

Optimizing Cropping Pattern and Water Allocation using Stackelberg and Meta-heuristic Techniques in Sistan Region

Zahra Ghaffari Moghadam^{*1}, Ali Sardar Shahraki², Somayyeh Mirshekari³

1. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Agricultural Economics, Agriculture Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: zahraghafari@uoz.ac.ir
2. Associate Professor of Agriculture Economics, Faculty of Management and Economic, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. E-mail: a.s.shahraki@eco.usb.ac.ir
3. Assistant Prof., Dept. of Agronomy and Plant Breeding, Agriculture Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: smirshekari@uoz.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 01.08.2023
Revised: 02.27.2023
Accepted: 03.01.2023

Keywords:
Cropping pattern
optimization,
Game Stackelberg,
Genetic algorithm,
Optimal allocation water,
Sistan

ABSTRACT

Background and Objectives: Water is a critical input for agricultural production and plays an important role in the sustainable development of the agricultural sector and the economic development of other sectors. Water shortage is one of the major challenges that most countries in the world are struggling with. The great importance of determining the optimal cropping pattern of crops and irrigation allocation planning in the water shortage conditions prevailing in Iran's watersheds is not hidden from anyone. This study aimed to optimize water allocation and determine the optimal cropping pattern of crops in five cities of the Sistan region under different management scenarios.

Materials and Methods: In this study, a model with a two-level planning approach, the Stackelberg game framework, and a genetic algorithm, was developed to optimize the water allocation between irrigated areas and crops, as well as to determine the optimal cropping area in 5 cities of Sistan region (including Hamon, Hirmand, Zahak, Nimroz and Zabol) to confront different water conditions. Selected products include wheat, barley, onion, melon, watermelon and alfalfa. The problem was solved in the form of nine scenarios, including three scenarios of irrigation efficiency, three scenarios of climatic conditions, and three scenarios of low irrigation conditions, and compared with the baseline scenario.

Results: For water allocation among the studied regions in the baseline scenario, the most and least water was allocated to Zahak and Hirmand areas, respectively. Among the studied crops, the most water was allocated to the melon due to its low water requirement and high economic value compared to other crops, and the least amount of water was allocated to the alfalfa due to its high water requirement; also the melon with 13503.5 ha had the highest cropping area and alfalfa with 4.85 ha had the lowest cropping area in a total of five cities. The total cropping area obtained by the model was 18240.32 ha. The value of the Gini coefficient was 0.0053, which is small and close to zero, indicating that the water allocation between the regions was fair. The total interest rate obtained in the baseline scenario was 5.06×10^{13} , which by applying irrigation efficiency scenarios of 50 and 70 percent, the amount of profit has increased by 12% and 34%, respectively, and the cultivated area by 27% and 47% compared to the baseline scenario. And in normal and wet year conditions, the amount of

total profit has increased by 28% and 54%, respectively, and the cultivated area by 40% and 65% compared to the baseline scenario. By applying the low irrigation scenario, the interest rate decreases compared to the baseline scenario, associated with the saving of a large volume of irrigation water, which leads to an increase in the cropping area of crops with higher economic efficiency. Therefore, by applying various scenarios, the cropping pattern moves towards crops with less water requirement and higher economic value.

Conclusion: According to the results, more water has been allocated to crops with higher economic value and less water requirement. Therefore, if crops with less interest rate compared to their water use and crops with high water requirement are removed from the cropping pattern and crops with higher economic efficiency and less water requirement are replaced in the cropping pattern, it can be a good solution to confront water shortage conditions. The increase in irrigation efficiency increased the total interest, thus it is recommended to save water used by plants through the improvement of irrigation technology and increase irrigation efficiency. The proposed model in this study can be employed for correct and efficient planning for agriculture and water resource management in various conditions.

Cite this article: Ghaffari Moghadam, Zahra, Sardar Shahraki, Ali, Mirshekari, Somayyeh. 2023. Optimizing Cropping Pattern and Water Allocation using Stackelberg and Meta-heuristic Techniques in Sistan Region. *Journal of Water and Soil Conservation*, 29 (4), 1-26.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2023.20956.3608

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بهینه‌سازی برنامه زراعی و تخصیص آب با کاربرد تکنیک‌های استاکلبرگ و فراابتکاری در منطقه سیستان

زهرا غفاری مقدم^{۱*} ID، علی سردار شهرکی^۲ ID، سمیه میرشکاری^۳ ID

۱. نویسنده مسئول، استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، پژوهشکده کشاورزی، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: zahraghafari@uoz.ac.ir

۲. دانشیار اقتصاد کشاورزی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. رایانامه: a.s.shahraki@eco.usb.ac.ir

۳. استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، پژوهشکده کشاورزی، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: smirshकारी@uoz.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نهاده‌های تولیدات محصولات کشاورزی جایگاه مهمی در توسعه پایدار بخش کشاورزی و توسعه اقتصادی سایر بخش‌ها دارد. کمبود آب یکی از مشکلات اصلی بیش‌تر کشورهای جهان است. تعیین الگوی کشت بهینه محصولات کشاورزی و برنامه‌ریزی تخصیص آبیاری در شرایط کم‌آبی حاکم بر حوضه‌های آبریز کشور از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. هدف از این مطالعه بهینه‌سازی تخصیص آب و تعیین الگوی کشت بهینه محصولات کشاورزی در پنج شهرستان منطقه سیستان طی سناریوهای مختلف مدیریتی است.
تاریخ دریافت: ۰۱/۱۰/۱۸ تاریخ ویرایش: ۰۱/۱۲/۰۸ تاریخ پذیرش: ۰۱/۱۲/۱۰	مواد و روش‌ها: در این مطالعه برای مواجهه با شرایط مختلف آبی، با استفاده از یک رویکرد برنامه‌ریزی دو سطحی و چارچوب بازی استاکلبرگ و استفاده از الگوریتم ژنتیک مدلی جهت بهینه‌سازی تخصیص آب بین مناطق تحت آبیاری و محصولات زراعی و هم‌چنین تعیین سطح زیر کشت بهینه برای محصولات زراعی در ۵ شهرستان منطقه سیستان (شامل هامون، هیرمند، زهک، نیمروز و زابل) توسعه داده شد. محصولات منتخب شامل گندم، جو، پیاز، خربزه، هندوانه و یونجه می‌باشد. مسأله در قالب نه سناریو شامل سه سناریوی راندمان آبیاری، سه سناریو شرایط اقلیمی و سه سناریو شرایط کم‌آبیاری اجرا و با سناریو پایه مقایسه شد.
واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بازی استاکلبرگ، بهینه‌سازی الگوی کشت، تخصیص بهینه آب، سیستان	یافته‌ها: در بین محصولات مورد بررسی بیش‌ترین آب به محصول خربزه به دلیل نیاز آبی کم و ارزش اقتصادی بالا نسبت به سایر محصولات و کم‌ترین آب به محصول یونجه به دلیل نیاز آبی بالا تخصیص داده شد. هم‌چنین محصول خربزه با ۱۳۵۰۳/۵ هکتار بیش‌ترین سطح زیرکشت و یونجه با ۴/۸۵ هکتار کم‌ترین سطح زیرکشت را در مجموع پنج شهرستان به خود اختصاص داده‌اند. کل سطح زیرکشت به دست‌آمده توسط مدل ۱۸۲۴۰/۳۲ هکتار است. مقدار ضریب

