

Optimization of cropping pattern in Minab plain using linear programming under water scarcity conditions

Mojtaba Mohammadi^{1*} 

¹ Department of Desert Management and Control, Faculty of Environmental Sciences, Planning and Sustainable Development, University of Saravan, Saravan, Iran.

Extended Abstract

Introduction

The increasing pressure of population growth has placed significant constraints on finite land and water resources. In arid and semi-arid regions like Iran, the combination of recurrent droughts and decades of groundwater over-extraction has led to a severe water crisis. The Minab plain in Hormozgan province, a critical agricultural hub, exemplifies this challenge. It has experienced a drastic groundwater level drop of nearly 14 meters, resulting in land subsidence and water quality deterioration. To address this crisis, the “Groundwater Resources Revival and Balancing Plan” was initiated to enforce strict limits on water extraction. However, a critical gap exists between this top-down policy and on-farm implementation. The primary novelty of this study lies in bridging this gap. While numerous studies have applied Linear Programming (LP) for general crop optimization, this research specifically utilizes the LP model as a practical tool to operationalize the water balancing policy. It addresses the critical question of how farmers can adapt their cropping patterns to comply with the new legal water withdrawal limits while simultaneously maximizing their economic returns. This research, therefore, provides a scientifically-grounded strategy that aligns the goals of environmental sustainability with the economic viability of agriculture in the Minab plain. Accordingly, the following sections detail the materials and methods employed, present and discuss the results from the optimization model, and provide concluding remarks and policy recommendations.

Materials and Methods

The optimization problem was formulated as a Linear Programming (LP) model. The objective function was designed to maximize the total net profit (Z) from all agricultural activities, defined as: Maximize $Z = \sum (BC_i * X_i)$ where X_i are the decision variables representing the area (ha) allocated to each crop i , and BC_i is the net profit per hectare of that crop. This maximization is subject to three key constraints: (1) Water Availability: Total annual water consumption ($\sum V_i * X_i$) must not exceed the sum of available surface water and the legally mandated groundwater limit of 57.92 MCM. (2) Land Availability: The total cultivated area ($\sum X_i$) must be less than or equal to the total arable land. (3) Cultivation Bounds: The area for each crop (X_i) must remain within its observed historical minimum and maximum levels to ensure market stability and reflect practical farming conditions. This study was conducted in the Minab plain, located in southern Iran, which covers an area of approximately 652 km². The region’s water supply is derived from both surface sources, primarily the Esteghlal Dam on the Minab River, and groundwater extracted from the alluvial aquifer. To develop the optimization model, a comprehensive dataset was compiled for twenty major crops cultivated in the area, covering grains, vegetables, melons, and forage crops. This data, sourced from the Jihad-e-Agriculture Organization, the Regional Water Authority, and national statistical databases, included historical cultivation areas (minimum and maximum bounds), crop yield, production costs, and market prices. Crop water requirements were calculated using the NetWat software, which considers local climatic conditions and specific plant characteristics. A Linear Programming (LP) model was formulated to solve the resource allocation problem. The model’s objective function was designed to maximize the total net profit, calculated as the sum of net returns from all cultivated crops. The model was subjected to a set of critical constraints: (1) Water resource availability, limiting total water consumption to the sum of surface water allocation and the permissible groundwater withdrawal of 57.92 million cubic meters (MCM) as stipulated by the balancing plan; (2) Land availability, ensuring the total cultivated area does not exceed the available arable land; (3) Crop area limits, restricting the cultivation area for each crop to be within its observed historical minimum and maximum levels to ensure market stability and crop diversity. To evaluate the impact of water management practices, the model was executed under two distinct irrigation efficiency scenarios: Scenario 1 with 53% efficiency, representing the current situation, and Scenario 2 with 65% efficiency, representing an improved condition achievable through modern irrigation technologies.

Results and Discussion

The results of the Linear Programming model provided distinct optimal cropping patterns for the two irrigation efficiency scenarios. Under Scenario 1 (53% efficiency), the optimal solution allocated a total of 13,949 hectares for cultivation, generating a maximum net profit of 8.37 trillion Rials. In this scenario, the cultivation areas for most crops were set at their minimum allowable limits, with the exception of highly profitable crops like leafy vegetables, which were allocated a larger area. This indicates that under current efficiency levels, water scarcity is the primary limiting factor for agricultural expansion. In contrast, under Scenario 2 (65% efficiency), the model recommended a significantly larger total cultivation area of 21,382 hectares, resulting in an increased net profit of 10.55 trillion Rials. This represents a 53% increase in cultivated land and a 26% rise in profit compared to the baseline scenario. The improved water use efficiency allowed for the expansion of high-value crops such as green beans, peppers, cucumbers, and leafy vegetables to their maximum allowable cultivation limits. A crucial finding is that both optimal scenarios successfully operated within the mandated groundwater withdrawal limit of 57.92 MCM.



This is a substantial reduction compared to the average historical consumption of approximately 65.9 MCM between 2011 and 2014. Furthermore, the net profits generated under both optimized scenarios were significantly higher than the profits recorded in those historical years. This demonstrates that a scientifically planned cropping pattern can simultaneously achieve the dual goals of reducing groundwater over-extraction and enhancing farmers' economic returns.

Conclusions

This study successfully demonstrated the effectiveness of Linear Programming as a powerful tool for optimizing cropping patterns to address the intertwined challenges of water scarcity and economic viability in the Minab plain. The findings conclusively show that it is possible to increase farmers' net profits while adhering to strict groundwater withdrawal limits necessary for aquifer restoration. The research highlights that improving irrigation efficiency is the most critical lever for unlocking the region's agricultural potential. A transition from the current 53% efficiency to a more achievable 65% can substantially increase both the cultivated area and farmer income, creating a strong economic incentive for adopting sustainable practices. The practical implications of this work are significant; the developed model serves as a robust decision-support tool for policymakers and water resource managers. It is recommended that local agricultural authorities promote the outputs of this model and facilitate the adoption of modern irrigation technologies through supportive policies and subsidies. By aligning the financial interests of farmers with the long-term goal of water resource sustainability, this approach offers a tangible and effective pathway to reviving the Minab aquifer while ensuring a prosperous agricultural future for the region.

Keywords: Optimal Water Allocation, Water Productivity, Sustainable Agriculture, Linear Programming, Minab Plain

Article Type: Research Article

Acknowledgment

We hereby express our gratitude for the spiritual support of the University of Saravan.

Conflicts of interest

The authors of this article declare no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

All data generated during the manuscript analysis are included in the article.

Authors' contribution

Mojtaba Mohammadi: Conceptualization, Methodology, Software, Formal Analysis, Investigation, Resources, Data Curation, Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing, Visualization.

*Corresponding Author, E-mail: Mojtaba Mohammadi, m.mohamadi@saravan.ac.ir

Citation: Mohammadi, M. (2026). Optimization of cropping pattern in Minab plain using linear programming under water scarcity conditions. *Water and Soil Management and Modeling*, 6(1), 252-269.

doi: 10.22098/mmws.2025.18423.1691

Received: 24 September 2025, Received in revised form: 06 October 2025, Accepted: 27 October 2025, Published online: 21 March 2026

Water and Soil Management and Modeling, Year 2026, Vol. 6, No. 1, pp. 252-269

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





بهینه‌سازی الگوی کشت دشت میناب با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و با لحاظ محدودیت‌های طرح تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی

مجتبی محمدی^{۱*}

^۱ گروه مدیریت و کنترل بیابان، دانشکده علوم محیط زیست، برنامه‌ریزی و توسعه پایدار، دانشگاه سراوان، سراوان، ایران.

چکیده

کمبود منابع آب و افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی در دشت میناب، پایداری کشاورزی منطقه را با چالش جدی مواجه کرده است. هدف این پژوهش، تدوین الگوی کشت بهینه با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی (LP) به منظور حداکثرسازی سود خالص کشاورزان، با در نظر گرفتن محدودیت‌های منابع آب بر اساس طرح تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی است. برای این منظور، اطلاعات مربوط به بیست محصول زراعی عمده منطقه شامل غلات، صیفی‌جات، سبزیجات و محصولات علوفه‌ای، جمع‌آوری شد. مدل برنامه‌ریزی خطی با تابع هدف حداکثرسازی سود و با محدودیت‌های مربوط به آب قابل دسترس (سطحی و زیرزمینی)، مساحت اراضی و حداقل و حداکثر سطح زیر کشت هر محصول فرموله گردید. سپس عملکرد مدل تحت دو سناریوی راندمان آبیاری ۵۳ درصد (شرایط فعلی) و ۶۵ درصد (شرایط بهبودیافته) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که در سناریوی راندمان ۵۳ درصد، سطح زیر کشت بهینه ۱۳/۹۴۹ هکتار با سود خالص ۸/۳۷ تریلیون ریال به دست آمد. با افزایش راندمان آبیاری به ۶۵ درصد، سطح زیر کشت بهینه به ۲۱/۳۸۲ هکتار و سود خالص به ۱۰/۵۵ تریلیون ریال افزایش یافت. این یافته‌ها بیانگر آن است که اجرای الگوی کشت بهینه، به‌ویژه هم‌زمان با بهبود راندمان آبیاری، نه تنها منجر به افزایش قابل توجه درآمد کشاورزان می‌شود، بلکه امکان رعایت کامل محدودیت برداشت از منابع آب زیرزمینی و حرکت به سوی پایداری کشاورزی و احیای آبخوان دشت میناب را فراهم می‌آورد. بر این اساس، پیشنهاد کاربردی پژوهش، تدوین بسته‌های سیاستی حمایتی، شامل ارائه یارانه‌های هدفمند برای گذار به سیستم‌های نوین آبیاری و ترویج کشت محصولات شناسایی شده در الگوی بهینه، جهت تحقق همزمان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی در منطقه است.

واژه‌های کلیدی: تخصیص بهینه آب، بهره‌وری آب، کشاورزی پایدار، برنامه‌ریزی خطی، دشت میناب

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: مجتبی محمدی، m.mohamadi@saravan.ac.ir

استاد: محمدی، مجتبی (۱۴۰۵). بهینه‌سازی الگوی کشت دشت میناب با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و با لحاظ محدودیت‌های طرح تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۶ (۱)، ۲۵۲ - ۲۶۹.

doi: 10.22098/mmws.2025.18423.1691

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۱، صفحه ۲۵۲ تا ۲۶۹

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

باتوجه به افزایش جمعیت و شهرنشینی، منابع آب و زمین به شدت محدود شده‌اند. زمین و آب از عوامل اصلی توسعه پایدار کشاورزی هستند و نقش حیاتی و غیرقابل جایگزین آب در تولید محصولات کشاورزی، نگرانی‌های عمده‌ای را در سطح جهانی ایجاد کرده است. در دهه‌های اخیر، مدیریت پایدار منابع آب به‌عنوان یک منبع طبیعی تجدیدپذیر با ظرفیت محدود، یکی از چالش‌های اصلی محققین بوده است. تعیین الگوی کشت مناسب و استراتژی‌های تخصیص بهینه آب کشاورزی، به‌ویژه در شرایط محدودیت منابع آبی و فراوانی اراضی قابل کشت، یکی از راهکارهای کلیدی برای افزایش راندمان مصرف آب، استفاده بهینه از منابع محدود و دستیابی به بیشترین سود اقتصادی محسوب می‌شود (Ghahraman, 2004 & Sepaskhah).

