

Research Paper

application of game theory in optimal allocation of water resources in Sistan region under drought conditions with deficit irrigation strategy

Zahra Ghaffari moghadam^{1*} , Ali Sardarshahraki², Arash Ghaffari moghadam³

1. Assistant Professor, Department of Agricultural Economics, Agriculture Institute, Research Institute of zabol, Zabol, Iran

2. Associate Professor of Agricultural Economics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran,

3. Master's degree in Computer Engineering, Hatef University, Zahedan, Iran

Received:2024/06/18

Revised:2024/07/15

Accepted:2025/01/31

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.71632/wej.2025.1167684](https://doi.org/10.71632/wej.2025.1167684)

Keywords:

Stackelberg, Water requirements, Genetic Allocation water, Water market

Abstract

Introduction: Due to frequent droughts, it is usually not possible to increase water allocation and therefore it is the limiting factor of water volume. Considering the limitation of water resources, the use of appropriate techniques to optimize the allocation of water to different products can be a solution. Using deficit irrigation methods is an optimal strategy to deal with the water shortage crisis.

Methods: In the current study have been investigated the effects of deficit irrigation on water allocation between crops and regions, system profit, water exchange between regions. For this purpose, the Stackelberg-Nash-Cournot equilibrium model has been used with the aim of allocating water between different irrigated areas at the leader level and allocating water between different crops at the follower level in the condition that the water market is formed and emphasis on deficit irrigation. In this study, three scenarios of 5% deficit irrigation, 10% deficit irrigation and 15% deficit irrigation have been considered to deal with drought conditions in Sistan region.

Findings: The results showed that in the condition that full irrigation is done, the most water is allocated to the melon crop and the least amount of water to the wheat crop, and the profit in this case is 2.71×10^{11} IRR, which increases the profit by applying deficit irrigation scenarios. The results of this research can be used as assistants for network managers and responsible people for water allocation.

Citation: Ghaffari moghadam Z, Sardarshahraki A, Ghaffari moghadam A. application of game theory in optimal allocation of water resources in Sistan region under drought conditions with deficit irrigation strategy . Water Resources Engineering Journal. 2025; 18 (67): 21- 37

***Corresponding author:** Zahra Ghaffari moghadam

Address: Department of Agricultural Economics, Agriculture Institute, Research Institute of zabol, Zabol

Tell: +9854-32220690

Email: zahraghafari@uoz.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

One of the most important challenges in water resource management is the sharp increase in human water consumption alongside a reduction in water availability for agricultural production. Due to frequent droughts, increasing water allocation is usually not possible, and water volume becomes a limiting factor.

Materials and Methods

Given the limitations on water resources, employing appropriate techniques to optimize water allocation across different crops could be a viable solution. One such strategy is the use of deficit irrigation, which has proven to be an optimal method for addressing water shortages. This study investigates the effects of deficit irrigation on water allocation between crops and regions, system profitability, and water exchanges between regions. To achieve this, the Stackelberg-Nash-Cournot equilibrium model has been applied to allocate water among irrigated areas at the leadership level, and among different crops at the follower level, within the context of a water market and with an emphasis on deficit irrigation.

In this study, the model proposed by Kalerk was used to estimate functional changes in selected agricultural products under water stress conditions. Three deficit irrigation scenarios (5%, 10%, and 15%) were considered to address drought conditions in the Sistan region. In this framework, local managers are considered high-level decision makers (leaders) who distribute available water among various irrigated regions, represented by the decision variable X_i . Farmers, actin as low-level decision makers, allocate the water to crops within each region, denoted by ET_{aij} . The model also allows for water exchange between regions, whereby regions with excess water can sell surplus to others, generating income and increasing overall profits. The goal of farmers is to maximize economic benefits for their irrigated areas through the creation of a water market.

Findings

The results indicated that in full irrigation conditions, the melon crop received the highest water allocation, while wheat received the least. In this scenario, the total profit was 2.71×10^{11} IRR, with the water allocation inequality index being 0.0334, indicating equitable water distribution among the regions. With the implementation of deficit irrigation scenarios, profits increased and the water allocation inequality index decreased. The analysis revealed that the benefits from the stored water in deficit irrigation compensated for the reduction in crop yields. By saving water and reallocating it to high-yielding crops, the loss from reduced yields could be mitigated. Moreover, deficit irrigation reduced the relative decline in crop performance, as unmet water needs were minimized, and a higher percentage of water demands were fulfilled.

Conclusion

Although deficit irrigation is not currently practiced in the Sistan region for income generation through water sales, it presents a viable approach for optimizing water use in areas with crops that yield higher economic returns. The combined policy of deficit irrigation and water markets will likely enhance water exchanges between regions and increase economic profits. This policy is recommended as an effective tool for the sustainability of water resources in the Sistan region. The findings from this study can assist network managers and water allocation authorities in making informed decisions.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

The cost of this research was provided by the grant of Zabol Research Institute with the code IR-RIOZ-GR-0702.

Authors' contributions

Design and conceptualization: zahra ghaffari moghadam, Ali Sardarshahraki.

Methodology and data analysis: zahra ghaffari moghadam, Arash Ghaffari moghadam.

Supervision and final writing: zahra ghaffari moghadam, Ali Sardarshahraki.

مقاله پژوهشی

کاربرد تئوری بازی در تخصیص بهینه منابع آب منطقه سیستان تحت شرایط خشکسالی با راهبرد کم‌آبیاری

زهرا غفاری مقدم^{۱*}، علی سردار شهرکی^۲، آرش غفاری مقدم^۳

۱- استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، پژوهشکده کشاورزی، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران

۲- دانشیار اقتصاد کشاورزی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر، دانشگاه هافت، زاهدان، ایران

چکیده

مقدمه: با توجه به خشکسالی‌های فراوان، معمولاً امکان افزایش تخصیص آب وجود ندارد و بنابراین عامل محدودکننده حجم آب می‌باشد. با توجه به محدودیت منابع آب استفاده از تکنیک‌های مناسب جهت بهینه سازی تخصیص آب به محصولات مختلف می‌تواند راهگشا باشد. استفاده از روش‌های کم‌آبیاری راهبردی بهینه جهت مقابله با بحران کم‌آبی می‌باشد.

روش: در مطالعه حاضر اثرات کم‌آبیاری بر تخصیص آب بین محصولات و مناطق، سود سیستم، مبادله آب بین مناطق بررسی شده است. برای این منظور از مدل تعادلی استاکلبرگ- نش- کورنو با هدف تخصیص آب بین مناطق مختلف تحت آبیاری در سطح رهبر و تخصیص آب بین محصولات مختلف در سطح پیرو در شرایطی که بازار آب شکل بگیرد و تاکید بر کم‌آبیاری انجام شده است. در این مطالعه سه سناریو ۵ درصد کم‌آبیاری، ۱۰ درصد کم‌آبیاری و ۱۵ درصد کم‌آبیاری جهت مقابله با شرایط خشکسالی در منطقه سیستان در نظر گرفته شده است.

یافته‌ها: نتایج حاصل نشان داد در شرایطی که آبیاری کامل انجام شود بیشترین آب به محصول خربزه و کمترین آب به محصول گندم اختصاص یافته است و سود حاصل در این حالت $10^{11} \times 2/71$ ریال می‌باشد که با اعمال سناریوهای کم‌آبیاری میزان سود افزایش خواهد یافت. مقدار شاخص نابرابری تخصیص در آب بدست آمده در این سناریو $0/334$ می‌باشد که مقدار این شاخص نزدیک به صفر می‌باشد و نشان می‌دهد تخصیص آب بین مناطق عادلانه بوده است. در بین محصولات بیشترین آب به محصول خربزه و کمترین آب به محصول گندم تخصیص داده شده است. با اعمال سناریو کم‌آبیاری مقدار سود افزایش و مقدار شاخص نابرابری تخصیص در آب کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد در صورت استفاده از روش کم‌آبیاری، منفعت حاصل از مقدار آب ذخیره شده جبران کاهش عملکرد محصول را کرده و با استفاده از مقدار آب صرفه جویی می‌توان به محصولات پربازده آب بیشتری تخصیص داد و ضرر ناشی از کاهش عملکرد را جبران کرد. همچنین با اعمال سناریو کم‌آبیاری کاهش در عملکرد نسبی برای محصولات کاهش پیدا می‌کند. کم‌آبیاری سبب شده است که نیاز آبی تامین نشده محصولات کاهش یابد و درصد بیشتری از نیاز آبی آنها تامین شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۹

تاریخ داوری: ۱۴۰۳/۰۴/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۲

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.71632/wej.2025.1167684](https://doi.org/10.71632/wej.2025.1167684)

واژه‌های کلیدی:

استاکلبرگ، نیاز آبی، الگوریتم ژنتیک، تخصیص آب، بازار آب

* نویسنده مسئول: زهرا غفاری مقدم

نشانی: گروه اقتصاد کشاورزی، پژوهشکده کشاورزی، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران.

تلفن: ۰۵۴۳۲۲۲۰۶۹۰

پست الکترونیکی: zahraghafari@uoz.ac.ir

مقدمه

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در مدیریت منابع آب روبه‌رو شدن انسان با افزایش شدید تقاضای آب و کاهش عرضه آب در تولید محصولات کشاورزی می‌باشد (۱، ۲). بنابراین، رویکردهای برنامه ریزی موثری با توجه به مدیریت تقاضا برای بهبود مدیریت تولید محصولات کشاورزی بایستی تدوین گردد. با توجه به پیچیدگی سیستم برنامه‌ریزی تولید محصولات کشاورزی، محققان دائما در تلاشند تا روش‌های کاربردی‌تری برای برنامه‌ریزی موثر تولید محصولات کشاورزی ایجاد کنند. این روش‌ها بیشتر بر آب آبیاری، سطح زیرکشت و توزیع منبع مهم متمرکز است (۳). کمبود آب در بین مصرف‌کنندگان مختلف آب باعث ایجاد مناقشات و درگیری بین آنها در بخش‌های مختلف شده است بنابراین جهت کاهش چنین درگیری‌هایی می‌توان به تعیین و تخصیص عادلانه آب مبادرت ورزید. کلید تخصیص اولیه حقوق آب، پایبندی به اهداف متعدد منافع اقتصادی، برابری اجتماعی، کنترل ریسک و حفاظت از محیط زیست می‌باشد (۴، ۵). از جمله مطالعاتی که در زمینه مدیریت و تخصیص منابع آب در سالهای اخیر انجام شده است می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: فرانسيسكو و همکاران (۶) از مدل‌های برنامه ریزی ریاضی، زنگ و همکاران (۷) از برنامه‌ریزی مشترک چند مرحله‌ای بازه‌ای - احتمالاتی و روش شبیه سازی مونت کارلو، ایگریو و همکاران (۸) و یائو و همکاران (۹) از مدل استاکلیبرگ نش - کورنو، آلارکون و ژوانا (۱۰) از مدل‌های بهینه سازی در قالب بازار آب، جهت تخصیص منابع آب استفاده نمودند. که در همه این مطالعات به اثر بخشی بازار آب در تخصیص منابع آب اشاره شده است (۱۱-۱۳). روشهای شبیه سازی (۱۴، ۱۵)، مدل‌های شبیه سازی و بهینه سازی توام (۱۶-۱۸) و تئوری بازی‌ها (۱۹-۲۱) اشاره نمود.