جینی ۰/۰۰۵۳ به دست آمد که مقداری کوچک و نزدیک صفر است و نشان می‌دهد تخصیص آب بین مناطق عادلانه بوده است. مقدار سود کل به دست آمده در حالت سناریو پایه $5/06 \times 10^{13}$ ریال است که با اعمال سناریوهای راندمان آبیاری ۵۰ و ۷۰ درصد میزان سود به ترتیب ۱۲ و ۳۴ درصد و سطح زیر کشت ۲۷ و ۴۷ درصد نسبت به حالت پایه افزایش یافته است. و در شرایط اقلیمی نرمال و ترسالی نیز میزان سود کل به ترتیب ۲۸ و ۵۴ درصد و سطح زیر کشت ۴۰ و ۶۵ درصد نسبت به حالت پایه افزایش یافته است. اعمال سناریو کم آبیاری میزان سود را نسبت به حالت پایه کاهش داد اما کاهش سود با صرفه‌جویی حجم زیادی از آب آبیاری همراه است و این حجم آب ذخیره شده منجر به افزایش سطح زیر کشت محصولاتی که صرفه اقتصادی بالاتری دارند، شده است بنابراین با اعمال سناریوهای مختلف، الگوی کشت به سمت محصولاتی با نیاز آبی کم‌تر و ارزش اقتصادی بیش‌تر متمایل می‌شود.

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده شد محصولاتی که دارای ارزش اقتصادی بالاتر و نیاز آبی کم‌تر بودند آب بیش‌تری به آن‌ها تخصیص داده شده است. بنابراین محصولات زراعی که نسبت به آب مصرفی سود کم‌تری را حاصل می‌کنند و هم‌چنین محصولاتی که دارای نیاز آبی بالایی هستند از الگوی کشت حذف و محصولات با صرفه اقتصادی بالاتر و نیاز آبی کم‌تر در الگوی کشت جایگزین شده‌اند که این می‌تواند راهکار مناسبی برای مواجهه با شرایط کمبود آب باشد. افزایش راندمان آبیاری باعث افزایش سود کل شده است بنابراین صرفه‌جویی در مقدار آب مصرفی گیاهان از طریق بهبود تکنولوژی آبیاری و افزایش راندمان آبیاری توصیه می‌شود. از مدل پیشنهادی در این مطالعه می‌توان به منظور برنامه‌ریزی صحیح و کارآمد برای کشاورزی و مدیریت منابع آب در شرایط مختلف استفاده نمود.

استناد: غفاری مقدم، زهرا، سردار شهرکی، علی، میرشکاری، سمیه (۱۴۰۱). بهینه‌سازی برنامه زراعی و تخصیص آب با کاربرد تکنیک‌های استاکلبرگ و فراابتکاری در منطقه سیستان. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۹ (۴)، ۲۶-۱.

DOI: 10.22069/jwsc.2023.20956.3608



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

محدودیت منابع آب موجود و اهمیت تأمین نیاز غذایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به خصوص ایران لزوم توجه به مباحث مصرف بهینه آب در کنار الگوی کشت محصولات کشاورزی را بیش از پیش ضروری ساخته است (۱). کمبود منابع آب، تضادهای بین منابع طبیعی، اقتصاد، اکولوژی، جامعه و محیط‌زیست را تشدید کرده و به یک چالش شدید جهانی تبدیل شده است (۲). کمبود آب یکی از بزرگ‌ترین مشکلات محیط زیستی در قرن بیست و یکم است (۳) به طوری که کمبود آب در بسیاری از کشورها در حال تشدید است و این روند به طور مستقیم بر آب کشاورزی و امنیت غذایی آن‌ها تأثیر می‌گذارد. این شرایط به‌ویژه برای مناطق خشک و نیمه‌خشک که در آن تصمیمات مدیریتی برای تخصیص آب کشاورزی به دلیل درگیری بین محصولات کشاورزی و دیگر استفاده‌کنندگان آب بیش‌تر مشهود است (۴). از آن‌جا که بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب است و در حدود ۷۰ درصد کل آب مصرفی را تشکیل می‌دهد (۵) و پراکنش نامناسب مکانی و زمانی بارندگی و شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک باعث شده است که تولید محصولات کشاورزی به زراعت آبی وابسته باشد، بنابراین لزوم یک برنامه‌ریزی بهینه برای الگوی کشت و تخصیص آب آبیاری را بیش از پیش نمایان نموده است (۱). کمبود منابع آب و رقابت بین مصرف‌کنندگان متعدد آب، اهمیت تخصیص آب در حوضه‌های رودخانه‌ای را پررنگ نموده است به طوری که پژوهش‌های زیادی در این زمینه انجام گرفته است (۳، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲). تضاد بین عرضه محدود آب و تقاضای روزافزون آب، مدیریت هم‌افزایی منابع آب و زمین کشاورزی را با چالش مواجه کرده است (۲). تخصیص منابع آب و زمین کشاورزی یک پیش‌نیاز