در سال‌های اخیر، بهینه‌سازی محصولات کشاورزی با استفاده از مدل‌های ریاضی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. این مدل‌ها به منظور استفاده بهینه از منابع موجود و حداکثرسازی منافع تحت محدودیت‌های مختلف توسعه یافته‌اند (Osama et al., 2017). از میان روش‌های مختلف بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی خطی (Linear Programming یا LP) یکی از ساده‌ترین و مؤثرترین روش‌ها برای بهینه‌سازی تخصیص منابع زمین و آب در شرایط رقابت محصولات مختلف است (Pachler et al., 2025).

مطالعات متعددی از مدل برنامه‌ریزی خطی برای بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات در مناطق مختلف استفاده کرده‌اند. برای مثال، Balezentis et al (2020) با استفاده از برنامه‌ریزی خطی به تعیین منطقه بهینه برای کشت محصولات مختلف با هدف حداکثرسازی سود پرداختند. نتایج نشان داد که انتخاب محصول مناسب برای نوع زمین مناسب، اصلی‌ترین عامل در دستیابی به سود حداکثری است. Srinivasa Raju and Nagesh Kumar (2004) با استفاده از الگوریتم ژنتیک سفارشی به شبیه‌سازی سیستم آبیاری مزارع و بهینه‌سازی تخصیص مناطق آبیاری به محصولات مختلف با هدف حداکثرسازی سود پرداختند. Wang & Zhou, 2004 از برنامه‌ریزی خطی برای بهینه‌سازی الگوی کشت در منطقه Chenghai چین استفاده کردند و نشان دادند که این روش نقش کلیدی در صرفه‌جویی مصرف آب و افزایش راندمان تولید دارد. Panda & Singh (2012) نیز با توسعه یک مدل برنامه‌ریزی خطی، کاهش سطح کشت محصولات کم‌بازده مانند برنج و خردل و افزایش سطح کشت محصولات پرسود مانند پنبه و گندم را نشان دادند که منجر به افزایش ۲۶ درصدی بازده خالص سالانه شد.

Yang et al., 2025 با توسعه یک مدل بهینه‌سازی - شبیه‌سازی به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر بهره‌وری آبیاری و الگوی کشت پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از ابزارهای مختلف بهینه‌سازی نقش مهمی در تخصیص منابع آب در مناطق کم‌آب ایفا می‌کند. Nafarzadegan et al., 2017 نیز یک مدل چندهدفه بازه‌ای را برای تخصیص آب بین شبکه‌های آبیاری و محیط‌زیست تدوین کردند که نتایج آن نشان‌دهنده اهمیت مدیریت ریسک در تخصیص منابع آب بود. مطالعات مشابهی توسط Mirzaei et al., 2024 و Goodarzi et al., 2023 در ایران انجام شده است که اهمیت استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی را در مدیریت منابع آب و افزایش بهره‌وری اقتصادی نشان داده‌اند. یکی از رویکردهای اصلی، تمرکز بر مدیریت سمت تقاضا از طریق ارزیابی شاخص‌هایی چون بهره‌وری آب و آب مجازی در محصولات زراعی است تا از این طریق به بهینه‌سازی الگوهای کشت و کاهش مصرف آب کمک شود (Basereh et al., 2024; Abdollahzadeh Kahrizi et al., 2023). رویکردها اهمیت مدیریت در سطح مزرعه را برجسته می‌سازند، اما تأثیر مستقیم الگوهای کشت و برداشت‌های ناشی از آن بر منابع آب زیرزمینی نیز باید به‌دقت ارزیابی شود. در همین راستا، مطالعاتی با استفاده از مدل‌سازی نشان داده‌اند که تغییر در الگوی کشت چگونه می‌تواند به طور مستقیم بر تراز آبخوان تأثیر بگذارد (Rostami Khalaj et al., 2025). این پژوهش‌ها اهمیت پایش دقیق و مستمر منابع آب زیرزمینی را دوچندان می‌سازد، چرا که هرگونه تصمیم مدیریتی در بخش کشاورزی، پیامدهایی برای پایداری آبخوان‌ها به همراه دارد. از این رو، پژوهش حاضر باهدف طراحی یک شبکه پایش بهینه برای ثبت دقیق این تغییرات و فراهم‌آوردن داده‌های قابل اتکا برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در دشت شمیل - اشکارا انجام شده است.

در سال‌های اخیر، هم‌زمان با تشدید بحران آب در ایران، مطالعات متعددی با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی به دنبال ارائه الگوی کشت پایدار بوده‌اند. این مطالعات رویکردهای متنوعی را به کار گرفته‌اند. برخی، مشابه پژوهش حاضر، با استفاده از برنامه‌ریزی خطی (LP) به دنبال یافتن الگوی کشت بهینه تحت محدودیت‌های سخت آبی بوده‌اند. گروهی دیگر از پژوهشگران، مدل‌های پیچیده‌تر چندهدفه را برای در نظر گرفتن هم‌زمان اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی به کار برده‌اند (Azami et al., 2024). همچنین، باتوجه به عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرات اقلیمی، برخی مطالعات از مدل‌های تصادفی برای لحاظ کردن ریسک در دسترس‌پذیری آب استفاده کرده‌اند (Nikouei et al., 2020). علاوه بر رویکردهای مبتنی بر محدودیت حجمی، اثر ابزارهای سیاستی دیگر مانند قیمت‌گذاری آب نیز بر تغییر الگوی

خطی، به تدوین الگوی کشت بهینه در دشت میناب پرداخته شده است. هدف اصلی این مطالعه، حداکثرسازی سود کشاورزان با رعایت محدودیت‌های برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی بر اساس طرح احیاء و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی است. این پژوهش اولین گام برای ارائه راهکاری علمی و عملی جهت مدیریت پایدار منابع آب و افزایش بهره‌وری اقتصادی کشاورزی در منطقه میناب محسوب می‌شود. در حالی که مطالعات متعددی از مدل‌های برنامه‌ریزی خطی (LP) برای بهینه‌سازی کلی الگوی کشت در شرایط کمبود آب استفاده کرده‌اند (e.g., Singh & Goodarzi et al., 2023 Panda, 2012; نوآوری اصلی این پژوهش در کاربرد هدفمند مدل LP به عنوان ابزاری برای پر کردن شکاف مذکور است. این تحقیق، مدل بهینه‌سازی را نه فقط برای افزایش بهره‌وری آب، بلکه به طور مشخص برای عملیاتی‌سازی سیاست طرح تعادل بخشی به کار می‌گیرد. به عبارت دیگر، این مدل یک محدودیت قانونی و غیرقابل انعطاف را به یک راهکار بهینه اقتصادی-کشاورزی ترجمه می‌کند که هم اهداف زیست‌محیطی سیاست‌گذار را تأمین کرده و هم حداکثر سود ممکن را برای کشاورزان تحت این محدودیت فراهم می‌آورد.

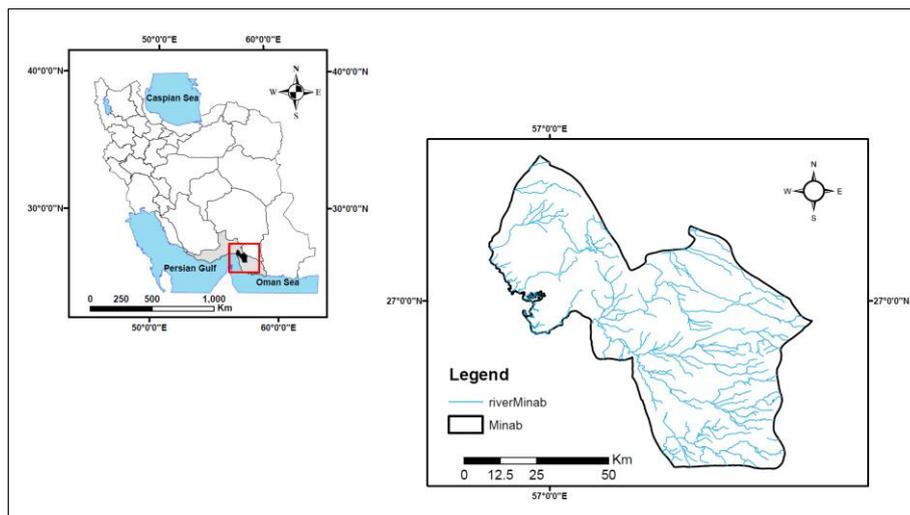
۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد پژوهش

دشت میناب بین طول‌های جغرافیایی ۵۶ و ۴۷ تا ۵۷ و ۴۹ درجه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۶ و ۰۵ تا ۲۷ و ۲۷ درجه شمالی گسترده شده است. این دشت به مرکزیت شهرستان میناب در فاصله ۷۰ کیلومتری شرق شهرستان بندرعباس و در مسیر جاده اصلی بندرعباس - بندر جاسک واقع گردیده است. این دشت از شمال به محدوده‌هایی شمالی تخت و رودان و از سمت شرق به محدوده جغین توکهور و از سمت جنوب به محدوده‌های بمانی و کربان و با شیب ملایمی از غربی‌ترین بیرون‌زدگی‌های تشکیلات مکران به طرف ساحل خلیج فارس سرازیر و به وسیله پهنه‌های گلی محصور و محدود گردیده است. دشت میناب دارای وسعتی در حدود ۶۵۲/۵ کیلومترمربع است که از این مقدار حدود ۳۷۴ کیلومترمربع دشت و ۲۴۷ کیلومترمربع مربوط به ارتفاعات است. همچنین وسعت دریاچه پشت سد در حدود ۱۹ کیلومترمربع و وسعت دشت پشت سد نیز در حدود ۱۳ کیلومترمربع است (Arvin et al., 2019). حداقل ارتفاع دشت برابر صفر در نزدیکی ساحل خلیج فارس و حداکثر آن ۹۰ متر در نزدیکی روستای گوربند و با متوسط وزنی ارتفاع برابر ۱۸/۵ متر از سطح دریا که به طور کلی ارتفاع دشت از شرق به طرف غرب و جنوب غرب کاهش می‌یابد. تصویر (۱)، موقعیت دشت میناب را نشان می‌دهد.

کشت مورد بررسی قرار گرفته است Mazandarani Zadeh & Hoseini, 2023). با این حال، موفقیت تمامی این مدل‌ها در گرو پذیرش نتایج توسط کشاورزان است؛ موضوعی که خود به یک حوزه تحقیقاتی مستقل در زمینه عوامل اجتماعی - اقتصادی مؤثر بر پذیرش الگوی کشت بهینه تبدیل شده است (Salehi, 2022). Shafa et al, 2022) پژوهش حاضر در ادامه این تلاش‌ها، به دنبال ارائه یک الگوی کشت بهینه اقتصادی در چارچوب سیاست واقعی و در حال اجرای «طرح تعادل بخشی» در دشت میناب است.

