اند، که از سردرگمی در مدل پیشنهادی جلوگیری شود.

جدول ۲- نمادهای مورد استفاده در مدل برای تعریف مجموعه‌ها، متغیرها و پارامترها

نماد	شرح
$j \in \{1.2, ..., J_1\}$	مجموعه مربوط به گروه اصلی محصولات
$k \in \{1.2, ..., K_1\}$	مجموعه مربوط به گروه نهاده‌های تولید
$m \in \{1.2, ..., 12\}$	مجموعه مربوط به ماه‌های سال
$Land_V_j$	متغیر مربوط به مقدار زمین تخصیص‌یافته به محصول j
$Water_V_{jm}$	متغیر مربوط به مقدار آب تخصیص‌یافته به محصول j
$\Pr od_V_j$	متغیر مربوط به مقدار تولید تخصیص‌یافته حاصل از کشت محصول j
$NetBenefit_V$	متغیر مربوط به سود ناخالص کل
$Obj\ \Pr ofit_V$	متغیر مربوط به سود ناخالص کل در الگو (متغیر تابع هدف)
$ObjWater_V$	متغیر مربوط به آب آبیاری کل در الگو (متغیر تابع هدف)
$ObjPest\ \&\ Ferti_V$	متغیر مربوط به هزینه کل مصرف کود و سم در الگو (متغیر تابع هدف)
$ObjLabor_V$	متغیر مربوط به تعداد نیروی کار کل در الگو (متغیر تابع هدف)
$Input_V_k$	متغیر مربوط به مقدار نهاده تولید تخصیص‌یافته از نوع k
$Input\ \mathrm{Cos}\,t_V_{jk}$	متغیر مربوط به هزینه نهاده تولید از نوع k برای کشت محصول j
$\mathrm{Cos}\,t_V_j$	متغیر مربوط به کل هزینه تولید برای کشت محصول j
$Crop\ \Pr ice_V_j$	متغیر مربوط به قیمت محصول j
$\mathrm{Re}\,vWater_V$	حجم آب تجدیدپذیر
$Calori_j$	میزان انرژی محصول j در مقدار معنی از واحد وزن
$TotalEnergy\ \Pr od_V_j$	کل انرژی تولیدشده حاصل از کشت محصول j
$Land_V_j$	مقدار زمین قابل کشت برای محصول j
$LandSch_V_{jm}$	ضریب اشغال زمین برای محصول j در ماه m
$LandRHS$	مقدار زمین قابل کشت در دشت
$MaxLandSuit_V_j$	حداکثر تناسب اراضی برای هر محصول j
$MinLandSuit_V_j$	حداقل تناسب اراضی برای هر محصول j
$NetWater\ \mathrm{Re}\,q_{jm}$	مقدار آب خالص مورد نیاز برای کشت یک هکتار از محصول j در ماه m
$Water\ \mathrm{Re}\,q_j$	نیاز ناخالص آبی محصول j

نماد	شرح
$WaterEff_j$	راندمان آبیاری برای محصول j
$WaterRHS_m$	مقدار آب قابل دسترس در ماه m
$InputAMT_{jk}$	مقدار مورد نیاز از نهاده تولید نوع k برای کشت یک هکتار از محصول j
$CropYeild_j$	متوسط عملکرد محصول j
$InputRHS_k$	مقدار در دسترس از نهاده تولید نوع k
$CropBenefit_j$	سود ناخالص برای کشت یک هکتار از محصول j
$NetBenefitCrrent$	سود ناخالص جاری دشت

مأخذ: یافته‌های پژوهش

اهداف مدل

دستیابی به اهداف مد نظر الگوی کشت محصولات زراعی دشت قزوین در مطالعهٔ حاضر با اهداف متفاوت و متضاد حداکثرسازی سود ناخالص، حداقل‌سازی مصرف کود و سم، حداقل‌سازی مصرف آب آبیاری و حداکثرسازی استفاده از نیروی کار و حداکثرسازی تولید انرژی حاصل از کشت محصولات زراعی دشت همراه است، که لزوم بهره‌گیری و استفاده از برنامه‌ریزی چندهدفه را یادآوری می‌کند. هدف حداقل‌سازی هزینه نهاده‌های شیمیایی (کود و سم) د پژوهش حاضر ناظر بر کاهش مصرف غیربهینه و مازاد این نهاده‌ها در چارچوب نیاز فنی محصولات است. از آنجا که انواع کودها و سموم اثرات زیست‌محیطی متفاوت دارند، در مدل حاضر، ضرایب فنی مصرف هر نهاده به‌صورت تفکیکی برای هر محصول لحاظ شده است. بدین ترتیب، با تخصیص نهاده‌ها بر اساس نیاز واقعی کشت و در چارچوب محدودیت منابع، از مصرف بیش از حد و غیراقتصادی نهاده‌های شیمیایی جلوگیری می‌شود.

در تحقیق حاضر، از یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی فازی چندهدفه (MOFNLP) استفاده شده که پیش‌تر، در مطالعات مختلف نیز به‌کار رفته است و از آن میان، می‌توان پژوهش‌های نیکویی و همکاران (Nikouei et al., 2022)، مردانی نجف‌آبادی و همکاران (Mardani Najafabadi et al., 2019)، مرزبان و همکاران (Marzban et al., 2021) و محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2012) یادآور شد. چارچوب حل مدل چندهدفه پژوهش حاضر مبتنی بر رویکرد برنامه‌ریزی مصالحه‌ای[1] و تجمیع توانی اهداف[2] است. در این چارچوب، پس از فازی‌سازی اهداف، ساختار تجمیعی مدل به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که امکان بیشینه‌سازی درجه دستیابی هم‌زمان به اهداف متعارض را فراهم کند. این رویکرد با تأکید بر

1. compromise programming
2. LP-metric

ایجاد تعادل میان اهداف اقتصـادی، زیسـت‌محیطی و اجتماعی، اسـتخراج یک راه‌حل متوازن در شـرایط محدودیت منابع را امکان‌پذیر می‌سـازد. بدین ترتیب، مدل، به‌جای تمرکز بر یک هدف خاص، نقطه‌ای مصـالحه‌ای میان اهداف مختلف را تعیین می‌کند (Randall et al., 2024). در این رویکرد، ابتدا تبدیل اهداف متعارض به توابع عضـویت فازی صـورت می‌گیرد و سـپس، با اسـتفاده از روش جمع موزون، تابع هدف به‌صـورت حداکثرسـازی درجه رضـایت کل از تحقق اهداف تعریف می‌شـود. این روش با برنامه‌ریزی آرمانی کلاسـیک متفاوت اسـت، زیرا به‌جای حداقل‌سازی انحراف از سطوح آرمانی، بر حداکثرسازی میزان تحقق هم‌زمان اهداف تمرکز دارد (Jones & Barnes, 2000; Mardani Najafabadi et al., 2019). شـکل عمومی این الگو به‌صـورت رابطه (۱) اسـت (با توجه به انعطاف‌پذیری مدل، به‌راحتی می‌توان اهداف متفاوت اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و سیاستی در الگوی کشت دشت را مد نظر قرار داد. نظر به اینکه در مطالعه حاضـر، اهداف مختلف دنبال می‌شـود، شـکل جبری این اهداف به‌صـورت رابطه زیر نمایش داده می‌شود):

(۱)

$$Obj\begin{cases} Z_1 \rightarrow Max: Obj\,\mathrm{Pr}ofit_V = \sum NetBenefit_V \\ Z_2 \rightarrow Min: ObjWater_V = \sum_{j=1}^{J}\sum_{m=1}^{M} Water_V_{jm} \\ Z_3 \rightarrow Min: ObjPest\,\&\,Fert_V = \sum_{j=1}^{J} Input\,\mathrm{Cos}t_V_{jk} & \forall k = \{pesticide,\ fertilizer\} \\ Z_4 \rightarrow Max: ObjLabor_V = \sum_{j=1}^{J} InputAMT_j Land_V_j & \forall k = \{Labor\} \\ Z_5 \rightarrow Max: ObjEnergy_V = \sum_{j=1}^{J} TotalEnergy\,\mathrm{Pr}od_V_j \end{cases}$$

که در آن، هدف Z_1 حداکثرسازی سود ناخالص، هدف Z_2 حداقل‌سازی مصرف آب آبیاری، هدف Z_3 حداقل‌سازی هزینه استفاده از کود و سم، هدف Z_4 حداکثرسازی استفاده از نیروی کار و هدف Z_5 حداکثرسازی تولید انرژی حاصل از کشت محصولات بوده و میزان انرژی تولیدی محصولات زراعی به‌عنوان یک شاخص جانشین برای بُعد کمی امنیت غذایی در نظر گرفته شده است.

در تحقیق حاضر، تابع هدف حداقل‌سازی هزینه نهاده‌های شیمیایی (کود و سم) در قالب شاخصی ترکیبی و بر مبنای داده‌های واقعی منطقه تعریف شده است. در ساختار مدل، ضرایب فنی مصرف هر نهاده برای هر محصول به‌صورت مجزا لحاظ شده و بدین ترتیب، میزان استفاده از کود و سـم به‌صـورت تفکیکی در قیود مدل منعکس شـده اسـت. بنابراین، تابع هدف نمایانگر

حداقل‌سازی مصرف مازاد و غیربهینه نهاده‌های شیمیایی در چارچوب نیاز فنی هر محصول است تا بتواند پیامدهای منفی زیست‌محیطی را تعدیل کند.