تخصیص آب صرفا بر اساس سطوح کشت و بدون توجه به نوع محصولات کشت شده، واکنش محصولات به کم‌آبی و میزان عملکرد آن انجام می‌گیرد. اگرچه کمبود آبیاری عملکرد محصول را کاهش می‌دهد، با تخصیص بهینه آب به مصارف داخل و خارج از مزرعه، کشاورزان ممکن است درآمد خالص خود را از ترکیبی از تولید محصول و فروش آب افزایش دهند (۲۲-۲۴). برای به حداکثر رساندن درآمد خالص مزرعه در این حالت، کشاورزان باید برای هر کاربری به طور بهینه آب را تخصیص دهند. بنابراین هنگامی که تامین آب، گران یا ناکافی است تا نیازهای آبی کامل محصول را برآورده کند، کم آبیاری ممکن است با کاهش استفاده از آب گران قیمت یا آبیاری زمین بیشتر با منابع آبیاری محدود، درآمد خالص را به حداکثر برساند (۲۵). یکی از استراتژی‌های بهینه‌سازی کم آبیاری می‌باشد که در این استراتژی گیاه به صورت هدفمند درجاتی از کم‌آبی و کاهش عملکرد را محتمل می‌شود. هدف اصلی و اساسی در کم‌آبیاری افزایش کارایی مصرف آب می‌باشد که با استفاده از کاهش میزان آب مورد نیاز در هر آبیاری یا حذف آبیاری‌های فاقد بهره‌وری امکان پذیر می‌باشد. چنانچه عرضه آب محدود باشد و یا هزینه تامین آب بالا باشد، سطح بهینه اقتصادی آبیاری کمتر از میزان آبی است که گیاه جهت دستیابی به حداکثر عملکرد (آبیاری کامل) نیاز دارد. این تکنیک کم آبیاری به طور گسترده در نواحی مواجه با کم آبی، مورد استفاده قرار گرفته است (۲۶). امروزه

با استفاده از تکنیک کم‌آبیاری می‌توان عملکرد قابل قبول و اقتصادی را با حداقل آب مصرفی داشت (۲۷) و از آن به عنوان یک استراتژی درآمدزا اقتصادی در وضعیت بحران آب، راهکار مصرف آب کمتر با هدف حداکثر استفاده از واحد حجم آب مصرفی و همچنین ذخیره آب صرفه‌جویی برای توسعه کشاورزی و دیگر بخشهای مصرف آب مطرح نمود (۲۸). در این مطالعه هدف، تخصیص بهینه آب بین مناطق و محصولات مختلف در شرایط خشکسالی و کم‌آبی با تاکید بر سیاست کم‌آبیاری می‌باشد از جمله مطالعاتی که در این زمینه انجام شده است می‌توان به مطالعات شیرشاهی و همکاران (۲۹) در رابطه با بهینه سازی سطح زیر کشت در سناریوهای مختلف آبیاری، محمدخانی و همکاران (۳۰) بهینه سازی تخصیص آب در شرایط تنش آبی، پانده و اوماماهش (۳۱) الگوی کشت و تخصیص بهینه آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک در شرایط کم‌آبیاری اشاره نمود. محمودزاده ورزی و همکاران (۲۴) در مطالعه خود مدلی برای بهینه سازی تخصیص آب برای یک مزرعه و محصول با استفاده از توابع تولید آب محصول مفهوم کم آبیاری ارائه نمودند. نتایج مطالعه نشان داد زمانی که قیمت محصول نسبت به قیمت اجاره آب پایین است، اجاره تمام آب موجود و آیش یا کاشت محصولات بدون آبیاری بیشترین درآمد را به همراه دارد. در منطقه سیستان سطوح قابل کشت کشاورزی مطابق مطالعات جامع منابع آب، ۱۳۵ هزار هکتار است و با توجه به الگوی کشت منطقه سرانه آب مصرفی در بخش کشاورزی به طور میانگین بیش از ۸۵۰۰ مترمکعب در هکتار می‌باشد (۳۲). شرایط آب و هوایی منطقه سیستان و وابستگی کامل به رودخانه هیرمند و اقدامات کشور افغانستان در مهار آب رودخانه هیرمند، باعث بروز مخاطرات شدید آبی و تاثیرات منفی در اشتغال، اقتصاد، محیط زیست و کشاورزی شده است و باعث ایجاد مشکلات فراوانی در مسئله مدیریت آب در این منطقه شده است (۳۲). بنابراین بررسی وضعیت آب در منطقه سیستان به عنوان مسئله‌ای استراتژیک و حیاتی از اهمیت بالایی برخوردار است. میزان آب ورودی رودخانه هیرمند به منطقه سیستان و آب تخصیص یافته به بخش کشاورزی در طی سالهای اخیر روند کاهشی داشته است و باعث کاهش سطح زیر کشت محصولات کشاورزی شده است به‌طوری‌که در صورت ادامه این روند ضمن ایجاد مشکلات اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی وقایعی نظیر مهاجرت، افزایش سطح فقر، خالی شدن روستاها از سکنه، شکل‌گیری اعتراض‌ها و تنش‌های منطقه‌ای بر سر منابع آب، نابودی کشاورزی، مرگ گونه‌های جانوری و گیاهی، نابودی محیط‌زیست، بیابان‌زائی و گرد و غبار از مصادیق بحران آبی در بخش کشاورزی منطقه سیستان می‌باشد. لذا با توجه به بحران آبی و خشکسالی‌های پی در پی که منطقه سیستان سال‌های متمادی با آن گرفتار است. این مطالعه به دنبال آن است با استفاده از مدل استاکلیبرگ - نش - کورنو و تاکید بر بازار آب مقدار آب موجود در بخش کشاورزی در شرایط خشکسالی در سه سناریو کم‌آبیاری بین مناطق و محصولات مختلف کشاورزی تخصیص داده شود. در مطالعات گذشته به تخصیص آب در شرایطی که کم آبیاری و بازار آب به طور همزمان اعمال شود اشاره نشده است

مواد و روش‌ها

مدرن برآورد تبخیر و تعرق و عکس‌العمل محصولات به تنش آبی می‌باشد. به این ترتیب در مطالعه جاری به منظور اعمال کم آبیاری و تعیین استراتژی کم آبیاری برای گیاه از رابطه در فضای سایر محدودیت‌ها و هدف‌های مدل استفاده شد (۳۵-۳۷).

این الگو با استفاده از روابط زیر تعریف می‌شود:

در این رابطه ET_0 میزان تبخیر و تعرق بالقوه سطوح گیاهی مرجع و K_y ضریب گیاهی است. تاثیر کاهش آب بر روی عملکرد محصولات بر اساس تابع تولید زیر محاسبه می‌شود:

$$\left[1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right] = K_y \left[1 - \frac{ET_a}{ET_p}\right] \quad (1)$$

در رابطه بالا Y_a عملکرد واقعی، Y_m عملکرد پتانسیل، ET_a تبخیر و تعرق واقعی، ET_p تبخیر و تعرق پتانسیل، $\frac{Y_a}{Y_m}$ عملکرد نسبی محصولات و K_y ضریب حساسیت گیاه به تنش آبی می‌باشد (۳۵-۳۷).

مدل تعادلی استاکلبرگ-نش-کورنو

بر مبنای چارچوب مدل تعادلی استاکلبرگ-نش-کورنو که یکی از انواع مدل‌های تئوری بازی می‌باشد، دو نهاد تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده است. مدیران محلی به عنوان تصمیم‌گیرندگان سطح بالا (رهبر) که آب موجود در بخش کشاورزی را بین نواحی مختلف تحت آبیاری توزیع می‌کنند و با متغیر تصمیم X_i نشان داده می‌شود. سپس کشاورزان به عنوان تصمیم‌گیرندگان سطح پایین آب تخصیص داده شده به هر منطقه را به محصولات کشاورزی تخصیص می‌دهند و با ET_{aij} نشان داده می‌شود (۸). در مدل پیشنهادی مطالعه امکان مبادله آب بین مناطق وجود دارد. به طوریکه مناطقی که آب مازاد دارند می‌توانند این آب اضافه را به مناطق دیگر بفروشند و از این طریق امکان ایجاد درآمد و افزایش سود برای آنها وجود و با BSW_i^+ نشان داده می‌شود (۳۸). هدف پیروان این است که با ایجاد بازار آب، مزایای اقتصادی بیشتری را برای مناطق آبیاری خودشان بدست آورند.

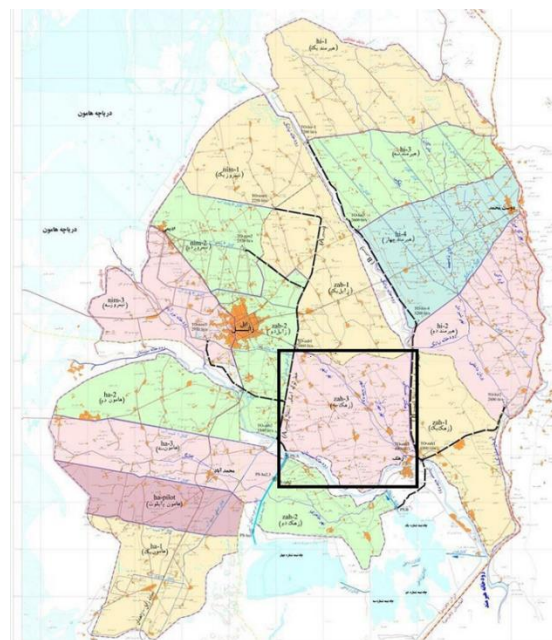
تصمیم‌گیرندگان سطح بالا (رهبر)

تصمیم‌گیرندگان سطح بالا تعیین می‌کند چه مقدار حق آبه به هر یک از مناطق آبیاری اختصاص یابد. هدف رهبر در این مطالعه این است که بر اساس اصل برابری، نابرابری در تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی در هر ناحیه را طبق معادله ۳ حداقل کنند (۸).

$$\min E = \sum_{i=1}^m \sum_{j=2}^m \left| \frac{X_i A_i}{R_i} - \frac{X_j A_j}{R_j} \right| \quad (2)$$

E شاخص نابرابری در تخصیص آب را نشان می‌دهد هر چه E به صفر نزدیکتر باشد به این معنی است که تخصیص آب عادلانه‌تر خواهد بود و هر چه مقدار E به یک نزدیک شود نشان می‌دهد تخصیص آب بین مناطق ناعادلانه‌تر می‌باشد.

