Journal of Research in Horticultural Science
پژوهش در علوم باغبانی
Vol. 4, No. 2 Autumn and Winter 2025 (101–109)
جلد ۴، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۴ (ص ۱۰۹-۱۰۱)
10.22092/rhsj.2026.372678.1145
مقاله علمی پژوهشی
تارنمای مجله: https://rhsj.areeo.ac.ir

بهینه‌سازی الگوی کشت صیفی‌جات گلخانه‌ای در استان یزد با برنامه‌ریزی خطی دوهدفه برای مدیریت آب و افزایش درآمد

مهرآسا آیت‌اللهی[۱]، محمدرضا وظیفه‌شناس[۲*]، احمد شاکر اردکانی[۳]

۱- استادیار، گروه ریاضی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران.

۲- استادیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان یزد، یزد، ایران.

۳- دانشیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان یزد، یزد، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۷

چکیده

با توجه به محدودیت منابع آب در مناطق خشک، بهینه‌سازی الگوی کشت گلخانه‌ای به‌منظور مدیریت هم‌زمان مصرف آب و افزایش درآمد حائز اهمیت است. هدف این پژوهش، تعیین الگوی کشت بهینه صیفی‌جات گلخانه‌ای در شهر یزد با مختصات جغرافیایی ۳۱/۸۹۷۴ درجه عرض شمالی و ۵۴/۳۵۶۹ درجه طول شرقی، با استفاده از برنامه‌ریزی خطی دوهدفه بود. مطالعه در یک گلخانه ۲۰۰۰ مترمربعی طی دوره اول تیر تا ۳۱ شهریور ۱۴۰۴ انجام شد. پنج محصول گوجه‌فرنگی، فلفل دلمه‌ای، بادمجان، خیارسبز و کدوسبز در قالب چهار سناریوی مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. مدل ریاضی با دو تابع هدف شامل کمینه‌سازی مصرف آب و بیشینه‌سازی درآمد و تحت محدودیت‌های مساحت، نیروی کار، بودجه و سهم مجاز سطح زیر کشت تدوین و با نرم‌افزار Lingo حل شد. نتایج نشان داد سناریوی اول دارای مصرف آب ۱۱۷۶۵۰۰ لیتر و درآمد ۸۲۷ میلیون تومان، سناریوی دوم دارای مصرف آب ۱۲۴۴۵۰۰ لیتر و درآمد ۸۴۷ میلیون تومان، سناریوی سوم دارای مصرف آب ۱۱۰۳۲۴۰ لیتر و درآمد ۷۲۹/۳۶ میلیون تومان و سناریوی چهارم دارای مصرف آب ۱۲۶۳۰۰۰ لیتر و درآمد ۸۳۹/۴ میلیون تومان بود. با توجه به ضرورت ایجاد تعادل میان اهداف اقتصادی و مدیریت منابع آب، سناریوی چهارم به‌عنوان الگوی کشت پیشنهادی انتخاب شد. در این الگو، ۹۰۰ مترمربع به گوجه‌فرنگی، ۵۰۰ مترمربع به فلفل دلمه‌ای، ۲۵۰ مترمربع به بادمجان، ۳۰۰ مترمربع به خیارسبز و ۵۰ مترمربع به کدوسبز اختصاص یافت. این ترکیب نسبت به سناریوی پایه، درآمد را ۱/۵ درصد افزایش داد، در حالی که مصرف آب ۷/۳۵ درصد افزایش یافت.

واژگان کلیدی: گلخانه صیفی‌جات، الگوی کشت، بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی خطی.

Optimization of Greenhouse Vegetable Cropping Pattern in Yazd Province Using Bi-Objective Linear Programming for Water Management and Income Enhancement

Mehrasa Ayatollahi[1], Mohammad Reza Vazifeshenas[2*], Ahmad Shakerardekani[3]

1- Assistant Professor, Department of Mathematics, Payame Noor University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Yazd Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Yazd, Iran.

1- Associate Professor, Yazd Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Yazd, Iran.

Received: May 2026 Accepted: March 2026

Abstract

Given the limited water resources in arid regions, optimizing greenhouse cropping patterns for simultaneous water management and income improvement is of great importance. The objective of this study was to determine an optimal cropping pattern for greenhouse vegetable production in Yazd City (31.8974° N, 54.3569° E), using a bi-objective linear programming approach. The study was conducted in a 2,000 m² greenhouse during the period from July 1 to September 31, 2025. Five greenhouse crops, including tomato, bell pepper, eggplant, cucumber, and zucchini, were evaluated under four different scenarios. A mathematical model was developed with two objective functions: minimizing water consumption and maximizing income, subject to constraints on area, labor, budget, and allowable cultivation share. The model was solved using LINGO software. The results showed that Scenario 1 resulted in a water consumption of 1,176,500 L and an income of 827 million Tomans, Scenario 2 resulted in a water consumption to 1,244,500 L and an income to 847 million Tomans, Scenario 3 resulted in a water consumption 1,103,240 L and an income of 729.36 million Tomans, and Scenario 4 resulted in a water consumption of 1,263,000 L and an income of 839.4 million Tomans. Considering the need to balance economic objectives and water-resource management, Scenario 4 was selected as the proposed cropping pattern. In this pattern, 900 m² was allocated to tomato, 500 m² to bell pepper, 250 m² to eggplant, 300 m² to cucumber, and 50 m² to zucchini. Compared to the baseline scenario, this pattern increased income by 1.5%, while water consumption increased by 7.35%.

Keywords: Vegetable Greenhouses, Cropping Pattern, Optimization, Linear Programming.