بدیهی است که معیارهای اندازه‌گیری برای اهداف یادشده کاملاً متفاوت است. استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی چندهدفه مستلزم استفاده از روش‌هایی برای هم‌سوسازی (نرمال‌سازی) معیارهای اندازه‌گیری با اهداف مختلف است. در فرآیندهای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری چندهدفه، می‌توان از منطق فازی برای همگن‌سازی اهداف استفاده کرد (Elliot et al., 2019; Sengupta et al., 2001). بسیاری از مطالعات از این روش در مدل‌های چندهدفه برای افزایش بازه اقتصادی و کاهش اثرات زیست‌محیطی (Nikouei et al., 2022)، افزایش بازه اقتصادی، کاهش مصرف آب و نهاده‌های تولید و حداقل‌سازی واردات خالص انرژی محصولات کشاورزی (Mardani Najafabadi et al., 2019)، افزایش بهره‌وری با تضمین حداکثر سود ناخالص، ضمن محدود کردن مصرف آب آبیاری (Nikouei et al., 2012; Raheli-Namin et al., 2016) و برجسته کردن رویکرد زیست‌محیطی به نهاده‌ها از جمله آب، کودهای شیمیایی و سموم شیمیایی (Manos et al., 2010) استفاده کرده‌اند. شکل عمومی این الگو به‌صورت زیر است:

$$Max: \lambda = \left[\sum_{j=1}^{M} w_j \lambda_j^p \right]^{\frac{1}{p}} \qquad (۲)$$

Subject to:

$$\lambda_i \left(Z_j^{Max} - Z_j^{Min} \right) + Z_j \left(x^* \right) \le Z_j^{Max} \qquad when \quad Z_j^{Min} \quad is \quad best \qquad (۳)$$

$$Z_j \left(x^* \right) - \lambda_i \left(Z_j^{Max} - Z_j^{Min} \right) \le Z_j^{Min} \qquad when \quad Z_j^{Max} \quad is \quad best \qquad (۴)$$

$$A_{hi} \le b_h \qquad (۵)$$

$$x_i \le 0 \qquad (۶)$$

$$0 \le \lambda \le 1 \qquad (۷)$$

$$i = 1.2,...,n \qquad t = 1.2.3 \qquad j = 1.2.3.4 \qquad h = 1.2,...,q$$

در رابطه (۲)، λ_j تابع عضویت هدف jام است که جمع موزون (مرکب) آرمانی اهداف مورد نظر در مطالعهٔ حاضر باشد و هدف حداکثرسازی آن است و w_j وزن هدف jام است که وزن‌های مد نظر برای حل الگوی برنامه‌ریزی چندمعیاره با استفاده از نظرات کارشناسان و

خبرگان بخش کشاورزی و به شیوه فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی[1] برآورد شدند (Karami, 2006). به‌منظور اطمینان از مقیاس‌پذیری و همگن‌ســـازی اهداف، مجموع وزن‌ها برابر با یک در نظر گرفته شـــده اســـت: $(\sum_{j=1}^{M} w_j = 1, \quad w_j \geq 0)$. پارامتر P در تابع تجمیع اهداف نیز عامل تعادلی (درجه جانشینی) میان اهداف محسوب می‌شود و شدت مصالحه بین اهداف متعارض را تعیین می‌کند، به‌گونه‌ای که با تغییر مقدار آن، ســـاختار تعادل بین اهداف تغییر می‌یابد. بدین ترتیب، در حالت p=۱، مدل به جمع موزون کلاسیک تبدیل می‌شود، در حالی که با افزایش مقدار p، تأکید مدل بر تعادل هم‌زمان میان اهداف بیشـــتر شـــده، راه‌حل به ســـمت برابری در درجات رضایت اهداف حرکت می‌کند. روابط (۳) و (۴) توابع عضویت اهداف یادشده در الگوی مطالعه را مشخص می‌کنند. در روابط بالا، x_i سطح زیر کشت محصول iام و λ_j مسافت تا حد آرمانی هدف jام عبارت از متغیرهای تصمیم الگوست که باید مقادیر بهینه آنها پس از حل آن به‌دست آیند. در این روابط، $Z_j^{\min}$ و $Z_j^{\max}$، به‌ترتیب، حداقل و حداکثر هدف jام، $Z_j(x^*)$ مقدار بهینه هدف و جواب بهینه x^* اســـت و اختلاف $Z_j^{\min}$ و $Z_j^{\max}$ را به‌عنوان حد تحمل تعریف می‌کنند (Mardani Najafabadi et al., 2016; Nikouei et al., 2022). مجموع روابط (۲) تا (۴) بر محدودیت‌های فنی در قالب رابطه (۵) در نظر گرفته می‌شـــود که در آن، ضـــریب فنی iامین محصـــول برای hامین محدودیت (منابع تولید) و b_h موجودی hامین محدودیت (منابع تولید) در الگوست. محدویت‌های الگو شامل محدودیت زمین و آب و نیز محدودیت‌های خاص روش حل مقید برنامه‌ریزی چندهدفه (شـامل محدودیت سـطح بازده برنامه‌ای مشـخص و میزان معین از مصرف آب) است.

به‌منظور ساخت توابع عضویت خطی در مدل برنامه‌ریزی چندهدفه فازی، مقادیر حداقل و حداکثر قابل دستیابی هر کدام از توابع هدف مطلوب و وضعیت فعلی اهداف تعیین شد. مطابق رویکرد استاندارد ارائه‌شده توسط زیمرمن[2] (Amini, 2015; Chandra & Aggarwal, 2014)، هر تابع هدف به‌صورت جداگانه و با ثابت نگه‌داشتن تمامی محدودیت‌ها بهینه‌سازی شد. حدود به‌دست‌آمده برای هر کدام از توابع هدف، برای نرمال‌سازی توابع هدف و تشکیل توابع عضویت فازی، در جدول ۳ ارائه شده است.

1. Analytic Hierarchy Process (AHP)
2. Zimmermann

جدول ۳ - مقادیر فعلی و مطلوب توابع هدف مورد استفاده در نرمال‌سازی فازی

شاخص	هدف	واحد	فعلی	مطلوب
سود خالص	حداکثرسازی	میلیون ریال	۵۸۵۹۷۳۳	۷۱۶۲۶۹۵
آب آبیاری	حداقل‌سازی	هزار متر مکعب	۱۴۲۰۷۰۹	۱۰۴۶۸۲۸
مصرف کود و سم	حداقل‌سازی	میلیون ریال	۱۰۵۸۴۵۵۵	۷۶۲۰۹۶۴
انرژی تولیدی	حداکثرسازی	کیلوکالری	۸۸۱۱۱۴۴۲۳	۹۹۴۹۶۹۶۰۰
اشتغال	حداکثرسازی	نفر- روز	۳۴۲۱۹۰۱	۳۴۳۸۹۲۹

مأخذ: یافته‌های پژوهش

برای حل مدل برنامه‌ریزی چندهدفه، از رویکرد مصالحه‌ای مبتنی بر تجمیع توانی استفاده شده است. در این رویکرد، اهداف متعارض پس از تبدیل به توابع عضویت فازی، در قالب یک تابع تجمیعی ادغام می‌شوند تا راه‌حلی حاصل شود که بیشترین میزان دستیابی هم‌زمان به اهداف را تأمین کند. این روش، نسبت به حل تک‌هدفه، امکان در نظر گرفتن هم‌زمان چندین معیار متعارض را فراهم کرده، از تمرکز صرف بر یک هدف خاص جلوگیری می‌کند. همچنین، استفاده از پارامتر تعادلی p امکان کنترل میزان مصالحه و درجه تعادل میان اهداف را فراهم می‌سازد. بدین ترتیب، راه‌حل نهایی بیانگر یک نقطه تعادلی میان اهداف مختلف در چارچوب محدودیت منابع منطقه است. رویکرد مصالحه‌ای در مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه به‌عنوان یکی از روش‌های متداول برای دستیابی به راه‌حل‌های متوازن میان اهداف متعارض شناخته می‌شود و در مسائل تخصیص منابع و برنامه‌ریزی کشاورزی، کاربرد گسترده دارد.

محدودیت‌های مدل

مجموعه محدودیت‌های مدل شامل سه قسمت اصلی محدودیت‌های منابع تولید (آب آبیاری، زمین و سایر نهاده‌ها)، محدودیت‌های اقتصادی و محدودیت‌های حداکثر و حداقل سطح زیر کشت و تقاضای محصولات کشاورزی است که در پی، بدان پرداخته می‌شود.

مجموعه محدودیت زمین

در این مجموعه، نباید مقدار کل زمین تخصیص‌یافته به محصولات از کل زمین قابل کشت دشت در هر ماه بیشتر باشد. مقدار کل زمین قابل تخصیص در منطقه برابر با ۱۳۵۳۵۲ هکتار بوده که بر اساس آمار رسمی سال ۱۴۰۳، به‌صورت رابطه زیر در مدل لحاظ شده است:

$$\sum_{j=1}^{J} landSch_{jm} Land_V_j \le LandRHS \qquad \forall, m \tag{۸}$$

که در آن، $Land_V_j$ متغیر مربوط به مقدار زمین تخصیص‌یافته به محصول j، $LandSch_V_{jm}$ ضریب اشغال زمین برای محصول j در ماه m و $LandRHS$ مقدار زمین قابل کشت در دشت است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در مجموعه محدودیت زمین قابل کشت، از ضریب اشغال زمین در ماه‌های مختلف سال و برای هر منطقه استفاده شده است. استفاده از ضریب اشغال زمین در هر ماه در رابطه (۸) باعث جلوگیری از تداخل و یا بدون استفاده ماندن زمین‌های زراعی با طول دوره رشد کمتر از دوازده ماه می‌شود. مقدار این ضریب در ماه‌هایی که محصول در زمین کشت شده، یک و در غیر این‌صورت صفر منظور شده است.

مجموعه محدودیت‌های تناسب اراضی

در این مجموعه، نباید محدودیت میزان سطح کشت محصول از مقدار حداکثر و حداقل تناسب اراضی محصول در دشت قزوین مطابق روابط زیر انحراف پیدا کند.

$$Land_V_j \le MaxLandSuit_Vj \qquad \forall, j \qquad (۹)$$

$$Land_V_j \le MinLandSuit_Vj \qquad \forall, j \qquad (۱۰)$$

که در این روابط، حداکثر و حداقل تناسب اراضی برای هر محصول، به‌ترتیب، با نمادهای $MaxLandSuit_Vj$ و $MinLandSuit_Vj$ نشان داده می‌شود. در مطالعهٔ حاضر، سطح کشت مناسب اراضی محصولات زراعی با در نظر گرفتن محدودیت‌هایی در فرآیند مدل‌سازی اعمال‌شده است، به‌گونه‌ای که سطح زیر کشت هر محصول از مجموع مساحت اختصاص‌یافته به طبقات S_1 و S_2 آن محصول کمتر باشد.

مجموعه محدودیت آب کشاورزی

در این مجموعه، از محدودیت‌ها به موازنه سطوح متفاوت میزان مصرف آب آبیاری به‌تفکیک ماه، دشت و محصول (که از موارد بسیار پراهمیت در تعیین الگوی کشت محسوب می‌شود) پرداخته شده و در این میان، عدم انحراف مدل از مقدار آب قابل دسترس برای منابع و ماه‌های مختلف به‌صورت روابط زیر مد نظر قرار گرفته است.

$$Water_V_{jm} = (NetWater\,\mathrm{Re}\,q_{jm} / WaterEff_j)Land_V_j \qquad \forall, j, m \qquad (۱۱)$$

$$Water_V_{jm} \le WaterRHS_m \qquad \forall, m \qquad (۱۲)$$

که در این روابط، $Water_V_{jm}$ متغیر مربوط به مقدار آب تخصیص‌یافته به محصول j در ماه m ، $NetWater\,\mathrm{Re}\,q_{jm}$ مقدار آب خالص مورد نیاز برای کشت یک هکتار از محصول j در ماه m و $WaterEff_j$ راندمان آبیاری برای محصول j است. همان‌گونه که در رابطه (۱۲) مشخص است، در این مجموعه، محدودیتی برای جلوگیری از انحراف این مقدار از میزان آب قابل دسترس در هر ماه تعبیه شده و مقدار آب خالص مورد نیاز برای کشت یک هکتار از سامانه نیاز آبیاری گیاهان زراعی و باغی کشور (نیازآب) استفاده شده است. بر این اساس، میزان آب مورد نیاز الگوی کشت در شرایط جاری ۱/۴۲ میلیون متر مکعب برآورد شده است. بنابراین، نباید مقدار کل آب قابل استفاده در الگو از این میزان تجاوز کند.