منطقه سیستان با وسعت بیش از ۲۵۰۰ کیلومتر مربع و طول جغرافیایی ۶۱ درجه و ۳۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۵۵ دقیقه شمالی، نسبت به نیم روز گرینویچ با ارتفاع بیش از ۴۰۰ متر از سطح دریا در شرق ایران و در شمال استان سیستان و بلوچستان قرار گرفته است. منطقه سیستان با متوسط بارندگی ۵۰ تا ۵۵ میلی‌متر، حدود ۷ درصد از متوسط بارندگی جهان را دارد. میزان تبخیر سالانه آن در حدود ۴۸۰۰ میلی‌متر گزارش شده است. متوسط حداکثر درجه حرارت متوسط حداقل درجه حرارت در این منطقه به ترتیب ۸/۵ و ۵ درجه سانتی‌گراد است. بادهای ۱۲۰ روزه از مهم‌ترین ویژگی‌های آب و هوایی سیستان می‌باشد که سرعت آن در سالهای خشکسالی به بیش از ۱۲۰ کیلومتر در ساعت نیز رسیده است این بادهای از اواسط خرداد ماه شروع و تا اوایل پاییز ادامه دارد و در سالهای اخیر به بیش از ۱۲۰ روز هم رسیده است. انتقال شن و ماسه، تشدید فرسایش و افزایش میزان تخییراز عواقب بادهای ۱۲۰ روزه می‌باشد (۳۳).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه سیستان

افزایش کارایی مصرف آب از طریق کاهش میزان مصرف آب محصولات در اثر اعمال تنش‌های آبی (سناریوهای کم آبیاری) هدف اصلی به کارگیری روش کم آبیاری در سطح اراضی می‌باشد که روی میزان عملکرد محصولات تاثیر می‌گذارد (۳۴). در سالهای اخیر، جهت بررسی مدیریت آبیاری تحت شرایط کم آبی در سطح مزارع زراعی مدل‌های متعددی توسعه یافته‌اند. در این راستا، الگوی پیشنهادی کالبرک که توسط بخش توسعه آب و خاک فائو توسعه یافته و امروزه به عنوان مدل پیش‌فرض در نرم‌افزار کروپوات لحاظ شده است، یکی از روشهای کاربردی جهت محاسبه کاهش عملکرد بر پایه روش‌های

با توجه به توابع هدف و محدودیت‌ها مدل کلی استاکبرگ-نش-کرونو را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\min E = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left| \frac{X_i A_{ij}}{R_i} - \frac{X_i A_{ij}}{R_i} \right|$$

$$R_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \cdot Y_{aij} \cdot A_{ij} - \gamma X_i A_i + c_i BSW_i^- - c_i BSW_i^+, i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^m X_i A_i \leq S$$

$$\max \sum_{i=1}^m R_i$$

$$\sum_{j=1}^n ET_{aij} A_{ij} \leq X_i A_i + \tau_i \cdot BSW_i^+ + (\tau_i - 1) \cdot BSW_i^-, i = 1, 2, \dots, n$$

$$\tau_i = \begin{cases} 0, X_i \geq \sum_{j=1}^n (ET_{pij} A_{ij}) \\ 1, X_i < \sum_{j=1}^n (ET_{pij} A_{ij}) \end{cases} \quad (11)$$

$$BSW_i^- \leq X_i A_i - \sum_{j=1}^n (ET_{aij} A_{ij}), i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^n \{BSW_i^- - BSW_i^+\} = 0, i = 1, 2, \dots, m.$$

$$\left[1 - \frac{Y_{aij}}{Y_{pij}} \right] = K_y \left[1 - \frac{ET_{aij}}{ET_{pij}} \right]$$

$$ET_{mij} \leq ET_{aij} \leq ET_{pij}$$

از آنجائیکه مدل‌های برنامه ریزی دو سطحی با چندین پیرو یک مسئله سخت چند جمله ای غیر قطعی و غیر محدب می‌باشد که امکان بافتن جواب بهینه برای آن مشکل است که در این مطالعه از یک فرایند فراابتکاری استفاده شده است که ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و روش برنامه ریزی فازی می‌باشد (۸). جهت حل مدل از یک فرایند فراابتکاری که ترکیبی از الگوریتم ژنتیک پویا و برنامه‌ریزی فازی است استفاده شده است (۸). برای این منظور ابتدا هر یک از توابع هدف را با توجه به محدودیت‌های متناظر با خودش مقادیر حداقل و حداکثر آنها را بدست آورده سپس با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی توابع عضویت مربوط به هر یک را تشکیل داده و به عنوان تابع برازندگی وارد الگوریتم ژنتیک می‌کنیم.

$$M^U = \begin{cases} 0, F \geq F_{\max} \\ \frac{F_{\max} - F}{F_{\max} - F_{\min}}, F_{\min} \leq F \\ 1, F \leq F_{\min} \end{cases} \quad (12)$$

$$M^L = \begin{cases} 0, f \leq f_{\min} \\ \frac{f - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}, f_{\min} \leq f \\ 1, f \geq f_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

در این مطالعه یک الگوریتم ژنتیک جدید برای حل مسئله پیشنهاد شده است که می‌توان آن را الگوریتم ژنتیک پویا نامید که در این الگوریتم عملکرد جهش برای سطح پایین به صورت پویا تغییر می‌کند. که با معرفی این الگوریتم جواب‌های بهتری برای مدل حاصل شده است. که در این الگوریتم در تکرارهای بالاتر میزان حداکثر جهش متغیر γ کمتر

مقدار تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی در هر منطقه آباری می‌باشد. R_i تابع سود اقتصادی می‌باشد که با استفاده از رابطه ۴ تعریف می‌شود:

$$R_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \cdot Y_{aij} \cdot A_{ij} - \gamma X_i A_i + c_i BSW_i^- - c_i BSW_i^+, i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

محدودیت‌های سطح بالا

$$\sum_{i=1}^m X_i A_i \leq S \quad (4)$$

تصمیم گیرندگان سطح پایین (پیرو)

هدف تصمیم‌گیرندگان پایین که کشاورزان هر منطقه هستند حداکثر کردن سود اقتصادی می‌باشد که با استفاده از رابطه ۶ تعریف می‌شود:

$$\max \sum_{i=1}^m R_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \cdot Y_{aij} \cdot A_{ij} - \gamma X_i A_i + c_i BSW_i^- - c_i BSW_i^+, i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

محدودیت‌های مدل در سطح پایین برابر است با:

$$\sum_{j=1}^n ET_{aij} A_{ij} \leq X_i A_i + \tau_i \cdot BSW_i^+ + (\tau_i - 1) \cdot BSW_i^-, i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

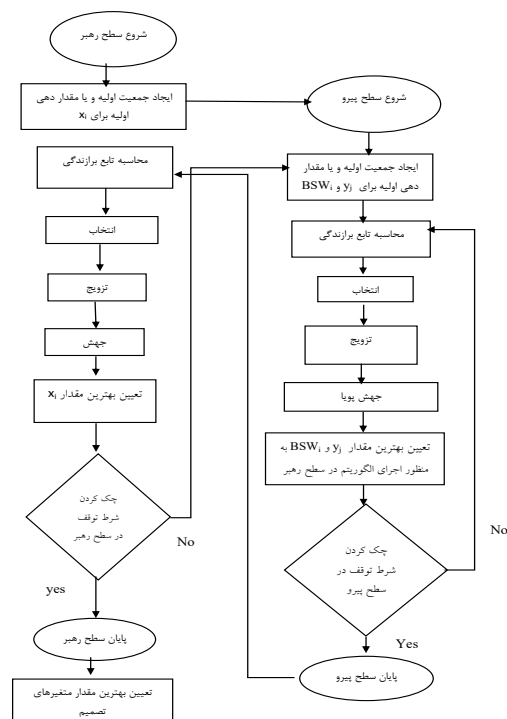
$$\tau_i = \begin{cases} 0, X_i \geq \sum_{j=1}^n (ET_{pij} A_{ij}) \\ 1, X_i < \sum_{j=1}^n (ET_{pij} A_{ij}) \end{cases} \quad (7)$$

$$BSW_i^- \leq X_i A_i - \sum_{j=1}^n (ET_{aij} A_{ij}), i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n \{BSW_i^- - BSW_i^+\} = 0, i = 1, 2, \dots, m. \quad (9)$$

$$ET_{mij} \leq ET_{aij} \leq ET_{pij} \quad (10)$$

خواهد شد تا y مقدار کمتری تغییر کند. این الگوریتم از همگرایی زودرسی که در الگوریتم ژنتیک ساده وجود دارد جلوگیری می‌کند. در شکل فلوجارت این الگوریتم آورده شده است



شکل ۲- فلوجارت روش الگوریتم ژنتیک برای مدل استاکلبرگ-نش-کورنو

جدول ۱- ضریب حساسیت و نیاز آبی گیاهان در شرایط مختلف

نیاز آبی در شرایط ۱۵ درصد کم آبیاری	نیاز آبی در شرایط ۱۰ درصد کم آبیاری	نیاز آبی در شرایط ۵ درصد کم آبیاری	نیاز آبی در شرایط آبیاری کامل	ضریب حساسیت گیاه به تنش آبی	گندم
۴۵۵۶	۴۸۲۴	۵۰۹۲	۵۳۶۰	۰/۹	جو
۴۲۵۰	۴۵۰۰	۴۷۵۰	۵۰۰۰	۰/۹۵	عدس
۲۹۲۴	۳۰۹۶	۳۲۶۸	۳۴۴۰	۰/۹	پياز
۶۳۶۶/۵	۶۷۴۱	۷۱۱۵/۵	۷۴۹۰	۰/۸	خربزه
۴۴۲۰	۴۶۸۰	۴۹۴۰	۵۲۰۰	۰/۸۵	هندوانه
۶۲۳۰/۵	۶۵۹۷	۶۹۶۳/۵	۷۳۳۰	۰/۸۵	یونجه
۱۹۰۷۴	۲۰۱۹۶	۲۱۳۱۸	۲۲۴۴۰	۰/۸۵	انگور
۹۳۵۰	۹۹۰۰	۱۰۴۵۰	۱۱۰۰۰	۰/۷۵	

میزان آب ورودی به منطقه سیستان در شرایط خشکسالی با استفاده از روش داده‌های تاریخی و شبیه‌سازی مونت کارلو ۲۶۰ میلیون متر مکعب بدست آمد که با توجه به اراضی قابل کشت در منطقه آب بسیار کمی

نتایج

می‌باشد بنابراین سعی بر این است که مدلی توسعه داده شود که علاوه بر حفظ حداکثری اراضی قابل کشت و ماندگاری مردم در منطقه آب به گونه ای بین محصولات و مناطق مختلف تخصیص داده شود که حداکثر سود اقتصادی از آن حاصل شود. در این مطالعه ۱۶ منطقه تحت آبیاری (بر اساس تقسیم بندی طرح ۴۶ هزار هکتاری) در نظر گرفته شده است و محصولات منتخب نیز از بین محصولاتی انتخاب شده است که بیشترین سطح زیر کشت در طی سالهای اخیر در منطقه داشته