*نویسنده مسئول: m.vazifeshenas@areo.ir

۱- مقدمه

در حالی که آب یکی از حیاتی‌ترین منابع طبیعی برای توسعه پایدار کشاورزی به شمار می‌رود، محدودیت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مانند نواحی مرکزی ایران، یکی از چالش‌های اصلی تولید محصولات کشاورزی است. با وجود آنکه بیش از ۹۰ درصد منابع تجدیدپذیر آب در ایران در بخش کشاورزی مصرف می‌شود، بهره‌وری آب در این بخش پایین است (Keshavarz *et al*., 2005). بنابراین، استفاده از روش‌های نوین مدیریت منابع آب در کشاورزی ضرورت ویژه‌ای دارد. علاوه‌بر این، پایداری اقتصادی واحدهای کشاورزی و گلخانه‌ای نیز نقش اساسی در تداوم تولید دارد؛ زیرا انتخاب الگوی کشت نامناسب می‌تواند ضمن مصرف بالای آب، بازده اقتصادی ناکافی را نیز به همراه داشته باشد. این موضوع در مناطقی مانند استان یزد، که براساس مطالعه امیری و همکاران (Amiri *et al*., 2023) با دارا بودن متوسط تبخیر سالانه حدود ۳۳۰۰ میلی‌متر و متوسط بارندگی سالانه حدود ۹۵ میلی‌متر از خشک‌ترین نواحی ایران به شمار می‌رود، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. به همین دلیل در سال‌های اخیر توسعه کشت گلخانه‌ای در یزد به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر برای افزایش بهره‌وری آب و استفاده بهینه از منابع محدود گسترش یافته و بنابر گزارش الگوی کشت ملی محصولات کشاورزی، درصد تحقق احداث گلخانه در استان یزد که در سال زارعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ برابر با ۱۶ درصد بوده در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ به ۷۰ درصد رسیده است (جهاد کشاورزی، ۱۴۰۴). کشت گلخانه‌ای، وابستگی به فصل رشد را از بین می‌برد و با کنترل دقیق عوامل محیطی مانند دما، رطوبت، نور و مواد مغذی، امکان تولید چندین برابر محصول در یک واحد سطح را فراهم می‌کند. در این روش، می‌توان در تمام فصول سال و حتی در مناطقی که آب و هوای نامناسبی برای کشاورزی دارند، به تولید ادامه داد که منجر به عرضه پایدار محصول به بازار و افزایش سودآوری می‌شود. با این حال، در بسیاری از گلخانه‌ها مدیریت منابع آب و آبیاری همچنان به صورت تجربی انجام می‌شود و تصمیم‌گیری در خصوص الگوی کشت اغلب بدون توجه به معیارهای بهینه‌سازی مصرف آب و بازده اقتصادی تولید صورت می‌گیرد.

تاکنون پژوهش‌ها و مطالعات متعددی در زمینه بهینه‌سازی مصرف آب و آبیاری هوشمند برای انواع مختلف محصولات کشاورزی صورت گرفته است. این مطالعات با رویکردهای نوآورانه و فناوری‌محور، از جمله استفاده از حسگرهای رطوبت خاک (Pourgholam-Amiji *et al*., 2023)، الگوریتم‌های هوشمند برای تعیین دقیق نیاز آبی گیاه (Dehghanisanij *et al*., 2023) و داده‌های تبخیر و تعرق (Sabzevari and Eslamian, 2023; Bidabadi *et al*., 2024) در مناطق مختلف و با شرایط آب و هوایی متفاوت (از مرطوب و معتدل تا خشک و نیمه‌خشک) انجام شده‌اند. علاوه‌بر موارد ذکر شده، یکی از رویکردهای دیگری که توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده، بررسی تأثیر تغییر الگوی کشت بر بهره‌وری آب و شاخص‌های اقتصادی است. نتایج حاصل از تغییر الگوی کشت، نشان می‌هد انتخاب هوشمندانه یک الگوی کشت مناسب می‌تواند منجر به کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری اقتصادی شود. نمونه‌ای از این رویکرد در سطح بین‌المللی، پژوهشی است که با هدف تخصیص بهینه منابع آب به مزارع مختلف کشاورزی در جنوب‌شرقی آناتولی (در ترکیه) انجام شده که از یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی استفاده کرده است (Benli and Kodul, 2003). در مطالعه‌ای مشابه اما با استفاده از برنامه‌ریزی خطی یک الگوی کشت بهینه برای ایالت کارناتا در هند طراحی شده که مبتنی بر محدودیت‌های منابع آب، زمین و نیروی انسانی است (Shreedhar *et al*., 2015). در ایران نیز با استفاده از برنامه‌ریزی خطی مطالعات متعددی برای تعیین و اصلاح الگوی کشت در مناطق مختلف انجام شده است. از جمله این موارد می‌توان به مطالعه‌ای در حوزه رودخانه زرینه برای تهیه الگوی کشت بهینه برای گندم، جو و یونجه اشاره نمود (Emami and Koch, 2018)؛ در این پژوهش با ترکیب مدل هیدرولوژیکی و الگوریتم بهینه‌سازی، بهره‌وری اقتصادی آب به حداکثر رسیده است. در مطالعه میرزائی بافتی و همکاران (Mirzaei Bafti *et al*., 2019) به منظور بهینه سازی الگوی کشت در بخش مرکزی سیرجان مدل‌های برنامه ریزی خطی تک‌هدفه و چندهدفه ارایه شده است که نشان می‌دهد برای مزارع کمتر از پنج هکتار بهتر است سطح زیر کشت یونجه کاهش و جو افزایش یابد و برای مزارع با مساحت

