Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Water and Soil Conservation

Print ISSN: 2322-2069
Online ISSN: 2322-2794

(OPEN ACCESS)

Optimization of Agricultural Cropping Pattern Using Goal Programming Approach under Water Scarcity Conditions (Case Study: Varamin Plain)

Mohammad Arab[1], Hamid Amirnejad[*2]

1. Ph.D. Student of Agricultural Economics, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran and Expert of the Agricultural Research, Education and Extension Organization of Tehran Province, Tehran, Iran. E-mail: m.arab@areeo.ac.ir
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Agricultural Economics, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: h.amirnejad@sanru.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 08.05.2024
Revised: 09.29.2024
Accepted: 11.02.2024

Keywords:
Goal programming,
Optimal Cropping pattern,
Varamin Plain,
Water productivity
Water resources

ABSTRACT

Background and Objectives: The growth of population, industry and agricultural activities has led to an increase in water consumption in the domestic, industrial and agricultural sectors, which has created a new challenge for planning and exploiting water resources. Therefore, water projects need efficient design, implementation and management. The imbalance of water resources in the Varamin Plain has raised the need to use effective water management policies, one of the appropriate solutions to achieve sustainable harvesting of water resources is to provide a suitable model of cultivation. In this regard, the present study investigates the optimization of agricultural crop cultivation pattern in Varamin Plain. Two main goals have been considered in this study, the first goal is to provide a suitable model of cultivation to simultaneously achieve maximum profit and minimum water consumption with existing water resources, and the second goal is to achieve simultaneous increase in cultivation area and maximization of profit with new water resources.

Materials and Methods: The ideal planning approach is a method based on the principles of mathematical optimization, which appears in the form of linear inequalities in order to analyze the final and desirable decisions of managers and officials. This model has more flexibility in the actual decisions of the managers of economic units due to considering the simultaneous achievement of several goals based on the priority of the issues of the studied area. Therefore, in order to achieve the objectives of the study, linear and ideal mathematical programming models were used in four scenarios. In the first scenario, the goal is to maximize gross profit, the second scenario is to minimize water consumption while maintaining profit, the third scenario is to simultaneously achieve the goals of maximizing profit and minimizing water consumption, and the fourth scenario is to simultaneously achieve land use and profit maximization with new water sources.

Results: The results of scenario one with the aim of profit maximization showed that the physical and economic productivity of water and profit increased by 4.33, 19.26 and 14.22 percent, respectively, and water

consumption decreased by 4.23 percent. The results of Scenario 2, aimed at minimizing water consumption while maintaining profit, indicate a 17.4 percent increase in economic water productivity, while physical water productivity and water consumption decreased by 40.69 percent and 14.81 percent, respectively. The reduction in physical water productivity in Scenario 2 is due to the expansion of canola cultivation area (10,024.79 hectares) and the low physical productivity of this crop (0.62 ($kg.m^{-3}$). The first main objective of the research was examined in scenario 3 and products with the highest economic productivity in the cultivation pattern were proposed, which would increase profit by 14.22 percent and reduce water consumption by 6.96 percent. According to the second main goal of the research in scenario 4, it was determined that with an increase of 24.13 percent of agricultural water, the cultivation area will increase by 80 thousand hectares and profit will increase by 34.16 percent compared to the current situation.

Conclusion: According to the results, it was found that the cultivation pattern in all four scenarios is better than the current situation. Also, it was found that melons, in addition to high water consumption, also have low water economic productivity and were excluded from the model in all four scenarios. Therefore, it is recommended not to cultivate this product in the Varamin plain, which faces the phenomenon of land subsidence. Also, considering the positive effect of increasing surface water supply on the cultivated area, production level, improving the level of underground aquifers, it was suggested that the government provide the conditions for improving the agricultural economy of Varamin plain by accelerating the phase 2 project of transferring Tehran's wastewater treatment.

Cite this article: Arab, Mohammad, Amirnejad, Hamid. 2025. Optimization of Agricultural Cropping Pattern Using Goal Programming Approach under Water Scarcity Conditions (Case Study: Varamin Plain). *Journal of Water and Soil Conservation*, 32 (2), 77-97.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/jwsc.2025.22688.3752
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۶۹
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۹٤

بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی با رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی در شرایط کمبود منابع آب (مطالعه موردی: دشت ورامین)

محمد عرب[۱]، حمید امیرنژاد*[۲]

۱. دانشجوی دکتری اقتصاد کشاورزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران و کارشناس مرکز تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی استان تهران، تهران، ایران. رایانامه: m.arab@areeo.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استاد گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: h.amirnejad@sanru.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۰۳/۰۵/۱۵
تاریخ ویرایش: ۰۳/۰۷/۰۸
تاریخ پذیرش: ۰۳/۰۸/۱۲

واژه‌های کلیدی:
الگوی کشت بهینه،
برنامه‌ریزی آرمانی،
بهره‌وری آب،
دشت ورامین،
منابع آب

چکیده

سابقه و هدف: رشد جمعیت، صنعت و فعالیت‌های کشاورزی منجر به افزایش مصرف آب در بخش‌های خانگی، صنعت و کشاورزی شده است که چالش جدیدی را برای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از منابع آب ایجاد کرده است. بنابراین، پروژه‌های آب نیاز به طراحی، اجرا و مدیریت کارآمد دارند. عدم تعادل منابع آب در دشت ورامین، ضرورت استفاده از سیاست‌های کارآمد مدیریت آب را مطرح ساخته است، یکی از راهکارهای مناسب برای رسیدن به برداشت پایدار از منابع آب، ارائه الگوی مناسب کشت است. در این راستا، مطالعه حاضر به بررسی بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی در دشت ورامین می‌پردازد. دو هدف اصلی در این مطالعه مدنظر قرار گرفته است، هدف اول ارایه الگوی مناسب کشت برای دستیابی همزمان به سود حداکثر و مصرف حداقل آب با منابع آبی موجود و هدف دوم دستیابی همزمان افزایش سطح کشت و حداکثرسازی سود با منابع آبی جدید می‌باشد.

مواد و روش‌ها: رهیافت برنامه‌ریزی آرمانی، روشی مبتنی بر اصول بهینه‌سازی ریاضی است که به‌منظور تجزیه و تحلیل تصمیم‌های نهایی و مطلوب مدیران و مسئولان به شکل نامعادلات خطی ظاهر می‌شود. این مدل به‌دلیل لحاظ‌کردن دستیابی همزمان به چند هدف بر مبنای اولویت مسائل منطقه مورد مطالعه، انعطاف‌پذیری بیش‌تری در تصمیم‌گیری‌های واقعی مدیران واحدهای اقتصادی دارد. بنابراین، جهت دستیابی به اهداف مطالعه از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی خطی و آرمانی در چهار سناریو استفاده گردید. در سناریوی اول هدف حداکثرسازی سود ناخالص، سناریوی دوم هدف حداقل‌سازی مصرف آب با حفظ سود، سناریوی سوم دستیابی همزمان به اهداف حداکثرسازی سود و حداقل‌سازی مصرف آب و سناریوی چهارم دستیابی همزمان به، به‌کارگیری زمین و حداکثرسازی سود با منابع آبی جدید می‌باشد.