و کشاورزان تمایل زیادی به کشت این محصولات داشتند. برای بدست آوردن سطح زیرکشت محصولات مختلف در مناطق مختلف تحت آبیاری از نتایج مدل نرلاو ارائه شده توسط غفاری مقدم و همکاران (۳۹) استفاده شده است و سطح زیر کشت مربوط به هر منطقه با استفاده از این مدل پیش‌بینی گردید که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- پیش‌بینی سطح زیر کشت محصولات با استفاده از مدل نرلاو (هکتار)

گندم	جو	عدس	پیاز	خریزه	هندوانه	یونجه	انگور	جمع کل
۱۶۳/۱۷	۱۷۱۸/۶	۸۹/۱۵	۱۲۹/۴	۲۰۴۲/۵	۲۰۹۱/۴	۳۴۶	۲۴۹	۷۶۳۹
۱۶۴	۱۷۰۷/۵	۸۹	۱۲۹	۲۰۳۰	۲۸۸۶/۵	۳۴۳	۲۴۷/۴	۷۵۹۶/۶
۱۵۲/۶	۱۸۳۵/۶	۹۳	۱۳۴	۲۱۷۴/۶	۳۰۵۶	۳۷۷	۲۶۷/۵	۸۰۹۰
۱۵۶/۶	۱۷۹۰	۹۱/۴	۱۳۲	۲۱۲۳	۲۹۹۶	۳۶۵	۲۶۰	۷۹۱۴
۱۶۱/۶	۹۶۷	۴۴/۶	۵۹	۶۵۵/۴	۱۳۳۴	۲۹۹	۲۱۲	۳۷۳۲
۱۵۳/۳	۱۰۱۹/۳	۴۶/۲	۶۰/۵	۶۸۹	۱۳۹۰/۶	۳۲۰	۲۲۴	۳۹۰۳
۱۷۶	۸۹۰	۴۲/۴	۵۶	۶۰۵/۵	۱۲۴۹	۲۶۸/۵	۱۹۳/۶	۳۴۸۱/۶
۱۵۱/۴	۱۰۳۱/۸	۴۶/۵	۶۱	۶۹۷	۱۴۰۴	۳۲۵	۲۲۷	۳۹۴۳/۶
۱۳۵	۱۳۰۶	۷۱/۳	۶۳	۸۵۴	۱۴۹۶	۳۶۶	۲۳۷	۴۵۲۸/۶
۱۵۸	۱۱۱۷	۶۴/۶	۵۸	۷۳۶	۱۳۳۲	۲۹۹	۲۰۰	۳۹۵۴/۷
۱۴۹/۳	۱۱۸۳/۶	۶۷	۶۰	۷۷۸	۱۳۸۴	۳۲۲	۲۱۳	۴۱۵۶/۴
۱۳۷/۵	۱۱۳۳/۸	۹۳/۴	۶۴	۷۶۲	۱۵۱۳	۳۶۷	۲۵۱/۵	۴۲۷۸
۱۸۴/۶	۸۴۹	۴۱/۲	۵۵	۵۷۹	۱۲۰۳/۵	۲۵۳	۱۸۴	۳۳۴۸/۵
۲۳۲	۹۳۵	۴۶/۴	۷۴	۷۱۲	۹۹۲	۲۶۹	۲۸۱	۳۵۴۳
۲۲۵	۹۶۴	۴۷/۳	۷۵/۴	۷۳۳/۴	۱۰۱۶/۵	۲۸۰	۲۹۰	۳۶۳۲/۵
۱۲۵/۵	۱۷۱۶	۶۸	۱۰۲/۴	۱۲۶۹	۱۶۰۳	۵۸۹	۵۴۱	۶۰۱۴
۲۶۲۵/۵۷	۲۰۱۶۴/۲	۲۳۱۸۵۸	۵۰۵۹۶/۴	۱۶۵۴۴۰/۳	۴۵۲۰۶۵/۶	۵۳۸۸/۵	۴۰۷۸	۷۱۴۵۸۳۲

ماخذ: (۳۹)

با استفاده از مدل عرضه نرلاو الگوی کشت برای هر یک از نواحی تحت بررسی در منطقه سیستان پیش بینی شد که جمع کل سطح زیر کشت در منطقه سیستان ۷۹۷۵۶ هکتار می‌باشد (۳۹).

با در نظر گرفتن شرایط خشکسالی در منطقه و تخصیص ۲۶۰ میلیون مترمکعب آب از مخازن چاه نیمه به این منطقه و راندمان آبیاری ۳۵ درصد مقدار آب موجود با استفاده از مدل تعادلی استاکلبرگ-نش-کورنو بین مناطق و محصولات مختلف تخصیص داده شد که نتایج آن در ادامه آورده شده است.

تخصیص آب بین مناطق و محصولات

جدول ۳- مقدار آب تخصیص یافته به هر منطقه و محصول در شرایط آبیاری کامل (هزار متر مکعب)

مناطق	میزان آب تخصیصی به منطقه	گندم	جو	عدس	پیاز	خریزه	هندوانه	یونجه	انگور
هیرمند یک	۱۷۳۶۳/۸۷	۲۰۵	۱۴۶۰	۴۵۶	۲۷۶۹	۶۸۴۱	۲۹۴۱	۶۶۶	۶۷۴
هیرمند دو	۱۴۲۴۲/۴۷	۱۵۴	۱۷۵۸	۴۹	۲۴۷۴	۷۶۵۲	۳۳۶۱	۶۳۱	۱۲۰۸
هیرمند سه	۱۸۸۷۲/۳	۱۲۹۸	۱۶۶۷	۲۴۰	۲۸۶۷	۷۷۳۲	۳۳۲۵	۹۰۰	۵۰۶
هیرمند چهار	۱۹۵۸۸	۱۴۷	۱۴۴۰	۲۴۹	۲۷۵۴	۶۵۹۲	۲۸۷۶	۶۲۵	۵۷۳
هامون یک	۱۴۳۶۲/۶	۱۴۸	۸۰۲	۲۵	۱۱۵۲	۹۲۱۵	۲۰۳۶	۲۴۵۲	۶۷۴
هامون دو	۱۵۵۴۱	۷۵۱	۱۰۶۳	۳۳۷	۱۲۵۰	۸۸۹۲	۱۷۵۱	۲۴۰۳	۱۶۵۲

هامون سه	۱۳۱۳۹	۴۱۳	۱۶۲۴	۱۶۳	۱۲۰۵	۷۸۴۷	۳۰۰۱	۴۶۰	۶۷۲
هامون چهار	۱۵۵۵۱/۶	۱۳۹	۷۶۱	۲۶	۱۲۹۵	۸۷۵۳	۳۷۲۷	۱۸۸۴	۹۶۶
نیمروز یک	۱۷۹۴۵	۳۳۱	۱۰۴۵	۸۰	۱۲۲۳	۸۱۲۲	۱۴۹۸	۱۱۵۴	۳۳۹۷
نیمروز دو	۱۳۲۹۰/۵	۶۰۰	۱۳۰۷	۶۲۱	۱۱۰۰	۵۷۲۳	۱۳۷۶	۵۰۹۶	۱۸۳۲
نیمروز سه	۱۸۵۲۵	۱۳۷	۱۰۵۸	۷۰	۱۲۸۳	۷۸۷۵	۱۳۵۵	۱۲۵۳	۶۱۱
زابل یک	۱۸۶۹۴	۴۰۹	۸۳۶	۱۵۹	۱۳۷۱	۱۰۵۲۳	۲۱۰۰	۷۷۰	۱۵۷۶
زابل دو	۱۵۸۷۷	۳۹۲	۱۰۰۷	۲۳	۱۱۷۵	۸۶۰۰	۱۸۲۱	۴۳۳	۳۲۹
زهک یک	۱۳۹۳۰/۷	۱۰۶۶	۹۰۰	۲۹۱	۱۳۹۶	۹۳۰۸	۹۵۳	۵۸۱	۸۸۱
زهک دو	۱۴۴۶۴/۶	۲۰۷	۱۱۴۱	۲۴۱	۱۶۱۳	۸۶۴۹	۱۶۳۲	۴۹۵	۱۷۸۱
زهک سه	۱۸۴۲۶/۶	۴۷۱	۱۶۵۳	۶۶۸	۱۹۸۸	۵۲۷۹	۱۵۳۹	۱۷۴۸	۱۰۰۹
جمع کل	۲۶۰۰۰۰	۶۸۶۸	۱۹۵۲۲	۳۶۹۸	۲۶۹۱۵	۱۲۷۶۰۳	۳۵۲۹۲	۲۱۵۵۱	۱۸۳۴۱

ماخذ: یافته‌های تحقیق

یکی از راههای مقابله با شرایط خشکسالی، کم‌آبایی می باشد لذا در این مطالعه برای مقابله با شرایط کم آبی سه سناریو کم آبیاری شامل ۵ درصد کم‌آبیاری، ۱۰ درصد کم آبیاری و ۱۵ درصد کم‌آبیاری در نظر گرفته شد. در این حالت نیاز آبی محصول به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد کاهش داده و در هر یک از این حالت‌ها میزان سود، آب تخصیص داده‌شده به تفکیک برای هر شهرستان، عملکرد نسبی، نیاز آبی تامین شده، حجم آب مبادله شده محاسبه و با شرایط آبیاری کامل مقایسه شدند. نتایج مربوط به اعمال سناریوها در جداول ۴، ۵ و ۶ آورده شده است

آبیاری کامل به شرایطی گفته می‌شود که هدف تامین نیاز آبی گیاه به طور کامل باشد با در نظر گرفتن نیاز آبی گیاه، مقدار آب موجود در بخش کشاورزی که ۲۶۰ میلیون مترمکعب برآورد شده بود، ابتدا بین مناطق و سپس بین محصولات مختلف تخصیص داده شد. در بین مناطق بیشترین آب به منطقه هیرمند ۴ و کمترین آب به نیمروز ۲ تخصیص داده شده است. در بین محصولات نیز بیشترین آب به خربزه و هندوانه به دلیل بازدهی بالا و نیاز آبی پایین این محصولات و کمترین آب به گندم به دلیل بازدهی پایین و نیاز آبی بالا تخصیص داده شده است.