بیشتر از پنج هکتار بهتر است سطح زیر کشت جو و پیاز افزایش یابد. مطالعه مشابهی به منظور تعیین الگوی کشت بهینه با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه در کرمانشاه انجام شده که نتایج آن نشان می‌هد بهتر است سطح زیر کشت محصولات گندم، جو و ذرت کاهش و سطح زیر کشت زعفران، زیتون و گیاهان دارویی افزایش یابد (Barati *et al*., 2020). پژوهش دیگری در حوزه دشت دهگلان واقع در استان کردستان انجام شده که برای تعیین الگوی کشت بهینه و راهکار افزایش سود خالص و بهره‌وری آب، مدل برنامه‌ریزی خطی در قالب هفت سناریوی مختلف برای محصولاتی نظیر گندم، جو، سیب زمینی و نخود طراحی شده است (شریعتی و همکاران، ۱۴۰۰). همچنین، میرزایی و همکاران (۱۴۰۴) نیز با دسته‌بندی محصولات کشاورزی در دو گروه اصلی پرآب‌بر و کم‌آب‌بر در استان فارس با استفاده از برنامه‌ریزی خطی یک الگوی کشت بهینه برای کاهش مصرف آب و سازگاری با کم‌آبی طراحی کرده‌اند. اخیراً در استان یزد نیز پژوهشی در زمینه بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات عمده زراعی و باغی اجرا شده است (مروج‌الاحکامی و همکاران، ۱۴۰۴)؛ نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کاهش سطح زیر کشت محصولات پرآب (گندم و جو) و افزایش سطح زیر کشت محصولات با بهره‌وری آب بالاتر (پسته و زعفران) منجر به بهبود مصرف آب می‌شود. اگرچه این مقاله گروه متنوعی از محصولات کشاورزی استان یزد را درنظرگرفته اما شامل محصولات گلخانه‌ای در این استان نمی‌شود. از جمله مطالعات انجام‌شده درباره محصولات گلخانه‌ای استان یزد می‌توان به پژوهش وظیفه‌شناس و همکاران (۱۴۰۳) اشاره کرد که در آن هیبریداسیون خیار سبز گلخانه‌ای بررسی شده است؛ با این حال، این مطالعه به موضوع مصرف آب نپرداخته است. به‌طور کلی، تاکنون پژوهش جامعی که به‌صورت هم‌زمان به کنترل و بهینه‌سازی مصرف آب و ارزیابی شاخص‌های اقتصادی در گلخانه‌های تولید صیفی در استان یزد بپردازد، گزارش نشده است.

در این پژوهش، به منظور ارزیابی تأثیر ترکیب‌های مختلف الگوی کشت بر مصرف آب و سودآوری در گلخانه‌های صیفی‌جات یزد، یک گلخانه با مساحت ۲۰۰۰ مترمربع انتخاب شد و چند سناریوی مدیریتی بر اساس یک مدل برنامه‌ریزی دوهدفه طراحی گردید. در این مدل که داده‌های آن مربوط به اول تیر ماه تا ۳۱ شهریور ماه می‌باشد، تخصیص سطح زیر کشت میان محصولات مختلف به‌گونه‌ای انجام شد که مصرف کل آب کمینه و درآمد حاصل از تولید، بیشینه شود. حل هر یک از سناریوها با استفاده از نرم‌افزار Lingo انجام گرفت و مقایسه نتایج، امکان تحلیل الگوهای مختلف کشت و شناسایی بهترین ترکیب محصولات از نظر مصرف آب و بازده اقتصادی را فراهم کرد. هرچند مدل ارائه‌شده برای یک گلخانه نمونه طراحی شده است، اما با اعمال تغییرات اندک در ضرایب و مقادیر قیود، قابلیت تعمیم و کاربرد در مقیاس‌های بزرگتر را نیز دارد. بنابراین، این مدل می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد برای مدیریت تلفیقی آب و درآمد در گلخانه‌های مناطق خشک مورد استفاده قرار گیرد.

به طور خلاصه، هدف اصلی پژوهش حاضر ارائه الگویی مناسب برای کشت ترکیبی محصولات صیفی در گلخانه‌های استان یزد است؛ الگویی که بتواند ضمن کاهش مصرف آب، درآمد حاصل از تولید را نیز افزایش دهد و در نهایت به پایداری و بهره‌وری بیشتر سیستم‌های تولید گلخانه‌ای در مناطق خشک کمک کند.

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش در یک گلخانه کشت صیفی‌جات با مساحت ۲۰۰۰ مترمربع واقع در حاشیه شهر یزد با طول جغرافیایی ۳۵۶۹/۵۴° شرقی و عرض جغراقیایی ۳۱/۸۹۷۴° شمالی انجام گرفت که براساس گزارش قیایی و همکاران (Ghiai *et al*., 2021) منطقه‌ای با آب و هوای گرم بیابانی است. بنابراین، به دلیل محدودیت‌های شدید منابع آب، یکی از حساس‌ترین نواحی ایران از نظر مدیریت آب محسوب می‌شود. براساس داده‌های اقلیمی بلندمدت، میانگین بارندگی سالانه در این منطقه حدود ۶۰ تا ۸۰ میلی‌متر است و متوسط تبخیر سالانه به ۲۵۰۰ تا ۳۵۰۰ میلی‌متر (شایق و سلطانی، ۱۳۹۰) می‌رسد که نشان‌دهنده شدت تنش آبی و ضرورت بهره‌گیری از سامانه‌های نوین مدیریت آب در تولیدات گلخانه‌ای است. گلخانه مورد مطالعه در این پژوهش، دارای بستر کشت خاکی و مجهز به سامانه آبیاری قطره‌ای بوده و دوره کشت مورد

ارزیابی، یک دوره ۱۰۰ روزه در فصل تابستان است که طی آن نیاز آبی محصولات صیفی در بیشترین مقدار خود قرار می‌گیرد.