برای تولید مواد غذایی است و با امنیت غذایی، توسعه اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی مرتبط است (۱۳) و به نوبه خود روی تولیدات کشاورزی و توسعه پایدار مناطق تأثیر می‌گذارد. تخصیص زمین کشاورزی و منابع آبی برای کشاورزی پایدار را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های برنامه‌ریزی چندهدفه تعیین کرد. با این حال، اکثر مطالعات برای به حداکثر رساندن بازده خالص سیستم یا به حداقل رساندن مصرف آب (بهره‌برداری از زمین) متمرکز شده‌اند (۶، ۱۴، ۱۵، ۱۶). از جمله مطالعاتی که در زمینه تخصیص منابع آب و زمین انجام شده می‌توان به مطالعات زیر اشاره نمود. لی و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه خود چارچوبی برای تخصیص جامع منابع آب و زمین کشاورزی برای انواع محصولات زراعی مختلف در حوضه رودخانه سونگ‌هوا در شمال غربی چین ایجاد کردند. مدل آن‌ها شامل توسعه یک الگوی بهینه‌سازی چندبعدی برای تخصیص هم‌زمان منابع آب و زمین کشاورزی که شامل اهداف عدالت در تخصیص منابع، سود اقتصادی، بهره‌وری بیولوژیکی، اثرات زیست‌محیطی هوا و آب، منابع مربوطه و ابعاد اجتماعی، اقتصادی، اکولوژیکی و زیست‌محیطی است (۲).

آمانتا بهبهانی (۲۰۲۰) با استفاده از مدل بهینه‌سازی زمانی و مکانی به تخصیص آب آبیاری و تعیین الگوی کشت با هدف حداکثرسازی سود خالص پرداختند (۱۷). لینکر (۲۰۲۰) یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر مدل برای تخصیص سطح زیر کشت و آب پیشنهاد کرد که می‌تواند برای ایجاد برنامه‌های آبیاری بهینه برای محصولات مختلف در مناطق مختلف مورد استفاده قرار گیرد. طرح پیشنهادی برای یک مزرعه فرضی با چهار مزرعه نزدیک دیویس انجام شده است (۱۸). لی و همکاران (۲۰۱۹) از یک رویکرد بهینه‌سازی- شبیه‌سازی برای تعیین هم‌زمان الگوی کشت و تخصیص آب آبیاری برای بهبود

برنامه‌ریزی و تعادل بخشی آبخوان‌ها در محدوده قم - کهک و جبران کسری تجمعی درازمدت آبخوان و تأکید بر شاخص‌های پایداری کشاورزی در افق برنامه‌ریزی بیست ساله پرداختند. نتایج نشان داد که اجرای الگوهای زراعی پیشنهادی علاوه بر جبران کسری درازمدت ۶۳۵ میلیون مترمکعبی و تعادل بخشی آبخوان محدوده مطالعاتی در طی افق برنامه‌ریزی، سبب خواهد شد که اشتغال نیروی کار و بهره‌وری فیزیکی مصرف منابع آبی، کودها و سموم شیمیایی افزایش و مصرف منابع آبی، کودها و سموم شیمیایی کاهش یابد (۲۳). مفتاح و همکاران (۱۳۹۹) به تعیین برداشت بهینه منابع آب و ارائه یک الگوی کشت بهینه در حوضه آبریز قره‌سو با استفاده از نظریه بازی پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که الگوی کشت فعلی در وضعیت بهینه نبوده و همچنین میزان بهره‌برداری فعلی بیش‌تر از مقدار تغذیه آبخوان است (۲۴). سیاسر و هنر (۱۳۹۶) به بهینه‌سازی تخصیص آب و الگوی کشت محصولات غالب کشاورزی در منطقه سیستان با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که الگوی کشت فعلی منطقه بهینه نبوده و با اجرای الگوی پیشنهادی سود حاصل به‌ازای هر هکتار زمین کشت شده افزایش می‌یابد (۲۵).

حوضه آبریز فرامرزی هیرمند یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبریز ایران است که نقش مهمی در حیات منطقه سیستان دارد. منطقه سیستان به دلیل بارندگی بسیار کم (متوسط ۵۰ میلی‌متر در سال) و تبخیر بسیار بالا (۴ الی ۵ هزار میلی‌متر در سال) دارای آب و هوای خشک و فراخشک است (۲۶). شرایط آب و هوایی و وابستگی کامل به رودخانه هیرمند و اقدامات کشور افغانستان در مهار آب رودخانه هیرمند، باعث بروز بحران شدید آبی و تأثیرات منفی در اقتصاد، کشاورزی، اشتغال و محیط‌زیست این منطقه شده

محیط خاک استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد که مدل پیشنهادی برای ارتقاء تخصیص کارآمد منابع آب و حفاظت از خاک مؤثر می‌باشد. ردپای کربن در منطقه گانژو بالاترین و در شهرستان گواتای کم‌ترین میزان را داشت و بیش‌ترین زمین به منطقه گانژو اختصاص یافت (۱۹). ایگزی و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی- فازی غیردقیق برای تخصیص بهینه منابع زمین و منابع آب آبیاری برای دستیابی به هدف حداکثرسازی سود اقتصادی سیستم در شهر جینینگ چین پیشنهاد نمودند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مدل برای پشتیبانی از توجیه طرح‌های تخصیص آب آبیاری و کاشت محصولات موجود در سیستم پیچیده منابع آب کشاورزی و همچنین شناسایی یک برنامه تخصیص آب مطلوب برای توسعه اجتماعی- اقتصادی مناطق تحت عدم قطعیت ارزشمند است. (۲۰). هائو و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه خود با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات^۱ به بهینه‌سازی الگوی کشت با در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به آب در دسترس و پتانسیل حفاظت و ذخیره آب برای حداکثرسازی سود در واحد حجم آب آبیاری پرداختند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد جهت دسترسی به حداکثر سود باید سطح زیر کشت و آب تخصیص داده‌شده به محصول ذرت را نسبت به سایر محصولات منطقه، افزایش داد (۲۱). ولی‌زادگان و دیندارسوها (۱۴۰۰) به تعیین سطح آبیاری و سطح زیر کشت بهینه برای محصولات عمده و رایج زراعی اراضی شبکه آبیاری و زهکشی مغان در پایاب سد ارس با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویای تصادفی پرداختند. نتایج بیانگر برتری الگوی کشت و سطوح آبیاری بهینه نسبت به کشت رایج در منطقه موردنظر بود (۲۲). امامی‌فر و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی الگوی کشت بهینه متناسب با آب قابل