جدول ۴- مقدار آب تخصیص یافته به هر منطقه و محصول در شرایط ۵ درصد کم آبیاری (هزار متر مکعب)

مناطق	میزان آب تخصیصی به منطقه	میزان آب تخصیصی به محصول						میزان آب	مناطق
		گندم	جو	عدس	پياز	خربزه	هندوانه	یونجه	انگور
هیرمند یک	۱۸۹۲۳	۸۳۶	۱۴۲۳	۲۶۰	۲۲۵۹	۴۱۸۱	۳۲۸۳	۱۳۳۱	۹۹۴
هیرمند دو	۱۷۷۴۱	۶۱۴	۴۱۴۰	۷۹	۲۳۵۲	۶۳۱۲	۳۵۳۲	۲۶۶۱	۵۷۵
هیرمند سه	۱۸۳۴۴	۱۵۴	۱۸۰۵	۱۱۵	۲۶۳۸	۶۲۸۳	۳۲۹۹	۶۶۴	۵۸۰
هیرمند چهار	۱۷۳۰۲	۹۳۷	۲۳۸۲	۴۹۴	۲۶۸۸	۶۷۴۵	۳۰۸۱	۶۲۵	۲۱۹۳
هامون یک	۱۲۵۴۰	۱۴۸	۷۹۶	۱۶۰	۱۱۹۷	۷۴۷۳	۱۳۳۳	۱۱۵۲	۴۶۶
هامون دو	۱۴۹۱۰/۵	۱۴۱	۱۲۰۵	۲۸۲	۱۲۳۰	۷۴۰۶	۱۸۹۶	۵۴۸	۲۶۷۷
هامون سه	۱۴۲۲۵/۸	۲۴۳	۷۲۴	۳۱۷	۱۱۴۵	۷۸۲۶	۲۸۸۶	۷۲۱	۳۸۵
هامون چهار	۱۴۷۲۶/۸	۳۶۵	۸۱۶	۱۳۳	۱۰۲۹	۸۷۷۸	۲۰۸۰	۲۱۱۵	۳۷۷
نیمروز یک	۱۷۱۰۶	۸۴۵	۱۱۳۶	۶۵۱	۸۶۷	۶۹۷۹	۶۲۰۴	۸۳۸۸	۱۳۴۵
نیمروز دو	۱۷۳۰۹	۴۸۳	۱۳۱۷	۵۶	۱۱۳۸	۸۷۰۸	۱۴۷۲	۵۱۲	۱۴۳۴
نیمروز سه	۱۶۹۵۴	۱۳۷	۹۲۷	۳۷	۱۲۱۸	۷۴۵۷	۴۴۶۶	۲۸۳۹	۱۳۹۶
زابل یک	۱۷۲۵۰	۳۵۲	۹۸۴	۱۴۰	۱۳۰۲	۹۱۹۲	۱۴۸۵	۶۲۹	۵۸۵
زابل دو	۱۴۴۴۸	۲۸۶	۷۹۶	۷۴	۱۰۹۶	۸۰۴۷	۱۴۹۹	۱۷۳۵	۳۲۳
زهک یک	۱۴۴۳۹	۱۷۷۲	۱۵۵۲	۱۸۰	۱۱۲۵	۶۶۵۸	۹۵۳	۴۶۲	۴۶۶
زهک دو	۱۶۷۶۶	۴۳۲	۱۱۷۱	۴۴۱	۱۵۳۲	۸۰۴۸	۱۰۲۳	۲۲۷۲	۴۸۷
زهک سه	۱۷۰۱۸	۴۵۹	۱۵۷۰	۲۸۳	۱۹۹۶	۴۹۸۵	۱۹۵۱	۱۹۵۵	۲۱۰۹
جمع کل	۲۶۰۰۰۰	۸۲۰۵	۲۲۷۴۳	۳۷۰۰	۲۴۸۱۴	۱۱۵۰۷۷	۴۰۴۴۲	۲۸۶۰۹	۱۶۳۹۰

ماخذ: یافته‌های تحقیق

جدول ۵- مقدار آب تخصیص یافته به هر منطقه و محصول در شرایط 10 درصد کم آبیاری (هزار متر مکعب)

مناطق	میزان آب	میزان آب تخصیصی به محصول منطقه	گندم	جو	عدس	پیاز	خریزه	هندوانه	یونجه	انگور
هیرمند یک	۱۴۹۶۲	۱۵۵۳	۱۴۰۷	۷۵	۲۴۹۲	۴۶۸۵	۳۱۶۰	۱۴۳۶	۹۰۱	
هیرمند دو	۱۸۸۵۳	۶۹۳	۳۲۴۸	۴۶۲	۲۴۱۱	۵۹۲۹	۳۳۶۷	۷۵۳	۷۹۱	
هیرمند سه	۱۶۳۸۳	۲۶۰	۱۸۴۲	۵۰۹	۲۵۸۱	۴۰۶۳	۲۹۳۴	۳۵۲۰	۴۴۴	
هیرمند چهار	۱۵۰۰۷	۱۳۶۸	۱۴۴۵	۱۴۴	۲۵۴۶	۳۸۰۷	۳۳۹۲	۱۳۶۷	۴۳۲	
هامون یک	۱۲۵۴۶	۱۱۴۵	۷۴۵	۱۲۱	۱۱۳۴	۵۳۶۸	۱۳۴۵	۶۹۸	۱۲۳۱	
هامون دو	۱۵۸۷۷	۱۴۱	۱۴۱۴	۲۶	۹۶۶	۷۸۴۳	۳۰۴۶	۱۱۵۶	۶۷۰	
هامون سه	۱۴۰۹۰	۳۵۹	۱۴۶۳	۳۱۸	۹۲۹	۸۰۵۴	۱۸۰۶	۵۰۱	۶۴۰	
هامون چهار	۱۳۰۵۵/۸	۸۷۴	۹۷۸	۳۷۵	۱۱۷۳	۵۲۳۲	۳۸۹۴	۷۷۰	۶۲۵	
نیمروز یک	۱۹۴۴۹	۵۲۲	۱۱۷۹	۱۵۰	۱۰۲۴	۸۹۰۷	۱۸۴۲	۶۲۷	۳۹۳	
نیمروز دو	۱۸۱۰۸	۲۸۴	۱۲۵۹	۲۰۰	۱۱۱۹	۷۰۱۵	۳۰۱۰	۹۳۲	۳۳۲	
نیمروز سه	۱۹۳۱۸	۹۹۱	۱۰۴۵	۳۷	۱۰۲۹	۹۱۵۱	۲۶۴۹	۵۵۲	۱۳۴۰	
زابل یک	۱۷۰۶۴	۳۸۱	۱۳۲۹	۱۷۳	۱۱۷۰	۸۸۹۶	۴۲۰۳	۶۷۹	۴۱۷	
زابل دو	۱۵۸۷۱	۲۹۳	۶۰۰۳	۱۳۷	۹۹۳	۷۴۱۴	۴۵۰۹	۴۷۸۱	۳۷۲۰	
زهک یک	۱۳۵۰۲	۸۳۴	۲۳۶۵	۲۶	۷۰۲	۹۱۹۱	۵۶۷۱	۴۶۲	۵۶۶	
زهک دو	۱۶۷۳۹	۲۱۲	۱۰۲۴	۱۲۲	۱۴۵۲	۷۶۹۲	۲۴۸۷	۹۳۳	۱۰۶۱	
زهک سه	۱۹۰۶۸	۲۳۴	۱۳۳۰	۳۸	۱۹۷۳	۵۰۶۵	۲۴۶۸	۱۸۰۸	۲۴۳۲	
جمع کل	۲۶۰۰۰۰	۱۰۱۴۴	۲۸۰۷۵	۲۹۱۲	۲۳۶۹۴	۱۰۸۳۱۱	۴۹۷۸۱	۲۰۹۷۶	۱۵۹۹۵	

ماخذ: یافته‌های تحقیق

جدول ۶- مقدار آب تخصیص یافته به هر منطقه و محصول در شرایط ۱۵ درصد کم آبیاری (هزار متر مکعب)

مناطق	میزان آب	میزان آب تخصیصی به محصول منطقه	گندم	جو	عدس	پیاز	خریزه	هندوانه	یونجه	انگور
هیرمند یک	۱۶۴۱۳/۷	۱۵۳	۱۵۷۹	۶۲۰	۲۲۸۱	۸۴۱۰	۳۵۸۵	۱۹۴۰	۲۳۹۵	
هیرمند دو	۱۳۳۸۰/۵	۱۵۴	۱۲۷۱	۱۴۸	۲۱۸۸	۵۸۶۱	۲۹۴۸	۱۶۰۹	۵۶۶	
هیرمند سه	۱۷۳۲۵	۱۷۸۱	۱۴۴۹	۲۵۸	۲۲۴۲	۳۹۷۵	۲۹۵۸	۶۴۶	۶۷۶	
هیرمند چهار	۱۶۷۰۴	۲۲۴	۱۴۲۸	۲۶۱	۲۲۶۸	۵۴۳۸	۳۹۲۹	۶۵۲	۱۲۲۵	
هامون یک	۱۷۲۱۸	۵۸۱	۹۳۹	۳۳۲	۱۰۷۱	۸۲۷۷	۱۷۶۰	۵۳۱	۴۲۱	
هامون دو	۱۶۰۹۶	۱۴۱	۸۹۸	۳۱۸	۱۰۹۸	۸۷۰۰	۱۶۰۳	۷۳۹	۳۷۲	
هامون سه	۱۳۲۷۴	۳۴۷	۱۰۶۷	۱۷۳	۱۰۲۴	۷۶۴۷	۱۷۸۸	۴۶۰	۷۷۳	
هامون چهار	۱۶۳۹۲	۱۳۹	۸۷۲	۱۲۱	۹۶۵	۸۸۰۱	۱۴۱۱	۶۲۳	۱۱۵۰	
نیمروز یک	۱۹۰۴۸	۱۲۴	۹۶۳	۸۸	۷۹۰	۸۷۳۳	۴۵۹۲	۶۲۷	۶۷۸	
نیمروز دو	۱۷۷۲۴	۱۸۸	۸۲۳	۶۱	۸۵۶	۷۴۹۲	۲۹۳۴	۳۸۱۶	۵۰۳	
نیمروز سه	۱۴۳۰۸	۴۴۷	۹۳۷	۴۸۳	۱۰۹۰	۸۳۰۲	۲۴۸۹	۱۲۶۰	۱۱۳۲	
زابل یک	۱۷۹۳۳	۶۸۸	۱۱۱۹	۱۳۹	۱۱۶۵	۹۲۵۹	۱۶۱۹	۲۰۱۰	۴۱۷	
زابل دو	۱۶۵۲۷	۵۰۲	۱۷۶۰	۱۶۱	۸۶۹	۷۲۶۹	۲۹۱۱	۹۰۳	۳۰۵	
زهک یک	۱۷۹۶۴	۱۹۱۷	۷۵۰	۹۰	۱۳۴۹	۸۹۹۷	۳۸۸۲	۴۶۲	۵۰۹	
زهک دو	۱۶۵۵۳	۲۴۳	۵۳۸۳	۱۸۷	۱۳۷۱	۹۲۶۲	۴۰۷۳	۴۲۸۹	۴۴۳۲	
زهک سه	۱۳۱۲۰	۱۳۲	۱۴۲۷	۳۰۲	۱۸۶۳	۴۵۰۲	۱۵۳۹	۱۱۲۷	۱۱۲۴	
جمع کل	۲۶۰۰۰۰	۷۷۶۰	۲۲۶۶۵	۳۷۴۳	۲۲۴۹۱	۱۲۰۹۲۴	۴۴۰۲۱	۲۱۶۹۲	۱۶۶۷۹	

ماخذ: یافته‌های تحقیق

آبی بالاتری بیشتری داشتند کمتر بوده است. و تخصیص آب به سمت محصولاتی پیش می‌رود که صرفه اقتصادی بالاتری داشتند