یافته‌ها: نتایج سناریوی یک با هدف حداکثرسازی سود نشان داد که بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب و سود به‌ترتیب ٤/٣٣ و ١٩/٢٦ و ١٤/٢٢ درصد افزایش و مصرف آب ٤/٢٣ درصد کاهش داشته است. نتایج سناریوی ٢ با هدف حداقل‌سازی مصرف آب با حفظ سود، نشان می‌دهد بهره‌وری اقتصادی آب به میزان ١٧/٤ درصد افزایش و بهره‌وری فیزیکی و مصرف آب به ترتیب ٤٠/٦٩ و ١٤/٨١ درصد کاهش داشته است. کاهش بهره‌وری فیزیکی آب در سناریوی ٢ به‌دلیل افزایش سطح کشت کلزا (١٠٠٢٤/٧٩ هکتار) و پایین بودن بهره‌وری فیزیکی (٠/٦٢ کیلوگرم بر مترمکعب) این محصول می‌باشد. هدف اصلی اول پژوهش در سناریوی ٣ بررسی شده و محصولاتی با بیش‌ترین بهره‌وری اقتصادی در الگوی کشت پیشنهاد گردید که سبب رشد سود به میزان ١٤/٢٢ درصد و کاهش مصرف آب به میزان ٦/٩٦ درصد می‌گردد. به‌دنبال هدف اصلی دوم تحقیق در سناریوی ٤ مشخص گردید با افزایش ٢٤/١٣ درصد آب کشاورزی، افزایش سطح کشت به میزان ٨٠ هزار هکتار و سود نیز به‌میزان ٣٤/١٦ درصد نسبت به وضعیت فعلی افزایش پیدا خواهد کرد.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج مشخص گردید الگوی کشت در هر چهار سناریو نسبت به وضعیت فعلی بهتر می‌باشد. هم‌چنین، مشخص گردید محصولات جالیزی علاوه بر مصرف بالای آب، بهره‌وری اقتصادی آب پایینی نیز دارد و در هر چهار سناریو از الگو حذف شدند. بنابراین، توصیه می‌گردد این محصول در دشت ورامین که با پدیده نشست زمین مواجه است، کشت نگردد. هم‌چنین، با توجه به اثر مثبت افزایش عرضه آب سطحی بر سطح زیرکشت، سطح تولید، بهبود تراز سفره‌های زیرزمینی، پیشنهاد گردید دولت با تسریع پروژه فاز ٢ انتقال پساب تصفیه تهران شرایط بهبود اقتصاد کشاورزی دشت ورامین را فراهم کند.

استناد: عرب، محمد، امیرنژاد، حمید (١۴٠۴). بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی با رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی در شرایط کمبود منابع آب (مطالعه موردی: دشت ورامین). *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ٣٢ (٢)، ٩٧-٧٧.

DOI: 10.22069/jwsc.2025.22688.3752

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

گسترش کشاورزی آبی و افزایش اتکا به برداشت از آب های زیرزمینی برای آبیاری منجر به بهره‌برداری قابل‌توجه از آبخوان شده است، بنابراین پایداری آبخوان و بهره‌وری کشاورزی برای نسل فعلی و آینده مورد تهدید واقع گردیده است (۱). رشد جمعیت، صنعت و فعالیت‌های کشاورزی منجر به افزایش مصرف آب در بخش‌های خانگی، صنعت و کشاورزی شده است که چالش جدیدی را برای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از منابع آب ایجاد کرده است. بنابراین، پروژه‌های آب نیاز به طراحی، اجرا و مدیریت کارآمد دارند. این امر مستلزم مطالعات دقیق و تحلیل و ارائه راهکارهای متناسب با شرایط طرح‌ها و نیز توجه به مشکلات و پیچیدگی‌های موجود است. با توجه به این مشکلات، استفاده ترکیبی از آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی، پساب و سازه‌های آبی ادغام شده با الگوی کشت بهینه راه‌حل مناسبی به‌نظر می‌رسد. دولت‌ها باید راه‌هایی را برای کاهش هدررفت آب و سیاست‌هایی برای کاهش تقاضای آب و افزایش عرضه در نظر بگیرند (۲).

محدودیت منابع آب سطحی در دشت ورامین کشاورزان را ناگزیر به استفاده از منابع آب سطحی و زیرزمینی به‌صورت تلفیقی می‌کند. با این وجود کمبود باران سبب برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در دشت گردیده و منطقه را با بحران جدی روبه‌رو کرده و اثرات محیطزیستی (نشست زمین) و اقتصادی (کاهش درآمد کشاورزان) و اجتماعی (نزاع کشاورزان بر سرآب) زیادی را در پی داشته است. با این وجود الگوی کشت فعلی دشت ورامین سبب کاهش شدید منابع آب زیرزمینی، تشدید پدیده فرونشست زمین، تخریب منابع خاک، کاهش بهره‌وری اقتصادی کشاورزی و ناپایداری منابع آب گردیده است. بنابراین، با توجه به بیلان منفی ۷۰ میلیون مترمکعب دشت ورامین (۳) مهم‌ترین رویکردی که برای حفاظت از منابع آب و پایداری آب مطرح است، جلوگیری از فشار مضاعف بر سفره‌های آب زیرزمینی و مدیریت بهره‌برداری از منابع آب می‌باشد. یکی از راهکارهای مناسب برای رسیدن به برداشت پایدار از منابع آب، که بتواند ملاحظات اقتصادی، محیطزیستی و اجتماعی را هم‌زمان موردتوجه قرار دهد، ارائه الگوی مناسب کشت است. تعیین الگوی کشت بهینه در مناطقی که برداشت بی‌رویه و نامطلوب منابع آب صورت می‌گیرد از اهمیت زیادی برخوردار است (٤). در این راستا، تان و ژان (۲۰۱۸) با استفاده از مدل برنامه‌ریزی چندهدفه استوار به بررسی مدیریت مصرف آب تحت عدم قطعیت در چین پرداختند، نتایج نشان داد که با کاهش عدم قطعیت پارامترهای مدل کارآیی مصرف آب افزایش یافته و در این حالت سطح زیرکشت سبزیجات افزایش می‌یابد (۵). اسعدی و نجفی علمدارلو (۲۰۱۹) پژوهشی با هدف تدوین الگوی بهینه کشت محصولات زراعی تحت شرایط کم‌آبی به‌منظور ارائه برنامه بهینه آبیاری، جهت حصول بیشینه‌سازی سود ناخالص مزرعه انجام دادند. براساس یافته‌های پژوهش با تدوین الگوی بهینه کشت محصولات زراعی، مقدار صرفه‌جویی آب به‌طور میانگین به میزان ۲۹/۳ درصد و سود ناخالص مزرعه به‌طور میانگین ۹/۵ درصد کاهش می‌یابد (٦). قربانی و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی[1] به تعیین بهینه‌سازی الگوی کشت دو شهرستان گرگان و کردکوی در حوضه آبریز قره‌سو پرداختند. الگوی کشت بهینه افزایش ۵ درصد سود در هر دو شهرستان و کاهش ٤٦ و ٤٧ درصدی مصرف آب را به‌ترتیب در دو شهرستان گرگان و کردکوی ارائه داد (٤). آداما و همکاران (۲۰۲۰) به‌منظور تخصیص بهینه آب برای به حداکثر رساندن بهره‌وری و افزایش تولید محصول