با این حال، کمبود منابع آب در ایران، به ویژه در مناطق جنوبی، همچنان به عنوان یک چالش جدی مطرح است. کاهش بارندگی و برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب سطحی و زیرزمینی، شرایط بحرانی در دشت‌های استان هرمزگان ایجاد کرده است (Abdollahi et al., 2022). دشت میناب، به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب بندرعباس و مرکز کشاورزی استان هرمزگان، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این دشت با وسعتی در حدود ۶۵۲/۵ کیلومتر مربع (۶۵/۲۵۰ هکتار)، در طول سال‌های گذشته با چالش‌های هیدرولوژیکی شدیدی مواجه بوده است. طی یک دوره سه دهه‌ای (۱۳۶۰ تا ۱۳۹۰ شمسی)، افت به طور میانگین سطح آب‌های زیرزمینی در این منطقه به میزان ۱۳/۸۸ متر، منجر به شور شدن و کاهش کیفیت آب، ایجاد فروچاله‌ها و خسارت‌های جدی به زیرساخت‌ها منظره مقابل با این بحران، «طرح احیاء و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی» توسط اداره آب منطقه‌ای اجرا شده است. این طرح از طریق سازوکارهایی نظیر نصب کنتورهای هوشمند بر روی چاه‌های مجاز و مسدودسازی چاه‌های غیرمجاز، به دنبال کنترل و کاهش برداشت از آبخوان است. با این حال، یک خلاء تحقیقاتی و عملیاتی مهم در این زمینه وجود دارد: در حالی که سیاست‌گذاران سقف برداشت را مشخص کرده‌اند، هیچ راهکار بهینه و مبتنی بر داده‌ای به کشاورزان ارائه نشده است که چگونه می‌توانند فعالیت‌های خود را با این محدودیت جدید تطبیق دهند. نوآوری اصلی این پژوهش در پر کردن همین شکاف نهفته است. برخلاف مطالعات متعددی که به طور کلی به بهینه‌سازی الگوی کشت می‌پردازند، این تحقیق به طور مشخص مدل برنامه‌ریزی خطی را به عنوان ابزاری برای عملیاتی‌سازی سیاست تعادل بخشی به کار می‌گیرد. هدف، پاسخ به این پرسش کلیدی است که چگونه می‌توان ضمن رعایت کامل سقف برداشت قانونی از آبخوان، الگوی کشتی را تدوین کرد که همزمان پایداری منابع آب و حداکثرسازی سود اقتصادی کشاورزان را تضمین نماید. این رویکرد، یک پل ارتباطی بین اهداف مدیریتی کلان و واقعیت‌های اقتصادی در سطح مزرعه ایجاد می‌کند. در این پژوهش، با استفاده از مدل برنامه‌ریزی



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد پژوهش در ایران و استان هرمزگان
Figure 1. The location of the study area in Iran and Hormozgan Province

۲-۲- وضعیت منابع آبی موجود

به طور کلی منابع آب در دسترس دشت میناب شامل منابع آبی سطحی شامل رودخانه میناب و سد استقلال میناب و منابع آب زیر زمینی است. در ارتباط با آب‌های سطحی، دشت میناب بخشی از حوضه آبریز رودخانه میناب و در قسمت انتهایی این رودخانه واقع است. آب این رودخانه پس از ورود به حوضه دشت وارد دریاچه سد استقلال شده و در آن جا ذخیره و در نهایت به تدریج با توجه به نیاز شرب و کشاورزی به صورت کنترل شده از سد خارج می‌شود. جدول (۱) میزان آب رهاسازی شده از سد برای مصارف کشاورزی دشت میناب از سد استقلال در سال آبی ۹۰-۹۱ را نشان می‌دهد.

در ارتباط با منابع آب زیرزمینی نیز از گذشته‌های دور بهره‌برداری از آبخوان زیرزمینی جهت مصارف مختلف مرسوم بوده و این امر از طریق حفر چاه‌های دستی و دستگاهی صورت می‌گرفته است. امروزه نیزه بخش مهمی از آب مورد نیاز محصولات زراعی دشت میناب از منابع آب زیرزمینی شامل چاه‌ها است. به طوری که بیش از ۷۵ درصد از کل آب مصرفی کشاورزی از این بخش می‌باشد. بر اساس آمار موجود، از مجموع ۱۰۲/۸۶۶ میلیون مترمکعب آب استحصالی از این چاه‌ها، ۱۸/۸۴۱ میلیون متر مکعب به مصرف شرب داخل دشت، ۱۷/۶۷۳ میلیون متر مکعب به مصرف شرب بندر عباس، ۰/۴۶۴ میلیون متر مکعب به مصرف صنعت و ۶۵/۸۸۸ میلیون متر مکعب به

مصرف کشاورزی تعلق دارد. جدول (۲) وضعیت چاه‌های موجود در دشت میناب را نشان می‌دهد.

برای ساخت مدل بهینه‌سازی، داده‌های ورودی برای بیست محصول عمده منطقه جمع‌آوری شد. پارامترهای اقتصادی مدل شامل میانگین عملکرد محصول، قیمت فروش و هزینه‌های تولید (کاشت، داشت و برداشت) و همچنین محدودیت‌های فیزیکی شامل حداقل و حداکثر سطح زیر کشت تاریخی هر محصول، بر اساس داده‌های یک دوره آماری پنج‌ساله (۱۳۹۰ الی ۱۳۹۴) از آمارنامه‌های رسمی سازمان جهاد کشاورزی استان هرمزگان و مرکز آمار ایران استخراج گردید (Jihad-e-Agriculture Organization, 2016; Statistical Center of Iran, 2016). این دوره به عنوان نماینده شرایط پایه و پیش از اجرای کامل طرح تعادل بخشی انتخاب شد. داده‌های مربوط به منابع آب سطحی (آب رهاسازی شده از سد استقلال) و زیرزمینی (حجم برداشت مجاز) نیز از گزارش‌های شرکت آب منطقه‌ای هرمزگان اخذ گردید (Hormozgan Regional Water Company, 2015). این محصولات شامل گروه‌های اصلی زراعی منطقه از جمله غلات (گندم، جو)، صیفی‌جات و سبزیجات (گوجه فرنگی، پیاز، هندوانه، خیار)، محصولات علوفه‌ای (یونجه، ذرت علوفه‌ای) و صنعتی (کلا، تنباکو) می‌باشند. لیست کامل این بیست محصول در جدول (۳) ارائه شده است

جدول ۱- میزان آب رهاسازی شده از سد برای مصارف کشاورزی دشت میناب از سد استقلال در سال آبی ۹۰-۹۱ (MCM)

Table 1. Amount of Water Released from Esteghlal Dam for Agricultural Use in the Minab Plain During the Water Year 2011-2012 (MCM)

Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Total
6.05	6.55	5.24	2.78	2.59	2.34	1.94	1.88	1.87	1.87	1.87	1.87	36.91

جدول ۲- وضعیت چاه‌های موجود در دشت میناب
Table 2. Status of Existing Wells in the Minab Plain

Water Use Sector	Number of Wells	Average Discharge (L/s)	Actual Withdrawal (MCM)
Agriculture	763	9.15	76.87
Domestic	33	23.00	17.98
Industry & Services	19	1.50	0.20
Total	815	-	95.05

جدول شماره ۳- لیست محصولات عمده و سطح زیر کشت محصولات

Table 3. List of Major Crops and Cultivated Areas

Crop	Cultivated Area (ha)		Yield (ton/ha)		
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Average
Irrigated Wheat	75	500	0.75	6.25	3.5
Irrigated Barley	10	50	0.5	8	4.25
Canola	50	155	1.5	3.13	2.31
Tobacco	179	300	0.55	3	1.77
Alfalfa	6	35	1.2	40	20.6
Green Bean	25	300	0.95	24	12.48
Tomato	2682	4213	13.69	46.6	30.15
Onion	2965	4860	3	45.5	24.25
Eggplant	350	4000	24.3	60	42.15
Pepper	280	1571	0.84	38	19.42
Watermelon	3500	5900	0.02	44.25	22.13
Cucumber	2000	3334	17	45.33	31.17
Squash	30	100	20	40	30
Leafy Vegetables	10	4500	1.33	24.99	13.16
Grain Corn	50	120	2.08	9.4	5.74
Forage Corn	50	150	30	240	135
Green Fava Bean	50	3500	3.18	25.28	14.23
Garlic	10	11	5.5	8	6.75
Sorghum	30	200	0.34	88.33	44.33
Cantaloupe	50	100	14	25	19.50

لازم به توضیح است که دامنه این پژوهش به بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات زراعی (Annual Crops) محدود شده است. محصولات باغی چندساله (Perennial Crops)، نظیر نخیلات و انبه، به دلیل ماهیت سرمایه‌گذاری بلندمدت و عدم امکان تغییر سطح زیر کشت آن‌ها در کوتاه‌مدت، به عنوان متغیر تصمیم‌گیری در مدل

در ادامه با استفاده از نرم افزار نت وات، نیاز آبی محصولات تهیه و میزان خالص آب مورد نیاز گیاهان زراعی متناسب با خصوصیات گیاه و اقلیم منطقه تعیین شد. پس از تهیه و دریافت این آمار و اطلاعات اقدام به توسعه معادلات و نامعادلات شامل تابع هدف و قیود در فرمت بهینه‌سازی به روش برنامه‌ریزی خطی شد.

اجاره زمین، که مستقل از نوع و سطح زیر کشت محصولات هستند و بر تصمیم بهینه‌سازی بین محصولات تأثیرگذار نیستند، در تابع هدف لحاظ نگردیدند.

$$\text{maximize } B = \sum_{i=1}^n (BC)_i X_i \quad (1)$$

B سود حاصل از همه محصولات در منطقه میناب، n شماره محصولات، BC_i سود حاصل از محصول iام، X_i سطح زیر کشت محصول iام

در این مدل، متغیرهای تصمیم (Decision Variables) که مدل مقادیر بهینه آنها را تعیین می‌کند، سطح زیر کشت هر محصول (X_i) هستند، در حالی که سود خالص واحد (BC_i) به عنوان یک پارامتر ورودی ثابت در نظر گرفته می‌شود.

لازم به ذکر است که مدل برنامه‌ریزی خطی حاضر، یک مدل تعیینی (Deterministic) و ایستا (Static) است. این مدل بر این فرضیه استوار است که کلیه پارامترهای فنی و اقتصادی (عملکرد، قیمت فروش، هزینه‌ها) در طول دوره بهینه‌سازی (یک سال زراعی) ثابت و مشخص هستند. برای کاهش اثر نوسانات کوتاه‌مدت، از میانگین داده‌های یک دوره آماری پایه (۱۳۹۰-۱۳۹۴) استفاده شده است. با این حال، این مدل اثرات تورم یا تغییرات آبی قیمت‌ها را پیش‌بینی نمی‌کند و نتایج آن نمایانگر یک الگوی بهینه تحت شرایط اقتصادی دوره پایه است. این موضوع به عنوان یکی از مفروضات اصلی تحقیق در نظر گرفته می‌شود و تحلیل اثر عدم قطعیت قیمت‌ها بر پایداری الگوی کشت بهینه می‌تواند در پژوهش‌های آتی با استفاده از تحلیل حساسیت یا روش‌های برنامه‌ریزی تصادفی مورد بررسی قرار گیرد.

محدودیت‌ها:

الف- محدودیت منابع آب زیرزمینی

این قید، کلیدی‌ترین محدودیت سیاستی در این پژوهش است و مستقیماً «طرح احیاء و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی» را در مدل اقتصادی وارد می‌کند. بر اساس این طرح، مجموع آب مصرفی سالانه برای کلیه محصولات زراعی ($\sum V_i * X_i$) نباید از سقف برداشت مجاز از منابع آب زیرزمینی تجاوز کند. این مقدار که توسط شرکت آب منطقه‌ای هرمزگان تعیین شده، برابر با ۵۷.۹۲ میلیون متر مکعب در سال است و در مدل به عنوان حد بالای متغیر (W_t) در رابطه (۲) اعمال گردید. لازم به ذکر است که این پژوهش به طور مشخص بر بهینه‌سازی تخصیص آب زیرزمینی متمرکز است و منابع آب سطحی (آب سد استقلال) در این قید لحاظ نشده‌اند.

$$\sum_{i=1}^n V_i X_i \leq W_t \quad (2)$$

لحاظ نشده‌اند. در این پژوهش، نیاز آبی باغات موجود به عنوان یک تقاضای ثابت و خارج از مدل بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و از کل آب قابل برنامه‌ریزی کسر گردیده است. بنابراین، مدل LP به دنبال تخصیص بهینه آب باقی‌مانده بین محصولات زراعی با قابلیت تصمیم‌گیری سالانه است. این رویکرد تضمین می‌کند که مدل ایستا (تک‌ساله) ابزار مناسبی برای پاسخ به اهداف پژوهش می‌باشد.