نیاز آبی تامین شده

از آنجائیکه منطقه در شرایط خشکسالی قرار دارد و آورد رودخانه هیرمند بسیار کم می‌باشد و سطح زیر کشت پیش‌بینی شده ۷۹۷۵۶ هکتار می‌باشد لذا با این مقدار آب محصولات به طور کامل نیاز آبی خود را دریافت نکرده‌اند. نتایج مربوط به متوسط میزان نیاز آبی تامین شده محصولات در جدول ۷ آورده شده است

جدول ۷- متوسط نیاز آبی تامین شده محصولات منتخب در مناطق مختلف (درصد)

گندم	جو	عدس	پياز	خریزه	هندوانه	یونجه	انگور
۱۷	۷	۳۸	۹۶	۶۴	۶	۶	۱۵
۲۱	۸	۴۲	۹۳	۶۱	۸	۹	۱۴
۲۹	۱۲	۳۴	۹۲	۶۲	۱۱	۷	۱۵
۲۱	۱۰	۴۶	۹۴	۷۲	۱۰	۸	۱۵

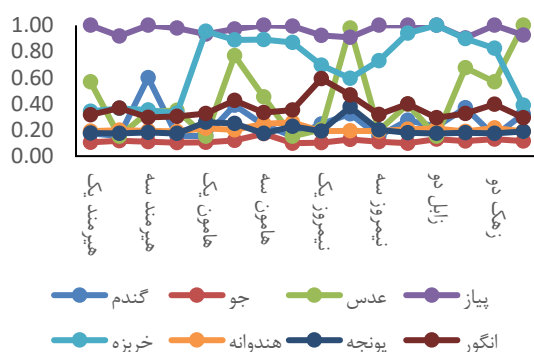
ماخذ: یافته‌های تحقیق

با توجه به نتایج جدول ۷ مشاهده می‌شود در تمام سناریوها پياز به دلیل سود اقتصادی بالا بیش از ۹۰ درصد نیاز آبی خود را دریافت کرده است. با اعمال سناریو کم آبیاری به دلیل افزایش آب قابل دسترس برای گیاه مقدار تامین نیاز آبی برای محصولات نیز افزایش یافته است. نیاز آبی تامین شده یونجه نسبت به سایر محصولات کمتر است و این نشان می‌دهد آب کمی در هر سه سناریو به این محصول تخصیص داده شده است که می‌تواند به علت نیاز آبی بالای این محصول باشد.

عملکرد نسبی

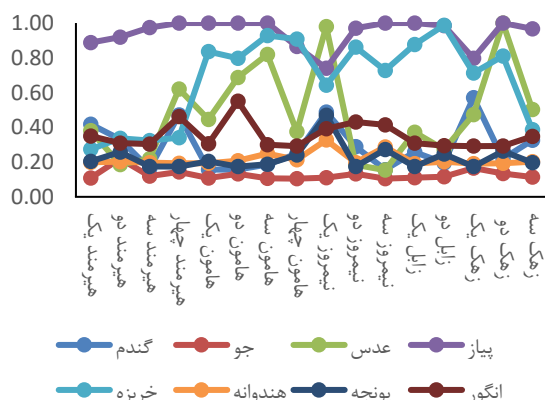
با اعمال تنش آبی و عدم تامین آب کافی مورد نیاز، با کاهش محصول مواجه خواهیم شد به طوریکه برای محصولات با ضریب حساسیت بالا با کاهش بیشتر محصول روبه‌رو خواهند شد البته با توجه به تابع هدف در مدل محصولی که سودآوری بیشتری داشته باشد با تنش کمتری مواجه می‌شود تا کاهش محصول کمتری داشته باشد. در نمودار ۱ تا ۵ عملکرد نسبی محصولات در سناریوهای مختلف آبیاری کامل و کم آبیاری نمایش داده شده است. از آنجا که حد اقتصادی بودن عملکرد گیاهان ضریب ۰/۷ در نظر گرفته شده است (۴۰). برای محصولاتی که این نسبت برای آنها کمتر از ۰/۷ می‌باشد نشان می‌دهد که کشت این گیاهان در شرایط کم آبی به دلیل نیاز آبی بالا و کاهش عملکرد چندان اقتصادی نیست. در شرایط آبیاری کامل عملکرد تخمینی به دست آمده برای پياز در همه مناطق تحت بررسی بیشتر از ۰/۷ می‌باشد، بعد از پياز خربزه بیشترین نسبت عملکرد را داشته است. با اعمال سناریو کم آبیاری کاهش در عملکرد نسبی برای محصولات کاهش پیدا کرده است. نتایج شیرشاهی و همکاران (۲۹) نشان داد که کشت محصولات گوجه، یونجه و چغندر قند به دلیل اینکه عملکرد نسبی آنها کمتر از ۰/۷ می‌باشد اقتصادی نیست.

آبیاری کامل



نمودار ۱- نتایج عملکرد نسبی محصولات در مناطق مختلف در سناریو آبیاری کامل

۵ درصد کم آبیاری

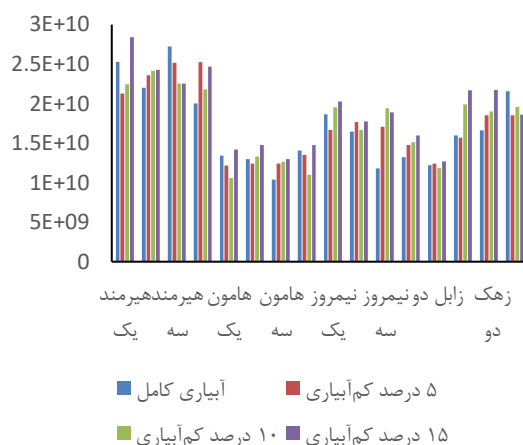


نمودار ۲- نتایج عملکرد نسبی محصولات در مناطق مختلف در سناریو ۵ درصد کم آبیاری

۱۰ درصد کم‌آبیاری	$2/79 \times 10^{11}$	۰/۰۳۱
۱۵ درصد کم‌آبیاری	$3/۰۴ \times 10^{11}$	۰/۰۳۰

ماخذ: یافته‌های تحقیق

از آنجائیکه مقدار شاخص E مقداری کوچک و نزدیک به صفر است نشان می‌دهد تخصیص آب بین مناطق عادلانه می‌باشد. و با اعمال سناریوها مقدار این شاخص نیز کاهش یافته است و نشان می‌دهد چنانچه کم‌آبیاری اعمال شود تخصیص آب بین مناطق عادلانه‌تر خواهد بود. مقدار سود اقتصادی در شرایط آبیاری کامل $2/71 \times 10^{11}$ ریال می‌باشد که در سناریوهای مختلف مقدار سود اقتصادی افزایش می‌یابد به‌طوری‌که با اعمال سناریوی کم‌آبیاری ۵ درصد میزان سود $۰/۰۶ \times 10^{11}$ ، در سناریوی ۱۰ درصد کم‌آبیاری $۰/۰۸ \times 10^{11}$ و در سناریوی ۱۵ درصد کم‌آبیاری $۰/۳۳ \times 10^{11}$ ریال نسبت به حالت آبیاری کامل افزایش یافته است که این حاکی از این می‌باشد اب صرفه جویی شده ناشی از کم‌آبیاری باعث افزایش آب تخصیص داده شده به محصولات می‌شود که در نتیجه منجر به افزایش سود اقتصادی خواهد شد. در نمودار ۳ مقایسه میزان سود هر منطقه در هر سناریو نشان داده شده است.



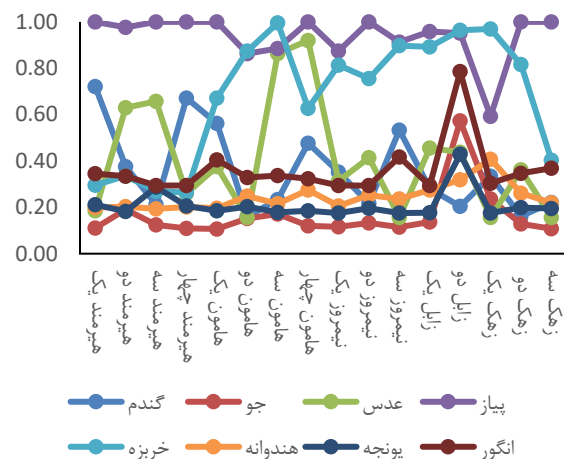
نمودار ۵- مقایسه میزان سود هر منطقه در هر سناریو (ریال)

بیشترین مقدار سود در بین مناطق در همه سناریوها متعلق به چهار منطقه هیرمند می‌باشد و کمترین سود اقتصادی را در منطق زابل دو داشته‌ایم. در رتبه بندی سود اقتصادی بین محصولات تولید خربزه، پیاز و هندوانه بیشترین سود اقتصادی را به همراه داشته است و کمترین سود نیز تولید گندم و عدس دارد.

بازار آب

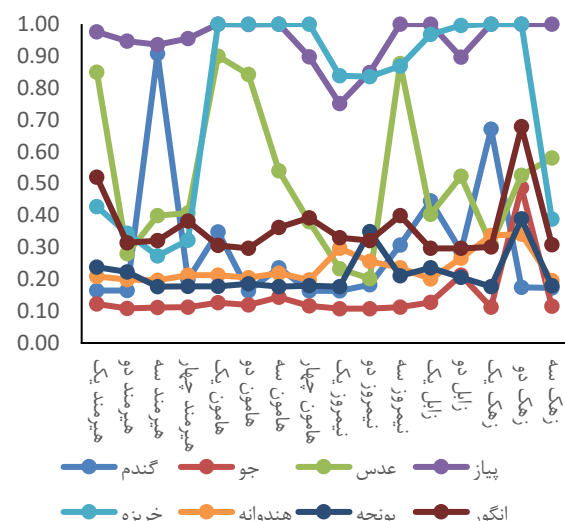
در این مطالعه تلاش شده است علاوه بر در نظر گرفتن شرایط کم‌آبیاری اثرات شکل‌گیری بازارهای آب منطقه‌ای بر تخصیص آب بین مناطق و محصولات نیز ارزیابی شود. نتایج حاصل از مبادله آب بین مناطق تحت سناریوهای مختلف در جدول ۸ آورده شده است

۱۰ درصد کم‌آبیاری



نمودار ۳- نتایج عملکرد نسبی محصولات در مناطق مختلف در سناریو ۱۰ درصد کم‌آبیاری

۱۵ درصد کم‌آبیاری



نمودار ۴- نتایج عملکرد نسبی محصولات در مناطق مختلف در سناریو ۱۵ درصد کم‌آبیاری

سود اقتصادی سیستم

با اعمال سناریوهای کم‌آبیاری مقدار سود اقتصادی و شاخص E در هر یک از سناریوها محاسبه شد

جدول ۷- میزان سود اقتصادی و شاخص E در هر سناریو

سناریو	سود اقتصادی سیستم	شاخص E
آبیاری کامل	$2/71 \times 10^{11}$	۰/۰۳۳۴
۵ درصد کم‌آبیاری	$2/77 \times 10^{11}$	۰/۰۳۳

جدول ۸- حجم کل آب مبادله شده بین مناطق در سناریوهای مختلف (هزار متر مکعب)

آبیاری کامل	۵ درصد کم آبیاری	۱۰ درصد کم آبیاری	۱۵ درصد کم آبیاری	
۱۷۸۴۷	۱۶۸۴۰	۲۰۰۹۰	۲۰۴۳۵	حجم آب فروخته شده
۱۷۸۴۷	۱۶۸۴۰	۲۰۰۹۰	۲۰۴۳۵	حجم آب خریداری شده

ماخذ: یافته‌های تحقیق

کم آبیاری مقدار آب در دسترس افزایش پیدا می‌کند لذا این آب صرفه جویی شده یا جهت تخصیص به محصولات و یا خرید و فروش استفاده می‌شود. نتایج حاصل از مبادله آب در سناریوهای مختلف کم آبیاری به تفکیک بین مناطق مختلف در نمودارهای ۹-۶ نشان داده شده است.