1- Goal Programming

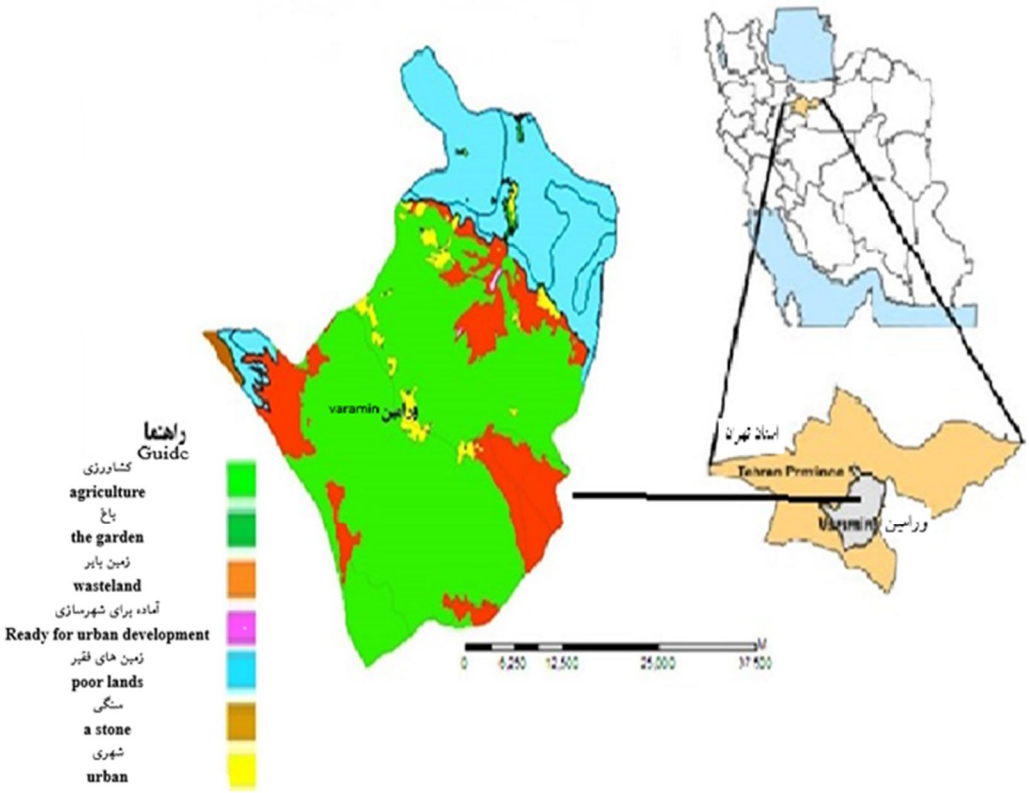
با استفاده از الگوریتم ژنتیک به تعیین الگوی بهینه کشت پرداختند. نتایج نشان داد الگوی کشت پیشنهادی دارای عملکرد بالاتری نسبت به شرایط فعلی می‌باشد. هم‌چنین میزان مصرف آب از ۵/۱ به ٤/۹٦ درصد کاهش یافته است (۷). ثانی و دشتی (۲۰۲۱) به تعیین الگوی کشت بهینه سازگار با کم‌آبی تحت شرایط عدم قطعیت با رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی استوار[1] پرداختند، نتایج بیانگر برتری این مدل بر دیگر مدل‌ها به لحاظ دستیابی همزمان به اهداف حداکثر سود و کاهش مصرف آب می‌باشد که نشان‌دهنده بهینه‌نبودن وضعیت موجود بهره‌برداری از آب در منطقه مورد مطالعه می‌باشد (۸). سیاه و زبیری (۲۰۲۲) در مدل‌سازی بهره‌برداری بهینه از منابع آب، غذا و انرژی در بخش مالزی، از یک الگوی برنامه‌ریزی چندهدفه در رابطه با بهینه‌سازی اقتصادی و محیط‌زیستی بهره گرفتند (۹). بر اساس یافته‌های این پژوهش، باید توسعه آتی مبتنی بر گسترش فعالیت‌های زراعی با لحاظ محدودیت‌ها و بهینه‌سازی مصرف منابع تولید صورت گیرد. لیانی و همکاران (۲۰۲۳) با رویکرد برنامه‌ریزی چندهدفه به تدوین الگوی کشت سازگار با محیط‌زیست در شهرستان ساری پرداختند. براساس نتایج سطح زیرکشت، مصرف آب و کود به‌ترتیب با کاهش ۱۵، ۱۲/۹۱ و ۱٤/٦٤ درصدی همراه بوده است (۱۰). دشتی و همکاران (۲۰۲۳) به تعیین الگوی کشت بهینه محصولات زراعی با تأکید بر محدودیت منابع آب استان آذربایجان شرقی در دشت مرند پرداخت براساس نتایج مدل برنامه‌ریزی کسری آب، مصرف آب به‌گونه‌ای انجام می‌شود که در ماه‌های مختلف کمبود آب وجود نداشته باشد (۱۱).

بررسی مطالعات گذشته بیانگر آن است که تعیین الگوی کشت بهینه نقش مهمی در مدیریت منابع آب داشته است. بنابراین، استفاده ترکیبی از آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی و پساب تصفیه‌شده در الگوی کشت بهینه دشت ورامین می‌تواند به مدیریت و استفاده مؤثرتر منابع آب و پروژه‌ها کمک کرده و راه‌حل مناسبی برای ملاحظات اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی به‌طور هم‌زمان باشد. در این مطالعه سعی گردیده با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی و منابع آبی مختلف دو هدف بررسی گردد. هدف اول ارایه الگوی مناسب کشت برای دستیابی هم‌زمان به سود حداکثر و مصرف حداقل آب و حفظ سطح زیرکشت فعلی با منابع آبی موجود در دشت ورامین بود. هدف دوم نیز دستیابی هم‌زمان به، به‌کارگیری زمین و حداکثرسازی سود با منابع آبی جدید در این دشت بود.

مواد و روش‌ها

دشت ورامین دارای چهار شهرستان ورامین، قرچک، پیشوا و پاکدشت می‌باشد که در ٤۵ کیلومتری جنوبی تهران و بین طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۱ درجه ٤۵ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۰ دقیقه و در ارتفاع تقریبی ۱۰۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است. مساحت دشت آبرفتی آن حدود ۱۳۸۰۰۰ هکتار است که بیش از ۸۰۰۰۰ هکتار از آن جزو اراضی کشاورزی محسوب می‌شود که با توجه به منابع آبی محدود حدود ۵۷۰۰۰ هزار هکتار فقط کشت می‌گردد. منابع آبی ورامین (در حال حاضر حق‌آبه رودخانه جاجرود عرضه نمی‌گردد) کانال انتقال آب پساب تصفیه‌شده تهران (به‌میزان تقریبی ۲۰۰ میلیون مترمکعب) و سفره‌های زیرزمینی (پتانسیل ۳۰۰ میلیون مترمکعب) می‌باشد. هم‌چنین، در حال حاضر بیلان آب‌های زیرزمینی منفی ۷۰ میلیون مترمکعب می‌باشد (۳). در شکل ۱ موقعیت دشت ورامین در ایران و استان تهران نشان داده شده است.

1- Robust goal programming



شکل ۱- موقعیت دشت ورامین در ایران و استان تهران.

Figure 1. Location of the Varamin Plain in Iran and Tehran Province.

رنگ سبز در نقشه زمین با قابلیت فعالیت کشاورزی در دشت ورامین را نشان می‌دهد. محصولات اصلی زراعی شبکه آبیاری دشت ورامین شامل گندم، جو، یونجه، ذرت، کلزا، صیفی‌جات، سبزیجات و پنبه می‌باشد. سبزیجات شامل خیار، گوجه‌فرنگی، کاهو، لوبیا سبز، کلم، سیر، سبزی و بادمجان و صیفی‌جات شامل هندوانه، خربزه، کدو، گرمک می‌باشند (۱۲).

برنامه‌ریزی خطی تکنیک مورداستفاده در پژوهش‌های مدیریت مزرعه می‌باشد و به‌عنوان مبنا و پایه تمام روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی شناخته می‌شود. به‌طورکلی، هر مدل برنامه‌ریزی ریاضی از دو قسمت اساسی تابع هدف و محدودیت‌ها تشکیل شده است. این اساس ساختار الگوی برنامه‌ریزی خطی اولیه به‌صورت رابطه ۱ می‌باشد (۱۳).

$$Max(Min) \qquad z = \sum_{j=1}^{n} C_j X_j \qquad (۱)$$

Subject to:

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} X_j \gtreqless b_i \qquad i= 1،2،3،\ldots،m$$

$$X_j \geq 0 \qquad j= 1،2،3،\ldots،n$$

در تابع هدف Z عبارتست از بازده برنامه‌ای کل یا بازده عوامل ثابت تولید که با کسر هزینه‌ها از درآمد ناخالص برنامه‌ای پیشنهادی به‌دست می‌آید. هزینه‌های تولید در این مطالعه هزینه‌های مستقیم مانند آماده‌سازی زمین، کاشت، داشت، برداشت و اجاره بهای زمین می‌باشد. C_i بازده برنامه‌ای هر واحد فعالیت و X_j فعالیت‌های مربوط به تولید محصولات مختلف زراعی می‌باشد. در محدودیت اول a_{ij} مقدار مورد نیاز منابع را برای تولید هرواحد فعالیت و b_i مقدار کل نهاده یا منابع در دسترس را نشان می‌دهد. محدودیت دوم ($X_j \geq 0$) محدودیت‌های غیرمنفی است. به‌علت برخی محدودیت‌های مدل برنامه‌ریزی خطی، برخی از پژوهش‌گران ساختن مدل‌های ریاضی گسترده را پیشنهاد می‌دهند. یکی از مدل‌های پیشنهادی، مدل‌های برنامه‌ریزی آرمانی است (١٤).