مجموعه محدویت‌های اقتصادی

در این مجموعه، به به محدودیت‌های اقتصادی شامل هزینه بهره‌برداری از آب آبیاری در رابطه (۱۳)، هزینه نهاده‌های کشاورزی در رابطه (۱۴)، هزینه کل تولید در رابطه (۱۵)، قیمت محصولات زراعی در رابطه (۱۶)، سود خالص محصولات برای هر هکتار در رابطه (۱۷)، کل سود خالص محصولات زراعی در رابطه (۱۸)، کل سود ناخالص محصولات زراعی در رابطه (۱۹) و در نهایت، به حداقل میزان سود مورد انتظار در رابطه (۲۰) پرداخته شده است. در این مجموعه، نباید محدودیت سود خالص از سود خالص شرایط کنونی محصولات اصلی کشاورزی منطقه (۵۸۵۹۷۳۳ میلیون ریال) کمتر شود:

$$WaterApp\,\mathrm{Cos}\,t_V_j = WaterApp\,\mathrm{Cos}\,t_j Land_Cl_V_j \qquad \forall, j \qquad (۱۳)$$

$$Input\,\mathrm{Cos}\,t_V_{jk} = Input\,\mathrm{Pr}\,ice_{jk} InputAMT_{jk} Land_V_j \qquad \forall, j \qquad (۱۴)$$

$$\mathrm{Cos}\,t_V_j = \sum_{k=1}^{K} Input\,\mathrm{Cos}\,t_V_{jk} + WaterApp\,\mathrm{Cos}\,t_V_j \qquad \forall, j \qquad (۱۵)$$

$$Crop\,\mathrm{Pr}\,ice_V_j = Crop\,\mathrm{Pr}\,iceCoA_j + Crop\,\mathrm{Pr}\,iceCoB_j\,\mathrm{Pr}\,od_V_j + Crop\,\mathrm{Pr}\,iceCoC_j \qquad \forall, j \qquad (۱۶)$$

$$CropBenfit_V_j = Crop\,\mathrm{Pr}\,ice_V_j CropYield_j \qquad \forall, j \qquad (۱۷)$$

$$Benefit_Cl_V_j = CropBenefit_V_j Land_V_j \qquad \forall, j \qquad (۱۸)$$

$$NetBenefit_V \geq \sum NetBenefitCurrent \qquad (۱۹)$$

$$NetBenefit_V = \sum_{j=1}^{J} Benefit_V_j - \mathrm{Cost}_V_j - WaterApp\,\mathrm{Cost}_V_j \qquad (۲۰)$$

نمادهای مجموعه معادلات اقتصادی شامل $WaterApp\,\mathrm{Cost}_V_j$ متغیر مربوط به هزینه بهره‌برداری از آب برای کشت محصول j، $Input\,\mathrm{Cost}_V_{jk}$ متغیر مربوط به هزینه نهاده تولید از نوع k برای کشت محصول j، Cost_V_j متغیر مربوط به کل هزینه تولید برای کشت محصول j، $Crop\,\mathrm{Price}_V_j$ متغیر مربوط به قیمت محصول j، $CropBenfit_V_j$ سود ناخالص برای کشت یک هکتار از محصول j، $Benefit_Cl_V_j$ متغیر مربوط به سود خالص کل برای کشت محصول j، $NetBenefit_V_j$ متغیر مربوط به سود ناخالص کل و $NetBenefitCurrent$ سود ناخالص جاری دشت قزوین است.

مجموعه محدودیت‌های نهاده‌های تولید

محدودیت نهاده‌های تولید به‌گونه‌ای تعریف شده است که مجموع مصرف هر نهاده توسط محصولات مختلف از مقدار کل نهاده در دسترس (۱۰۵۴۵۵۵ میلیون ریال) تجاوز نکند. در این رابطه، ضرایب فنی بیانگر میزان مصرف نهاده به ازای واحد سطح زیر کشت بوده و سمت راست رابطه ظرفیت کل نهاده قابل برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. این فرم محدودیت مطابق ساختار استاندارد مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی تخصیص منابع در مطالعات بهینه‌سازی الگوی کشت است (Mardani Najafabadi et al., 2019):

$$\sum_{j=1}^{J} InputAMT_{jk}\, Land_Cl_V_j \le InputRHS_k \qquad \forall, k \qquad (۲۱)$$

از آنجا که منابعی نظیر آب و زمین محدود هستند، افزایش سطح زیر کشت یک محصول به‌طور مستقیم موجب کاهش امکان تخصیص نهاده به سایر محصولات می‌شود. در مدل حاضر، هر محصول متناسب با ضرایب فنی مصرف نهاده‌ها از منابع استفاده می‌کند و از آنجا که مجموع مصرف نمی‌تواند از ظرفیت کل نهاده در دسترس تجاوز کند، رقابت میان محصولات به‌صورت درون‌زا و از طریق قیود منابع اعمال شده است. در نتیجه، تخصیص منابع میان محصولات در چارچوب فرآیند بهینه‌سازی و بر اساس کارآیی نسبی مصرف نهاده‌ها تعیین می‌شود، به‌گونه‌ای

که محصولات کم‌مصرف‌تر یا با بازدهی بالاتر در شرایط محدودیت منابع مزیت نسبی بیشتری برای تخصیص سطح زیر کشت خواهند داشت.

نتایج و بحث

با توجه به اهداف پنج‌گانهٔ مطالعهٔ حاضر، برآورد وزن اهداف مد نظر در مدل با استفاده از نظرات کارشناسان و خبرگان بخش کشاورزی استان قزوین به شیوه فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) به‌دست آمده و برای حل الگوی برنامه‌ریزی چندمعیاره برای اهداف حداکثرسازی سود، حداقل‌سازی مصرف آب آبیاری، حداقل‌سازی مصرف کود و سم، حداکثرسازی استفاده از نیروی کار و حداکثرسازی تولید انرژی حاصل از کشت محصولات زراعی، به‌ترتیب، ۰/۳۰، ۰/۲۵، ۰/۱۲، ۰/۲۵ و ۰/۸ ملاک عمل قرار گرفته است.

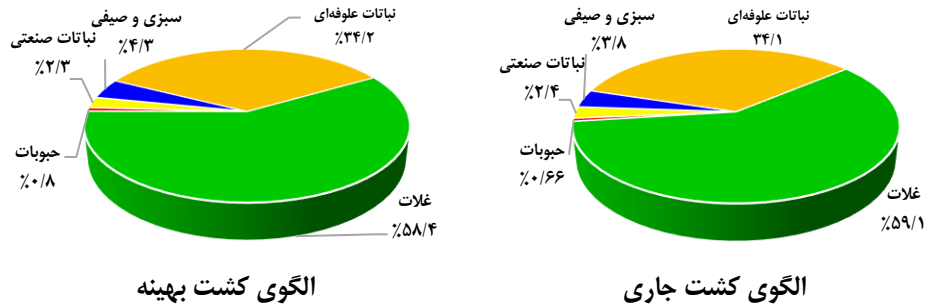
نتایج اجرای مدل بر متغیرهای اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و سطح زیر کشت در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴ - متغیرهای تعیین الگوی کشت دشت قزوین به‌تفکیک اهداف مطالعه

شاخص	جاری	تک هدفه					چندهدفه (MOP)	تغییرات MOP نسبت به جاری (درصد)
		حداکثر منافع اقتصادی(NB)	حداقل آب مصرفی (AW)	حداقل مخاطرات زیست‌محیطی (EN)	حداکثر امنیت غذایی (FS)	حداکثر نیروی کار (Lab)		
سطح زیر کشت (هکتار)	۱۳۵۳۵۲	۱۳۴۸۵۲	۱۰۳۶۴۸	۱۰۲۰۶۰	۱۳۴۵۹۷	۱۳۵۰۳۷	۱۳۵۰۰۲	-۰/۳
سود خالص (میلیون ریال)	۵۸۵۹۷۳۳	۷۱۶۲۶۹۵	۵۸۵۹۷۳۳	۵۸۵۹۷۳۳	۷۱۳۷۷۲۳	۶۹۱۷۱۰۴	۶۹۱۸۵۵۶	۱۸/۱
آب آبیاری (هزار متر مکعب)	۱۴۲۰۷۰۹	۱۳۸۷۸۳۷	۱۰۴۶۸۲۸	۱۰۴۸۱۹۲	۱۳۸۳۴۵۱	۱۳۹۸۴۹۷	۱۳۹۸۲۵۸	-۲
مصرف کود و سم (میلیون ریال)	۱۰۵۸۴۵۵۵	۱۰۴۳۲۸۹۸	۷۶۹۶۴۵۶	۷۶۲۰۹۶۴	۱۰۴۰۳۷۴۸	۱۰۵۲۱۱۲۸	۱۰۵۲۲۰۳۱	-۰/۶
انرژی تولیدی (کیلوکالری)	۸۸۱۱۱۴۴۲۳	۹۹۰۵۹۸۹۹۹	۵۵۷۴۴۴۸۵۴	۵۹۶۸۴۹۲۸۸	۹۹۴۹۶۹۶۴۵	۹۴۵۳۴۵۳۲۳	۹۴۵۳۲۱۸۴۳	۷/۳
اشتغال (نفر- روز)	۳۴۲۱۹۰۱	۳۳۵۳۰۳۹	۲۵۷۷۶۵۹	۲۵۷۸۴۵۳	۳۳۴۲۰۴۲	۳۴۳۸۹۲۹	۳۴۳۸۸۸۴	۰/۵

مأخذ: یافته‌های پژوهش

سطح زیر کشت کل محصولات زراعی آبی دشت قزوین در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ برابر با ۱۳۵۳۵۲ هکتار بوده، که به ۲۲ محصول زراعی از گروه‌های مختلف محصولی اختصاص یافته است. مقایسه نتایج حاصل از اجرای مدل با وضعیت فعلی الگوی کشت نشان می‌دهد که سطح کل زیر کشت محصولات زراعی آبی به ۱۳۵۰۰۲ هکتار کاهش یافته، که بیانگر کاهش ۰/۳ درصدی سطح زیر کشت کل در این دشت است. با اجرای مدل، کاهش سطح زیر کشت در کلیه الگوهای ارائه‌شده مدل‌ها نسبت به الگوی کشت جاری اتفاق افتاده است. کاهش سطح زیر کشت نتیجه برقراری مصالحه و بهینه‌سازی هم‌زمان میان اهداف متعارض و محدودیت منابع بوده و به‌عنوان هدف مستقیم مدل در نظر گرفته نشده است (جدول ۴).