محصولات کشاورزی و تعیین الگوی کشت بهینه در هر شهرستان منطقه سیستان با کاربرد تئوری بازی می‌باشد که برای این منظور از یک رویکرد برنامه‌ریزی دو سطحی و چارچوب بازی استاکلبرگ و الگوریتم ژنتیک، جهت بهینه‌سازی تخصیص آب آبیاری بین مناطق تحت آبیاری و محصولات کشاورزی و هم‌چنین تعیین الگوی کشت بهینه محصولات کشاورزی در پنج شهرستان منطقه سیستان طی سناریوهای مختلف مدیریتی استفاده شده است. در این مطالعه به‌طور هم‌زمان اهداف متضاد چندگانه عدالت در تخصیص آب و سود اقتصادی در نظر گرفته شده است.

مواد و روش‌ها

در یک فرایند تصمیم‌گیری، چنانچه تعداد تصمیم‌گیران بیش از یک نفر باشد، تصمیم‌گیری به‌علت وجود اهداف، دیدگاه‌ها و اولویت‌های متفاوت و غالباً متضاد تصمیم‌گیرندگان با مشکلاتی همراه است. چندین روش برای حل این نوع مسائل وجود دارد، یکی از روش‌های که در سال‌های اخیر بسیار موردتوجه بوده است، مدل‌های تئوری بازی است (۲۹). یکی از روش‌های نوین در تئوری بازی‌ها استفاده از تئوری استاکلبرگ در تخصیص منابع محدود است، این بازی از نوع بازی غیرهمکارانه است که در مطالعه حاضر توسعه داده شده است. بازی استاکلبرگ یک نمونه کلاسیک از مسائل بهینه‌سازی دو سطحی هستند که اغلب در تئوری بازی و اقتصاد مشاهده می‌شوند (۳۰). در این بازی افراد به دو گروه رهبر و پیرو تقسیم می‌شوند (۳۱). بنابراین تعادل بازی ابتدا با حل تابع هدف پیروها بررسی می‌شود (۳۲). پس‌از آن‌که رهبر حرکت خود را انجام داد، پیروان به انتخاب بهترین استراتژی که بازده آن‌ها را حداکثر می‌کند؛ می‌پردازند. در این مطالعه از یک

است و مسأله مدیریت آب را در این منطقه با مشکلات فراوانی مواجه ساخته است (۲۷). مطابق مطالعات جامع منابع آب سازمان کشاورزی سطوح قابل‌کشت کشاورزی در منطقه سیستان ۱۳۵ هزار هکتار است و سرانه آب سالانه با توجه به الگوی کشت در این منطقه به‌طور میانگین ۸۷۵۰ مترمکعب در هکتار است (۲۷، ۲۸). بنابراین برای کشاورزی منطقه سالانه حدود ۱۲۰۰ میلیون مترمکعب آب موردنیاز است که از کل سطوح زیر کشت تنها حدود ۸۵ هزار هکتار از اراضی (حدود ۶۳ درصد از کل اراضی) به کشت محصولات اختصاص می‌یابد (۲۸). آب موجود برای کشاورزی در منطقه سیستان منحصر به رودخانه هیرمند و کانال‌های منشعب از آن است. از آنجایی‌که این منطقه از توزیع نامناسب زمانی و مکانی آب رنج می‌برد و از طرف دیگر با رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی و توسعه بخش‌های کشاورزی و صنعتی مواجه است، افزایش تقاضای آب در این منطقه اتفاقی ناگزیر بوده و مدیریت منابع آب برای جلوگیری از مواجهه با بحران آب و تنش‌های احتمالی الزامی است (۲۷). با این شرایط و عدم وجود سفره‌های آب زیرزمینی در دشت سیستان و عدم دسترسی به منابع آبی دیگر، اهمیت کشاورزی در منطقه و با توجه به موقعیت استراتژیک و حساس منطقه در مرز شرقی ایران، اهمیت تخصیص آب در بخش کشاورزی در منطقه سیستان احساس می‌شود. بنابراین با توجه به این که بخش کشاورزی بیش‌ترین مصرف‌کننده آب در منطقه سیستان است و با وجود کمبود آب در منطقه، اتخاذ روش مناسب و توسعه مدلی برای تعیین الگوی کشت بهینه محصولات کشاورزی و تخصیص بهینه آب در مناطق آبیاری و محصولات کشاورزی یکی از مهم‌ترین گام‌ها در جهت مدیریت منابع آب است. بنابراین اهداف این مطالعه شامل تخصیص بهینه آب بین مناطق آبیاری و

کشت در هر منطقه i عملکرد محصول j به‌ازای یک هکتار در منطقه i ، a, b, c و پارامترهای تابع تولید آب، ET_j نیاز آبی محصول، R_i درآمد خالص، X_i میزان حق‌آبه اولیه هر منطقه i که توسط تصمیم‌گیرنده سطح بالا (رهبر) تعیین می‌شود. Y_{ij} آبی که تخصیص داده می‌شود به هر محصول در منطقه i که توسط تصمیم‌گیرنده سطح پایین (پیرو) تعیین می‌شود.