رهیافت برنامه‌ریزی آرمانی، روشی مبتنی بر اصول بهینه‌سازی ریاضی است که به‌منظور تجزیه و تحلیل تصمیم‌های نهایی و مطلوب مدیران و مسئولان به شکل نامعادلات خطی ظاهر می‌شود. این مدل به‌دلیل لحاظ‌کردن دستیابی هم‌زمان به چند هدف بر مبنای اولویت، انعطاف‌پذیری بیش‌تری در تصمیم‌گیری‌های واقعی مدیران واحدهای اقتصادی دارد. در این روش، برای هر یک از اهداف یک مقدار مشخص عددی و سپس یک تابع هدف تعیین می‌شود. آن‌گاه مدل در جستجوی جوابی است که بتواند مجموع انحرافات از اهداف و اولویت‌ها را با در نظر گرفتن محدودیت‌های مختلف موجود، به حداقل برساند (٦). محدودیت‌های برنامه‌ریزی آرمانی شامل دو دسته محدودیت‌های معمول برنامه‌ریزی خطی و محدودیت‌های برنامه‌ریزی آرمانی می‌باشد. محدودیت‌های آرمانی، دارای متغیرهای انحرافی d+ و d− هستند که تابع هدف، با کمینه‌کردن انحرافات از آرمان شکل می‌گیرد. بر این اساس ساختار الگوی برنامه‌ریزی آرمانی به‌صورت رابطه ۲ می‌باشد (١٥).

$$\min z = \sum_{i=1}^{n}(d_i^- + d_i^+) \qquad (۲)$$

Subject to:

$$F_i(X) + d_i^- - d_i^+ = G_K$$

$$X، d_i^+، d_i^- \geq 0 \quad ; K = 1، 2، \ldots، K$$

در این مطالعه محدودیت‌های مدل برنامه‌ریزی خطی شامل محدودیت منابع آب (W) برحسب مترمکعب، زمین زراعی (S) برحسب هکتار، ساعات استفاده از ماشین‌آلات کشاورزی (M)، نیروی کار (L) بر حسب نفر در سال، استفاده از کود شیمیایی (F) بر حسب کیلوگرم در هکتار، استفاده از سموم شیمیایی (P) بر حسب لیتر در هکتار می‌باشد. که به‌ترتیب در رابطه‌های ۳ تا ۸ نشان داده شده که سمت چپ معادلات مقدار مورد نیاز منابع را برای تولید هر واحد فعالیت در سال زراعی و سمت راست معادلات مقدار کل نهاده یا منابع در دسترس را نشان می‌دهد.

پتانسیل واقعی استان تهران در تأمین سبد غذایی مطلوب برای جمعیت استان تهران ۲۲ درصد است که باید مرزهای حوزه غذایی استان تهران گسترده‌تر و شعاع حوزه غذایی افزایش یابد، بدین معنا که از دیگر استان‌ها واردات صورت گیرد (١٦). با توجه به مزیت‌های اقتصادی و ملاحظات اجتماعی که بومی‌سازی سیستم غذایی دارد می‌توان با الگوی کشت

بهینه و افزایش عملکرد، تولیدات را افزایش و وابستگی به واردات را کاهش داد. بنابراین، در این مطالعه نیاز خود کفایی دشت ورامین موردنظر قرار گرفته است. محدودیت نیاز خودکفایی: باتوجه به نیاز منطقه به محصول گندم (X_1) برای مصرف انسان حداقل ۲۰ هزار هکتار و سه محصول جو (X_2)، ذرت علوفه‌ای (X_6) و یونجه (X_5) برای مصرف دام به‌ترتیب حداقل ۷، ۱ و ۱/۸ هزار هکتار به‌عنوان محدودیت وارد مدل گردیده و در رابطه‌های ۹ تا ۱۲ نشان داده شده است.

$$\sum_{j=1}^{n} w_j X_j \leq W \quad (۳)$$

$$\sum_{j=1}^{n} s_j X_j \leq S \quad (٤)$$

$$\sum_{j=1}^{n} m_j X_j \leq M \quad (٥)$$

$$\sum_{j=1}^{n} l_j X_j \leq L \quad (٦)$$

$$\sum_{j=1}^{n} f_j X_j \leq F \quad (٧)$$

$$\sum_{j=1}^{n} p_j X_j \leq P \quad (٨)$$

$$X_1 \geq 20000 \quad (٩)$$

$$X_2 \geq 7000 \quad (١٠)$$

$$X_5 \geq 1800 \quad (١١)$$

$$X_6 \geq 1000 \quad (١٢)$$

$$X_j \geq 0 \qquad j= 1،2،3،\ldots،n \quad (١٣)$$

محدودیت‌های آرمانی این مطالعه آرمان افزایش سود (حداکثرسازی سود براساس نتیجه سناریو اول)، آرمان کاهش مصرف آب (حداقل‌سازی مصرف آب براساس نتیجه سناریو دوم) و آرمان افزایش سطح کشت (میزان زمین قابل‌کشت دشت ورامین ۸۰۰۰۰ هکتار) می‌باشد که به ترتیب در رابطه‌های ١٤ تا ١٦ با نمادهای G_P، G_w و G_s نشان داده شده است. تابع هدف نیز بر اساس کمینه‌کردن انحرافات آرمان‌ها (d_1^-: کمینه کردن انحراف منفی از آرمان سود، d_2^+: کمینه کردن انحرافات مثبت از آرمان مصرف آب، d_3^-: کمینه کردن انحراف منفی از آرمان افزایش سطح کشت) در رابطه ۱۷ نشان داده شده که در سناریوهای مختلف بررسی می‌گردد.

$$\Sigma CiXi+d_1^- - d_1^+=G_P \quad (١٤)$$

$$\Sigma WiXi+d_2^- - d_2^+=G_W \quad (١٥)$$

$$\Sigma Xi+d_3^- - d_3^+=G_S \quad (١٦)$$

$$Min\, d_1^- + d_2^+ +d_3^- \quad (١٧)$$

نتایج و بحث

نوع و میزان محصولات کشت‌شده در دشت ورامین به تفکیک چهار شهر ورامین، قرچک، پیشوا و پاکدشت در جدول ۱ ارائه گردید. برای حل مدل نیاز به محاسبه ضرایب تابع هدف و ضرایب توابع محدودیت‌ها می‌باشد، آمار و اطلاعات همه محدودیت‌ها شامل زمین زراعی، آب، هزینه تولید، کود، کارگر، ماشین‌آلات، سم و سایر محدودیت‌های دیگر در سال ۱٤۰۱ از اداره جهاد کشاورزی و شرکت آب منطقه‌ای شهرستان ورامین جمع‌آوری گردیده که نتایج آن در جدول ۲ آمده است. جهت دستیابی به اهداف مطالعه تمامی این محدودیت‌ها در نرم‌افزار GAMZ وارد شده و نتایج حاصل از برآورد الگوی کشت بهینه تحت ٤ سناریوی مختلف ارائه گردیده است.

جدول ۱- سطح محصولات کشت‌شده دشت ورامین در شرایط فعلی به تفکیک مناطق (هکتار).

Table 1. Cultivated Crop Areas in the Varamin Plain Under Current Conditions by Region (ha).

کل دشت ورامین Varamin Plain	پاکدشت Pakdasht	قرچک Qarchak	پیشوا Pishva	ورامین Varamin	محصول Crop
18900	5000	1500	3400	9000	گندم (X_1) Wheat
16000	3400	1000	1600	10000	جو (X_2) Barley
450	100	50	100	200	کلزا (X_3) Canola
4206	1100	6	1800	1300	سبزیجات (X_4) Vegetables
6400	1100	300	1500	3500	یونجه (X_5) Alfalfa
9400	2500	700	1200	5000	ذرت علوفه‌ای (X_6) Forage Corn
2000	200	0	500	1300	محصولات جالیزی (X_7) melons
57356	13400	3556	10100	30300	کل سطح زیرکشت (هکتار) Total cultivated (ha)

جدول ۲- ماتریس ضرایب فنی و اقتصادی تولید محصولات زراعی در دشت ورامین در یک هکتار.

Table 2. Matrix of Technical and Economic Coefficients for Crop Production in the Varamin Plain per Hectare.