الگوی کشت جاری **الگوی کشت بهینه**

مأخذ: یافته‌های پژوهش

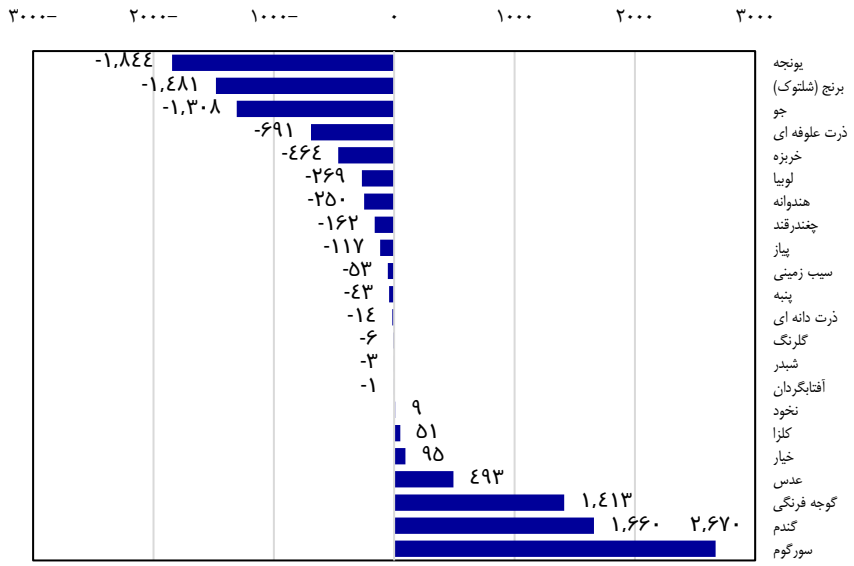
نمودار ۱- تغییرات سهم گروه محصولات زراعی در الگوی کشت دشت قزوین

مدل به‌صورت یکپارچه برای تمامی محصولات اجرا شده که در اینجا، برای سهولت تحلیل و تفسیر، نتایج در سطح گروه محصولات بررسی شده است. بررسی سهم گروه محصولات زراعی در الگوی کشت دشت قزوین حاکی از آن است که غلات و نباتات علوفه‌ای، در مجموع، ۹۲/۶ درصد از الگوی کشت محصولات دشت را به خود اختصاص داده‌اند. با اجرای مدل، در گروه غلات، کاهش سطح زیر کشت در کلیه الگوهای ارائه‌شده مشاهده شده است. در دو الگوی حداقل مصرف کود و سم و حداقل مصرف آب آبیاری، کاهش سطح زیر کشت بیش از دیگر مدل‌ها بوده و باعث کاهش سطح زیر کشت از ۷۹۹۹۶ هکتار در الگوی جاری، به‌ترتیب، به ۶۳۲۲۶ و ۶۷۲۷۲ هکتار در این دو الگو شده است. در مدل مصالحه بین تمام اهداف مطالعه (الگوی چندهدفه)، سطح زیر کشت گروه غلات به ۷۸۸۵۳ هکتار کاهش یافته، به‌گونه‌ای که سطح زیر کشت گروه غلات با کاهش محسوس ۴۹/۳ درصدی سطح زیر کشت برنج، کاهش ۴/۲ درصدی سطح زیر کشت جو و افزایش ۳/۶ درصدی سطح زیر کشت گندم همراه بوده است.

شایان یادآوری است که در پژوهش حاضر، برنج به‌صورت یک محصول تجمیعی و با میانگین نیاز آبی و عملکرد منطقه‌ای در نظر گرفته شده، که با کاهش سطح زیر کشت غلات در مطالعات دیگر در زمینه بهینه‌سازی الگوی کشت هم‌سوست (Mardani Najafabadi et al., 2019; Nikouei & Mardani Najafabadi, 2021; Vafaeinejad, 2016) (نمودار ۲).

در گروه نباتات علوفه‌ای، افزایش سطح در مدل‌های حداکثر منافع اقتصادی، حداکثر امنیت غذایی، حداکثر نیروی کار، مصالحه بین اهداف و کاهش سطح زیر کشت در مدل‌های حداقل مصرف آب آبیاری و حداقل مصرف کود و سم همراستا با ماهیت اهداف تعیین‌شده بوده است. بررسی دقیق‌تر سطح زیر کشت محصولات علوفه‌ای در مدل چندهدفه (مصالحه بین تمام اهداف مطالعه) حاکی از کاهش سطح زیر کشت ذرت علوفه‌ای و یونجه (با نیاز خالص آبی بالا) و در مقابل، افزایش سطح زیر کشت سورگوم با نیاز خالص آبی کم و سود خالص بالاست. سورگوم، به‌دلیل نیاز آبی کم نسبت به ذرت علوفه‌ای و همچنین، مقاومت به شوری از اهمیت ویژه برخوردار است. با توجه به مقاومت بسیار بالا به خشکی و شوری، این گیاه جایگزینی مناسب برای سایر گیاهان علوفه‌ای تابستانه است و در صورت کشت به‌موقع، تا سه چین قابل برداشت بوده و مجموع عملکردی آن حتی تا بیش از صد تن در هکتار است. کاهش سطح زیر کشت یونجه و ذرت علوفه‌ای در مطالعه یزدانی و همکاران (Yazdani et al., 2016) و جایگزینی سورگوم به‌جای علوفه‌های با مصرف آب بالا مانند یونجه در مطالعه نیکویی و مردانی نجف‌آبادی (Nikouei & Mardani Najafabadi, 2021) نیز گزارش شده است.

گروه محصولات حبوبات، نباتات صنعتی و سبزی و صیفی، در مجموع، ۷/۴ درصد الگوی کشت دشت قزوین را به خود اختصاص داده‌اند. با اجرای مدل، سطح زیر کشت حبوبات در مدل چندهدفه (مصالحه بین تمام اهداف مطالعه)، با تغییر در ترکیب محصولات این گروه، با افزایش ۱۷/۹ درصدی سطح زیر کشت حبوبات از ۷۹۸ هکتار (الگوی جاری) به ۱۰۵۷ هکتار همراه بوده است. در گروه سبزی و صیفی، محصول گوجه‌فرنگی از توان و سودآوری اقتصادی بالاتر از سایر محصولات برخوردار است، به‌گونه‌ای که با اجرای مدل، با افزایش سطح زیر کشت گوجه‌فرنگی و کاهش سطح زیر کشت خربزه، هندوانه، پیاز و سیب‌زمینی، تغییرات به نحوی انجام می‌شود که سهم گروه سبزی و صیفی از ۳/۸ درصد در الگوی جاری دشت قزوین به ۴/۳ درصد در مدل چندهدفه افزایش می‌یابد. افزایش سطح زیر کشت گروه اصلی سبزی‌ها در مطالعه بهینه‌سازی الگوی کشت توسط نیکویی و مردانی نجف‌آبادی (Nikouei & Mardani Najafabadi, 2021) و مردانی نجف‌آبادی و همکاران (Mardani Najafabadi et al., 2016) نیز گزارش شده است. در نمودار ۲، تغییرات سطح زیر کشت محصولات زراعی در الگوی چندهدفه نسبت به الگوی فعلی دشت قزوین ارائه شده است.



مأخذ: یافته‌های پژوهش

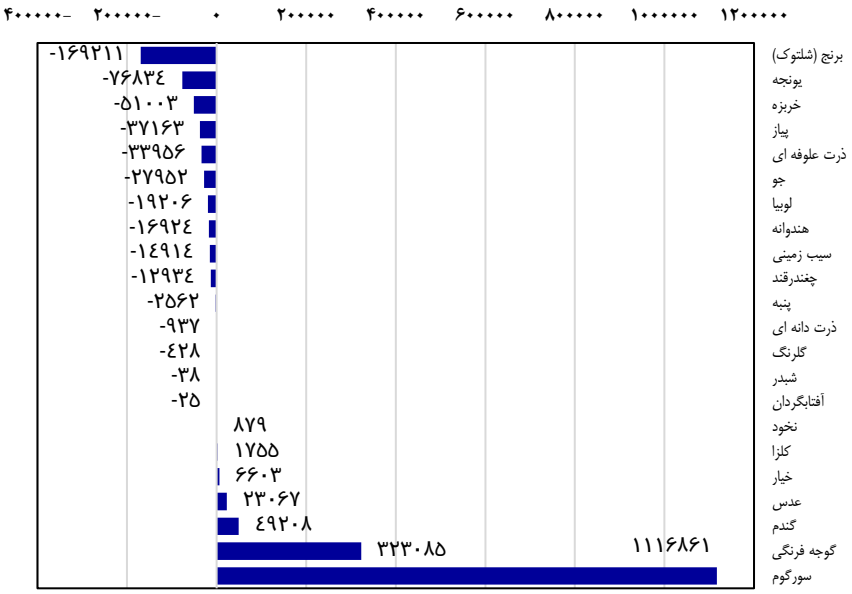
نمودار ۲- تغییرات سطح زیر کشت محصولات زراعی در الگوی چندهدفه نسبت به الگوی فعلی دشت قزوین (هکتار)

تأثیر اجرای الگوهای برنامه‌ریزی بر متغیرها

میزان بازه اقتصادی (شاخص اقتصادی)

لازمه توسعه بخش کشاورزی و افزایش تولید با کارآیی مناسب، استفاده مطلوب از منابع و امکانات محدود و تخصیص بهینه عوامل تولید بین فعالیت‌های مختلف کشاورزی به‌گونه‌ای است که بالاترین میزان سودآوری اقتصادی تأمین شود. بنابراین، سودآوری اقتصادی یکی از ضوابط اصلی تصمیم‌گیری کشاورز در پذیرش الگوهای کشت به‌شمار می‌رود و انگیزه‌های اقتصادی از شروط اولیه قبول برنامه‌های کشت است. سود خالص الگو در الگوهای منافع اقتصادی، امنیت غذایی و اشتغال نسبت به وضعیت جاری افزایش داشته و برای الگوهای مصرف آب و مخاطرات زیست‌محیطی نسبت به وضعیت جاری بدون تغییر بوده است. بیشترین سود خالص مربوط به مدل حداکثرسازی منافع اقتصادی با افزایش ۲۲/۲ درصد و در الگوی چندهدفه مصالحه بین اهداف افزایش ۱۸/۱ درصدی را نشان می‌دهد. در نمودار ۳، تغییرات بازه اقتصادی محصولات زراعی در الگوی چندهدفه نسبت به الگوی فعلی دشت قزوین ارائه شده است. تغییرات بازه اقتصادی محصولات زراعی در الگوی چندهدفه حاکی از آن است که محصولات برنج (شلتوک)، یونجه، خربزه، پیاز، ذرت علوفه‌ای و ... با کاهش بازه اقتصادی و محصولات

سورگوم، گوجه‌فرنگی، گندم، عدس و ... در مقادیر مختلف با افزایش بازه اقتصادی روبه‌رو بوده‌اند، به‌گونه‌ای که برآیند تغییرات بازه اقتصادی محصولات زراعی در الگوی چندهدفه نسبت به الگوی فعلی دشت قزوین شاهد افزایش ۱۰۵۸۸۲۳ میلیون ریال (۱۸/۱ درصدی) بوده است.