تکنیک مورد استفاده در این روش برنامه‌ریزی خطی (LP) از دو قسمت تشکیل شده است. بخش اول شامل تابع هدف خطی به منظور حداکثر کردن سود محصولات کشاورزی در منطقه مورد مطالعه و بخش دوم شامل محدودیت‌های خطی در منطقه می‌باشد. در ادامه مدل خطی مورد نظر به منظور یافتن سطح زیر کشت بهینه محصولات جهت ارائه حداکثر سودآوری با توجه به حدود بالا و پایین سطح زیر کشت موجود، فورموله شد.

محدودیت‌های این مدل شامل محدودیت برداشت از سطح آب‌های زیر زمینی و آب‌های سطحی بر اساس سناریوهای طرح تعادل بخشی آب‌های زیر زمینی و محدودیت‌های سطح زمین برای محصولات کشاورزی می‌باشد.

مدل برنامه‌ریزی خطی (LP) به کار رفته در این تحقیق، یک مدل بهینه‌سازی ایستا برای یک سال زراعی است. این مدل به دنبال یافتن الگوی کشت بهینه برای یک دوره کشت مشخص با توجه به منابع و محدودیت‌های همان دوره است و ماهیت برنامه‌ریزی بلندمدت و چندساله را ندارد. برای حل مدل برنامه‌ریزی خطی تدوین شده، از نرم‌افزار تخصصی بهینه‌سازی MATLAB استفاده گردید.

۲-۳- تابع هدف:

تابع هدف معیاری برای تعیین بهترین جواب قابل قبول برای حل مسئله می‌باشد. معیاری که مسئله بر اساس آن بهینه می‌شود به صورت تابعی از متغیرهای مسئله بیان می‌شود بر اساس اهداف هدف مورد نظر مساله حداکثر یا حداقل می‌گردد.

در مسائل مربوط به تعیین الگوی بهینه محصولات، هدف اصلی تصمیم‌گیرندگان این است که حداکثر سود خالص را که هدف اصلی در انتخاب الگوی کشت بهینه است به حداکثر برسانند. در این پژوهش نیز تابع هدف مدل به حداکثر رساندن سود حاصل از هر محصول می‌باشد. رابطه ۱ تابع هدف را نشان می‌دهد.

تعریف سود خالص: در این پژوهش، سود خالص BC در رابطه ۱ برای هر محصول به صورت تفاوت میان درآمد ناخالص و هزینه‌های متغیر تولید محاسبه شد. درآمد ناخالص از حاصل ضرب عملکرد متوسط محصول در قیمت فروش آن به دست آمد. هزینه‌های متغیر تولید شامل کلیه هزینه‌های مربوط به مراحل کاشت، داشت و برداشت از جمله هزینه‌های بذر، کود، سموم، آبیاری، نیروی کارگری و ماشین‌آلات می‌باشد. هزینه‌های ثابت مانند استهلاک و

برنامه‌های توسعه هر منطقه در محاسبه سطوح زیر کشت اعمال می‌گردد. در این مطالع نیز مدل بهینه طراحی شده با سناریوهای متفاوت از مقدار راندمان آبیاری اجرا گردید. برای ارزیابی تأثیر شیوه‌های مدیریت آب، مدل تحت دو سناریو اجرا شد. در این پژوهش، راندمان آبیاری به عنوان شاخصی از تکنولوژی و سیستم آبیاری غالب در منطقه و به صورت یکسان برای تمام محصولات در نظر گرفته شد. سناریوی اول (پایه) با راندمان ۵۳ درصد، نماینده وضعیت موجود و سیستم‌های آبیاری سنتی (سطحی) در منطقه بر اساس گزارش‌های فنی پیشین است. (Abvarzan Consulting Engineers, 1996) سناریوی دوم (بهبودیافته) با راندمان ۶۵ درصد، به عنوان یک هدف واقع‌گرایانه و قابل دستیابی از طریق به‌کارگیری فناوری‌های نوین آبیاری مانند سیستم‌های تحت فشار (قطره‌ای و بارانی) در نظر گرفته شد. این رقم بر اساس مطالعات ارزیابی بهره‌وری آب در شبکه‌های آبیاری ایران انتخاب شده است. این دو سناریو امکان مقایسه بین شرایط فعلی و پتانسیل آینده منطقه را فراهم می‌آورند. لازم به ذکر است که هرچند فرمولاسیون کلی برنامه‌ریزی خطی یک روش استاندارد است، ویژگی منحصر به فرد این مدل در نحوه تعریف محدودیت‌های آن برای بازتاب دقیق شرایط مدیریتی و کشاورزی دشت میناب نهفته است. محدودیت اصلی منابع آب (رابطه ۲) به طور مستقیم سقف برداشت قانونی تعیین‌شده توسط «طرح احیاء و تعادل بخشی» را وارد مدل می‌کند. علاوه بر این، محدودیت حداقل و حداکثر سطح زیر کشت (رابطه ۴) تضمین می‌کند که الگوی کشت پیشنهادی با در نظر گرفتن واقعیت‌های منطقه از جمله دانش بومی، تقاضای بازار و تناوب زراعی، کاملاً عملیاتی و قابل پذیرش باشد. این دو ویژگی در کنار هم، مدل را از یک تمرین تئوریک به یک ابزار کاربردی پشتیبان تصمیم برای مدیریت پایدار کشاورزی در منطقه تبدیل می‌کند. داده‌های ورودی این مدل بر اساس آمارنامه‌ها و گزارش‌های رسمی نهادهای متولی بخش آب و کشاورزی تدوین شده است تا یک مبنای کلان و قابل اتکا برای برنامه‌ریزی منطقه‌ای فراهم آورد. محدودیت‌های حداقل و حداکثر سطح زیر کشت نیز به طور ضمنی منعکس‌کننده الگوهای رفتاری کشاورزان در طول زمان است. با این حال، برای مطالعات تکمیلی و افزایش دقت مدل در مقیاس‌های کوچک‌تر، پیشنهاد می‌شود از طریق روش‌های مشارکتی مانند مصاحبه با کشاورزان و کارشناسان محلی، به اعتبارسنجی و کالیبراسیون ضرایب فنی و اقتصادی مدل پرداخته شود.

۳- نتایج و بحث

همانطور که ذکر گردید به منظور بهینه‌سازی سطح زیر کشت محصولات زراعی دشت میناب با هدف اعمال محدودیت برداشت از منابع آب زیر زمینی بر اساس سناریو هیدرولوژیکی طرح احیاء و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی منطقه میناب، مدل بهینه

Vi حجم آب آبیاری سالانه برای محصول iam (متر مکعب بر هکتار)، Xi سطح زیر کشت محصول iam، Wt مجموع حجم آب سطحی رها شده از سد استقلال به اراضی کشاورزی و مقدار برداشت مجاز از چاه‌های منطقه میناب که توسط دفتر مطالعات پایه منابع آب در برنامه اجرای طرح احیاء و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی به مقدار ۵۷/۹۲ میلیون متر مکعب جهت مصارف کشاورزی لحاظ شده است. شایان ذکر است که این مدل یک بهینه‌سازی تک‌هدفه (Single-Objective) است که در آن، سود خالص حداکثر می‌شود. در این چارچوب، محدودیت آب یک قید سخت (Hard Constraint) است و نه یک هدف ثانویه برای حداقل‌سازی. به عبارت دیگر، مدل به دنبال سودآورترین الگوی کشت ممکن در چارچوب محدودیت آبی تعیین‌شده است و ماهیت چندهدفه ندارد.

ب- محدودیت اراضی قابل کشت:

مجموع سطح زیر کشت تمامی محصولات (Xi) نمی‌تواند از کل مساحت اراضی قابل کشت موجود در منطقه (A) تجاوز کند. این محدودیت فیزیکی تضمین‌کننده قابل اجرا بودن الگوی کشت پیشنهادی است

$$\sum_{i=1}^n X_i \leq A \quad \text{رابطه ۳}$$

که A سطح کل اراضی قابل کشت می‌باشد.

ج- محدودیت حداقل و حداکثر سطح زیر کشت

محصولات:

به منظور اطمینان از واقع‌گرایانه بودن الگوی کشت بهینه و جلوگیری از ارائه راه‌حل‌های افراطی (مانند تخصیص کل اراضی به یک محصول)، برای هر محصول یک حد پایین (L_i) و یک حد بالا (U_i) برای سطح زیر کشت تعریف شد. این حدود بر اساس داده‌های تاریخی کشت محصولات در منطقه تعیین گردیده‌اند. این محدودیت اهداف مهمی چون حفظ تنوع زراعی، جلوگیری از اشباع بازار و کاهش ریسک اقتصادی برای کشاورزان را دنبال می‌کند و پایداری الگوی پیشنهادی را افزایش می‌دهد.

$$A_{min_i} \leq X_i \leq A_{max_i} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

A_{min_i} حداقل سطح زیر کشت محصول i ام، A_{max_i} حداکثر سطح زیر کشت محصول i ام

علاوه بر این با توجه به اینکه یکی از عوامل و شاخص‌های مهم در تدوین و بهینه‌سازی سطوح کشت در هر منطقه ای راندمان آبیاری در هریک از برنامه‌های کشاورزی می‌باشد. این راندمان با توجه سطح عملیات پروژه‌های بهبود و ارتقاء راندمان آبیاری نظیر تجهیز و نوسازی اراضی، انتقال آب با لوله، پوشش انهار، سیستم‌های آبیاری تحت فشار و سایر عملیات‌های زیر بنایی آب و خاک برای

سنتی سطحی با سیستم‌های نوین آبیاری تحت فشار، به ویژه آبیاری قطره‌ای، امکان‌پذیر است که تکنولوژی آن به طور کامل در کشور موجود و قابل اجراست. مهم‌ترین مانع در این مسیر، هزینه اولیه بالای سرمایه‌گذاری برای تجهیز مزارع است. بنابراین، موفقیت این گذار به شدت به سیاست‌های حمایتی دولت وابسته است. ارائه تسهیلات بانکی کم‌بهره، اختصاص یارانه‌های هدفمند برای خرید تجهیزات و ارائه خدمات فنی و مهندسی از سوی نهادهای متولی مانند سازمان جهاد کشاورزی، نقش کلیدی در کاهش این مانع مالی ایفا می‌کند. از منظر پذیرش توسط کشاورزان، مهم‌ترین انگیزه، بازگشت اقتصادی سرمایه‌گذاری است. همانطور که نتایج این پژوهش نشان داد، سناریوی بهبودیافته منجر به افزایش ۲۶ درصدی سود خالص کل می‌شود. این افزایش سودآوری، در کنار کاهش ریسک ناشی از کمبود آب در سال‌های خشک، یک محرک اقتصادی قدرتمند برای کشاورزان ایجاد می‌کند تا به سمت این تکنولوژی‌ها حرکت کنند. بنابراین، سناریوی راندمان ۶۵ درصد نه به عنوان یک هدف دور از دسترس، بلکه به عنوان یک پتانسیل واقع‌گرایانه در نظر گرفته شده که تحقق آن نیازمند یک برنامه جامع حمایتی و ترویجی است.