اهداف سطح بالا: جهت حداکثر کردن عدالت در تخصیص آب حوضه به‌منظور تخصیص متعادل آب بین ذینفعان حوضه مورد مطالعه، عدالت در تخصیص را نیز باید در نظر گرفت. برای اندازه‌گیری توزیع عدالت، ضریب جینی^۱ ارائه شد. به‌طورکلی از ضریب جینی برای اندازه‌گیری نابرابری درآمدها استفاده می‌شود، درحالی‌که امروزه از آن در نابرابری زمین و اندازه‌گیری نابرابری مصرف آب نیز استفاده می‌شود (۳۳). بنابراین، با استفاده از ضریب جینی می‌توان یک معیار نابرابری توزیع آب برای سطح حوضه آبریز تعریف کرد مقدار این ضریب در تخصیص آب به‌صورت تابع هدف زیر بیان می‌شود (۳۳).

$$\min Gini = \sum_{i=1}^m \sum_{i'=2}^m \left| \frac{X_i}{R_i} - \frac{X_{i'}}{R_{i'}} \right| / 2m \sum_{i=1}^m \frac{X_i}{R_i} - \text{water penalty up} \quad (1)$$

ناحیه برای تأمین منافع اقتصادی باید آب بیش‌تری به آن اختصاص داده شود. $\frac{X_i}{R_i}$ مقدار تخصیص آب به‌ازای هر واحد سود اقتصادی در هر منطقه آبیاری است. R_i تابع سود اقتصادی است که توسط رابطه ۲ نشان داده می‌شود (۳۴):

$$R_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \cdot F_{ij} \cdot A_{ij} - \gamma X_i, i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

موجود در بخش کشاورزی بیش‌تر باشد و با رابطه ۳ نشان داده می‌شود (۳۴).

استراتژی بهینه برای تخصیص آب آبیاری و تعیین الگوی بهینه کشت در بخش کشاورزی با دنبال کردن مدل تعادلی استاکلبرگ استفاده می‌شود. بر مبنای مدل استاکلبرگ دو نهاد تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده است. تصمیم‌گیرندگان سطح بالا، مدیران محلی که حق آبه اولیه را بین نواحی مختلف آبیاری تخصیص می‌دهند و با متغیر تصمیم X_i نشان داده می‌شود. نهاد دوم تصمیم‌گیرندگان سطح پایین، کشاورزان (پیروان) هستند که آب را بین محصولات کشاورزی توزیع می‌کنند و با Y_{ij} نشان داده می‌شود و سطح زیر کشت هر یک از محصولات موجود در الگوی کشت را تعیین می‌کنند و با A_{ij} نمایش داده می‌شود.

تعریف نمادها و متغیرها: i مناطق تحت آبیاری $i = 1, 2, \dots, m$ ، j نوع محصول در منطقه آبیاری $j = 1, 2, \dots, n$ مقدار سود برای محصول j در منطقه i به‌ازای هر واحد آبی که تخصیص داده می‌شود. γ قیمت آب که توسط رهبر تعیین می‌شود. η راندمان آبیاری، A_{ij} سطح زیر کشتی که اختصاص داده می‌شود به محصول j در منطقه i ، A_i سطح زیر

در این رابطه مقدار ضریب جینی بین صفر تا یک است. هرچه این مقدار به صفر نزدیک‌تر باشد به این معنی است که نواحی مختلف تخصیص آب یکسان به‌ازای هر واحد اقتصادی به‌دست می‌آورند و تخصیص آب میان مناطق عادلانه خواهد بود؛ و هرچه مقدار آن به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان می‌دهد که یک

محدودیت متناظر با تابع هدف تصمیم‌گیرندگان سطح بالا عبارت است از کل آب تخصیص‌یافته به مناطق تحت آبیاری که نمی‌تواند از مقدار کل آب

1- Gini coefficient

$$\sum_{i=1}^m X_i \leq S \quad (3)$$

تصمیم گیرندگان سطح پایین: تصمیم گیرنده سطح پایین کشاورزان هر منطقه هستند که نقش پیرو را دارند و هدف آن‌ها حداکثر کردن سود اقتصادی است. تابع هدف برای سطح پایین با استفاده از رابطه ۴ تعریف می‌شود (۳۴):

$$\max \sum_{i=1}^m R_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \cdot F_{ij} \cdot A_{ij} - \gamma X_i - \text{water penalty low} - \text{Area penalty } i = 1, \dots, m \quad (4)$$

محدودیت‌های متناظر با تابع هدف تصمیم گیرندگان سطح پایین عبارت‌اند از:

$$\sum_{j=1}^n Y_{ij} A_{ij} \leq X_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n A_{ij} \leq A_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$F_{ij} = a \cdot (\eta \sum_{j=1}^n Y_{ij})^2 + b \cdot (\eta \sum_{j=1}^n Y_{ij}) + c, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

زمین قابل کشت در صورتی که سطح زیر کشت از حداکثر سطح موجود بیش‌تر شود از معادله ۱۰ محاسبه می‌شود (۱). در این‌جا α ضریب تابع جریمه مربوط به تابع هدف سطح بالا، β ضریب تابع جریمه مربوط به سطح پایین و μ ضریب تابع جریمه مربوط زمین قابل کشت می‌باشد که مقدار این پارامترها با سعی و خطا برابر ۱۰۰ انتخاب شده است.

روش ارضاء قیود^۱ به صورت تعریف آن‌ها در قالب تابع جریمه^۲ در تابع هدف است. برای تابع هدف سطح بالا چنانچه آب تخصیص داده شده به هر منطقه از کل آب موجود بیش‌تر باشد از رابطه ۸ و در تابع هدف سطح پایین تابع جریمه حداکثر آب در دسترس اگر آب مصرفی محصولات بیش‌تر از آب تخصیص یافته باشد از معادله ۹ و تابع جریمه حداکثر

$$\text{water penalty up} = \alpha \left(\left(\sum_{j=1}^n X_j / S \right) - 1 \right) \quad (8)$$

$$\text{water penalty low} = \beta \left(\left(\sum_{j=1}^n A_{ij} \cdot Y_{ij} / X_i \right) - 1 \right) \quad (9)$$

$$\text{Area penalty} = \mu \left(\left(\sum_{j=1}^n A_{ij} / A_i \right) - 1 \right) \quad (10)$$

1- Constraint Satisfaction Problems

2- Penalty Function

توابع هدف سطح بالا و پایین با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه و به‌عنوان یک تابع برازندگی^۲ وارد الگوریتم ژنتیک می‌شود.

$$M^U = \begin{cases} 0, & F \geq F_{max} \\ \frac{F_{max}-F}{F_{max}-F_{min}}, & F_{min} \leq F \leq F_{max} \\ 1, & F \leq F_{min} \end{cases} \quad (11)$$

$$M^L = \begin{cases} 0, & f \leq f_{min} \\ \frac{f - f_{min}}{f_{max} - f_{min}}, & f_{min} \leq f \leq f_{max} \\ 1, & f \geq f_{i,max} \end{cases}$$

برای دستیابی به پاسخ بهینه و مناسب در الگوریتم ژنتیک نیاز به تنظیم پارامترهایی مانند اندازه جمعیت، تعداد تکرار، میزان جهش^۴ و نرخ تقاطع^۵ است. مقادیر بهینه پارامترهای اولیه الگوریتم ژنتیک بر اساس تجربه، از تکرارهای متعدد اجرای الگوریتم و به‌صورت آزمون و خطا به‌دست آمده است. با تغییر این پارامترها و مقایسه نتایج پاسخ‌های بهینه توابع هدف در هر حالت، بهترین مقادیر برای این پارامترها برآورد شد (جدول ۲).