جالیزی Melons	ذرت علوفه‌ای Forage corn	یونجه Alfalfa	سبزیجات Vegetables	کلزا Canola	جو Barley	گندم Wheat	
9000	7000	15000	10000	4500	5000	6000	آب مصرفی ناخالص (مترمکعب) gross water (m^3)
800	350	710	1650	380	300	400	سود ناخالص (میلیون ریال) Gross profit (million Rials)
38000	32250	62000	125000	150000	34000	75000	قیمت (ریال به ازای هر کیلوگرم) price ($Rls.kg^{-1}$)
3.8	7.2	1.2	4.3	0.62	0.9	0.91	بهره‌وری فیزیکی آب (کیلوگرم بر مترمکعب) Water Physical productivity ($kg.m^{-3}$)
88880	50000	47330	165000	84440	61000	66660	بهره‌وری اقتصادی آب (ریال بر مترمکعب) Water economical productivity ($Rls.m^{-3}$)
35	50.5	18	43	2.8	4.5	5.5	عملکرد کشت (تن درهکتار) Yields ($t.ha^{-1}$)
600	250	700	600	450	200	300	کود شیمیایی (کیلوگرم در هکتار) Chemical Fertilizer ($kg.ha^{-1}$)
8	5	9	6	4	3	3	سموم شیمیایی (لیتر درهکتار) Chemical pesticides ($L.ha^{-1}$)
42	10	40	50	12	10	10	نیروی کار (نفردر سال) Human Labour ($p.y^{-1}$)
8	10	9	2	10	12	12	ماشین‌آلات (ساعات استفاده) Machinery (hr)

بهره‌وری فیزیکی آب یکی از شاخص‌های مطرح در خصوص سنجش میزان بهره‌وری آب کشاورزی است. این شاخص در واقع عملکرد به ازای واحد حجم آب و یا نسبت مقدار محصول تولیدشده به حجم آب مصرف شده است. بنابراین، هرچه این نسبت بیش‌تر باشد نشان‌دهنده مصرف صحیح‌تر آب است. اگر شاخص را براساس سود ناخالص سنجیده شود نشان‌دهنده شاخص بهره‌وری اقتصادی است که از تقسیم ارزش ناخالص تولید بر میزان آب مصرفی به‌دست می‌آید (۱۷). بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در این مطالعه به‌عنوان محدودیت وارد مدل نگردیده و تنها میانگین بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی در الگوی کشت‌های مختلف مقایسه خواهد شد.

سناریوی اول: الگوی برنامه‌ریزی خطی متعارف تک‌هدفه با هدف حداکثرسازی سود: نتایج به‌دست آمده الگوی کشت بهینه با هدف حداکثرکردن سود ناخالص بر اساس قیمت و هزینه‌های مستقیم تولید (۱۲) با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی (معادله ۱) در جدول ۳ فراهم آمده است.

جدول ۳- الگوی کشت بهینه با هدف حداکثرسازی سود با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی در دشت ورامین.

Table 3. Optimal Cropping Pattern Aimed at Maximizing Profit Using Linear Programming Method in the Varamin Plain.

تغییرات (درصد) Change (%)	سطح زیرکشت بهینه (هکتار) Area under cultivation (ha)	سطح زیر کشت فعلی (هکتار) Current cultivated area (ha)	محصول Crop
61.60	30542.5	18900	گندم Wheat
-56.25	7000	16000	جو Barley
-100.00	0	450	کلزا Canola
124.17	9428.5	4206	سبزیجات Vegetables
-71.88	1800	6400	یونجه Alfalfa
-8.67	8585	9400	ذرت علوفه‌ای Forage corn
-100.00	0	2000	محصولات جالیزی Melons
0.00	57356	57356	کل سطح زیرکشت (هکتار) Total cultivated (ha)
4.33	2.41	2.31	بهره‌وری فیزیکی آب (کیلوگرم بر مترمکعب) Water physical productivity ($kg.m^{-3}$)
19.26	85469	71665	بهره‌وری اقتصادی آب (ریال بر مترمکعب) Water economical productivity ($Rls.m^{-3}$)
14.22	34156780	29904900	سود ناخالص (میلیون ریال) Profit (million Rials)
-4.23	399635	417285	آب مصرفی (هزار مترمکعب) Water Consumption (10^3m^3)

با توجه به مقادیر جدول ۳ زمانی که هدف حداکثرسازی سود می‌باشد بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب و سود ناخالص به‌ترتیب رشد ٤/۳۳ و ۱۹/۲٦ و ۱٤/۲۲ درصدی و مصرف آب کاهش ٤/۲۳ درصدی داشته است و این نشان می‌دهد که الگوی کشت فعلی مناسب نمی‌باشد و محصولاتی با بهره‌وری فیزیکی پایین (کلزا) و بهره‌وری اقتصادی پایین (جالیزی) کشت می‌شود که سود منطقه را هم تحت‌الشعاع قرار داده است. سطح زیرکشت کلزا و محصولات جالیزی صفر در نظر گرفته با توجه به این‌که هزینه کاهش یافته به‌ترتیب ۵۲/۷۵۰ و ۹٦/۵۵۰ میلیون ریال به‌ازای هر هکتار می‌باشد، یعنی به‌ازای کشت هر هکتار از این محصولات این میزان از سود کاهش پیدا می‌کند. قیمت سایه‌ای محدودیت منابع آب برابر با ۱۷۵۰۰ ریال می‌باشد یعنی به‌ازای هر مترمکعب آب سود به میزان ۱۷۵۰۰ ریال افزایش پیدا می‌کند که نشان‌دهنده ارزش نهایی هر مترمکعب آب کشاورزی می‌باشد. نتیجه این مطالعه با مطالعه رواسی‌زاده و همکاران (۱٤۰۲) که قیمت سایه‌ای آب از روش PMP[1] ۲۳۹۱۷ به‌دست آمده است (۱۸) همخوانی دارد.

1- Positive mathematical programming

سناریوی دوم: الگوی پیشنهادی برنامه‌ریزی خطی متعارف تک‌هدفه با هدف حداقل‌سازی مصرف آب: در این سناریو حفظ سود و سطح زیرکشت فعلی به‌عنوان محدودیت وارد مدل گردیده است. نتایج به‌دست آمده الگوی کشت بهینه با هدف حداقل‌سازی مصرف آب با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی در جدول ٤ فراهم شده است.

جدول ٤- الگوی کشت بهینه با هدف حداقل‌سازی مصرف آب با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی در دشت ورامین.

Table 4. Optimal Cropping Pattern Aimed at Minimizing Water Consumption Using Linear Programming Method in the Varamin Plain.

تغییرات (درصد) Changes (%)	سطح زیرکشت بهینه (هکتار) Area under cultivation (ha)	سطح زیر کشت فعلی (هکتار) Current cultivated area (ha)	محصول Crop
5.82	20000	18900	گندم Wheat
11.15	17784.45	16000	جو Barley
2127.73	10024.79	450	کلزا Canola
60.41	6746.75	4206	سبزیجات Vegetables
-71.88	1800	6400	یونجه Alfalfa
-89.36	1000	9400	ذرت علوفه‌ای Forage corn
-100.00	0	2000	محصولات جالیزی Melons
0.00	57356	57356	کل سطح زیرکشت (هکتار) Total cultivated (ha)
-40.69	1.37	2.31	بهره‌وری فیزیکی آب (کیلوگرم بر مترمکعب) Water physical productivity ($kg.m^{-3}$)
17.4	84120	71665	بهره‌وری اقتصادی آب (ریال بر مترمکعب) Water economical productivity ($Rls.m^{-3}$)
0.00	29904900	29904900	سود ناخالص (میلیون ریال) Profit (million Rials)
-14.81	355501.305	417285	آب مصرفی (هزار مترمکعب) Water Consumption (10^3m^3)

با توجه به مقادیر جدول ٤ زمانی که هدف حداقل‌سازی مصرف آب می‌باشد بهره‌وری اقتصادی آب رشد ١٧/٤ درصدی و مصرف آب کاهش ١٤/٨١ درصدی داشته است. بنابراین، الگوی کشت حداقل‌سازی مصرف آب برای منطقه ورامین که با افت تراز آب زیرزمینی مواجه است، الگوی مناسبی می‌باشد. کشت یونجه کاهش ٧١/٨٨ درصدی داشته و محصولات جالیزی کاهش ١٠٠ درصدی داشته است.