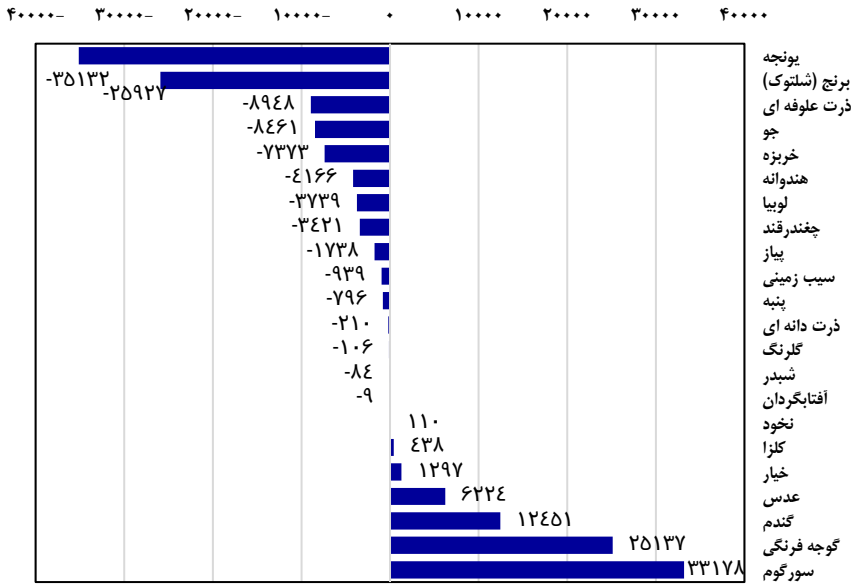
مأخذ: یافته‌های پژوهش

نمودار ۳- تغییرات بازه اقتصادی محصولات زراعی در الگوی چندهدفه نسبت به الگوی فعلی دشت قزوین (میلیون ریال)

میزان آب مصرفی (شاخص زیست‌محیطی)

تخصیص منابع آب، با توجه به محدودیت آن، یک چالش مدیریتی و عملیاتی پیچیده برای تصمیم‌گیرندگان و کشاورزان است (Li et al., 2019). از این‌رو، برنامه‌ریزی تولید با تخصیص بهینه آب برای محصولات از اهمیت زیادی برخوردار است. میزان مصرف آب الگوی کشت محصولات زراعی دشت قزوین در شرایط جاری ۱/۴۲ میلیارد متر مکعب است. اگرچه در بین الگوهای مورد بررسی، بیشترین کاهش مصرف آب در الگوی تک‌هدفه حداقل مصرف آب مشاهده شده است، اما نتایج حاصل از اجرای مدل نشان می‌دهد که مصرف آب با مقادیر مختلف در همه الگوهای مورد بررسی نسبت به الگوی وضع موجود با کاهش مواجه بوده است. بدیهی است که تغییر در سطوح زیر کشت محصولات دشت قزوین بر مصرف آب الگوی کشت دشت تأثیر مستقیم دارد. در این ارتباط، تغییرات مصرف آب محصولات زراعی در الگوی چندهدفه

نسبت به الگوی فعلی دشت قزوین در نمودار ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه‌شده در این نمودار، مصرف آب محصولات یونجه، برنج (شلتوک)، جو، ذرت علوفه‌ای، خربزه، هندوانه و ... با کاهش و مصرف آب محصولات سورگوم، گوجه‌فرنگی، گندم و ... در مقادیر مختلف با افزایش روبه‌رو بوده‌اند. برآیند تغییرات مصرف آب محصولات مختلف، در نهایت، منجر به کاهش حدود دو درصدی الگوی چندهدفه نسبت به الگوی فعلی دشت قزوین شده است.



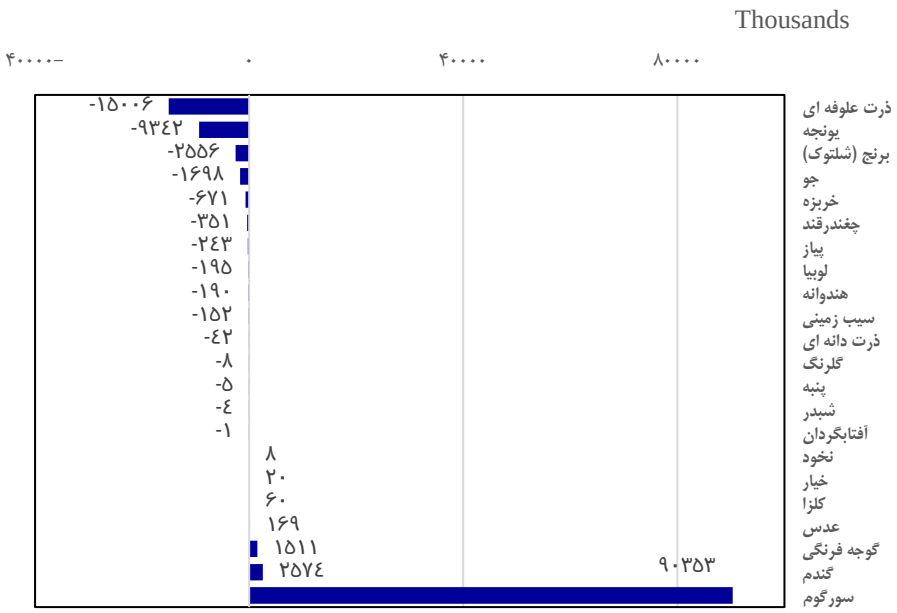
مأخذ: یافته‌های پژوهش

نمودار ۴- تغییرات آب مصرفی محصولات زراعی در الگوی چندهدفه نسبت به الگوی فعلی دشت قزوین (هزار متر مکعب)

میزان کالری تولیدی الگوی کشت (شاخص امنیت غذایی)

منابع محدود تولید و رقابت بین محصولات مختلف به یکی از چالش‌های امنیت غذایی و پایداری تبدیل شده‌اند. در ادبیات برنامه‌ریزی کشاورزی، میزان انرژی یا کالری تولیدی محصولات زراعی به‌عنوان شاخصی برای سنجش ظرفیت نظام کشاورزی در تأمین غذا و ارزیابی امنیت غذایی مطرح می‌شود. بر این اساس، در پژوهش حاضر، تولید انرژی محصولات زراعی به‌عنوان یکی از شاخص‌های ارزیابی عملکرد الگوی کشت در نظر گرفته شده است. انرژی تولیدی محصولات زراعی شامل تمامی محصولات زراعی دشت قزوین اعم از خوراکی و غیرخوراکی است. انرژی خروجی هر محصول نیز از حاصل‌ضرب عملکرد آن در محتوای انرژی

زیستی محصول محاسبه و ضرایب انرژی بر اساس جداول مؤسسه تحقیقات تغذیه‌ای و صنایع غذایی کشور استخراج شده است. افزایش تولید انرژی الگوی کشت محصولات زراعی دشت قزوین یکی از اهداف مطالعهٔ حاضر بوده است. بررسی و مقایسه میزان کالری تولیدی الگوی کشت با اجرای مدل نشان داد که در الگوی چندهدفه مبتنی بر مصالحه بین اهداف، میزان انرژی تولیدی نسبت به الگوی فعلی دشت ۶۴۲۰۷۴۲۰ کیلوکالری افزایش یافته است (جدول ۴). بدیهی است که این افزایش حاصل تغییر در ترکیب الگوی کشت و تفاوت در میزان انرژی تولیدی محصولات مختلف زراعی است. در این ارتباط، میزان کالری تولیدی برخی محصولات مانند ذرت علوفه‌ای، یونجه، برنج (شلتوک) و جو کاهش یافته، در حالی که برای محصولاتی مانند سورگوم، گندم، گوجه‌فرنگی و عدس در مقادیر مختلف افزایش نشان داده است (نمودار ۵). برآیند این تغییرات، سرانجام، منجر به افزایش حدود ۷/۳ درصدی انرژی تولیدی کل نظام زراعی در الگوی چندهدفه نسبت به الگوی فعلی دشت شده، که بیانگر بهبود کارآیی انرژی زیستی و ظرفیت تولیدی سامانه (نظام) کشاورزی منطقه است.

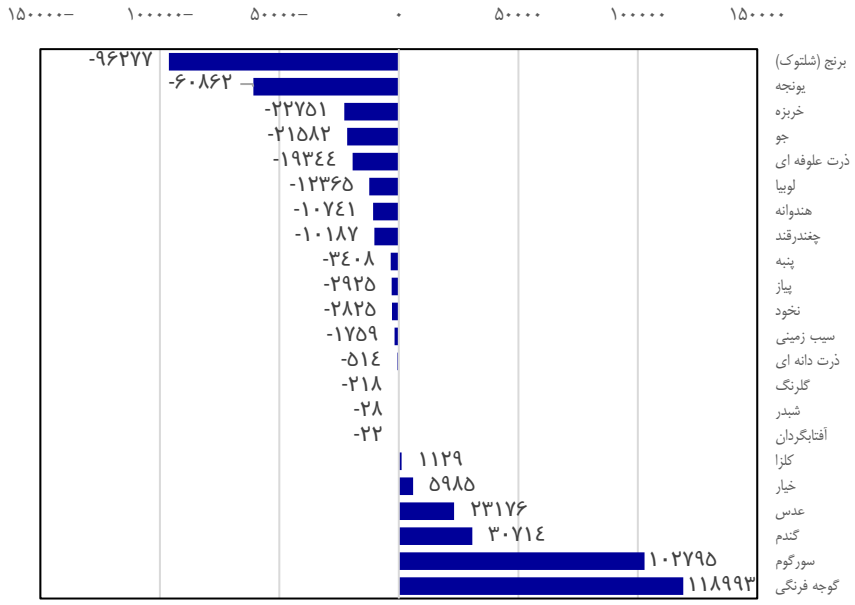


مأخذ: یافته‌های پژوهش

نمودار ۵- تغییرات میزان انرژی تولیدی محصولات زراعی در الگوی چندهدفه نسبت به الگوی فعلی دشت قزوین (هزار کیلوکالری)

اشتغال (شاخص اجتماعی)