در صورت بهینه‌سازی سطح زیر کشت در راندمان آبیاری ۶۵ درصد، با هدف حداکثر نمودن سود خالص و محدودیت برداشت از منابع آب زیرزمینی می‌بایست ۲۱۳۸۲ هکتار از اراضی را کشت نمود که در در بیشتر محصولات زراعی برابر با حد پایین سطوح زیر کشت می‌باشد اما در محصولات صیفی همچون لوبیا سبز، فلفل، خیار، کدو، سبزیجات برگی سطح بهینه کشت برابر با حد بالای سطوح زیر کشت این محصولات می‌باشد. در این صورت سودی معادل ۱۰/۵۵ تریلیون ریال به دست خواهد آمد. از این رو در صورت بهبود سیستم‌های آبیاری به روش‌های نوین و افزایش راندمان آبیاری می‌توان حداکثر سطح اراضی قابل کشت را مورد استفاده قرار داد که به طبع منجر به افزایش سود کشاورزان نیز می‌گردد. در جدول ۵، مقایسه سناریوهای مختلف راندمان آبیاری از لحاظ سطح زیر کشت ارائه شده است. همچنین نتایج بهینه‌سازی سطح زیر کشت با مدل برنامه ریزی خطی در سناریوهای راندمان آبیاری ۵۳ و ۶۵ با سطوح سطح زیر کشت محصولات در دوره آماری ۱۳۹۰-۱۳۹۴ مورد بررسی و مقایسه گردید. جدول ۶ نتایج این مقایسه را نشان می‌دهد.

سازی خطی تدوین گردید و سپس کلیه معادلات و نامعادلات مربوطه کد نویسی و به مدل معرفی گردید. و در ادامه مدل با سناریوهای راندمان آبیاری که در بخش مواد و روش‌ها بیان گردید مدل اجرا گردید. در جدول ۴، سطوح زیر کشت محصولات زراعی مختلف پس از بهینه‌سازی الگوی کشت با در نظر گرفتن شرایط و محدودیت‌ها و راندمان آبیاری‌های متفاوت ارائه گردیده است. نتایج بهینه‌سازی (جدول ۴) نشان‌دهنده یک تغییر استراتژیک در الگوی کشت منطقه است. در سناریوی راندمان ۵۳ درصد (شرایط فعلی)، برای رعایت سقف برداشت آب، مدل سطح زیر کشت بهینه را به ۱۳۹۴۹ هکتار محدود می‌کند. در این حالت، بیشترین کاهش سطح زیر کشت مربوط به اغلب محصولات عمده و سنتی منطقه (مانند گوجه‌فرنگی، پیاز و هندوانه) است که سطح کشت آن‌ها به حد پایین تاریخی خود می‌رسد. در مقابل، بیشترین افزایش سطح زیر کشت به طور انحصاری به «سبزیجات برگی» اختصاص یافته که سطح آن از ۱۰ به بیش از ۱۵۵۷ هکتار افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که مدل برای حداکثرسازی سود در شرایط محدودیت شدید آب، منابع را به سمت محصولی با بالاترین بازده اقتصادی به ازای هر واحد آب مصرفی هدایت می‌کند. سود خالص در این سناریو به ۸.۳۷ تریلیون ریال (بر اساس قیمت‌های ثابت دوره پایه ۱۳۹۰-۱۳۹۴) به دست خواهد آمد. گذار از سناریوی ۵۳٪ به ۶۵٪ یک تحول استراتژیک در نتایج ایجاد می‌کند. با افزایش راندمان، میزان آب ناخالص مورد نیاز برای هر هکتار از هر محصول کاهش می‌یابد. این امر به معنای آزاد شدن بخشی از منابع آب محدود در قید اصلی مدل است. مدل بهینه‌سازی از این ظرفیت آبی جدید استفاده کرده و آن را به سودآورترین گزینه‌ها تخصیص می‌دهد. به همین دلیل، در سناریوی ۶۵٪، سطح زیر کشت کل به ۲۱,۳۸۲ هکتار افزایش یافته و مدل قادر است سطح زیر کشت محصولات با سودآوری بالا مانند لوبیا سبز، فلفل، خیار و سبزیجات برگی را تا حد بالای مجاز گسترش دهد. این تغییر استراتژیک منجر به افزایش ۲۶ درصدی سود خالص کل به ۱۰.۵۵ تریلیون ریال می‌گردد.

گذار از راندمان ۵۳٪ به ۶۵٪، اگرچه از نظر محاسباتی منجر به نتایج مطلوب اقتصادی می‌شود، اما تحقق آن در سطح مزرعه مستلزم بررسی ابعاد عملیاتی، اقتصادی و اجتماعی است. دستیابی به راندمان ۶۵ درصد عمدتاً از طریق جایگزینی روش‌های آبیاری

جدول ۴- سطوح زیر کشت محصولات زراعی مختلف پس از بهینه‌سازی الگوی کشت با در نظر گرفتن شرایط و محدودیت‌ها و راندمان آبیاری‌های

Table 4. Cultivated Areas of Various Crops After Optimization of Cropping Pattern Considering Conditions, Constraints, and Irrigation Efficiencies

Crop	Current Cultivated Area (ha)		Optimal Cultivated Area (ha)	
	Minimum	Maximum	53% Efficiency	65% Efficiency
Irrigated Wheat	75	500	75	75
Irrigated Barley	10	50	10	10
Canola	50	155	50	50
Tobacco	179	300	179	179
Alfalfa	6	35	6	6
Green Bean	25	300	25	300
Tomato	2682	4213	2682	2682
Onion	2965	4860	2965	2965
Eggplant	350	4000	350	1870
Pepper	280	1571	280	1571
Watermelon	3500	5900	3500	3500
Cucumber	2000	3334	2000	3334
Squash	30	100	30	100
Leafy Vegetables	10	4500	1557.66	4500
Grain Corn	50	120	50	50
Forage Corn	50	150	50	50
Green Fava Bean	50	3500	50	50
Garlic	10	11	10	10
Sorghum	30	200	30	30
Cantaloupe	50	100	50	50

جدول ۵ مقایسه نتایج سناریوهای مختلف راندمان آبیاری از لحاظ سطح زیر کشت

Table 5. Comparison of Cultivated Areas Under Different Irrigation Efficiency Scenarios

Scenario / Constraint	Total Cultivated Area (ha)
53% Efficiency Scenario	13,949.66
65% Efficiency Scenario	21,382.00
Sum of Lower Bounds	12,402.00
Sum of Upper Bounds	33,899.00

جدول ۶- نتایج مقایسه بهینه سازی سطح زیر کشت در سناریوهای راندمان آبیاری ۵۳ و ۶۵ با سطوح سطح زیر کشت محصولات در دوره آماری ۱۳۹۰-۱۳۹۴

Table 6. Comparison of Optimized Cultivated Areas Under Irrigation Efficiency Scenarios of 53% and 65% with Cultivated Areas During the Statistical Period 2011-2015

Crop	Optimal Area @ 65%	Optimal Area @ 53%	Area 2011	Area 2012	Area 2013	Area 2014	Area 2015
Irrigated Wheat	75	75	200	400	300	500	500
Irrigated Barley	10	10	10	10	50	50	50
Canola	50	50	0	0	0	0	50
Tobacco	179	179	250	250	300	300	300
Alfalfa	6	6	20	20	35	35	35
Green Bean	300	25	200	10	50	200	50
Tomato	2682	2682	3500	4213	4000	3700	2800
Onion	2965	2965	3750	3054	0	3600	2956
Eggplant	1870	350	3650	2929	350	4000	4000
Pepper	1571	280	330	1571	0	350	350
Watermelon	3500	3500	3586	3794	4500	5900	4000
Cucumber	3334	2000	2000	2389	0	0	2800
Squash	100	30	80	70	0	0	0
Leafy Vegetables	4500	1557.66	10	0	4500	0	30
Grain Corn	50	50	50	0	100	100	100
Forage Corn	50	50	50	50	120	0	0
Green Fava Bean	50	50	50	50	3500	50	0
Garlic	10	10	10	0	0	0	11
Sorghum	30	30	30	120	20	120	120
Cantaloupe	50	50	50	0	100	100	100
Total Area (ha)	21382.01	13949.66	17826	18930	17925	19005	18525
Groundwater Use (MCM)			65.89	65.89	65.89	65.89	65.89
Net Profit (10 ⁶ Rials)	10.55	8.367	6.81	7.79	7.05	5.47	7.24

همانطور که یافته‌ها این جدول نشان می‌دهد سطح زیر کشت در حالت راندمان ۵۳ درصد، سال ۹۰، سال ۹۱، سال ۹۲، سال ۹۳، و سال ۹۴ به ترتیب برابر ۱۳۹۴۹/۶۶، ۱۷۸۲۶، ۱۸۹۳۰، ۱۷۹۲۵، ۱۹۰۰۵ و ۱۸۵۲۵ هکتار (شکل ۲)، و سود خالص به ترتیب برابر ۸/۳۶۷، ۶/۷۹، ۷/۰۵، ۵/۴۷، ۷/۲۴، ۷/۲۴ تریلیون ریال (شکل ۳) و حجم آب مصرفی از آب‌های زیر زمینی به ترتیب برابر ۵۷/۹۲

۶۵/۸۹، ۶۵/۸۹، ۶۵/۸۹، ۶۵/۹، ۶۵/۸۹، ۶۵/۸۹ میلیون متر مکعب می‌باشد که ارقام و مقایسه نشان می‌دهد در صورت اجرای بهینه سطح زیر کشت با راندمان ۵۳ درصد اجرا گردد نه تنها سطح زیر کشت اراضی نسبت به سال‌های ۹۰-۹۴ که مورد مقایسه قرار گرفتند، کاهش خواهد داشت، بلکه بطور متوسط افزایش سود خالصی برابر با ۱/۵ تریلیون ریال نیز بیشتر نسبت به سطوح زیر

می‌کند که نشان می‌دهد چگونه می‌توان اهداف کلان سیاستی (حفاظت از آبخوان) را با منافع اقتصادی خرد (سود کشاورزان) همسو نمود. با این حال، وجه تمایز اصلی این تحقیق در مقایسه با مطالعات بهینه‌سازی عمومی (مانند Balezentis et al., 2020؛ Ghodousi & Morsali., 2016) در تعریف محدودیت اصلی مدل نهفته است. در حالی که بسیاری از پژوهش‌ها بر بهینه‌سازی کلی تمرکز دارند، این مدل به طور مشخص برای عملیاتی‌سازی یک سیاست واقعی و در حال اجرا، یعنی «طرح تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی»، طراحی شده است. این رویکرد، نتایج را از یک توصیه تئوریک به یک راهکار عملیاتی برای سیاست‌گذاران و کشاورزان دشت میناب تبدیل می‌کند که چگونه می‌توانند ضمن رعایت کامل سقف برداشت قانونی، به حداکثر سود اقتصادی دست یابند.