برای تهیه داده‌های ورودی مدل، اطلاعات لازم برای نیاز آبی محصولات گلخانه‌ای طی دوره کشت از اول تیر تا ۳۱ شهریور، از طریق جستجو در گزارش‌های فنی، پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر و همچنین مصاحبه مستقیم با گلخانه‌داران منطقه گردآوری شد و اطلاعات مربوط به درآمد حاصل از فروش محصولات طی دوره انجام پژوهش نیز بنابر اظهارات گلخانه‌داران منطقه در نظر گرفته شد. داده‌های مرتبط با مقدار نیروی انسانی قابل دسترس (برحسب نفر-ساعت)، هزینه نهاده‌های مورد استفاده (نظیر بذر، نشاء، کود و ...) و محدودیت‌های مربوط به سهم مجاز سطح زیر کشت هر محصول نیز جمع‌آوری شد تا محدودیت‌های عملیاتی مدل با دقت بیشتری مشخص شوند. پنج محصول منتخب در این مطالعه، شامل خیار سبز، گوجه‌فرنگی، کدو سبز، فلفل دلمه‌ای و بادمجان هستند که از محصولات شاخص گلخانه‌ای در یزد به شمار می‌روند.

۲-۱- ساختار مدل

فرایند بهینه‌سازی در این پژوهش با استفاده از برنامه‌ریزی خطی انجام گرفت و ساختار ریاضی مدل به‌گونه‌ای تدوین شد که امکان ارزیابی اثر تغییر در ترکیب محصولات بر مصرف آب و همچنین بر تغییر درآمد فراهم شود. در حالت کلی مدل برنامه‌ریزی خطی شامل اجزاء مشخصی است که عبارتند از: متغیرهای تصمیم، تابع هدف و محدودیت‌های مدل. متغیرهای تصمیم شامل نمادهای ریاضی است که نشان دهنده سطح فعالیت هستند. تابع هدف مدل، یک رابطه ریاضی است که هدف پژوهش را در قالب متغیرهای تصمیم بیان می‌کند و معمولاً به صورت حداقل کردن یا حداکثر کردن بیان می‌شود. محدودیت‌های مدل نیز روابطی خطی برحسب متغیرهای تصمیم هستند که براساس محدودیت‌های منابع موجود یا سیاستگذاری‌های داخلی تعیین می‌شوند (Taha, 1992).

۲-۱-۱- متغیرهای تصمیم و تابع هدف

در پژوهش حاضر، متغیرهای تصمیم برابر با مقدار سطح زیر کشت تخصیص یافته به هر محصول (برحسب مترمربع) تعریف شدند. بر این اساس به ازای محصولات پنج‌گانه مورد مطالعه، متغیرهای $x_1, \dots, x_5$ را به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفتیم:

x_1 : مساحتی که به کشت گوجه‌فرنگی اختصاص می‌یابد؛

x_2 : مساحتی که به کشت فلفل دلمه‌ای اختصاص می‌یابد؛

x_3 : مساحتی که به کشت بادمجان اختصاص می‌یابد؛

x_4 : مساحتی که به کشت خیارسبز اختصاص می‌یابد؛

x_5 : مساحتی که به کشت کدوسبز اختصاص می‌یابد.

با توجه به این که هدف اصلی مدل در این پژوهش، کمینه‌سازی مصرف کل آب و بیشینه‌سازی کل درآمد حاصل از فروش محصولات است، دو تابع هدف به صورت رابطه زیر در نظر می‌گیریم:

$$\min Z = \sum_{i=1}^{5} c_i x_i \qquad (۱)$$
$$\max W = \sum_{i=1}^{5} p_i x_i$$

در رابطه فوق c_i و p_i به ازای $i = 1, \dots, 5$ به ترتیب نشان‌دهنده میزان مصرف آب (برحسب لیتر) و درآمد حاصل از فروش (برحسب تومان) به ازای هرکیلوگرم برای هر یک از پنج محصول مورد نظر در هر مترمربع و برای کل دوره ۱۰۰ روزه می‌باشد.

۲-۱-۲- محدودیت‌ها

مدل، تحت مجموعه‌ای از قیود عملیاتی و مدیریتی تعریف شد که به‌صورت زیر لحاظ گردید:

محدودیت مساحت: مجموع مساحت تخصیص‌یافته به محصولات برابر با مساحت کل زمین گلخانه یعنی ۲۰۰۰ مترمربع باشد. این قید با معادله ریاضی زیر در مدل به کارگرفته شد:

$$\sum_{i=1}^{5} x_i = 2000 \qquad (۲)$$

محدودیت سهم سطح زیر کشت برای هر محصول: برای جلوگیری از تخصیص غیرواقعی مساحت، بر اساس توصیه‌های فنی کارشناس، در نظر گرفتن بازار مصرف و قیمت فروش، حدود بالا و پایین مجاز برای سطح زیر کشت هر محصول تعیین شد:

$$S_{i_min} \le x_i \le S_{i_max} \ , \ for\ i = 1, \dots, 5 \quad (۳)$$

در رابطه (۳)، S_{i_min} و S_{i_max} به ترتیب نشان‌دهنده حداقل و حداکثر مساحتی از زمین گلخانه است که به کشت هریک از محصولات پنج‌گانه اختصاص می‌یابد.

محدودیت نیروی کار: نیروی کار در یک گلخانه وظایف متعددی در طول دوره‌های کاشت، داشت و برداشت دارد که اهم آن‌ها شامل آماده‌سازی بستر خاک، کاشت بذر و نشاء، نصب قیم برای گیاهان رونده، عملیات آبیاری، بررسی نشت آب، تمیز کردن فیلتر، کوددهی، هرس و هدایت رشد، کنترل آفات شامل محلول‌پاشی و نصب تله، برداشت محصول، پاک‌سازی بستر و جمع‌آوری بقایا است. برپایه بازده نیروی کار در گلخانه‌ها و روش‌های عملیاتی متداول، میزان کار لازم برای هر محصول در کل دوره ۱۰۰ روزه برآورد شد و معادله ریاضی برای محدودیت نیروی کار به طوریکه مجموع نفر-ساعات مورد نیاز برای عملیات کاشت، داشت و برداشت از مقدار نیروی کار در دسترس فراتر نرود به صورت زیر در هر سناریو لحاظ گردید:

$$\sum_{i=1}^{5} d_i x_i \leq W_T \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، W_T نشان‌دهنده مقدار کل نیروی کار موجود برحسب نفر-ساعت و d_i نشان‌دهنده مقدار کار لازم برای هریک از محصولات پنج‌گانه برحسب نفر-ساعت می‌باشد.