ایجاد اشـــتغال و درآمد پایدار مهم‌ترین راهکار ایجاد رفاه اقتصادی- اجتماعی در جوامع بشـــری است، به‌گونه‌ای که در کشورهای در حال توســـعه، ایجاد اشـــتغال از اهداف اصلی توســـعه قلمداد می‌شـــود. کشـــاورزی از مهم‌ترین بخش‌های اقتصادی ایران است که تولید، تأمین غذا و همچنین، ایجاد اشـــتغال از مهم‌ترین کارکردهای آن به‌شمار می‌رود. الگوی کشت به‌عنوان یکی از اجزای نظام کشاورزی می‌تواند نقش مؤثر در دستیابی به اهداف توسعه کشاورزی و روســـتایی یا همانا بهبود زندگی کشـــاورزان و رفاه حال آنها داشـــته باشـــد. از آنجا که تولید محصـــولات مختلف با نیروی کار متفاوت انجام می‌شـــود، یکی از راه‌های تنظیم اشـــتغال در این زیربخش تغییر الگوی کشت است. برآیند تغییرات میزان اشتغال محصولات زراعی با اجرای مدل حاکی از افزایش ۱۶۹۸۳ نفر- روز- کار در مدل الگوی چندهدفه نسبت به وضعیت جاری است (جدول ۴). همچنین، تغییرات اشتغال محصولات زراعی در الگوی چندهدفه حاکی از آن است که محصـــولات گوجه‌فرنگی، ســـورگوم، گندم و ... با افزایش و محصـــولات برنج (شـــلتوک)، یونجه، خربزه، جو و ... با کاهش اشـــتعال روبه‌رو بوده‌اند (نمودار ۶). اگرچه با توجه به گســـترش فناوری تولید در قالب بهبود مکانیزاسیون، ارتقای بهره‌وری نیروی کار، گسترش مهارت و سطح تخصص در فعالیت‌های بخش کشاورزی، افزایش قابل توجه بازده تولید، گذار کشاورزی از تولید سنتی به پیشـــرفته و اســـتفاده از فناوری‌های نوین، نمی‌توان انتظار نامعقول از افزایش اشـــتغال‌زایی بخش کشـــاورزی داشـــت، اما بررســـی نتایج مطالعه نشـــان می‌دهد که اشـــتغال الگوی چندهدفه نسبت به الگوی فعلی دشت قزوین ۰/۵ درصد رشد داشته است.

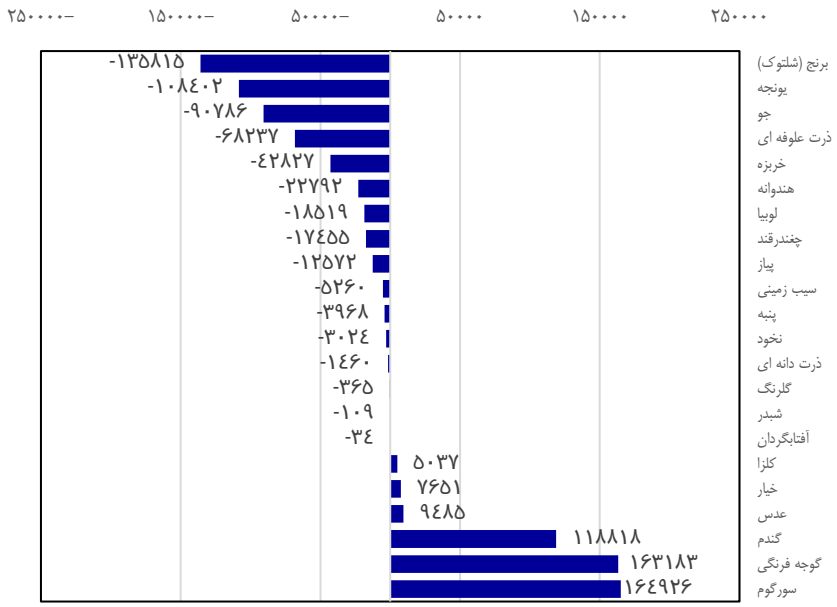


مأخذ: یافته‌های پژوهش

نمودار ۶- تغییرات اشتغال محصولات زراعی در الگوی چندهدفه نسبت به الگوی فعلی دشت قزوین (نفر-روز - کار)

میزان مصرف کود و سموم شیمیایی (شاخص زیست‌محیطی)

مصرف بیش از حد سموم و کودهای شیمیایی پایداری نظام‌های کشاورزی، حفظ محیط زیست و سلامت مصرف‌کنندگان مواد غذایی را تهدید می‌کند. بخشی مهم از بهینه‌سازی مصرف این نهاده‌ها می‌تواند از طریق انتخاب سطح فعالیت‌های زراعی با بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات صورت پذیرد. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داد که در همه الگوهای مورد بررسی، مصرف کود و سم نسبت به الگوی وضع موجود با کاهش مواجه بوده است. بدیهی است که تغییر در سطوح زیر کشت محصولات زراعی دشت قزوین بر مصرف نهاده‌های الگوی کشت دشت تأثیر مستقیم دارد. تغییرات مصرف کود و سم محصولات زراعی الگوی چندهدفه نسبت به الگوی فعلی دشت قزوین در نمودار ۷ نشان داده شده است. بر این اساس، با اجرای مدل چندهدفه، محصولات برنج (شلتوک)، یونجه، جو، ذرت علوفه‌ای، خربزه، هندوانه، لوبیا، چغندرقند و ... با کاهش مصرف کود و سم و محصولات گوجه‌فرنگی، سورگوم، گندم، عدس، خیار، کلزا و نخود با افزایش این نهاده‌ها مواجه بوده‌اند، که برآیند این تغییرات مصرفی به کاهش ۰/۶ درصدی مصرف کود و سموم شیمیایی نسبت به الگوی جاری کشت دشت انجامیده است.



مأخذ: یافته‌های پژوهش

نمودار ۷- تغییرات مصرف کود و سم محصولات زراعی الگوی چندهدفه نسبت به الگوی فعلی دشت قزوین (میلیون ریال)

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مطالعات بهینه‌سازی الگوی کشت و ارزیابی تناسب اراضی هر کدام به‌نوعی برآنند که بهترین استفاده از اراضی را مشخص کنند. در مطالعات تناسب اراضی، تنها تمرکز روی ویژگی‌های اقلیمی و شرایط مربوط به خاک[1] محصولات منطقه مورد مطالعه است و مکان مناسب برای تولید پایدار یک محصول خاص تعیین می‌شود، ولی این‌گونه مطالعات در تعیین نوع کاربری سایر عوامل اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و سیاست‌گذاری‌های تولید نقشی ایفا نمی‌کنند. در صورتی که اراضی مناسب کشت محصولات از طریق به‌کارگیری مطالعات تناسب اراضی مشخص و سطح بهینه کشت با استفاده از مطالعات بهینه‌سازی الگوی کشت تعیین شود، مناسب‌ترین کاربری و بهترین سطح لازم زیر کشت برای پایداری هم‌زمان منابع آب و خاک و سایر عوامل تأثیرگذار در الگوی کشت مشخص می‌شود.

[1] edaphic

مطالعه حاضر در سطح برنامه‌ریزی ساختاری کشاورزی[1] انجام شده است. در این سطح، هدف اصلی تعیین چارچوب‌های کلی تخصیص و استفاده از اراضی در مقیاس‌های بزرگ (مانند دشت قزوین) است. به همین دلیل، در مدل تدوین الگوی کشت بهینه، مساحت تناسب اراضی به‌عنوان محدودیت‌های سطح قابل کشت برای هر محصول لحاظ می‌شود تا از استفاده بهینه و پایدار منابع در سطح منطقه‌ای اطمینان حاصل شود. بدیهی است که تحلیل تفکیکی تناسب اراضی بر اساس طبقات جزئی‌تر و واحدهای مزرعه‌ای به داده‌های دقیق‌تر حدنگاری و اجرایی نیاز دارد که در سطح برنامه‌ریزی عملیاتی[2] قابل انجام است. از این‌رو، این نوع تحلیل‌ها می‌تواند به‌عنوان مرحله تکمیلی و ادامه مطالعه حاضر در مطالعات آتی مورد توجه قرار گیرد.

از آنجا که در طراحی برنامه‌ریزی الگوی کشت محصولات زراعی دشت قزوین، کلیه اهداف و متغیرهای مد نظر مبتنی بر نتایج ارزیابی تناسب اراضی و در راستای اصول کشاورزی پایدار بوده و نتایج به‌دست‌آمده نیز در راستای بهبود شاخص‌های مد نظر است، می‌توان انتظار داشت که اجرای الگوی پیشنهادی با پیامد پایداری بیشتر در زمینه‌های منافع اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی نسبت به الگوی کشت فعلی دشت قزوین همراه باشد.

نتایج مدل‌های بررسی‌شده در پژوهش حاضر عمدتاً نشان‌دهنده کاهش سطح زیر کشت کل و کاهش مصرف آب بوده، که تأکیدی بر ضرورت اتخاذ سیاست‌هایی در راستای کاهش مصرف آب و اصلاح الگوی کشت است. از آنجا که آب آبیاری عامل محدودکنندهٔ برنامه‌ریزی کشت در دشت قزوین بوده و منطقه با افت منابع آب زیرزمینی مواجه است و از سوی دیگر، کشاورزان معمولاً به کاهش سطح زیر کشت چندان تمایل ندارند، در مناطقی که تناسب اراضی برای تولید محصولات زراعی پایین است، پیشنهاد می‌شود که سیاست‌ها و راهکارهایی نظیر نصب کنتورهای هوشمند، حذف چاه‌های غیرمجاز، ارتقای بهره‌وری آب در مزرعه، برنامه‌های ترویجی آموزشی، و بررسی و اعمال سیاست‌های قیمتی آب (به‌ویژه برای محصولات پرآب‌بر) در دستور کار قرار گیرد. اجرای سیاست‌های قیمتی آب موضوع بسیار پیچیده و حیاتی است که باید در مطالعات آتی، به بررسی اثر اعمال سیاست‌های قیمتی با اهداف چندگانه و مدل‌های مناسب پرداخته شود تا ضمن اثرگذاری لازم بر مدیریت منابع آب، بار مالی سنگین بر کشاورزان تحمیل نکند. بدیهی است که اجرایی شدن این تصمیم‌ها نیاز به قوانین، بخشنامه‌ها و شیوه‌نامه‌های اجرایی و ایجاد زیرساخت‌های اجرایی این قوانین دارد که به‌ترتیب، بر عهده برنامه‌ریزان راهبردی در سطح کلان و برنامه‌ریزان عملیاتی در سطح اجرایی است.