مدل استفاده‌شده در این مطالعه با استفاده از یک فرایند فراابتکاری که ترکیبی از الگوریتم ژنتیک پویا^۱ و روش برنامه‌ریزی فازی است حل شده است (۳۴، ۳۵). برای این منظور توابع عضویت هر یک از

با توجه به این‌که مطالعه حاضر در سطح منطقه‌ای است داده‌های موردنیاز آن از نوع اسنادی و ثبت‌شده در دستگاه‌های دولتی و ذی‌ربط است. داده‌های موردنیاز از سازمان جهاد کشاورزی استان سیستان و بلوچستان و شرکت آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان جمع‌آوری شد. جهت حل مدل پیشنهادی از الگوریتم ژنتیک استفاده شد که با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون در محیط برنامه‌نویسی ویژوال استودیو کد^۳ کدنویسی شد.

نتایج و بحث

برای تخمین تابع تولید آب- محصول هر یک از محصولات تحت بررسی در پنج شهرستان منطقه سیستان از ضرایب توابع تولید آب محصول درجه دوم محاسبه‌شده توسط غفاری مقدم و همکاران (۲۰۲۲) استفاده شده است که ضرایب مربوطه به آن در جدول ۱ ارایه شده است (۳۶).

- 1- Dynamic Genetic Algorithm
- 2- Fitness Function
- 3- Visual Studio Code
- 4- Mutation
- 5- Crossover

جدول ۱- ضرایب تابع تولید آب برای محصولات انتخابی در مناطق سیستان.

Table 1. Water production coefficient for selected crops in Sistan regions.

هیرمند Hirmand			زهک Zahak			زابل - نیمروز - هامون Zabol- Nimrouz- Hamoun			محصولات
c	b	a	C	b	a	c	b	a	
-163	0.51	-0.000044	-270	0.87	-0.00083	-270	0.87	-0.00083	گندم Wheat
-132	0.53	-0.000051	-132	0.53	-0.000051	-132	0.53	-0.000051	جو Barley
-2274	5.25	-0.00037	-2274	0.87	-0.00032	-2274	5.25	-0.00032	پیاز onion
-240	5.11	-0.00046	-1834	0.53	-0.00082	-1834	8.41	-0.00082	خریزه Melon
-1260	3.82	-0.00016	-1266	3.81	-0.00016	-1664.6	5	-0.00041	هندوانه WaterMelon
-1266	2.14	-0.000048	-1266	2.14	-0.000048	-1266	2.14	-0.000048	یونجه Alfalfa

مأخذ: (۳۶)

جدول ۲- بهترین مقدار پارامترهای تنظیمی الگوریتم ژنتیک.

Table 2. The best value of genetic algorithm regulatory parameters.

انتخاب شده Selected	مورد آزمایش Tested	فاکتورها Factors
25	25 30 35	تعداد جمعیت Number of population
700	700 800 1000	تعداد تکرار سطح بالا Number of iteration in up level
100	30 50 100	تعداد تکرار سطح پایین Number of iteration in low level
1000000	1000000 2000000 5000000	میزان جهش سطح بالا High level mutation rate
200000	200000 500000 1000000	میزان جهش سطح پایین Low level mutation rate
0.2	0.2 0.3 0.4	احتمال جهش سطح بالا High level mutation probability
0.2	0.2 0.3 0.4	احتمال جهش سطح پایین Low level mutation probability

تخصیص یافته به هر منطقه هستند که مدل در پی یافتن آن‌هاست. در جدول ۳ نتایج حاصل از تخصیص بهینه آب و زمین بین محصولات و مناطق تحت بررسی در سناریو پایه آورده شده است.

سناریوی پایه به منظور برآورد تابع هدف در شرایط خشک‌سالی، راندمان آبیاری ۳۵ درصد و آبیاری کامل تعریف شده است. متغیرهای تصمیم مسأله شامل تعیین میزان سطح بهینه کشت هر محصول، آب تخصیص یافته به هر محصول، آب

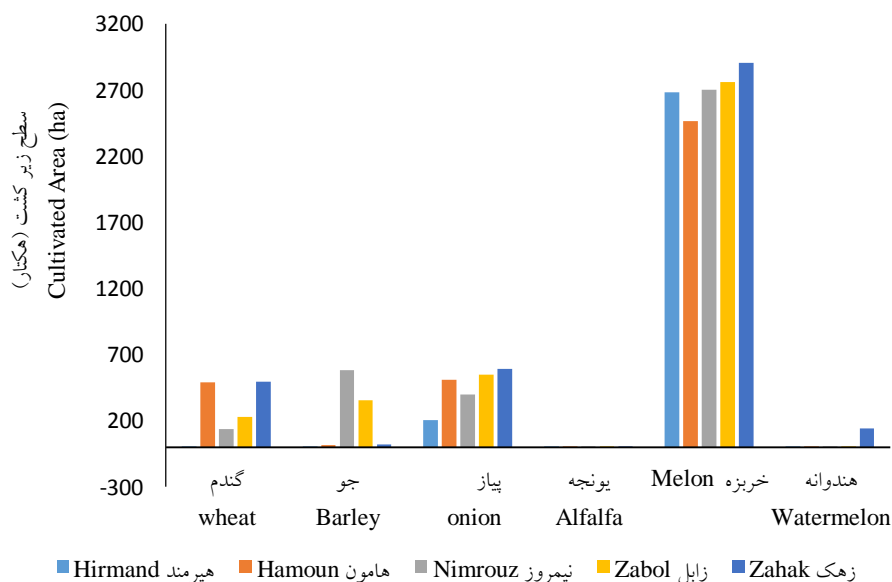
جدول ۳- میزان آب تخصیص داده شده و سطح زیر کشت بهینه هر محصول (هزار مترمکعب/هکتار).