محدودیت بودجه برای تأمین نهاده‌ها: با توجه به تورم و نوسانات شدید قیمت، هزینه تأمین نهاده‌ها برای محصولات پنج‌گانه مورد مطالعه در این پژوهش، به صورت برآوردی از قیمت بازار ایران و مصرف نرمال برای دوره ۱۰۰ روزه در نظر گرفته شد. معادله ریاضی متناظر با این قید به صورت زیر در مدل به کارگرفته شد:

$$\sum_{i=1}^{5} e_i x_i \leq M_{max} \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، M_{max} نشان‌دهنده حداکثر بودجه تخصیص یافته برحسب هزار تومان برای تأمین نهاده‌ها و e_i نشان‌دهنده هزینه تامین نهاده‌ها برحسب هزار تومان برای هرکدام از محصولات پنج‌گانه می‌باشد.

۲-۱-۳- طراحی سناریوها و حل مدل

برای تحلیل اثر ترکیب‌های مختلف الگوی کشت، چهار سناریو طراحی شد. در تمامی سناریوها سه محصول گوجه‌فرنگی، فلفل دلمه‌ای و بادمجان به‌عنوان محصولات ثابت تعریف شدند. ترکیبات مختلفی از دو محصول خیار سبز و کدو سبز به‌صورت جداگانه و یا مشترک در سناریوها وارد مدل شدند تا امکان تحلیل اثرات احتمالی تغییر در الگوی کشت فراهم گردد. هر سناریو به‌صورت مستقل مدل‌سازی و اجرا شد. خروجی هر مدل شامل میزان بهینه تخصیص سطح زیر کشت برای هر محصول در سناریوی مربوطه و مقدار مصرف آب متناظر با آن و درآمد حاصل از فروش آن است.

در مسائل دو هدفه که دارای اهداف دوگانه متضاد (ماکزیمم‌سازی و مینیمم‌سازی) هستند، جواب بهینه در نقطه ایده‌آل قرار دارد؛ نقطه ایده‌آل حالتی است که در آن هر هدف به بهترین مقدار ممکن خود برسد، بدون اینکه با سایر اهداف تداخل داشته باشد. در یک مسئله دو هدفه با اهداف متضاد معمولاً نقطه ایده‌آل در ناحیه اشتراک جواب‌های اهداف قرار ندارد، بنابراین یک نقطه آرمانی محسوب می‌شود که دستیابی مستقیم به آن امکان‌پذیر نیست. با این حال، می‌توان با روش‌هایی نظیر روش ε-محدودیت، نقاطی که تا حد ممکن به نقطه ایده‌آل نزدیک باشند را به صورت تقریبی به دست آورد. همچنین می‌توان با وزن‌دهی به هریک از توابع هدف، اولویت اهداف را تنظیم نمود. برای حل مدل هر یک از سناریوهای معرفی شده در این پژوهش نیز از همین روش استفاده شد و با در نظرگرفتن اولویت ۶۰ درصد برای کمینه‌سازی آب و ۴۰ درصد برای بیشینه‌سازی درآمد، جواب مسئله در نقطه‌ای نزدیک به نقطه ایده‌آل مشخص شد. محاسبات هر سناریو با استفاده از نرم‌افزار Lingo نسخه ۱۸,۰ انجام شد.

پس از استخراج خروجی‌ها، نتایج حاصل از هر سناریو در قالب یک جدول و نمودار ارائه شد تا امکان مقایسه و تحلیل فراهم شود. مقایسه سناریوها نشان‌دهنده تفاوت‌های موجود در تخصیص بهینه سطح زیر کشت و میزان مصرف آب و درآمد تحت ترکیبات مختلف محصولات است.

۳- نتایج

نتایج چهار سناریوی بررسی شده در این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

سناریوی اول (سه محصول پایه): در این حالت تنها کشت سه محصول اصلی در نظر گرفته شد و نزدیک‌ترین

جواب به نقطه ایده‌آل به دست آمد. مدل، تخصیص ۱۲۰۰ مترمربع به گوجه‌فرنگی، ۵۰۰ مترمربع به فلفل دلمه‌ای و ۳۰۰ مترمربع به بادمجان را پیشنهاد کرد. مصرف آب طی دوره ۱۰۰ روزه برابر ۱۱۷۶۵۰۰ لیتر و درآمد حاصل حدوداً ۸۲۷ میلیون تومان برآورد شد.

سناریوی دوم (اضافه شدن خیارسبز): با افزودن خیارسبز، ترکیب بهینه شامل ۸۰۰ مترمربع گوجه‌فرنگی، ۵۰۰ مترمربع فلفل دلمه‌ای، ۵۰۰ مترمربع بادمجان و ۲۰۰ مترمربع خیارسبز بود. با اجرای این الگو، مصرف آب به ۱۲۴۴۵۰۰ لیتر و درآمد به ۸۴۷ میلیون تومان افزایش یافت. این نتایج نشان داد افزودن خیارسبز موجب افزایش ۶۸۰۰۰ لیتری (۵/۷۸ درصد) مصرف آب و افزایش ۲۰ میلیون تومانی (۲/۴۲ درصد) درآمد نسبت به سناریوی اول می‌شود.