هم‌چنین سطح کشت کلزا به‌میزان ۱۰۰۲٤/۷۹ هکتار ارائه گردید که باتوجه به هدف سناریو و کم‌آب‌بر بودن کلزا منطقی می‌باشد. کلزا با وجود کم‌آب‌بر بودن، بهره‌وری فیزیکی پایینی (۰/٦۲ کیلوگرم بر مترمکعب) دارد، بنابراین با افزایش کشت کلزا بهره‌وری فیزیکی آب در این سناریو کاهش ٤۰/٦۹ درصدی داشته است.

سناریوی سوم: الگوی پیشنهادی برنامه‌ریزی آرمانی جهت دستیابی هم‌زمان به اهداف حداکثرسازی سود و حداقل‌سازی مصرف آب: نتایج به‌دست‌آمده الگوی کشت بهینه با اهداف آرمانی از دیدگاه کشاورزان به‌ترتیب اولویت حداکثرسازی سود و حداقل‌سازی مصرف آب با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی در جدول ۵ فراهم شده است.

جدول ۵- الگوی کشت برنامه‌ریزی آرمانی جهت دستیابی هم‌زمان به اهداف حداکثرسازی سود و حداقل‌سازی مصرف آب دشت ورامین.

Table 5. Goal Programming Cropping Pattern for Simultaneous Achievement of Profit Maximization and Water Consumption Minimization in the Varamin Plain.

تغییرات (درصد) Change (%)	سطح زیرکشت بهینه (هکتار) Area under cultivation (ha)	سطح زیر کشت فعلی (هکتار) Current cultivated area (ha)	محصول Crop
81.67	34335	18900	گندم Wheat
-32.55	10792.5	16000	جو Barley
-100.00	0	450	کلزا Canola
124.17	9428.5	4206	سبزیجات Vegetables
-71.88	1800	6400	یونجه Alfalfa
-89.36	1000	9400	ذرت علوفه‌ای Forage corn
-100.00	0	2000	محصولات جالیزی Melons
0.00	57356	57356	کل سطح زیرکشت (هکتار) Total cultivated (ha)
-31.60	1.58	2.31	بهره‌وری فیزیکی آب (کیلوگرم بر مترمکعب) Water physical productivity ($kg.m^{-3}$)
22.75	87974	71665	بهره‌وری اقتصادی آب (ریال بر مترمکعب) Water economical productivity ($Rls.m^{-3}$)
14.22	34156780	29904900	سود ناخالص (میلیون ریال) Profit (million Rials)
-6.96	388257.500	417285	آب مصرفی (هزار مترمکعب) Water Consumption ($10^3 m^3$)

با توجه به مقادیر جدول ۵ زمانی که هدف دستیابی هم‌زمان حداکثرسازی سود و حداقل‌سازی مصرف آب می‌باشد بهره‌وری اقتصادی آب و سود به‌ترتیب رشد ۲۲/۷۵ و ۱٤/۲۲ درصدی و مصرف آب کاهش ٦/۹٦ درصدی داشته است که این نشان می‌دهد که الگوی کشت فعلی مناسب نمی‌باشد و

محصولاتی با بهره‌وری پایین و مصرف بیش‌تر آب کشت می‌شود که سود و مصرف آب منطقه را هم تحت‌الشعاع قرار داده است. در این الگو محصولات کلزا و جالیزی که بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب کم‌تری دارند، حذف شده‌اند. در مطالعه قربانی و همکاران (۲۰۲۰) با الگوی کشت بهینه افزایش ۵ درصد سود در هر دو شهرستان و کاهش ٤٦ و ٤٧ درصدی مصرف آب به‌ترتیب در دو شهرستان گرگان و کردکوی ارائه گردید که با نتایج سناریوی سوم همخوانی دارد (٤).

سناریوی چهارم: الگوی پیشنهادی برنامه‌ریزی آرمانی جهت دستیابی هم‌زمان حداکثرسازی سود، حداقل‌سازی مصرف آب و به‌کارگیری حداکثری زمین: باتوجه به تخصیص ۲۸۳ میلیون مترمکعب آب به دشت ورامین جهت جبران کمبود آب کشاورزی از طریق پروژه فاز ۲ انتقال پساب تصفیه‌شده تهران به ورامین، سناریوی چهارم بررسی گردید. این سناریو به بررسی اثر آب کافی بر میزان سود و سطح زیرکشت می‌پردازد. نتایج به‌دست‌آمده الگوی کشت بهینه با هدف آرمانی دستیابی هم‌زمان حداکثرسازی سود، حداقل‌سازی مصرف آب و حداکثرسازی به‌کارگیری زمین با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی در جدول ٦ فراهم شده است.

جدول ٦- الگوی کشت برنامه‌ریزی آرمانی جهت دستیابی هم‌زمان به اهداف حداکثرسازی سود، حداقل‌سازی مصرف آب و حداکثرسازی سطح کشت دشت ورامین.

Table 6. Goal Programming Cropping Pattern for Simultaneous Achievement of Profit Maximization, Water Consumption Minimization, and Cultivated Area Maximization in the Varamin Plain.

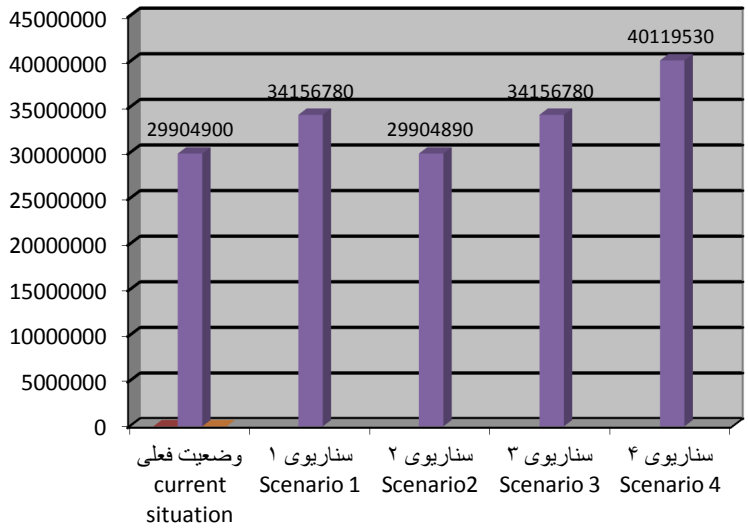
تغییرات (درصد) Change (%)	سطح زیرکشت بهینه (هکتار) Area under cultivation (ha)	سطح زیر کشت فعلی (هکتار) Current cultivated area (ha)	محصول Crop
5.82	20000	18900	گندم Wheat
-10.88	14258.87	16000	جو Barley
2815.32	13118.95	450	کلزا Canola
97.35	8300.71	4206	سبزیجات Vegetables
-71.88	1800	6400	یونجه Alfalfa
139.59	22521.43	9400	ذرت علوفه‌ای Forage corn
-100.00	0	2000	محصولات جالیزی Melons
39.48	80000	57356	کل سطح زیرکشت (هکتار) Total cultivated (ha)
80.09	4.16	2.31	بهره‌وری فیزیکی آب (کیلوگرم بر مترمکعب) Water physical productivity ($kg.m^{-3}$)
8.1	77452	71665	بهره‌وری اقتصادی آب (ریال بر مترمکعب) Water economical productivity ($Rls.m^{-3}$)
34.16	40119530	29904900	سود ناخالص (میلیون ریال) Profit (million Rials)
24.13	517986.735	417285	آب مصرفی (هزار مترمکعب) Water Consumption (10^3m^3)

با توجه به مقادیر جدول ٦ با عرضه آب کافی به دشت ورامین آرمان به‌کارگیری زمین استفاده ۸۰ هزار هکتار زمین قابل‌کشت عملی شده است و سود نیز به‌میزان ۳٤/۱٦ درصد نسبت به وضعیت فعلی افزایش پیدا کرده است. هم‌چنین، با اجرای الگوی کشت بهینه، پس از پروژه فاز ۲ انتقال پساب تصفیه‌شده تهران به ورامین مازاد آب خواهیم داشت. بنابراین، تا حد زیادی می‌توان برداشت آب‌های زیرزمینی را کاهش داد. مقایسه نتایج اهداف مطالعه و بهره‌وری اقتصادی آب در سناریوهای مختلف در جدول ۷ آمده و مقایسه ترسیمی این نتایج در شکل‌های ۲ تا ٤ فراهم شده است.