علاوه بر تحلیل سود کل، بررسی شاخص «سود خالص در واحد سطح» به درک عمیق‌تری از نتایج کمک می‌کند. در وضعیت تاریخی (دوره پایه)، میانگین سود خالص حدود ۵۷۴.۵ میلیون ریال در هکتار بود. در سناریوی بهینه با راندمان ۵۳ درصد، این شاخص به ۶۰۰ میلیون ریال در هکتار افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش بهره‌وری زمین حتی در شرایط محدودیت شدید آب است. در سناریوی بهبودیافته (راندمان ۶۵ درصد)، این رقم به ۶۳۴.۴ میلیون ریال در هکتار می‌رسد که افزایشی بیش از ۱۰ درصدی نسبت به وضعیت تاریخی را نشان می‌دهد. بنابراین، الگوی بهینه نه تنها منجر به افزایش سود کل می‌شود، بلکه با تخصیص منابع به محصولات با ارزش افزوده بالاتر، بهره‌وری اقتصادی هر هکتار از اراضی کشاورزی را نیز به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد.

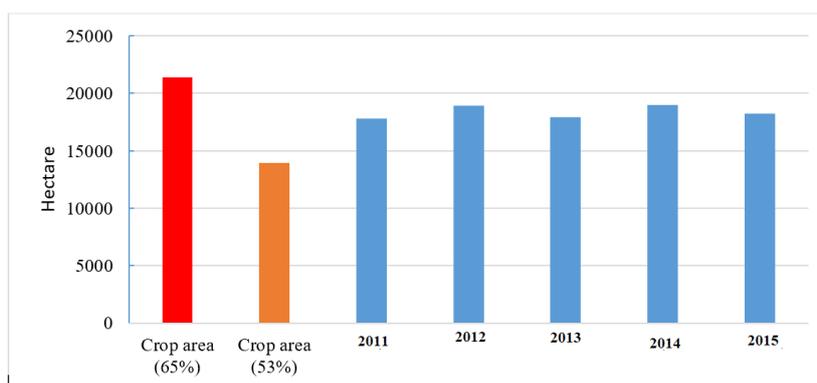
لازم به ذکر است که مدل بهینه‌سازی حاضر بر حداکثرسازی سود خالص عملیاتی سالانه متمرکز است و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای ارتقاء سیستم‌های آبیاری (مانند خرید و نصب تجهیزات آبیاری قطره‌ای) را به عنوان یک هزینه سرمایه‌ای در تابع هدف لحاظ نمی‌کند. بنابراین، افزایش ۲۶ درصدی سود خالص در سناریوی بهبودیافته، باید به عنوان پتانسیل اقتصادی و بازده ناخالص حاصل از این سرمایه‌گذاری در نظر گرفته شود. تصمیم‌گیری نهایی برای سرمایه‌گذاری توسط کشاورز یا سیاست‌گذار، مستلزم انجام یک تحلیل هزینه-فایده جداگانه است که در آن، این سود اضافی سالانه با هزینه‌های استهلاک و بهره سرمایه‌گذاری مقایسه می‌شود. در واقع، نقش اصلی این پژوهش، تعیین دقیق میزان این «فایده» است تا مبنای قابل اتکایی برای آن تحلیل فراهم آورد و نشان دهد که سرمایه‌گذاری در جهت بهبود راندمان آبیاری، از پتانسیل بازدهی اقتصادی قابل توجهی برخوردار است.

کشت در این سالها خواهد داشت و در این حالت میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی از میانگین تاریخی ۶۵.۸۹ به سقف مجاز ۵۷.۹۲ میلیون متر مکعب رسیده و کاهش معادل ۷.۹۷ میلیون متر مکعب را محقق می‌سازد (جدول ۷) و نتایج در حالت راندمان ۶۵ درصد، سال ۹۰، سال ۹۱، سال ۹۲، سال ۹۳، و سال ۹۴ به ترتیب سطوح زیر کشت برابر ۲۱۳۸۲، ۱۷۸۲۶، ۱۸۹۳۰، ۱۷۹۲۵، ۱۹۰۰۵، و ۱۸۵۲۵ هکتار، و سود خالص به ترتیب برابر ۱۰/۵۵، ۶/۸۱، ۷/۷۹، ۷/۰۵، ۵/۴۷، ۷/۲۴ تریلیون ریال و حجم آب مصرفی از آب‌های زیر زمینی به ترتیب برابر ۵۷/۹۲، ۶۵/۸۹، ۶۵/۸۹، ۶۵/۹۰ مقایسه این نتایج نشان می‌دهد می‌توان سطوح زیر کشت محصولات را با راندمان ۶۵ درصد و بر اساس مدل بهینه این تحقیق، به سطح ۲۱۳۸۲ هکتار افزایش داد که منجر به افزایش سود خالصی به مقدار متوسط ۳/۷ تریلیون ریال نسبت به این سال ها خواهد گردید و در این حالت میزان برداشت از آب‌های زیر زمینی نیز کاهش برابر ۷/۹۷ میلیون متر مکعب خواهد داشت. بنابراین با اجرای مدل بهینه سطح زیر کشت می‌توان محدودیت برداشت از سطح آب‌های زیر زمینی را رعایت کرد و همزمان سود خالص کشاورزان نیز افزایش گردد که منجر به پایداری منابع آب زیر زمینی و احیاء آب‌های زیر زمینی می‌گردد.

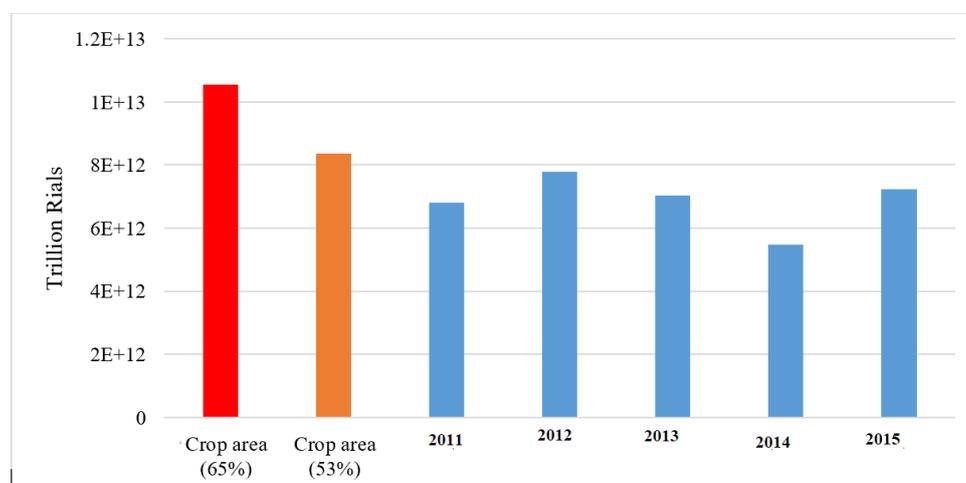
مقایسه این یافته‌ها با مطالعات پیشین، اعتبار و اهمیت نتایج را دوچندان می‌سازد. نتایج این پژوهش کاملاً همسو با یافته‌های Singh & Panda (2012) است که با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی، کاهش سطح کشت محصولات کم‌بازده و افزایش سطح کشت محصولات پرسود را برای حداکثرسازی بازده خالص سالانه پیشنهاد دادند. در هر دو مطالعه، مدل بهینه‌سازی به طور استراتژیک منابع آب و زمین را به سمت محصولات با بالاترین بازده اقتصادی (در این مطالعه سبزیجات برگی، فلفل و خیار) سوق می‌دهد. نکته قابل توجه، شباهت عددی در میزان بهبود اقتصادی است؛ در حالی که مطالعه مذکور به افزایش ۲۶ درصدی بازده خالص دست یافت، در پژوهش حاضر نیز گذار به سناریوی بهبودیافته (راندمان ۶۵٪) منجر به افزایش دقیقاً ۲۶ درصدی سود خالص گردید. این هم‌خوانی، نشان‌دهنده استحکام رویکرد برنامه‌ریزی خطی در دستیابی به اهداف مشابه در مناطق مختلف است. با این حال، وجه تمایز اصلی این پژوهش با بسیاری از مطالعات پیشین، لنگر انداختن مدل در یک سیاست مدیریتی واقعی و در حال اجرا است. برخلاف مدل‌های عمومی بهینه‌سازی، محدودیت اصلی آب در این تحقیق، یک عدد فرضی یا تاریخی نیست، بلکه سقف قانونی و غیرقابل تخطی تعیین‌شده توسط «طرح احیاء و تعادل بخشی» است. این ویژگی، مدل را از یک تمرین تئوریک به یک ابزار پشتیبان تصمیم عملیاتی تبدیل

جدول ۷، نتایج مقایسه حجم آب مصرفی و سود خالص محصولات در سناریوهای مدل بهینه با سطوح زیر کشت محصولات در دوره آماری ۱۳۹۰-۱۳۹۴
 Table 7. Summary and comparison of total area, water consumption, and net profit for optimal scenarios versus historical years (2011-2016).

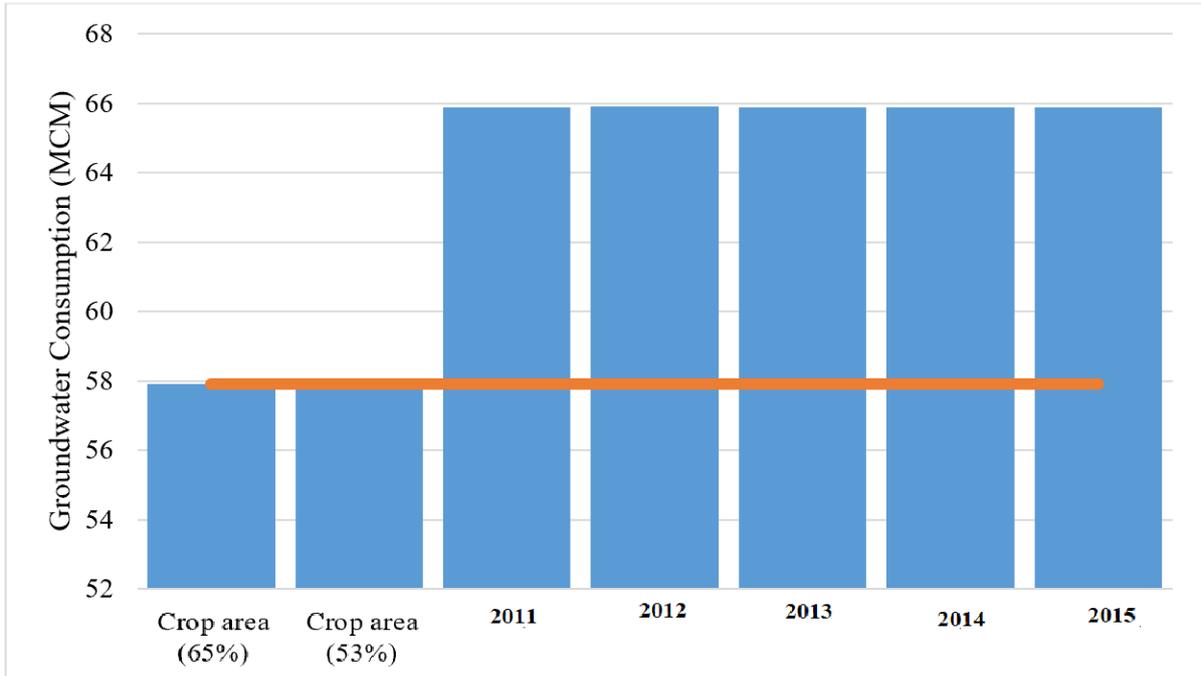
	65% Efficiency Scenario	53% Efficiency Scenario	2011-12	2012-13	2013-14	2014-15	2015-16
Total Area (ha)	21,382.01	13,949.66	17,826	18,930	17,925	19,005	18,525
Groundwater Consumption (MCM)	-	-	65.89	65.90	65.89	65.89	65.89
Net Profit (10 ¹² Rials)	10.55	8.37	6.81	7.79	7.05	5.47	7.24
Difference in Groundwater Consumption (MCM)	-	-	7.97	7.98	7.97	7.97	7.96
Profit Difference from 53% Scenario (10 ¹² Rials)	-	-	-1.56	-0.58	-1.32	-2.90	-1.13
Profit Difference from 65% Scenario (10 ¹² Rials)	-	-	-3.74	-2.76	-3.50	-5.08	-3.31



شکل ۲- نمودار مقایسه کل سطح زیر کشت محصولات در سناریوهای مدل بهینه‌سازی با سطوح زیر کشت محصولات در دوره آماری سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۴
 Figure 2. Comparison of Total Cultivated Areas Under Optimized Model Scenarios with Cultivated Areas During the Statistical Period of 2011-2015



شکل ۳- نمودار مقایسه سود خالص محصولات در سناریوهای مدل بهینه‌سازی با سود خالص محصولات در دوره آماری سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۴
 Figure 3. Comparison of Net Profit of Crops Under Optimized Model Scenarios with Net Profit of Crops During the Statistical Period of 2011-2015



شکل ۴. نمودار مقایسه میزان برداشت آب‌های زیرزمینی در سناریوهای مدل بهینه‌سازی با سطوح زیر کشت محصولات در دوره آماری سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۴
 Figure 4. Comparison of groundwater consumption in the optimal scenarios (65% and 53% efficiency) with historical agricultural years (2011-2016). The horizontal line indicates the groundwater withdrawal limit (57.92 MCM).