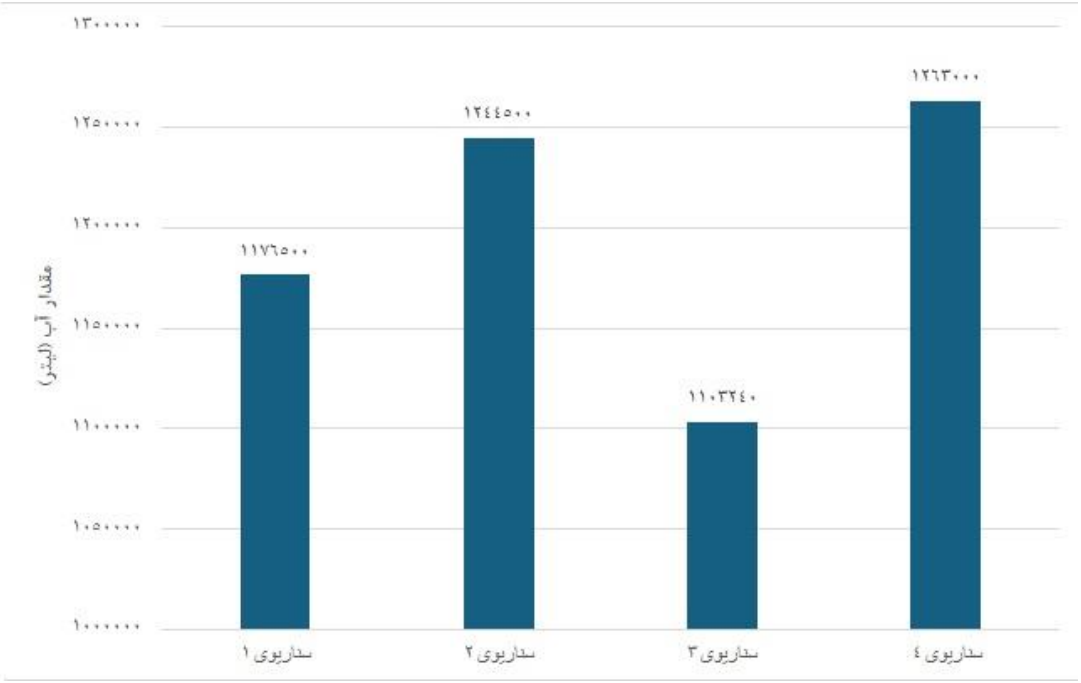
سناریوی سوم (جایگزینی کدوسبز با خیارسبز): در این سناریو خیارسبز حذف و کدوسبز اضافه شد. ترکیب بهینه، شامل تخصیص ۱۱۰۰ مترمربع برای گوجه‌فرنگی، ۳۹۲ مترمربع برای فلفل دلمه‌ای، ۲۰۸ مترمربع برای بادمجان و ۳۰۰ مترمربع برای کدوسبز بود. مصرف آب در این حالت ۱۱۰۳۲۴۰ لیتر محاسبه شد که نسبت به سناریوی اول ۷۳۲۶۰ لیتر (۶/۲۳ درصد) و نسبت به سناریوی دوم ۱۴۱۲۶۰ لیتر (۱۱/۳۵ درصد) کاهش داشت. درآمد حاصل نیز برابر با ۷۲۹ میلیون و ۳۶۰ هزار تومان برآورد شد که نسبت به سناریوهای اول و دوم به ترتیب ۱۱/۸۱ درصد و ۱۳/۸۶ درصد کاهش نشان داد.

سناریوی چهارم (الگوی کشت پنج محصولی): این سناریو ترکیب بهینه برای پنج محصول را ارائه می‌دهد. مدل به ترتیب ۹۰۰ مترمربع، ۵۰۰ مترمربع، ۲۵۰ مترمربع، ۳۰۰ مترمربع و ۵۰ مترمربع را برای گوجه‌فرنگی، فلفل دلمه‌ای، بادمجان، خیارسبز و کدوسبز به عنوان نزدیک‌ترین جواب به نقطه ایده‌آل پیشنهاد کرد. با اجرای این مدل، مصرف آب برابر ۱۲۶۳۰۰۰ لیتر شد که نسبت به سناریوی اول ۷/۳۵ درصد افزایش، نسبت به سناریوی دوم ۱/۴۹ درصد افزایش و نسبت به سناریوی سوم ۱۴/۵ درصد افزایش نشان داد. درآمد این الگو ۸۳۹ میلیون و ۴۰۰ هزار تومان برآورد شد که نسبت به سناریوی اول ۱/۵ درصد افزایش و نسبت به سناریوی دوم ۰/۹ درصد کاهش و نسبت به سناریوی سوم ۱۵/۰۹ درصد افزایش داشت.

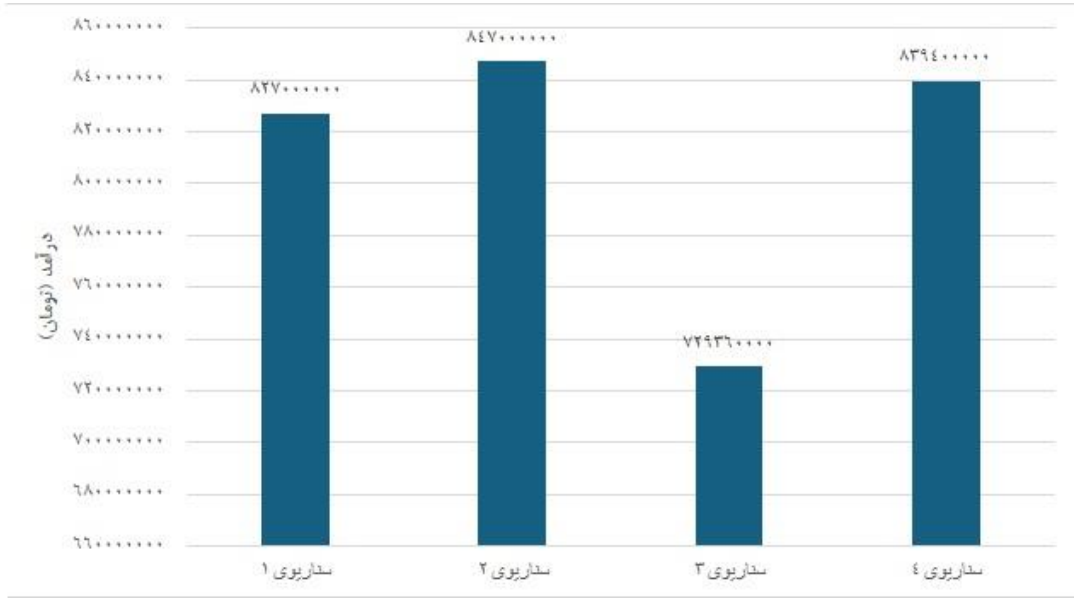
به منظور فراهم آوردن امکان مقایسه بهتر، نتایج حاصل از چهار سناریوی فوق شامل سطح زیر کشت برای هر محصول، میزان مصرف آب و درآمد حاصل از اجرای هر سناریو در جدول ۱ ارائه شده است. شکل ۱ و شکل ۲ نیز نمودارهای مقایسه‌ای مصرف آب و درآمد را برای سناریوهای چهارگانه فوق ارائه می‌دهند.