1. Structural Agricultural Planning (SAP)
2. operational planning

با تلفیق ارزیابی تناسب اراضی و تعیین الگوی بهینه کشت مبتنی بر آن، می‌توان در اجرای الگوی کشت، مکان‌های مناسب با سطوح مشخص را برای کشت محصولات زراعی شناسایی و تعیین کرد. از آنجا که تناسب اراضی نقش کلیدی در بهره‌وری دارد، نتیجه این فرآیند نه‌تنها سبب افزایش تولید و کارآیی در زیربخش زراعت خواهد بود، بلکه امکان برنامه‌ریزی و مدیریت هدفمند و نظام‌مند تولیدات کشاورزی را در مقیاس منطقه‌ای فراهم می‌سازد. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود که تعیین الگوی کشت مناطق به‌صورت هم‌زمان و در انطباق کامل با نتایج ارزیابی تناسب اراضی انجام شود، چراکه این رویکرد هماهنگ موجب افزایش دقت در انتخاب محصولات متناسب با ظرفیت‌های محیطی هر منطقه می‌شود و زمینه‌ساز بهره‌برداری بهینه از منابع و عوامل تولید، افزایش تولید و مدیریت علمی و کارآمدتر در بخش کشاورزی خواهد بود و پایداری کشاورزی را به‌همراه خواهد داشت.

موفقیت الگوی کشت به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی برنامه‌ریزی کشاورزی نه‌تنها به کیفیت طراحی و تدوین آن بلکه به شیوه و کیفیت اجرای آن در مزرعه وابسته است. طراحی و تدوین الگوی کشت مبتنی بر نتایج ارزیابی تناسب اراضی، همان‌گونه که در مطالعهٔ حاضر انجام شد، به مجریان و ناظران ذی‌ربط در سطح منطقه این امکان را می‌دهد که با توجه به وجود نقشه‌ها و مکان مناسب تولید محصولات مختلف، امکان ارزیابی دقیق، شناسایی به‌موقع انحرافات، اصلاح خطاها و به‌روزرسانی تصمیمات را داشته باشند. بدیهی است که این فرآیند، در عمل، هنگامی نتایج دقیق‌تر و اثربخش‌تر به‌دست می‌دهد که با بهره‌گیری از مطالعات حدنگاری واحدهای بهره‌برداری زراعی دشت قزوین همراه باشد. در نتیجه، به‌عنوان مسیر آتی پژوهش، پیشنهاد می‌شود که تدوین الگوی کشت مبتنی بر توان اراضی و حدنگاری اراضی زراعی در سطح عملیاتی دنبال شود تا برنامه‌ریزی تولید، نظام توزیع محصولات، و مدیریت بهینه آب و خاک در چارچوب برنامه‌ریزی ساختاری و راهبری جامع دشت قزوین تحقق یابد.

منابع

1. Abdelbaki, A. M., & Alzahrani, A. S. (2024). Gradually optimization of cropping pattern in Saudi Arabia for sustainable agricultural development until 2030. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(4), 102624.
2. Ahmadi, A. (2022). The effect of increasing water use efficiency on improving the status of groundwater resources using WEAP model in Qazvin Plain. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(1), 53-62. [In Persian]

3. Akbari, M., Najafi Alamdarloo, H., & Mousavi, S. H. (2019). Impacts of climate change and drought on income risk and crop pattern in Qazvin Plain irrigation network. *Water Research in Agriculture*, 33(2), 265-281. DOI: 10.22092/jwra.2019.119742. [In Persian]
4. Akinsunmade, A., & Ejieji, C. (2021). Land suitability and crop pattern model using integrated pollination intelligence algorithm and remote sensing. *Earthline Journal of Mathematical Sciences*, 5(1), 1-15.
5. Aliaga, M. A., & Chaves-Dos-Santos, S. M. (2014). Food and nutrition security public initiatives from a human and socioeconomic development perspective: mapping experiences within the 1996 World Food Summit signatories. *Social Science and Medicine*, 104, 74-79.
6. Amini, A. (2015). Application of fuzzy multi-objective programming in optimization of crop production planning. *Asian Journal of Agricultural Research*, 9(5), 208-222.
7. Asaadi , M., Khalilian, S., & Mousavi, S. H. (2019). Effects of deficit irrigation simultaneously with reduced usage of fertilizer and chemical pesticides on changing cropping pattern in Qazvin irrigation network. *Water Research in Agriculture*, 33(1), 121-136. [In Persian]
8. Brosseau, A., Saito, K., van Oort, P. A., Diagne, M., Valbuena, D., & Groot, J. C. (2021). Exploring opportunities for diversification of smallholders' rice-based farming systems in the Senegal River Valley. *Agricultural Systems*, 193, 103211.
9. Bulukazari, S., Babazadeh, H., Ebrahimi Pak, N., Mousavi-Jahromi, S. H., & Ramezani Etedali, H. (2022). Optimization of water and land allocation in salinity and deficit-irrigation conditions at farm level in Qazvin Plain. *PlosOne*, 17(7), e0269663.
10. Chandra, S., & Aggarwal, A. (2014). On solving fuzzy linear programming problems: a revisit to Zimmermann's approach. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 27(5), 2603-2610.
11. Chen, Y., Zhou, Y,. Fang, S., Li, M., Wang, Y., & Cao, K. (2022). Crop pattern optimization for the coordination between economy and environment considering hydrological uncertainty. *Science of the Total Environment*, 809, 151152.

12. Ehsani Kolikand, S., Bijan Nazari, B., Ramezani Etedali, H., & Sotoodehnia, A. (2023). Optimization of cropping patterns in agricultural wells with monthly and anually water volume restrictions (case study: Qazvin Plain). *Water Management in Agriculture*, 9(2), 31-44. [In Persian]
13. Elliot, T., Bertrand, A., Almenar, J. B., Petucco, C., Proença, V., & Rugani, B. (2019). Spatial optimisation of urban ecosystem services through integrated participatory and multi-objective integer linear programming. *Ecological Modelling*, 409, 108774.
14. FAO (2017). The future of food and agriculture: trends and challenges. Food andAgriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.
15. Fehér, A., Gazdecki, M., Véha, M., Szakály, M., & Szakály, Z. (2020). A comprehensive review of the benefits of and the barriers to the switch to a plant-based diet. *Sustainability*, 12(10). 1-18.
16. Fleming, K., Kouassi, A., Ondula, E., & Waweru, P. (2016). Toward farmer decision profiles to improve food security in Kenya. *IBM Journal of Research and Development*, 60(5/6), 1-6.
17. Foley, J. A., DeFries, R,. Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., & Gibbs, H. K. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570-574.
18. Gholami, Z., Ebrahimian, H., & Noory, H. (2018). Prioritization of major agricultural crops cultivation considering the energy and water costs in Qazvin Plain. *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(1), 17-30. [In Persian]
19. Hacısüleyman, V., & Özger, M. (2024). Multi-objective cropping pattern optimization and comparative assessment with the food-energy-water nexus. *Water Supply*, 24(12), 4077-4093.
20. Hao, L., Su, X., & Singh, V. P. (2018). Cropping pattern optimization considering uncertainty of water availability and water saving potential. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(1), 178-186.
21. Hou, Z., Liu, Y., Wang, J., Manevski, K., & Zeng, Z. (2026). Multi-objective optimization framework for cropping structure based on water-

carbon-economy nexus: large-scale case study in Northeast China. *Field Crops Research*, 340, 110367.

22. Hussain, M. A., Riley, W., & Bekhit, A. E.-D. A. (2022). Trends and motivations for novel protein sources and contribution towards food security. In: Alternative Proteins (pp. 1-16). CRC Press.
23. Itoh, T., Ishii, H., & Nanseki, T. (2003). A model of crop planning under uncertainty in agricultural management. *International Journal of Production Economics*, 81, 555-558.
24. IWRMC (2019). Forbidden plains of Iran. *Iran Water Resources Management Company (IWRMC)*. Available at https://www.danab.ir/wp-content/uploads/2020/09/total97.pdf. [In Persian]
25. Jones, D., & Barnes, E. (2000). Fuzzy composite programming to combine remote sensing and crop models for decision support in precision crop management. *Agricultural Systems*, 65(3), 137-158.
26. Joolaie, R., Abedi Sarvestani, A., Taheri, F., Van Passel, S., & Azadi, H. (2017). Sustainable cropping pattern in North Iran: application of fuzzy goal programming. *Environment, Development and Sustainability*, 19(6), 2199-2216.
27. Joulaei, R., Azar, A., & Chizari, H. (2005). Several regional planning models and its application in agriculture, case study of Fars province. *Agricultural Economics and Development* 13, 87-125. [In Persian]
28. Karami, E. (2006). Appropriateness of farmers' adoption of irrigation methods: the application of the AHP model. *Agricultural Systems*, 87(1), 101-119. [In Persian]
29. Kelley, H. W. (1983). Keeping the land alive: soil erosion--its causes and cures. Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, Italy.
30. Kihoro, J., Bosco, N. J., & Murage, H. (2013). Suitability analysis for rice growing sites using a multicriteria evaluation and GIS approach in great Mwea region, Kenya. *SpringerPlus*, 2(1), 1-9.
31. Kousar, S., Sangi, M. N., Kausar, N., Pamučar, D., Ozbilge, E., & Cagin, T. (2023). Multi-objective optimization model for uncertain crop production under neutrosophic fuzzy environment: a case study. *AIMS Mathematics*, 8(3): 7584–7605.

32. Li, J., Qiao, Y., Lei, X., Kang, A., Wang, M., Liao, W., Wang, H., & Ma, Y. (2019). A two-stage water allocation strategy for developing regional economic-environment sustainability. *Journal of Environmental Management*, 244, 189-198.
33. Li, M., Fu, Q., Singh, V. P., Liu, D., Li, T., & Zhou, Y. (2020). Managing agricultural water and land resources with tradeoff between economic, environmental, and social considerations: a multi-objective non-linear optimization model under uncertainty. *Agricultural Systems*, 178, 102685.
34. Li, X., Kang, S., Niu, J., Du, T., Tong, L., Li, S., & Ding, R. (2017). Applying uncertain programming model to improve regional farming economic benefits and water productivity. *Agricultural Water Management*, 179, 352-365.
35. Liu, Y. (2018). Introduction to land use and rural sustainability in China. *Land Use Policy*, 74, 1-4.
36. Liu, Y., Fang, F., & Li, Y. (2014). Key issues of land use in China and implications for policy making. *Land Use Policy*, 40, 6-12.
37. Long, H., Li, Y., Liu, Y., Woods, M., & Zou, J. (2012). Accelerated restructuring in rural China fueled by 'increasing vs. decreasing balance' land-use policy for dealing with hollowed villages. *Land Use Policy*, 29(1), 11-22.
38. Loni, R., & Sharifzadeh, M. (2022). A review of water, energy, and food nexus in Iran: necessity, challenges and suggested solutions. *Sustainability, Development and Environment*, 3(3), 29-49. [In Persian]
39. Lyu, J., Jiang, Y., Xu, C., Liu, Y., Su, Z., Liu, J., & He, J. (2022). Multi-objective winter wheat irrigation strategies optimization based on coupling AquaCrop-OSPy and NSGA-III: a case study in Yangling, China. *Science of the Total Environment*, 843, 157104.
40. Mahmoodi, M., & Parhizkari, A. (2016). Economic analysis of the climate change impacts on products yield, cropping pattern and farmer's gross margin (case study: Qazvin Plain). *Economic Growth and Development Research*, 1(2), 25-40. [In Persian]
41. MAJ (2015). Qualitative assessment of land suitability for important agricultural crops in the Qazvin Plain. *Agricultural Research, Education*