۴- نتیجه‌گیری

کشت باشد ولی با افزایش راندمان آبیاری به ۶۵ درصد میزان سطح زیر کشت افزایش می‌یابد بطوری که از سطح زیر کشت ۱۳۹۴۹/۶۶ هکتاری در راندمان آبیاری ۵۳ درصد به مقدار سطح زیر کشت ۲۱۳۸۲ هکتاری در راندمان آبیاری ۶۵ درصدی رسیده است که به طبع میزان سود نیز از مقدار ۸/۳۶۷ تریلیون ریال به مقدار ۱۰/۵۵ تریلیون ریال افزایش یافته است. بنابراین می‌توان بیان داشت که در صورت بهبود سیستم‌های آبیاری به روش‌های نوین و افزایش راندمان آبیاری می‌توان حداکثر سطح اراضی قابل کشت را مورد استفاده قرار داد که به طبع منجر به افزایش سود کشاورزان نیز می‌گردد. از طرفی دیگر نیز در این حالت محدودیت برداشت از منابع آب زیرزمینی که توسط طرح احیاء و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی در حال اجرا نیز می‌باشد نیز رعایت می‌گردد و این طرح نیز می‌تواند به اهداف تعیین شده خود مبنی بر کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی و احیاء آبخوان دشت میناب برسد. بنابراین، با توجه به اینکه کسب درآمد مهم‌ترین انگیزه در فعالیت‌های کشاورزی است، هم‌راستا کردن منافع اقتصادی کشاورزان با اهداف پایداری منابع آب، کلید موفقیت هر طرح مدیریتی است. لازم به ذکر است که مدل ارائه شده در این تحقیق به عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری استراتژیک برای نهادهای متولی مانند سازمان جهاد کشاورزی و شرکت آب منطقه‌ای عمل می‌کند. پیاده‌سازی نتایج این مدل در مقیاس مزرعه، نه از طریق ابلاغ مستقیم، بلکه از طریق سیاست‌گذاری‌های هوشمند و تشویقی امکان‌پذیر است. پیشنهاد می‌گردد مدیران منطقه‌ای با استفاده از خروجی‌های این مدل، اقدام به تدوین بسته‌های حمایتی و یارانه‌های هدفمند برای کشت محصولات

در این مطالعه به مدل برنامه‌ریزی خطی برای بهینه‌سازی سطح زیر کشت محصولات زراعی مختلف در دشت میناب با هدف حداکثر رساندن سود خالص کشاورزان تدوین گردید. در این مدل محدودیت‌های مختلفی همچون میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی بر اساس سناریو هیدرولوژیکی طرح احیاء و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی (۵۷/۹۲ میلیون متر مکعب جهت مصارف کشاورزی)، محدودیت در دسترس بودن سطح زیر کشت گنجانده شده است. باید توجه داشت که این پژوهش بر بهینه‌سازی تک‌هدفه (حداکثرسازی سود اقتصادی) متمرکز است، در حالی که مهم‌ترین معیار پایداری، یعنی حفظ منابع آب، به عنوان یک محدودیت اصلی و غیرقابل تخطی در مدل اعمال شده است. بنابراین، مدل یک راهکار بهینه اقتصادی را در چارچوب الزامات اکولوژیکی ارائه می‌دهد. برای این هدف آمار بیست محصول زراعی شامل سطح زیر کشت، عملکرد، هزینه (کاشت داشت برداشت)، قیمت و درآمد از منابع مختلف ذی‌صلاح تهیه گردید. تجزیه و تحلیل نشان داد که محصولات صیفی همچون هندوانه، پیاز، گوجه فرنگی و سبزیجات بیشترین سطح زیر کشت در منطقه را دارا می‌باشند. محصولاتی که جزو محصولات پر مصرف از لحاظ نیاز آبی می‌باشند. از طرفی دیگر محصولاتی همچون گندم و جو سطح کمتری را به خود اختصاص داده‌اند. نتایج بهینه‌سازی مدل در دو سناریو با راندمان آبیاری ۶۵ و ۵۳ درصد نشان داد که در راندمان آبیاری ۵۳ درصد می‌بایست سطح زیر کشت برای تمامی محصولات برابر با حد پایین سطوح زیر

مکعب) به منظور متوقف کردن روند افت سطح آب است. دستاورد اصلی این تحقیق آن است که نشان می‌دهد دستیابی به این هدف کلیدی هیدرولوژیکی، نه تنها از نظر اقتصادی امکان‌پذیر است، بلکه می‌تواند منجر به افزایش بهره‌وری اقتصادی آب و زمین نیز گردد. بنابراین، این مطالعه مسیر اجرایی و اقتصادی برای تحقق یک سیاست بلندمدت زیست‌محیطی را فراهم می‌آورد.

باید توجه داشت که این پژوهش با محدودیت‌هایی نیز همراه بود. مدل به کار رفته یک مدل ایستا و تعیینی است که نوسانات قیمت محصولات و عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرات اقلیمی بر منابع آب را در نظر نمی‌گیرد. همچنین، این مطالعه بر محصولات زراعی متمرکز بوده و باغات را به عنوان یک تقاضای ثابت در نظر گرفته است. بر این اساس، برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود: (۱) از مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی برای لحاظ کردن ریسک و عدم قطعیت در پارامترهای اقتصادی و هیدرولوژیکی استفاده شود. (۲) مدل‌های دینامیک و چنددوره‌ای توسعه داده شود تا اثرات بلندمدت تغییر الگوی کشت بر تراز آبخوان شبیه‌سازی گردد. (۳) با استفاده از پیمایش‌های میدانی و مدل‌های اجتماعی-اقتصادی، عوامل مؤثر بر پذیرش الگوی کشت بهینه توسط کشاورزان مورد بررسی قرار گیرد تا شکاف بین نتایج مدل و اجرای عملی آن در سطح مزرعه کاهش یابد.

سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله از حمایت‌های معنوی دانشگاه سراوان سپاس‌گزاری به‌عمل می‌آید.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش وجود ندارند.

دسترسی به داده‌ها

تمام داده‌های تولید شده در متن مقاله حاضر ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

مجتبی محمدی: ایده‌پردازی، روش‌شناسی، نرم‌افزار، تحلیل رسمی، تحقیق، تأمین منابع، پالایش داده‌ها، نگارش پیش‌نویس اولیه، بازبینی و ویرایش متن، بصری‌سازی.

منابع

آروین، مرتضی، سلاجقه، علی، و مهدوی، محمد. (۱۳۹۸). ارزیابی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر منابع آب زیرزمینی دشت میناب. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۳(۴۶)، ۱-۱۲. doi: 10.22111/jneh.2018.22276.1324

بهینه، ارائه برنامه‌های ترویجی و آموزشی برای تبیین مزایای اقتصادی الگوی جدید، و ایجاد بازارهای فروش تضمینی نمایند. از این طریق، می‌توان انگیزه اقتصادی لازم را برای کشاورزان فراهم آورد تا به صورت داوطلبانه به سمت الگوی کشتی حرکت کنند که همزمان منجر به افزایش سودآوری و حفظ منابع حیاتی آب زیرزمینی برای نسل‌های آینده گردد.

علاوه بر افزایش سود خالص کل، ارزیابی نتایج از منظر شاخص‌های بهره‌وری آب نیز حائز اهمیت است. در مطالعات مدیریت منابع آب، تأکید می‌شود که برای تصمیم‌گیری در خصوص الگوی کشت بهینه، نباید صرفاً به بهره‌وری فیزیکی (مانند کیلوگرم محصول بر متر مکعب آب) اتکا کرد، بلکه بهره‌وری اقتصادی آب (سود خالص به ازای هر واحد آب) معیار جامع‌تر و کلیدی‌تری است (Asadzadeh, Sharafeh & Raof, 2018). نتایج این پژوهش به وضوح این موضوع را تأیید می‌کند. در سناریوی راندمان ۵۳٪، بهره‌وری اقتصادی آب آبیاری (که از تقسیم سود خالص کل بر حجم آب مصرفی به دست می‌آید) حدود ۱۴۴،۵۰۰ ریال بر متر مکعب است. این شاخص در سناریوی بهبودیافته (راندمان ۶۵٪) با یک جهش قابل توجه به حدود ۱۸۲،۱۵۰ ریال بر متر مکعب افزایش می‌یابد. این یافته نشان می‌دهد که الگوی کشت بهینه پیشنهادی، نه تنها درآمد کلی را افزایش می‌دهد، بلکه به طور سیستماتیک ارزش اقتصادی خلق شده از هر متر مکعب آب محدود در منطقه را به حداکثر می‌رساند و این، هسته اصلی کشاورزی پایدار و اقتصادی است.

باید توجه داشت که الگوی بهینه ارائه‌شده در این تحقیق، یک راهنمای کلان برای سیاست‌گذاران بخش آب و کشاورزی است و پیاده‌سازی آن در سطح مزرعه نیازمند استفاده از ابزارهای مدیریتی و ترویجی است. سازمان جهاد کشاورزی و شرکت آب منطقه‌ای می‌توانند با بهره‌گیری از نتایج این مدل، سیاست‌های تشویقی مانند حمایت‌های یارانه‌ای برای کشت محصولات توصیه شده، خرید تضمینی، ارائه تسهیلات برای تجهیز به سیستم‌های آبیاری نوین و آموزش کشاورزان از طریق سازمان‌های ترویجی را تدوین نمایند. این رویکرد، پل ارتباطی میان برنامه‌ریزی کلان منطقه‌ای و تصمیم‌گیری در سطح مزرعه را ایجاد کرده و کشاورزان را به صورت داوطلبانه به سمت الگویی هدایت می‌کند که هم برای اقتصاد آن‌ها و هم برای پایداری منابع آب منطقه مفید است.