جدول ۱- نتایج حاصل از چهار سناریوی طراحی شده.

	سطح زیر کشت گوجه فرنگی (مترمربع)	سطح زیر کشت فلفل دلمه‌ای (مترمربع)	سطح زیر کشت بادمجان (مترمربع)	سطح زیر کشت خیارسبز (مترمربع)	سطح زیر کشت کدوسبز (مترمربع)	حداقل مصرف آب (لیتر)	حداکثر درآمد (تومان)
سناریوی اول	۱۲۰۰	۵۰۰	۳۰۰	۰	۰	۱۱۷۶۵۰۰	۸۲۷۰۰۰۰۰۰
سناریوی دوم	۸۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۲۰۰	۰	۱۲۴۴۵۰۰	۸۴۷۰۰۰۰۰۰
سناریوی سوم	۱۱۰۰	۳۹۲	۲۰۸	۰	۳۰۰	۱۱۰۳۲۴۰	۷۲۹۳۶۰۰۰۰
سناریوی چهارم	۹۰۰	۵۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۵۰	۱۲۶۳۰۰۰	۸۳۹۴۰۰۰۰۰



شکل ۱- نمودار مربوط به میزان آب مصرفی برای هر سناریو (برحسب لیتر).



شکل ۲- نمودار درآمد حاصل از هر سناریو (برحسب تومان).

بررسی هم‌زمان شاخص‌های مصرف آب و درآمد نشان داد که سناریوی دوم بیشترین درآمد را ایجاد می‌کند، اما با افزایش مصرف آب همراه است. در مقابل، سناریوی سوم کمترین مصرف آب را به خود اختصاص داد، ولی کاهش قابل توجه درآمد را به دنبال داشت. مقایسه نتایج بیانگر آن است که سناریوی چهارم با ترکیب پنج محصول، تعادل مناسب‌تری میان اهداف اقتصادی و مدیریت منابع آب برقرار می‌کند. این سناریو نسبت به الگوی پایه موجب افزایش ۱/۵ درصدی

درآمد شد، در حالی که افزایش مصرف آب آن در محدوده قابل قبول ارزیابی شد؛ بنابراین می‌توان آن را به عنوان مناسب‌ترین الگوی کشت در شرایط مورد مطالعه معرفی کرد.

نتایج پژوهش همچنین نشان داد که تصمیم‌گیری درباره الگوی کشت گلخانه‌ای نباید صرفاً بر مبنای حداکثرسازی درآمد یا حداقل‌سازی مصرف آب انجام شود، بلکه لازم است هر دو شاخص به طور هم‌زمان مورد توجه قرار گیرند. در شرایط کم‌آبی استان یزد، استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه می‌تواند ضمن حفظ سودآوری، فشار بر منابع آب را کاهش دهد. مدل برنامه‌ریزی خطی دوهدفه ارائه‌شده در این پژوهش با در نظر گرفتن محدودیت‌های مساحت، نیروی کار و بودجه، توانست ترکیب‌های متعادلی از محصولات را پیشنهاد کند.

با این حال، به دلیل تفاوت گلخانه‌ها از نظر نوع سازه، تجهیزات کنترلی، سامانه آبیاری، بستر کشت، سطح مکانیزاسیون و شرایط مدیریتی، لازم است در کاربرد مدل برای سایر واحدهای تولیدی، مقادیر مصرف آب محصولات متناسب با شرایط واقعی هر گلخانه مجدداً محاسبه و در مدل اعمال شود. همچنین تفاوت در طول دوره رشد و تعداد برداشت محصولات می‌تواند بر مصرف آب، عملکرد، درآمد، نیاز به نیروی کار و مدت زمان اشغال فضای گلخانه تأثیرگذار باشد. از این‌رو، ضرایب مربوط به مصرف آب، عملکرد و درآمد باید متناسب با شرایط زمانی و مکانی مورد استفاده بازنگری شوند.

علاوه بر این، عواملی نظیر محدودیت انرژی، قطعی برق، نوسانات قیمت نهاده‌ها و محصولات، کیفیت محصول و ریسک‌های بازار می‌توانند بر عملکرد و سودآوری نهایی تأثیرگذار باشند. بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، با استفاده از داده‌های واقعی گلخانه‌های مختلف استان یزد و لحاظ کردن محدودیت‌های انرژی، نوسانات بازار و تفاوت دوره رشد محصولات، الگوهای کشت بهینه با دقت بیشتری توسعه یابند.