Table 3. The amount of water allocated and the optimal cultivated area of each product (1000M³/ha).

مناطق / محصول	متغیرهای تصمیم Decision variables	هیرمند Hirmand	هامون Hamoun	نیمروز Nimrouz	زابل Zabol	زهک Zahak
	تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی Water allocation per unit of economic benefit $\frac{X_i}{R_i}$	0.0000055	0.0000059	0.0000057	0.0000057	0.0000057
	سود اقتصادی (ریال) economic benefit (Rial)	7.08×10^{12}	9.88×10^{12}	1.06×10^{13}	1.1×10^{13}	1.2×10^{13}
	سطح زیر کشت (هکتار) Cultivated area (ha)	3754.7	3118.3	3803	4396.45	3566
	میزان آب تخصیص داده شده به هر منطقه (هزار مترمکعب) Water allocation to Area (1000m ³)	39048	50302	53865	55927	60848
گندم Wheat	مقدار آب تخصیص داده شده به هر محصول (هزار مترمکعب) Water allocation to cop (1000m ³)	68	7467	2104	3509	7582
	سطح زیر کشت (هکتار) Cultivated area (ha)	4.5	487.6	137.4	229.16	495
جو Barley	مقدار آب تخصیص داده شده به هر محصول (هزار مترمکعب) Water allocation to cop (1000m ³)	46	221	8323	5091	274
	سطح زیر کشت (هکتار) Cultivated area (ha)	3.22	15.5	582.6	356.4	19.21
پیاز Onion	مقدار آب تخصیص داده شده به هر محصول (هزار مترمکعب) Water allocation to cop (1000m ³)	4414	10905	8460	11758	12613
	سطح زیر کشت (هکتار) Cultivated area (ha)	206.25	509.61	395.31	549.45	589.41
یونجه Alfalfa	مقدار آب تخصیص داده شده به هر محصول (هزار مترمکعب) Water allocation to cop (1000m ³)	12	0.71	162	104.5	311
	سطح زیر کشت (هکتار) Cultivated area (ha)	0.19	0.01	2.5	1.63	0.5
خریزه Melon	مقدار آب تخصیص داده شده به هر محصول (هزار مترمکعب) Water allocation to cop (1000m ³)	34490	31665	34699	35440	37321
	سطح زیر کشت (هکتار) Cultivated area (ha)	2682.6	2463	2699	2756.5	2902.8
هندوانه Water Melon	مقدار آب تخصیص داده شده به هر محصول (هزار مترمکعب) Water allocation to cop (1000m ³)	17.4	31	117.1	14	2987.6
	سطح زیر کشت (هکتار) Cultivated area (ha)	0.83	1.47	5.59	0.7	142.65

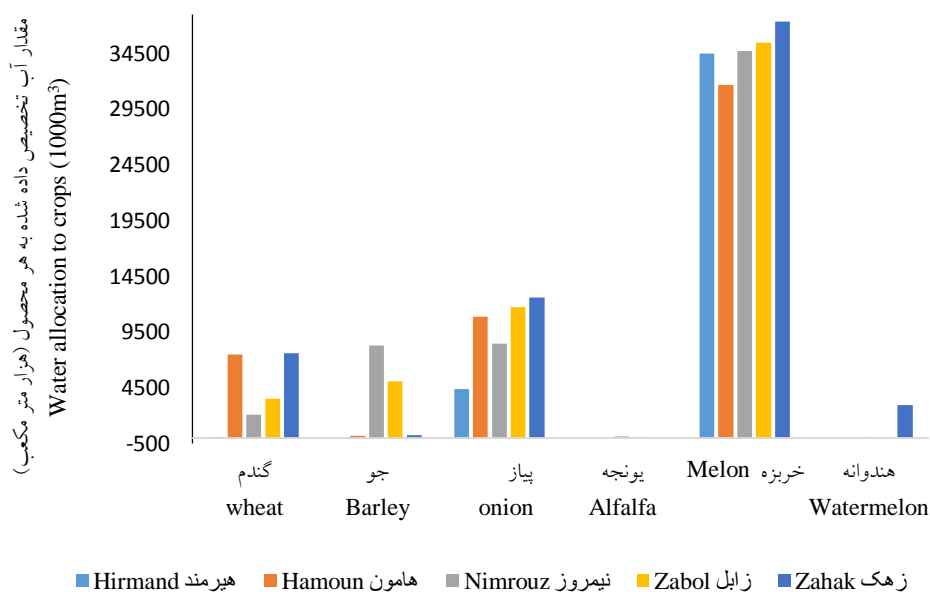
بین محصولات بیشترین آب به محصول خربزه و کمترین آب به محصول یونجه تخصیص داده شده است. بیشترین سطح زیر کشت متعلق به محصول خربزه است که ناشی از نیاز آبی نسبتاً پایین این محصول و ارزش اقتصادی بالای آن است بعد از محصول خربزه بیشترین سطح زیر کشت به پیاز اختصاص دارد با توجه به نیاز آبی بالای پیاز از آنجائی که سود اقتصادی بالایی دارد سطح زیر کشت بالایی به این محصول اختصاص داده شده است. همچنین کمترین سطح زیر کشت متعلق به یونجه است به طوری که در تمام شهرستانها میزان سطح زیر کشت یونجه زیر ۲/۵ هکتار است که علت آن نیاز آبی بالای این محصول است. در شرایط خشکسالی به دلیل حجم کم آب الگوی کشت به سمت محصولاتی با نیاز آبی کمتر می‌رود. در شکل‌های ۱ و ۲ میزان سطح زیر کشت و آب تخصیص داده شده به هر محصول در هر شهرستان نشان داده شده است.