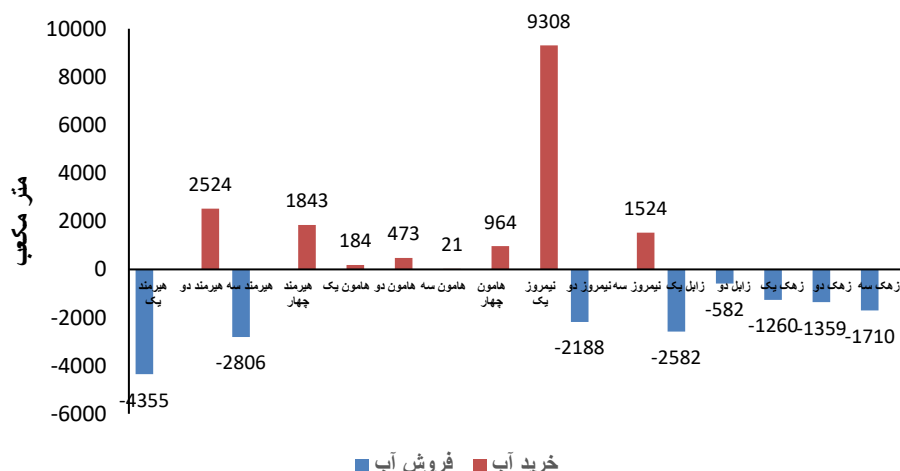
در شرایط آبیاری کامل حجم آب مبادله شده بین مناطق ۱۷۸۴۷ هزار متر مکعب بوده است که با اعمال شرایط کم آبیاری حجم آب مبادله شده نیز تغییر پیدا کرده است به طوریکه با اعمال ۵ درصد کم آبیاری مقدار خرید و فروش آب به ۱۶۸۴۰ هزار متر مکعب کاهش پیدا کرده است. در شرایط کم آبیاری ۱۰ درصد و ۱۵ درصد مقدار خرید و فروش نسبت به آبیاری کامل افزایش پیدا کرده است از آنجائیکه با اعمال

آبیاری کامل



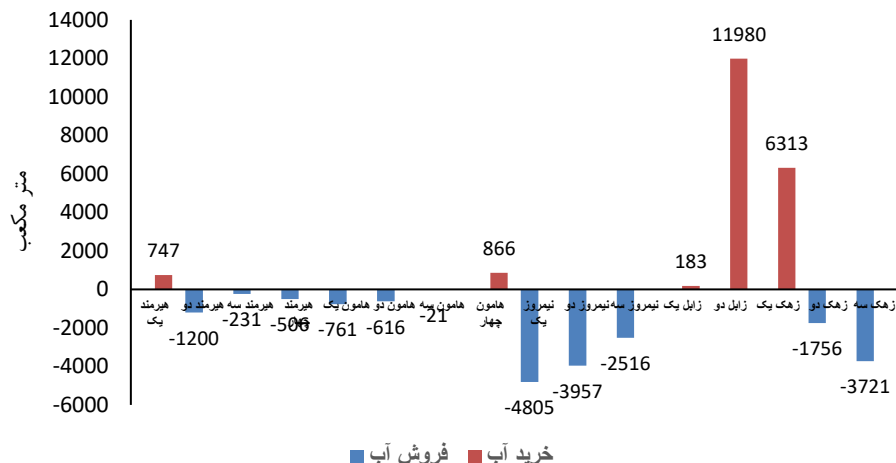
نمودار ۶- میزان مبادله آب بین مناطق در شرایط آبیاری کامل

۵ درصد کم آبیاری



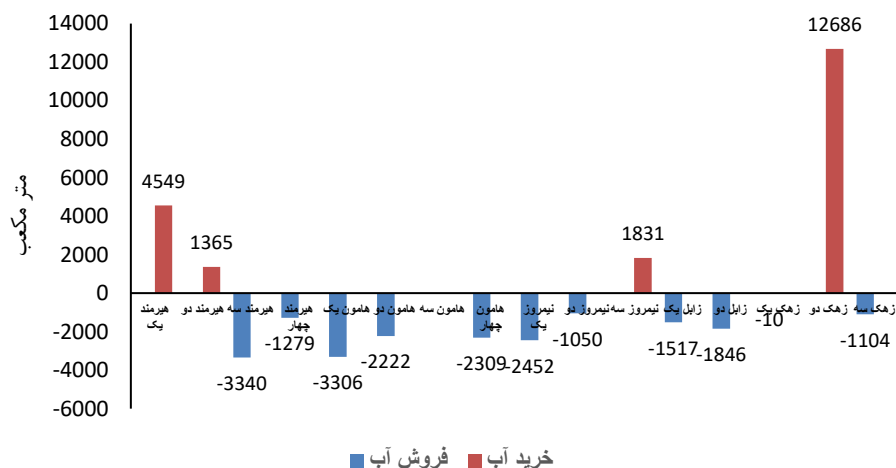
نمودار ۷- میزان مبادله آب بین مناطق در شرایط ۵ درصد کم آبیاری

۱۰ درصد کم آبیاری



نمودار ۸- میزان مبادله آب بین مناطق در شرایط ۱۰ درصد کم آبیاری

۱۵ درصد کم آبیاری



نمودار ۹- میزان مبادله آب بین مناطق در شرایط ۱۵ درصد کم آبیاری

هدف در این مطالعه تخصیص منابع آب در بخش کشاورزی جهت توسعه پایدار می‌باشد که برای این منظور از مدل استاکبرگ - نش- کورنو که یکی از انواع مدل‌های برنامه ریزی دو سطحی می‌باشد، استفاده شده است. این مدل نه تنها تعادل بین مدیران و کشاورزان را مورد توجه قرار می‌دهد بلکه مبادله آب بین مناطق نیز در این مدل در نظر گرفته می‌شود. یافته‌های پژوهش از این نظر اهمیت دارند که نشان می‌دهند با اعمال یک مدیریت بهینه و هدفمند جهت تخصیص آب می‌توان اثرات خشکسالی را جبران نمود به طوریکه که با تغییرات حاصل از بهینه‌سازی، می‌توان سود خالص کشاورزان را در بسیاری از موارد افزایش داد. اگرچه کم آبیاری در حال حاضر در منطقه سیستان به منظور ایجاد درآمد از طریق فروش آب انجام نمی‌شود، اما این یک رویکرد قابل قبول جهت استفاده بهینه آب برای مناطق و محصولاتی که بازده اقتصادی بیشتری دارند مفید خواهد بود.

در شرایط آبیاری کامل مناطق هیرمند سه، هامون چهار، نیمروز یک و زهک یک خریدار آب و سایر مناطق فروشنده آب بودند که بیشترین خرید آب توسط نیمروز یک انجام گرفته شده است و بیشترین فروش آب در زهک سه مشاهده می‌شود. با ۵ درصد اعمال کم آبیاری بیشترین خرید در نیمروز یک و بیشترین فروش در هیرمند یک افتاده است و چهار منطقه هامون، هیرمند چهار، نیمروز یک و سه خریدار آب و دیگر مناطق فروشنده آب بودند. در شرایط ۱۰ درصد کم آبیاری نیز بیشترین مقدار فروش آب در نیمروز یک و بیشترین خرید آب در زابل دو و در شرایط ۱۵ درصد کم آبیاری بیشترین خرید توسط زهک دو و بیشترین فروش توسط هیرمند سه انجام گرفته است.

بحث و نتیجه‌گیری

i	مناطق تحت آبیاری $i = 1, 2, \dots, m$
j	نوع محصول در منطقه آبیاری $j = 1, 2, \dots, n$
S	کل آب موجود در بخش کشاورزی (مترمکعب)
b_{ij}	بازده خالص محصول j در منطقه i به ازای هر واحد آب (ریال)
γ	قیمت آب که توسط رهبر تعیین می‌شود (ریال)
c_i	هزینه آبی که از بازار آب خریداری می‌شود (ریال)
A_{ij}	سطح زیر کشتی محصول j در منطقه i (هکتار)
η	راندمان آبیاری
A_i	سطح زیر کشت در منطقه i (هکتار)
Y_{aij}	عملکرد واقعی محصول j به ازای یک هکتار در منطقه i (کیلوگرم)
Y_{pij}	عملکرد بالقوه محصول j به ازای یک هکتار در منطقه i (کیلوگرم)
R_i	سود اقتصادی (ریال)
X_i	میزان حق ایه اولیه هر منطقه i که توسط تصمیم گیرنده سطح بالا (رهبر) تعیین می‌شود (مترمکعب)
ET_a	آبی که به هر محصول در منطقه i تخصیص داده می‌شود و توسط تصمیم گیرنده سطح پایین (پیرو) تعیین می‌شود (مترمکعب)
BSW_i^-	مقدار آب فروخته شده (مترمکعب)
BSW_i^+	مقدار آب خریداری شده (مترمکعب)
τ_i	متغیر ۰-۱ که آیا آب خریداری شود یا خیر
ET_p	حداکثر نیاز آبی گیاه (مترمکعب)
ET_m	حداقل آب مورد نیاز گیاه برای ادامه حیات و عدم قرار گرفتن در تنش‌های معنی‌دار آبی (مترمکعب)

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر از محل گرنت پژوهشگاه زابل با کد IR-RIOZ-GR-0702 تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده‌پردازی: زهرا غفاری مقدم، علی سردار شهرکی؛ روش‌شناسی و تحلیل داده‌ها: زهرا غفاری مقدم، آرش غفاری مقدم؛ نظارت و نگارش نهایی: زهرا غفاری مقدم، علی سردار شهرکی.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

- Ren C, Li Z, Zhang H. Integrated multi-objective stochastic fuzzy programming and AHP method for agricultural water and land optimization allocation under multiple uncertainties. *Journal of Cleaner Production*. 2019;210:12-24.