۴- نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی دوهدفه امکان دستیابی به الگوی کشت متعادل از نظر درآمد و مصرف آب را فراهم می‌کند. در میان چهار سناریوی بررسی‌شده، سناریوی چهارم شامل کشت ۹۰۰ مترمربع گوجه‌فرنگی، ۵۰۰ مترمربع فلفل دلمه‌ای، ۲۵۰ مترمربع بادمجان، ۳۰۰ مترمربع خیارسبز و ۵۰ مترمربع کدوسبز، مناسب‌ترین تعادل را میان سودآوری و مدیریت منابع آب ایجاد کرد و به عنوان الگوی کشت پیشنهادی معرفی شد. بر این اساس، استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه می‌تواند در شرایط کم‌آبی استان یزد، ابزاری کارآمد برای افزایش بهره‌وری اقتصادی و استفاده پایدار از منابع آب در تولیدات گلخانه‌ای باشد.

تضاد و تعارض منافع - نویسندگان هر گونه تعارض و تضاد منافع اعم از تجاری و غیر تجاری و شخصی را که در ارتباط مستقیم یا غیر مستقیم با اثر منتشر شده است رد می نمایند.

تشکر و قدردانی- از خانم دکتر فاطمه برزگری به پاس راهنمایی‌های ارزشمند و مشاوره و هم‌فکری ایشان در انجام این پژوهش، صمیمانه قدردانی و تشکر می‌شود.

منابع

جهاد کشاورزی. (۱۴۰۴). برنامه الگوی کشت ملی محصولات کشاورزی (محصولات باغبانی). جلد دوم.

میرزائی، ع. سلطانی، ا. عباسی، ف. زینلی، ا. و میرکریمی، ش. (۱۴۰۴). بهینه‌سازی آبی الگوی کشت استان فارس به منظور سازگاری با کم آبی. *نشریه علوم آب و خاک*. ۲۹ (۱)،۱۳۱-۱۵۲.

مروج‌الحکامی، ب. اکرامی، م. زارع، ش. وظیفه‌شناس، م. ر. اسمعیل‌زاده حسینی، ع. و رحیمیان، م. ح. (۱۴۰۴). بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات زراعی و باغی عمده در استان یزد. ۱۵ (۵۹)، ۱۰۴-۱۲۵.

شریعتی، ه. معتمد وزیری، ب. گودرزی، م. و احمدی، ح. (۱۴۰۰). بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی و نرم‌افزار Lingo در دشت دهگلان استان کردستان، ایران. *جغرافیا و پایداری محیط*. ۱۱ (۳)، ۸۱-۹۶.

شایق، ا. و سلطانی، س. (۱۳۹۰). مقایسه شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی در استان یزد. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، *علوم آب و خاک*. ۱۵ (۵۷)، ۲۳۱-۲۴۹.

وظیفه‌شناس، م. ر. اسمعیل‌زاده حسینی، ع. و شاکر اردکانی، ا. (۱۴۰۳). بررسی امکان دورگ‌گیری خیار گلخانه‌ای با مزیت نسبی برای تولید جمعیت پایه اصلاحی. *پژوهش در علوم باغبانی*، ۳ (۲)، ۸۹-۱۰۳.

Amiri, V., Ali, S., & Sohrabi, N. (2023). Estimating the spatio-temporal assessment of GRACE/GRACE-FO derived groundwater storage depletion and validation with in-situ water quality data (Yazd province, central Iran). *Journal of Hydrology*, *620*, 129416.

Barati, K., Abedi Koupai, J., Darvishi, E., Arzani, A., & Yousefi, A. (2020). Crop pattern optimization using system dynamics approach and multi-objective mathematical programming. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *22*(5), 1397-1412.

Benli, B., & Kodul, S. (2003). A non-linear model for farm optimization with adequate and limited water supplies application to the south-east Anatolian project (GAP) region. *Agricultural Water Management*, *62*, 187-203.

Bidabadi, M., Babazadeh, H., Shiri, J., & Saremi, A. (2024). Estimation reference crop evapotranspiration (ET0) using artificial intelligence model in an arid climate with external data. *Applied Water Science*, *14*(1), 3.

Dehghanisanij, H., Salamati, N., Emami, S., Emami, H., & Fujimaki, H. (2023). An intelligent approach to improve date palm crop yield and water productivity under different irrigation and climate scenarios. *Applied Water Science*, *13*(2), 56.

Emami, F., & Koch, M. (2018). Agricultural water productivity-based hydro-economic modeling for optimal crop pattern and water resources planning in the Zarrine River Basin, Iran, in the wake of climate change. *Sustainability*, *10*(11), 3953.

Ghiai, M. M., Arjmand, J. T., Mohammadi, O., Ahmadi, M. H., & Assad, M. E. H. (2021). Investigation and modeling of energy consumption of tall office buildings in Iran'shot-arid'andcold'climate conditions. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, *16*(1), 21-34.

Keshavarz, A., Ashrafi, S., Hydari, N., Pouran, M., & Farzaneh, E. (2005). Water allocation and pricing in agriculture of Iran. In *Water conservation, reuse, and recycling: proceeding of an Iranian American workshop, The National Academies Press: Washington, DC* (pp. 153-172).

Mirzaei Bafti, M., Rahmani, S., & Parhizkar, 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.

Pourgholam-Amiji, M., Liaghat, A., & Nozari, F. (2023). Development and evaluation of smart irrigation system to enhance the water use efficiency. *Advances in Modern Agriculture*, *4*(2), 2359.

Sabzevari, Y., & Eslamian, S. (2023). Spatio-temporal variations of reference evapotranspiration in western Iran. *The Indonesian Journal of Geography*, *55*(2), 235-247.

Shreedhar, R., Hiremath, C. G., & Shetty, G. G. (2015). Optimization of cropping pattern using linear programming model for Markandeya command area. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, *6*(9), 1311-1326.

Taha, H. A. (1992). Operations research: an introduction. New York: Macmillan, ISBN 9780024189752.