جدول ۷- نتایج الگوی کشت بهینه محصولات کشاورزی بر اساس مدل‌های برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی آرمانی.

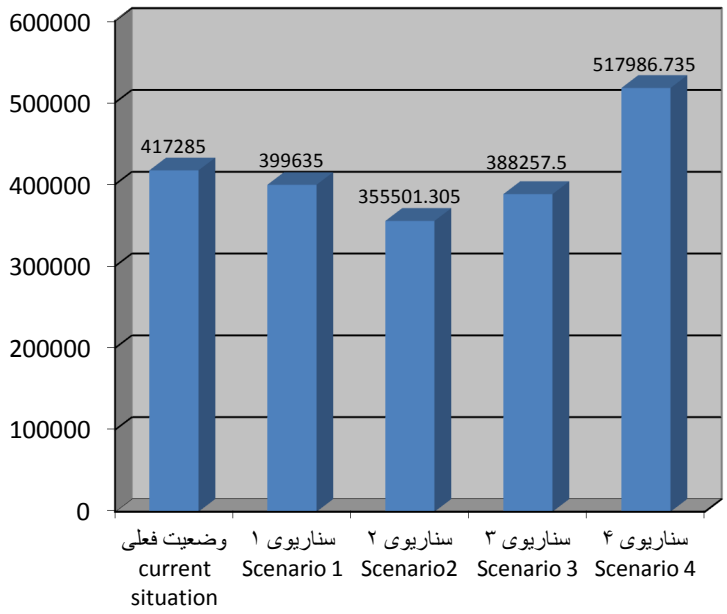
Table 7. Results of Optimal Cropping Pattern for Agricultural Products Based on Linear Programming and Goal Programming Models.

سناریوی ٤ Scenario 4	سناریوی ۳ Scenario 3	سناریوی ۲ Scenario 2	سناریوی ۱ Scenario1	کشت فعلی Current cultivation	محصول Crop
20000	34335	20000	30542.5	18900	گندم Wheat
14258.87	10792.5	17784.45	7000	16000	جو Barley
13118.95	0	10024.79	0	450	کلزا Canola
8300.71	9428.5	6746.75	9428.5	4206	سبزیجات Vegetables
1800	1800	1800	1800	6400	یونجه Alfalfa
22521.43	1000	1000	8585	9400	ذرت علوفه‌ای Forage corn
0	0	0	0	2000	محصولات جالیزی Melons
80000	57356	57356	57356	57356	کل سطح زیرکشت (هکتار) Total cultivated (ha)
4.16	1.58	1.37	2.41	2.31	بهره‌وری فیزیکی آب (کیلوگرم بر مترمکعب) Water physical productivity ($kg.m^{-3}$)
77452	87974	84120	85469	71665	بهره‌وری اقتصادی آب (ریال بر مترمکعب) Water economical productivity ($Rls.m^{-3}$)
40119530	34156780	29904890	34156780	29904900	سود ناخالص (میلیون ریال) Profit (million Rials)
517986.735	388257.500	355501.305	399635	417285	آب مصرفی (هزار مترمکعب) Water Consumption (10^3m^3)



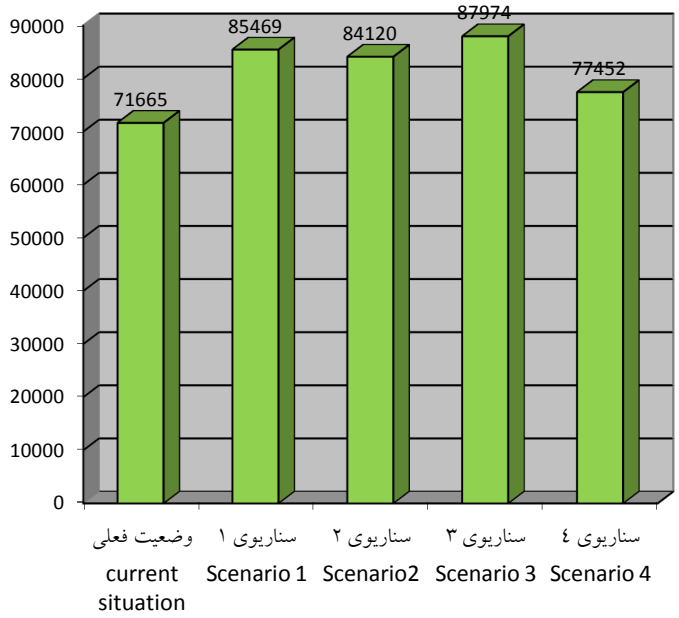
شکل ۲- نمایش مقایسه سود (میلیون ریال) در سناریوهای مختلف.

Figure 2. Comparison of profit (million Rials) in different scenarios.



شکل ۳- مقایسه مصرف آب (هزارمترمکعب در هکتار) در سناریوهای مختلف.

Figure 3. Comparison of water consumption (1000 m^3) in different scenarios.



شکل ٤- مقایسه بهره‌وری اقتصادی آب (ریال) در سناریوهای مختلف.

Figure 4. Comparison of water economic productivity (Rials) in different scenarios.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به ارائه الگوی کشت بهینه در دشت ورامین با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی خطی و آرمانی پرداخته است. برای این منظور چهار سناریو بررسی شد که سناریوی اول هدف حداکثرسازی سود ناخالص، سناریوی دوم هدف حداقل‌سازی مصرف آب، سناریوی سوم دستیابی هم‌زمان به اهداف حداکثرسازی سود و حداقل‌سازی مصرف آب و سناریوی چهارم دستیابی هم‌زمان به، به‌کارگیری زمین و حداکثرسازی سود با منابع آبی جدید می‌باشد. با توجه به نتایج مشخص گردید در الگوی فعلی محصولاتی با پایین‌ترین بهره‌وری اقتصادی آبی کشت می‌شود، و الگوی کشت در هر چهار سناریو نسبت به وضعیت فعلی بهتر می‌باشد. در سناریوی ۲ مشخص گردید با حفظ سود و افزایش بهره‌وری اقتصادی آب به‌میزان ۱۷/٤درصد مصرف آب کاهش ۱٤/۸۱ درصدی داشته است، بنابراین اگر سیاست منطقه جلوگیری از تخلیه سفره‌های زیرزمینی و پدیده نشست زمین باشد الگوی کشت در سناریوی ۲ کمک شایانی خواهد نمود. با منابع آبی موجود بهترین الگوی کشت مربوط به سناریوی ۳ می‌باشد. سناریوی ۳ محصولاتی با بیش‌ترین بهره‌وری اقتصادی در الگوی کشت پیشنهاد می‌دهد که سبب رشد سود به‌میزان ۱٤/۲۲ درصد و کاهش مصرف آب به‌میزان ٦/۹٦ درصد می‌گردد، که با نتایج مطالعه قربانی و همکاران (۲۰۲۰) همخوانی دارد (٤). در سناریوی ٤ مشخص گردید با افزایش ۲٤/۱۳ درصد آب کشاورزی، به‌کارگیری زمین به‌میزان ۸۰ هزار هکتار زمین قابل‌کشت عملی شده و سود نیز به‌میزان ۳٤/۱٦ درصد نسبت به وضعیت فعلی افزایش پیدا خواهد کرد. بنابراین، پیشنهاد می‌گردد دولت با تسریع پروژه فاز ۲ انتقال پساب تصفیه تهران امکان افزایش سطح زیرکشت، تولید، بهبود تراز سفره‌های زیرزمینی و بهبود اقتصاد کشاورزی دشت ورامین را فراهم کند.