لازم به تأکید است که مدل بهینه‌سازی خطی به کار رفته در این پژوهش، یک مدل ایستا است و فرآیندهای دینامیک و بلندمدت هیدرولوژیکی آبخوان را شبیه‌سازی نمی‌کند. در واقع، هدف این پژوهش ارائه یک الگوی کشت بهینه است که شرط لازم برای احیای آبخوان را برآورده سازد. معیار اولیه برای شروع فرآیند احیا، که توسط «طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی» تعریف شده، رساندن میزان برداشت کل به سطح آب قابل برنامه‌ریزی (۵۷.۹۲ میلیون متر

- اعظمی، آزاده، میرک زاده، علی اصغر، و آذری، آرش. (۱۴۰۳). بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات زراعی شهرستان صحنه براساس محدودیت منابع. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، ۳۵(۲)، ۸۷-۱۱۴. doi: 10.22108/gep.2024.138492.1598
- باسره، فاطمه، احمدپری، هدیه، و شریفی، محمدرضا. (۱۴۰۳). بررسی محتوای آب مجازی و شاخص های بهره وری آب کشاورزی در محصولات زراعی (مورد مطالعه: شهرستان دهلران استان ایلام). *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۱-۱۸. doi: 10.22098/mmws.2023.13145.1309
- رستمی خلج، محمد، نور، حمزه، رجایی، حسین، و باقریان کلات، علی. (۱۴۰۴). تأثیر الگوی کشت بر تغییرات تراز آب زیرزمینی در بخشی از آبخوان دشت مشهد-چناران. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۱)، ۴۵-۵۶. doi: 10.22098/mmws.2024.14408.1406
- سازمان جهاد کشاورزی استان هرمزگان. (۱۳۹۵). *آمارنامه کشاورزی استان هرمزگان (سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۹۴)*. معاونت برنامه‌ریزی و امور اقتصادی. (گزارش)
- سپاسخواه، علیرضا، و قهرمان، بیژن. (۱۳۸۳). *رابطه آب، خاک و گیاه*. انتشارات دانشگاه شیراز. (کتاب)
- میرزائی، عبدالرحمان، سلطانی، افشین، عباسی، فریبرز، زینلی، ابراهیم و میرکریمی، شهرزاد. (۱۴۰۳). برآورد آب برداشت شده برای کشاورزی استان فارس بر اساس مدل سازی بیلان آب. *تحقیقات آب و خاک ایران*. doi: 10.22059/ijswr.2024.372447.669663.55(6), 963-978.
- شرکت آب منطقه‌ای هرمزگان. (۱۳۹۴). *گزارش طرح احیاء و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی دشت میناب*. معاونت مطالعات پایه منابع آب. (گزارش)
- صالحی شفا، نیما، بابازاده، حسین، آقایی، فیاض، صامی، علی، غفوری، محمدرضا، صفوی، مسعود، و پناهدار، علی. (۱۴۰۱). تدوین الگوی کشت بهینه به منظور مدیریت تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت شهریار. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۲)، ۲۱۷-۲۲۵. doi: 10.22108/mmws.2022.11792.1169
- عبداله زاده کهریزی، رحیم، کوبکی نژاد مقدم، امیرحسین، و معروفی نیا، ادریس. (۱۴۰۲). بررسی آب مجازی و شاخص بهره وری آب کشاورزی در محصولات زراعی دشت پلدشت. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۱)، ۵۴-۶۸. doi: 10.22098/mmws.2022.11090.1100
- گودرزی، مصطفی، قدیبیک لو، جواد، غدیری، عادل و خودشناس، محمدعلی. (۱۴۰۲). تعیین الگوی کشت بهینه مبتنی بر هم‌بست آب، انرژی، غذا و سود اقتصادی (مطالعه موردی استان مرکزی - دشت فراهان). *آب و خاک*. doi: 10.22067/jsw.2023.79946.1233
- مازندرانی زاده، حامد، و حسینی، سیده مرضیه. (۱۴۰۱). ارزیابی اثر پیش‌بینی قیمت محصولات کشاورزی بر کاهش افت تراز آب زیرزمینی با روش پویایی سیستم‌ها. *تحقیقات آب و خاک ایران*. doi: 10.22059/ijswr.2022.345131.669305
- مرکز آمار ایران. (۱۳۹۵). *نتایج آمارگیری از زراعت و باغداری*. انتشارات مرکز آمار ایران. (گزارش)
- مهندسین مشاور آب ورزان. (۱۳۷۵). *گزارش مطالعات طرح بهبود و توسعه مدیریت آب و خاک دشت میناب*. وزارت جهاد کشاورزی. (گزارش)
- نفرزادگان، علیرضا، وقار فرد، حسن، نیکو، محمدرضا و نوحه گر، احمد. (۱۳۹۶). استفاده از برنامه ریزی خطی بازه ای تعاملی برای تخصیص بهینه آب و سطح کشت با توجه به محتوای آب مجازی و فاکتورهای اقتصادی-اجتماعی (مطالعه موردی: دشت درودزن- کربال). *مجله اکوهیدرولوژی*. doi: 10.22059/ije.2017.61498.601-613
- عبداللهی، سنا، بذرافشان، ام البنین و شکاری، مرضیه. (۱۴۰۱). تحلیل روند مشخصه‌های خشکسالی در ایران با استفاده از شاخص‌های تک و چندمتغیره. *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*. doi: 10.22125/iwe.2022.150751

References

- Abdollahzadeh Kahrizi, R., Kokabinezhad Moghaddam, A. H., & Merufinia, E. (2023). Investigating virtual water and agricultural water productivity index in crops of Poldasht Plain. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(1), 54-68. doi: 10.22098/mmws.2022.11090.1100 [In Persian]
- Abvarzan Consulting Engineers. (1996). [Report on irrigation efficiency in Minab plain]. Ministry of Agriculture Jihad. [In Persian]
- Arvin, et al. (2019). [Comprehensive studies report on the revival and development of agriculture and natural resources in Hormozgan province]. Hormozgan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center. doi: 10.22111/jneh.2018.22276.1324. [In Persian]
- Asadzadeh Sharafteh, H., & Raouf, M. (2018). Comparison of water use efficiency in sprinkler and hydroflume irrigation systems (Case study: Ardabil Plain). *Water and Irrigation Management*, 8(1), 55-68. DOI: 10.22059/jwim.2018.239976.556. [In Persian].
- Azami, A., Mirakzadeh, A. A. and Azari, A. (2024). Optimizing the Crop Cultivation Pattern of Sahne Township Based on Limited Water Resources. *Geography and Environmental Planning*, 35(2), 87-114. doi: 10.22108/gep.2024.138492.1598
- Basereh, F., Ahmadpari, H., & Sharifi, M. (2024). Investigating virtual water content and

- agricultural water productivity indicators in crops Case study: Dehloran County, Ilam Province. *Water and Soil Management and Modelling*, 4(3), 1-18. doi: [10.22098/mmws.2023.13145.1309](https://doi.org/10.22098/mmws.2023.13145.1309). [In Persian]
- Goodarzi, M., Ghadbeiklou, J., Ghadir, A. and Khodshenas, M. (2023). Determining the Optimal Cropping Pattern Based on the Multiple Objectives of Water, Energy, Food and Economic Profit Indices (Case Study: Markazi Province - Farahan Plain). *Water and Soil*, 37(2), 187-202. doi: [10.22067/jsw.2023.79946.1233](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.79946.1233). [In Persian]
- Hormozgan Regional Water Company. (2015). *Report on the revival and balancing plan for groundwater resources of Minab plain*. Deputy of Water Resources Basic Studies. [In Persian]
- Jihad-e-Agriculture Organization of Hormozgan Province. (2016). *Agricultural yearbook of Hormozgan province (2011-2015)*. Deputy of Planning and Economic Affairs. [In Persian]
- Srinivasa Raju, K., Nagesh Kumar, D. Irrigation Planning using Genetic Algorithms. *Water Resources Management* 18, 163-176 (2004). doi: [10.1023/B:WARM.0000024738.72486.b2](https://doi.org/10.1023/B:WARM.0000024738.72486.b2)
- Mazandarani zadeh, H. and hoseini, M. (2023). Investigating the effect of agricultural product price forecasting on groundwater level using systems dynamics, in order to simultaneously maintain the welfare of farmers and groundwater resources. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(11), 2565-2582. doi: [10.22059/ijswr.2022.345131.669305](https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345131.669305). [In Persian]
- Mirzaei, A., Soltani, A., Abbasi, F., Zeinali, E. and Mirkarimi, S. (2024). Estimation of withdrawal water for Fars Province agriculture based on water balance modelling. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(6), 963-978. doi: [10.22059/ijswr.2024.372447.669663](https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.372447.669663). [In Persian]
- N. Pachler, E. F. Crawley and B. G. Cameron, "Mixed Integer Linear Programming for Ground Infrastructure and Inter-Satellite Link Design in Satellite Constellations," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, doi: [10.1109/TVT.2025.3593016](https://doi.org/10.1109/TVT.2025.3593016).
- Nafarzadegan, A. R., Vagharfard, H., Nikoo, M. R. and Nohegar, A. (2017). Application of interactive interval linear programming for optimal water and crop area allocation considering virtual water content and socio-economic factors (Case study: Dorudzan-Korbal Plain). *Journal of Ecohydrology*, 4(2), 601-613. doi: [10.22059/ije.2017.61498](https://doi.org/10.22059/ije.2017.61498). [In Persian]
- Osama, S., Elkholy, M., & El-Alfy, M. (2017). Optimization of crop pattern in North Sinai by using linear programming. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4), 559-566. doi: [10.1016/j.aej.2017.04.015](https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.04.015)
- Rostami Khalaj, M., Noor, H., Rajayi, H., & Bagherian Kalat, A. (2025). Effect of cropping pattern on changes in groundwater level in a part of Mashhad Chenaran plain aquifer. *Water and Soil Management and Modelling*, 5(1), 45-56. doi: [10.22098/mmws.2024.14408.1406](https://doi.org/10.22098/mmws.2024.14408.1406) [In Persian].
- Salehi Shafa, N., Babazadeh, H., Aghayari, F., Saremi, A., Ghafouri, M. R., Safavi, M. and Panahdar, A. (2022). Formulation of an optimized Cropping pattern in order to manage groundwater level changes in Shahriar Plain. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(2), 217-235. doi: [10.22098/mmws.2022.11792.1169](https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11792.1169). [In Persian]
- Balezantis, T., Chen, X., Galnaityte, A., & Namiotko, V. (2020). Optimizing crop mix with respect to economic and environmental constraints: An integrated MCDM approach. *Science of the Total Environment*, 705, 135896. doi: [10.1016/j.scitotenv.2019.135896](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135896)
- Statistical Center of Iran. (2016). *Results of the agricultural and horticultural survey*. Statistical Center of Iran Publications. [In Persian]
- Wang, L., & Zhou, H. (2004). *Optimization of irrigation and cropping pattern in Chenggai irrigation area, China*. Proceedings of the International Conference on Water-Saving Agriculture and Sustainable Use of Water and Land Resources, Yangling, China.
- Abdollahi, S., Bazrafshan, O. and Shekari, M. (2022). Trend Analysis of Drought Characteristics in Iran Using Univariate and Multivariate Indices. *Irrigation and Water Engineering*, 12(4), 334-353. doi: [10.22125/iwe.2022.150751](https://doi.org/10.22125/iwe.2022.150751). [In Persian].
- Yang, C., Liu, C., Qiu, Z., Wang, S., Xing, X., & Ma, X. (2025). Multi-objective irrigation strategies and production prediction for winter wheat in China in future dry years using CERES-wheat model and non-dominated sorting genetic algorithm II. *Computers and Electronics in Agriculture*, 230, 109888. doi: [10.1016/j.compag.2024.109888](https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109888)