and Extension Organization (AREEO), Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran. [In Persian]
42. Majid, H. (1996). Systematic: agricultural geography. Rawat Publications.
43. Mandal, V. P., Rehman, S,. Ahmed, R., Masroor, M., Kumar, P., & Sajjad, H. (2020). Land suitability assessment for optimal cropping sequences in Katihar district of Bihar, India using GIS and AHP. *Spatial Information Research*, 28(5), 589-599.
44. Manikas, I., Ali, B. M., & Sundarakani, B. (2023). A systematic literature review of indicators measuring food security. *Agriculture and Food Security*, 12(10), 1-31.
45. Manos, B., Papathanasiou, J., Bournaris, T., & Voudouris, K. (2010). A multicriteria model for planning agricultural regions within a context of groundwater rational management. *Journal of Environmental Management*, 91(7), 1593-1600.
46. Mardani Najafabadi, M., & Mirzaei, A. (2019). Evaluating effect of policy programs to achieve water resources stability objective in Qazvin Plain. *Journal of Agricultural Economics Research*, 11(3), 155-176. [In Persian]
47. Mardani Najafabadi, M., Nikouei, A., Ziaei, S., & Ahmadpour, M. (2016). Codifying regional cropping pattern of agricultural and horticultural products in Isfahan province: multi-objective structural planning approach. *Agricultural Economics and Development*, 30(3), 188-206. [In Persian]
48. Mardani Najafabadi, M., Ziaei, S., Nikouei, A., & Borazjani, M. A. (2019). Mathematical Programming Model (MPM) for optimization of regional cropping patterns decisions: a case study. *Agricultural Systems*, 173, 218-232.
49. Marzban, Z., Asgharipour, M. R., Ghanbari, A., Ramroudi, M., & Seyedabadi, E. (2021). Determining cropping patterns with emphasis on optimal energy consumption using LCA and multi-objective planning: a case study in eastern Lorestan province, Iran. *Energy, Ecology and Environment*, 7, 489-507.
50. Matori, A., & Chandio, I. A. (2011). Land suitability analysis using Geographic Information System (GIS) for hillside development: a case

study of Penang Island. *International Conference on Environmental and Computer Science* (IPCBEE Vol. 19, pp. 1–6). IACSIT Press, Singapore

51. Meenambal, T. (2019). Environmental science and engineering. MJP Publisher.
52. Mirzaei Bafti, M., Rahmani, S., & Parhizkari, A. (2019). The economic value of irrigation water, cropping pattern, and farmer gross margin under drought conditions: the case of the Qazvin Plain. *Journal of Hydrosciences and Environment*, 3(6), 32-42.
53. Mohammadi, H., Boustani, F., & Kafilzadeh, F. (2012). Optimal cropping pattern using a multi-objectives fuzzy non-linear optimization algorithm: a case study. *Water and Wastewater*, 23(4), 43-55. [In Persian]
54. Nikouei, A., Asgharipour, M. R., & Marzban, Z. (2022). Modeling land allocation to produce crops under economic and environmental goals in Iran: a multi-objective programming approach. *Ecological Modelling*, 471, 110062.
55. Nikouei, A., & Mardani Najafabadi, M. (2021). Application of agricultural land cadastre in compilation of comprehensive and operational cropping pattern of farms: a case study in Isfahan province. *Agricultural Economics and Development*, 29(1), 235-266. [In Persian]
56. Nikouei, A., Zibaei, M., & Ward, F. A. (2012). Incentives to adopt irrigation water saving measures for wetlands preservation: an integrated basin scale analysis. *Journal of Hydrology*, 464, 216-232.
57. Nouri, H., Stokvis, B., Borujeni, S. C., Galindo, A., Brugnach, M., Blatchford, M., Alaghmand, S., & Hoekstra, A. (2020). Reduce blue water scarcity and increase nutritional and economic water productivity through changing the cropping pattern in a catchment. *Journal of Hydrology*, 588, 125086.
58. Ojaghi, S., Bayat, R., Fazli , S., Keshavarz Turk, E., & Taheri , A. F. (2024). Determining the key drivers affecting employment and social welfare in [ran: the approach of analyzing mutual effects in future study. *Majlis and Rahbord*, 31(117), 335-377. DOI: 10.22034/mr.2022.5406.5161.
59. Okola, I., Omulo, E. O., Ochieng, D. O., & Ouma, G. (2025). Multi-objective optimization of the food-energy-water nexus problem: a review

of the key concepts and emerging opportunities in objective functions, decision variables, and optimization techniques. *Earth's Future*, 13(4), e2024EF004718.

60. Parhizkari, A. (2021). Economic analysis of the effects of increase saffron acreage on cropping pattern, the consumption of inputs and farmer's gross profit in Qazvin Plain. *Agricultural Economics Research*, 13(1), 1-24. [In Persian]
61. Porter, J., Xie, L., Challinor, A. J., Howden, M., Iqbal, M. M., Lobell, D. B., & Travasso, M. I. (2014). Food security and food production systems. (pp. 485–533). Cambridge University Press.
62. Pozza, L. E., & Field, D. J. (2020). The science of soil security and food security. *Soil Security*, 1(1),100002. https://doi.org/10.1016/j.soisec.2020.100002
63. Raheli-Namin, S., Mortazavi, M., Mobinifar, M., & Adeli, M. (2016). Groundwater quality probability mapping and assessment for domestic and irrigation purposes in Ghara-Su Basin of Golestan province. *Iran. J. Mater. Environ. Sci*, 7(1), 259-271.
64. Rahman, M. N. (2020). Crops pattern change and agricultural diversification: a case study of Domar Upazila, Nilphamari. *International Journal of Agricultural Science and Food Technology*, 6(1), 022-029.
65. Randall, M., Schiller, K., Lewis, A., Montgomery, J., & Alam, M. S. (2024). A systematic review of crop planning optimisation under climate change. *Water Resources Management*, 38(6), 1867-1881.
66. Roser, M., Ritchie, H., & Rosado, P. (2013). Food supply. Available at http://www.OurWorldInData. org.
67. Sengupta, A., Pal, T. K., & Chakraborty, D. (2001). Interpretation of inequality constraints involving interval coefficients and a solution to interval linear programming. *Fuzzy Sets and Systems*, 119(1), 129-138.
68. Shabanzadeh Khoashrody, M., Peykani, G., Hosseini, S. S., & Yazdani, S. (2019). Change from the purchasing price policy to the guaranteed price policy and its effects on cropping pattern in Qazvin Plain. *Agricultural Economics Research*, 11(1), 101-129. [In Persian]
69. Shirshahi, F., Babazadeh, H., Ebrahimi Pak, N., & Khaledian, M. R. (2021). Optimization of water allocation and optimal cropping pattern in

irrigation and drainage network of Ghazvin Plain. *Irrigation Sciences and Engineering*, 44(3), 103-116. [In Persian]

70. Shokoohi, A., Ramezani Etedali, H., Mojtabavi, S. A., & Singh, V. P. (2016). Using water footprint accounting for optimizing crop patterns respecting sustainable development (case study: Qazvin Plain). Iran-Water Resource Research, 12(3), 99-113. [In Persian]
71. Song, M., Xie, Q., Shahbaz, M., & Yao, X. (2023). Economic growth and security from the perspective of natural resource assets. *Resources Policy*, 80, 10315.
72. Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50), 20260-20264.
73. Tilman, D., Socolow, R., Foley, J. A., Hill, J., Larson, E., Lynd, L., Pacala, S., Reilly, J., Searchinger, T., & Somerville, C. (2009). Beneficial biofuels: the food, energy, and environment trilemma. *Science*, 325(5938), 270-271.
74. Tudi, M., Daniel Ruan, H., Wang, L., Lyu, J., Sadler, R., Connell, D., Chu, C., & Phung, D. T. (2021). Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(3), 1112.
75. Vafa, P., Barary, M., Alizade, Y., & Faramarzi, M. (2018). Agro-ecological zoning of wheat irrigation using geographic information systems and the analytical hierarchy process in Ilam province. *Journal of Agroecology*, 8(1), 61-74.
76. Vafaeinejad, A. (2016). Cropping pattern optimization by using TOPSIS and genetic algorithm based on the capabilities of GIS. *Eco Hydrology*, 3(1), 69-86. [In Persian]
77. Varade, S., & Patel, J. N. (2018). Determination of optimum cropping pattern using advanced optimization algorithms. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23(6), 05018010.
78. Vivekanandan, N., & Viswanathan, K. (2007). Optimization of multi-objective cropping pattern using linear and goal programming approaches. *Mausam*, 58(3), 323-334.

79. Wardlow, B. D., & Egbert, S. L. (2002). Discriminating cropping patterns in the US Central Great Plains region using time-series MODIS 250-meter NDVI data: preliminary results. Proceedings, Pecora 15 and Land Satellite Information IV Conference.
80. Yang, G., Fu, C,. Zuo, Q., Shi, J., Wu, X., Qiao, X., & Ben-Gal, A. (2025). Multi-objective optimized allocation of arid saline farmlands and irrigation water resources for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management*, 321, 109929.
81. Yazdani, S., Mahmoodi, M., Yavari, G., Nazari, M., & Mirzaei, M. (2016). Analysis of the economic effects of nonprice policy reduced water supply in Qazvin Plain. *Economic Growth and Development Research*, 6(23(2)), 89-98. [In Persian]
82. Yu, H., Liu, K., Bai, Y., Luo, Y., Wang, T., Zhong, J., Liu, S., & Bai, Z. (2021). The agricultural planting structure adjustment based on water footprint and multi-objective optimisation models in China. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126646.
83. Yu, J., Chen, Y., Wu, J., & Khan, S. (2011). Cellular automata-based spatial multi-criteria land suitability simulation for irrigated agriculture. *International Journal of Geographical Information Science*, 25(1), 131-148.
84. Zeng, X., Kang, S., Li, F., Zhang, L., & Guo, P. (2010). Fuzzy multi-objective linear programming applying to crop area planning. *Agricultural Water Management*, 98(1), 134-142.
85. Zhang, K., Yu, Z., Li, X., Zhou, W., & Zhang, D. (2007). Land use change and land degradation in China from 1991 to 2001. *Land Degradation & Development*, 18(2), 209-219.