محصولات جالیزی علاوه بر مصرف بالای آب، بهره‌وری اقتصادی آب پایینی نیز دارد و از الگو کشت

بهینه حذف شده که با مطالعه کریم‌زاده و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت دارد (۱۹). بنابراین، توصیه می‌گردد این محصول در دشت ورامین که با پدیده نشست زمین مواجه می‌باشد، کشت نگردد. کشت کلزا به‌دلیل نیاز آبی کم‌تری که نسبت به محصولات دیگر دارد در سناریوی دوم که هدف کاهش مصرف آب می‌باشد به‌میزان ۱۰۰۲٤/۷۹ هکتار کشت شده است. هم‌چنین، در سناریوی چهارم که هدف به‌کارگیری حداکثری زمین دنبال می‌شود این محصول به‌میزان ۱۳۱۱۸/۹۵ هکتار کشت شده است. اما در سناریو اول و سوم که سود حداکثر را در نظر دارند به علت بهره‌وری اقتصادی کمی که دارد از مدل حذف گردیده است که با نتایج مطالعه پناهی و فلسفیان (۱٤۰۰) همخوانی دارد(۱٤). باتوجه به این‌که از توسعه تولید کلزا علاوه‌بر تأمین روغن خوراکی، می‌توان از کنجاله‌اش برای تأمین نهاده‌های دامی استفاده و از خروج ارز جهت واردات نهاده‌های دامی جلوگیری کرد، پیشنهاد می‌گردد دولت با ارایه تسهیلات به کشاورزان و خرید تضمینی شرایط افزایش کشت این محصول را فراهم کند. آموزش، ترویج، آگاه‌سازی و فرهنگ‌سازی در کشاورزان گام اساسی در اجرای اصلاح الگوی کشت می‌باشد، بنابراین پیشنهاد می‌گردد دولت تمرکز براین موضوع را افزایش دهد. هم‌چنین، یکپارچه‌سازی و تجمیع زمین‌های کشاورزی کمک شایانی در اجرایی‌شدن اصلاح الگوی کشت دارد. بنابراین، پیشنهاد می‌گردد دولت با ارائه مشوق‌هایی، نسبت به تشویق و ترغیب مالکان اراضی کشاورزی خرد و پراکنده به تجمیع و یکپارچه‌سازی اراضی کشاورزی اقدام نماید.

اصلاح الگوی کشت کمک شایانی در کاهش مصرف آب می‌کند اما در افزایش بهره‌وری و عملکرد محصولات اثر زیادی ندارد. بنابراین، توصیه می‌گردد در کنار اصلاح الگوی کشت با آموزش اصول کشت به کشاورزان و اصلاح سیستم آبیاری زمینه افزایش بهره‌وری فراهم گردد.

شایان ذکر است با وجود دقت در طراحی مدل‌های برنامه‌ریزی، برخی محدودیت‌ها در پژوهش حاضر وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرد، عدم قطعیت در داده‌های ورودی مانند اطلاعات مربوط به منابع آب، قیمت محصولات، هزینه‌های تولید و بهره‌وری که در شرایط واقعی ممکن است با نوساناتی همراه باشد که در مدل به‌صورت قطعی لحاظ شده‌اند. هم‌چنین پویایی بازار و تغییرات احتمالی در سیاست‌های حمایتی، تعرفه‌های واردات، نرخ ارز، تغییر الگوهای مصرف و تغییرات اقلیمی می‌تواند نتایج مدل را در آینده تحت‌تأثیر قرار دهد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از داوران این مقاله که با نظرات خود موجب بهبود متن حاضر شده‌اند تشکر می‌نمایند.

داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

داده‌های این پژوهش مرتبط با پروژه تحقیقاتی می‌باشد، دسترسی به داده‌ها و اطلاعات صرفاً برای داوران/ دبیرتخصصی/ سردبیر نشریه و بنابر درخواست ایشان میسر خواهد بود.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافعی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: روش‌شناسی و آماده‌سازی داده‌ها و اطلاعات، انجام محاسبات، تهیه پیش‌نویس مقاله.

نویسنده دوم: طرح تحقیق و روش‌شناسی، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله، مشارکت در آنالیزها، نظارت تحقیق.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها می‌باشد.

حمایت مالی

این پژوهش از حمایت مستقیم مالی برخوردار نبوده است.

منابع

1. Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G., & Perrone, D. (2020). Global groundwater sustainability, resources and systems in the Anthropocene. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences,* 48, 431-463.
2. ElFetyany, M., Kamal, R., Helmy, M., & Nasr, M. L. (2021). Study the effect of food waste on Egypt water resources-wheat case study Ain Shams. *Engineering Journa*l. 12 (3), 2401-2412.
3. https://thrw.ir/.
4. Ghorbani, K., Meftah Halaghi, M., Keramatzadeh, A., & Salarijazi, M. (2020). Crop pattern optimization by using Goal programming (case study: Gharesoo basin). *Journal of Water and Soil Conservation*. 27 (1), 163-180. [In Persian]
5. Tan, Q., & Zhang, T. (2018). Robust fractional programming approach for improving agricultural water-use efficiency under uncertainty. *Journal of Hydrology*. 564 (1), 110-1119.
6. Asadi, M. A., & Najafi Alamdarlo, H. (2019). Economic evaluation of optimum cultivating pattern for reducing the use of groundwater in Dehgolan plain. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*. 50 (1), 29-43. [In Persian]
7. Adama, G., Jimoh, D., & Otache, M. (2020). Optimization of irrigation water allocation framework based on genetic algorithm approach. *Journal of Water Resource and Protection*. 12, 316-329.
8. Sani, F., & Dashti, G. (2021). Determining Optimal Cropping Pattern for Adaptation of Water Scarcity under Uncertainty using Robust Goal Programming Approach. *Water and Soil Science*. 31 (1), 15-30. [In Persian]
9. Siah, Q., & Zabiri, H. (2022). Modeling and optimization of water-foodenergy nexus for Malaysia's agricultural sector. *Sustainability*, 14(3), 1799.
10. Layani, G., Darzi, A., Motevali, A., Bagherian-Jelodar, M., Kaikha, M., Nadi, M., Firouzjaeian, A. A., Amirnejad, H., & Pirdashti, H. (2023). Developing environmentally friendly cropping pattern with a multi-objective planning approach in Sari County. *Agricultural Economics Research*. 15 (1), 96-79. [In Persian]
11. Dashti, G., Mousavi Asbagh, M., Hossein Zad, J., & Ghasemi, E. (2023). Determination of Optimum Cropping Pattern of Major Crops in Marand Plain with Emphasis on Sustainable Use of Water Resources. *Agricultural Economics and Development*. 31 (1), 163-184. [In Persian]
12. https://www.tehran-agri.ir/.
13. Mehrgan, M. (2001). Operational research for the publication of an academic book on linear programming. Compiled by Hillier and Lieberman, Tehran, Tander publishing house.
14. Falsafian, A., & Panahi, A. (2021). Optimization of the crop cultivation in the Shabestar plain underwater constraint. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*. 4, 35-48.
15. Seamus, M., & Surendra, M. (2008). Lexicographic Goal Programming and Assessment Tools for a Combinatorial Production Problem, Available Instant access upon order completion, 116 p.
16. Akbarpoor, M., Veisi, H., Mahdavi Damghani, A., & Nazari, M. (2019). A model to analyze foodsheds and self-sufficiency (case study: Tehran province).

Environmental Sciences. 17 (4), 27-42. [In Persian]

17. Molen, D. J., Sakthivadivel, R., & Perrye, C. J. (1998). Indicators for Comparing Performance of irrigated agricultural systems. Research Report 20. Colombo, Sri Lanka: International Water Management institute.
18. Ravasizadeh, S., Ansari, V., Salami, H., & Peykani Machiani, G. (2023). Analyzing the Impact of Increased Water Price on Response of Farmers and Crop Patterns in Varamin Plain of Iran. *Agricultural Economics and Development*. 31 (3), 167-198. [In Persian]
19. Karimzadeh, M., Alizadeh, A., Ansari, H., Ghorbani, M., & Banayan Aval, M. (2017). Optimizing Water Productivity and Energy Efficiency in Selecting Crop Pattern. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*. 10 (6), 849-859. [In Persian]