سود خالص سالانه در سناریو آبیاری کامل $2/71 \times 10^{11}$ ریال می‌باشد و میزان کل آب در دسترس برای بخش کشاورزی ۲۶۰ میلیون متر مکعب می‌باشد. مقدار شاخص نابرابری تخصیص در آب بدست آمده در این سناریو ۰/۳۳۴ می‌باشد که مقدار این شاخص نزدیک به صفر می‌باشد و نشان می‌دهد تخصیص آب بین مناطق عادلانه بوده است. در بین محصولات بیشترین آب به محصول خربزه و کمترین آب به محصول گندم تخصیص داده شده است. با اعمال سناریو کم‌آبیاری مقدار سود افزایش و مقدار شاخص نابرابری تخصیص در آب کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد در صورت استفاده از روش کم‌آبیاری، منفعت حاصل از مقدار آب ذخیره شده جبران کاهش عملکرد محصول را کرده و با استفاده از مقدار آب صرفه جویی می‌توان به محصولات پربازده آب بیشتری تخصیص داد و ضرر ناشی از کاهش عملکرد را جبران کرد. همچنین با اعمال سناریو کم‌آبیاری کاهش در عملکرد نسبی برای محصولات کاهش پیدا می‌کند. کم‌آبیاری سبب شده است که نیاز آبی تامین نشده محصولات کاهش یابد و درصد بیشتری از نیاز آبی آنها تامین شود. نتایج مطالعه حاضر منطبق با نتایج مطالعه ایگزیزو و همکاران (۸) و یائو و همکاران (۹) می‌باشد آنها نیز در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که با ایجاد بازار آب و معامله آب بین مناطق تحت آبیاری سود اقتصادی افزایش خواهد یافت و تخصیص آب بین مناطق عادلانه تر خواهد بود. همچنین فرانسيسكو و همکاران (۶) زنگ و همکاران (۳۸)، غفاری مقدم و همکاران (۱۴) در مطالعات خود به اثر بخشی بازار آب در فرایند تخصیص آب نیز اشاره نمودند. در این مطالعه علاوه بر تخصیص آب در شرایطی که بازار آب ایجاد می‌شود شرایط کم‌آبیاری نیز در نظر گرفته شده است.

پیشنهادهای

با توجه به نتایج سیاست تلفیقی شامل اعمال کم‌آبیاری و بازار آب منجر به افزایش مبادله آب بین مناطق و سود اقتصادی خواهد شد لذا پیشنهاد می‌شود جهت پایداری منابع آب در منطقه سیستان از این سیاست به عنوان ابزاری موثر استفاده نمود. از نتایج این تحقیق به عنوان کمک یار مدیران شبکه و افراد مسئول برای تخصیص آب می‌توان استفاده کرد.

تعریف متغیرها و پارامترها

جدول ۹- معرفی متغیرها و پارامترهای به کار برده شده

در مدل

نماد

توضیحات

- <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.348>
- Li M, Fu Q, Singh VP, Ma M, Liu X. An intuitionistic fuzzy multi-objective non-linear programming model for sustainable irrigation water allocation under the combination of dry and wet conditions. *Journal of Hydrology*. 2017;555:80-94.

- <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.055>
- 3 Zhang F, Guo P, Engel BA, Guo S, Zhang C, Tang Y. Planning seasonal irrigation water allocation based on an interval multiobjective multi-stage stochastic programming approach. *Agricultural Water Management*. 2019;223:105692. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105692>
 - 4 Wu D, Liu M. Coordinated optimal allocation of water resources and industrial structure in the Beijing–Tianjin–Hebei regions of China. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*. 2022;20(4):392-401. <https://doi.org/10.1016/j.cjpre.2022.11.009>
 - 5 Feng J. Optimal allocation of regional water resources based on multi-objective dynamic equilibrium strategy. *Applied Mathematical Modelling*. 2021;90:1183-203. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.10.027>
 - 6 Francesco S, Dionisio, P., Carlos, G., Vito, F. An ensemble experiment of mathematical programming models to assess socio-economic effects of agricultural water pricing reform in the Piedmont Region, Italy. *Journal of Environmental Management*. 2020;17(3). Epub 29. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110645>
 - 7 Zeng X, Li Y, Huang G, Liu J. Modeling water trading under uncertainty for supporting water resources management in an arid region. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2016;142(2):04015058. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000593](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000593)
 - 8 Xu Z, Yao L, Zhou X, Moudi M, Zhang L. Optimal irrigation for sustainable development considering water rights transaction: A Stackelberg-Nash-Cournot equilibrium model. *Journal of Hydrology*. 2019;575:628-37. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.063>
 - 9 Yao L, Xu Z, Chen X. Sustainable water allocation strategies under various climate scenarios: A case study in China. *Journal of Hydrology*. 2019;574:529-43.
 - 10 Alarcón J, Juana L. The Water Markets as Effective Tools of Managing Water Shortages in an Irrigation District. *Water Resources Management*. 2016;30(8):2611-25. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1296-8>
 - 11 Yue Q, Zhang F, Zhang C, Zhu H, Tang Y, Guo P. A full fuzzy-interval credibility-constrained nonlinear programming approach for irrigation water allocation under uncertainty. *Agricultural Water Management*. 2020;230:105961. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105961>
 - 12 Li M, Xu Y, Fu Q, Singh VP, Liu D, Li T. Efficient irrigation water allocation and its impact on agricultural sustainability and water scarcity under uncertainty. *Journal of Hydrology*. 2020;586:124888. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124888>
 - 13 Elleuch MA, Anane M, Euch J, Frikha A. Hybrid fuzzy multi-criteria decision making to solve the irrigation water allocation problem in the Tunisian case. *Agricultural systems*. 2019;176:102644. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102644>
 - 14 Wu R-S, Liu J-S, Chang S-Y, Hussain F. Modeling of mixed crop field water demand and a smart irrigation system. *Water*. 2017;9(11):885. <https://doi.org/10.3390/w9110885>
 - 15 Lin P, You J, Gan H, Jia L. Rule-based object-oriented water resource system simulation model for water allocation. *Water Resources Management*. 2020;34:3183-97. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02607-3>
 - 16 Li M, Li J, Singh VP, Fu Q, Liu D, Yang G. Efficient allocation of agricultural land and water resources for soil environment protection using a mixed optimization-simulation approach under uncertainty. *Geoderma*. 2019;353:55-69. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.023>
 - 17 Wang Y, Yang J, Chang J. Development of a coupled quantity-quality-environment water allocation model applying the optimization-simulation method. *Journal of Cleaner Production*. 2019;213:944-55. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.065>
 - 18 Chakraei I, Safavi HR, Dandy GC, Golmohammadi MH. Integrated simulation-

- optimization framework for water allocation based on sustainability of surface water and groundwater resources. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2021;147(3):05021001.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001339](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001339)
- 19 Zeng Y, Li J, Cai Y, Tan Q, Dai C. A hybrid game theory and mathematical programming model for solving trans-boundary water conflicts. *Journal of Hydrology*. 2019;570:666-81.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.053>
 - 20 Kosolapova NA, Matveeva LG, Nikitaeva AY, Molapisi L. Modeling resource basis for social and economic development strategies: Water resource case. *Journal of Hydrology*. 2017;553:438-46.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.007>
 - 21 Philpot SL, Johnson PA, Hipel KW. Analysis of a brownfield management conflict in Canada. *Hydrological Research Letters*. 2017;11(3):141-8.
<https://doi.org/10.3178/hrl.11.141>
 - 22 Geerts S, Raes D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*. 2009;96(9):1275-84.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.009>
 - 23 Fereres E, Soriano MA. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of experimental botany*. 2007;58(2):147-59.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>
 - 24 Mahmoudzadeh Varzi M, Trout TJ, DeJonge KC, Oad R. Optimal water allocation under deficit irrigation in the context of Colorado water law. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2019;145(5):05019003.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001374](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001374)
 - 25 Trout TJ, Howell, T. A., English, M. J., Martin, D. L. Deficit irrigation strategies for the western US. *Transactions of the ASABE*. 2020;63(6):12.
<https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=51878>
 - 26 English M, Raja SN. Perspectives on deficit irrigation. *Agricultural Water Management*. 1996;32(1):1-14.
[https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(96\)01255-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(96)01255-3)
 - 27 English M, Music J, Murty V. Deficit irrigation. *Management of Farm Irrigation Systems ASAE Monograph*, Michigan. 1990:631-63.
 - 28 Salemi H, Soom MAM, Lee TS, Mousavi SF, Ganji A, Yusoff MK. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region. *African Journal of Agricultural Research*. 2011;610(1):2204-DOI: 10.5897/AJAR10.1009
 - 29 Shirshahi F, Babazadeh H, Ebrahimipak N, Khaledian M. Determining Optimum major Crops Cultivation Areas in Different Levels of deficit Irrigation in Qazvin Irrigation and drainage district. *Water and Soil Science*. 2020;30(1):69-81.
20.1001.1.20085133.1399.30.1.6.2
 - 30 Mohammad khani M, karimi m, Gomrokchi a. Optimization of Water Allocation between Different Crops in Water Stress Conditions in Qazvin Irrigation Network. *Water and Soil*. 2017;31(1):1-10.
<https://doi.org/10.22067/jsw.v31i1.48682>
 - 31 Pande G, Umamahesh N. Optimal Cropping Pattern and Water Allocation Using Ga Under Deficit Irrigation Conditions. 2022.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1873146/v1>
 - 32 Ali S. Optimal Allocation of Water Resources of Hirmand Basin by Application of Game Theory and Evaluating the Managerial Scenarios [thesis]: university of Sistan and Baluchestan. ; 2016.
 - 33 Ghaffari Moghadam Z, SardarShahraki A. Prediction of monthly consumption of drinking water in the Sistan region under climate change impact. *Journal of Natural Environmental Hazards*. 2023;12(37):75-100. 10.22111/jneh.2023.42994.1912
 - 34 Zapata-Sierra AJ, Manzano-Agugliaro F. Controlled deficit irrigation for orange trees in Mediterranean countries. *Journal of Cleaner Production*. 2017;162:130-40.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.208>
 - 35 Clarke D, Smith M, El-Askari K, editors. *CropWat for Windows: user guide*. 2001: IHE Oak Brook, IL, USA.
https://www.researchgate.net/publication/312903822_CropWat_for_Windows_User_guide

- 36 Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D. Crop yield response to water: fao Rome; 2012. <https://www.fao.org/4/i2800e/i2800e00.htm>
- 37 Graveline N, Mérel P. Intensive and extensive margin adjustments to water scarcity in France's Cereal Belt. *European Review of Agricultural Economics*. 2014;41(5):707-43. <https://doi.org/10.1093/erae/jbt039>
- 38 Goetz RU, Martínez Y, Xabadia À. Efficiency and acceptance of new water allocation rules- The case of an agricultural water users association. *Science of the total environment*. 2017;601:614-25. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.226>
- 39 Ghaffari Moghadam Z, Moradi E, Hashemi Tabar M, Sardar Shahraki A. Developing a Bi-level programming model for water allocation based on Nerlove's supply response theory and water market. *Environment, Development and Sustainability*. 2023;25(6):5663-89. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02658-z>
- 40 Georgiou P, Papamichail D, Vougioukas S. Optimal irrigation reservoir operation and simultaneous multi-crop cultivation area selection using simulated annealing. *Irrigation and drainage: the journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*. 2006;55(2):129-44. <https://doi.org/10.1002/ird.229>