سود خالص سالانه در سناریو پایه $5/06 \times 10^{13}$ ریال و میزان کل آب در دسترس برای بخش کشاورزی ۲۶۰ میلیون مترمکعب است. مقدار ضریب جینی به دست آمده در این سناریو ۰/۰۰۵۳ است که مقدار این شاخص نزدیک به صفر است و نشان می‌دهد تخصیص آب بین مناطق عادلانه بوده است. مقدار شاخص $\frac{X_i}{R_i}$ در همه شهرستانها مشابه و نشان‌دهنده توزیع عادلانه آب بین مناطق تحت بررسی است. بیشترین مقدار سود اقتصادی به دست آمده متعلق به شهرستان زهک و کمترین سود متعلق به شهرستان هیرمند است. کل سطح زیر کشت در سناریو پایه ۱۸۶۳۸/۸ هکتار است که از این مقدار زابل با ۴۳۹۶/۴۵ هکتار بیشترین سطح زیر کشت و هامون با ۳۱۱۸/۳ هکتار کمترین سطح زیر کشت را به خود اختصاص داده است. بیشترین آب به شهرستان زهک با ۶۰۸۴۸ هزار مترمکعب و کمترین آب به شهرستان هیرمند تخصیص داده شده است. در



شکل ۱- سطح زیر کشت تخصیص داده شده به هر محصول در پنج شهرستان منطقه سیستان (هکتار).

Figure 1. The cultivated area allocated to each product in 5 cities of Sistan region (ha).



شکل ۲- مقدار آب تخصیص داده شده به هر محصول در پنج شهرستان منطقه سیستان (هزار مترمکعب).
Figure 2. The amount of water allocated to each crop in 5 cities of Sistan region (1000m³).

سناریو راندمان آبیاری: چنانچه روش آبیاری در سطح مزرعه به صورت غرقابی باشد راندمان آبیاری ۳۵ درصد، اگر از سیستم آبیاری بارانی استفاده شود راندمان آبیاری ۵۰ درصد و چنانچه از سیستم آبیاری تحت فشار (قطره‌ای) استفاده شود راندمان آبیاری ۷۰ درصد خواهد بود (۳۷). در این جا فرض می‌شود تکنولوژی آبیاری بهبودیافته و راندمان آبیاری به ۵۰ و ۷۰ درصد افزایش یابد. جدول ۴ نتایج تجزیه و تحلیل مربوط به سه راندمان آبیاری ۳۵، ۵۰ و ۷۰ درصد را نشان می‌دهد.

تجزیه و تحلیل سناریوها: جهت داشتن برنامه بلندمدت در راستای دستیابی به توسعه پایدار در منطقه سیستان نیاز است تا عدم قطعیت‌ها در مدل‌سازی‌ها در نظر گرفته شود. برای این منظور از فن سناریوسازی برای کشف عدم قطعیت آینده و تأثیر آن بر نتایج استفاده شد. در این مطالعه نه سناریو شامل سه سناریو راندمان آبیاری، سه سناریو شرایط اقلیمی و سه سناریو شرایط کم آبیاری تعریف شد.

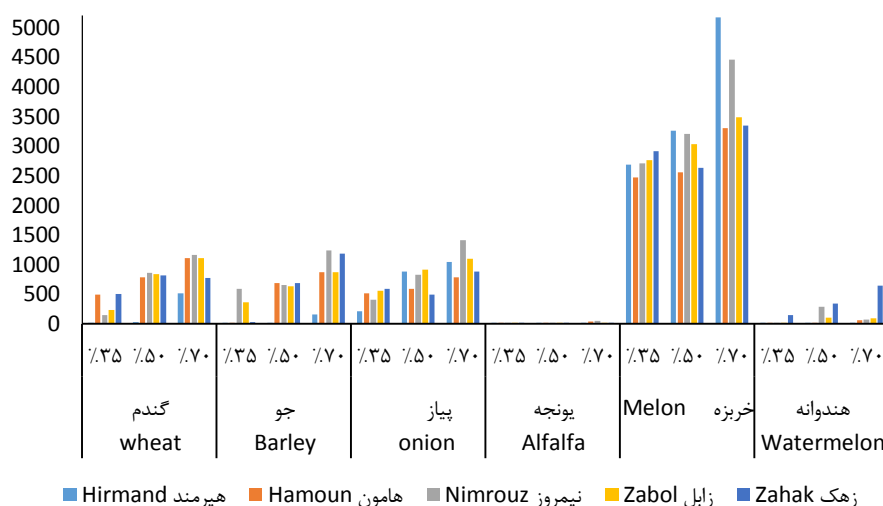
جدول ۴- تجزیه و تحلیل سناریو تغییر راندمان آبیاری.

Table 4. Analysis Scenario of irrigation efficiency change.

70%	50%	35%	راندمان آبیاری Irrigation efficiency	
0.00011	0.00018	0.0053	ضریب جینی Gini Coefficient	
7.68×10^{13}	5.74×10^{13}	5.06×10^{13}	سود کل (ریال) Total profit (Rial)	
34782.4	25034	18240.32	کل سطح زیر کشت Total area	
70%	50%	35%	راندمان آبیاری Irrigation Efficiency	
1.45×10^{13}	9.48×10^{12}	7.08×10^{12}	سود (ریال) Profit (Rial)	
49253	43002	39048	مقدار آب (هزار مترمکعب) Amount of water (1000m ³)	
0.0000034	0.0000045	0.0000055	تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی $\frac{X_i}{R_i}$ Water allocation per unit of economic benefit $\frac{X_i}{R_i}$	هیرمند Hirmand
6857	4176.41	2897.6	کل سطح زیر کشت (هکتار) Total Area (ha)	
1.35×10^{13}	1.04×10^{13}	9.88×10^{12}	سود (ریال) Profit (Rial)	
45755	46937	50302.5	مقدار آب (هزار مترمکعب) Amount of water (1000m ³)	
0.0000034	0.0000045	0.00000509	تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی $\frac{X_i}{R_i}$ Water allocation per unit of economic benefit $\frac{X_i}{R_i}$	هامون Hamoun
6128	4599.75	3477.1	کل سطح زیر کشت (هکتار) Total Area (ha)	
1.87×10^{13}	1.34×10^{13}	1.06×10^{13}	سود (ریال) Profit (Rial)	
63385	60853	53865	مقدار آب (هزار مترمکعب) Amount of water (1000m ³)	
0.0000034	0.0000045	0.00000507	تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی $\frac{X_i}{R_i}$ Water allocation per unit of economic benefit $\frac{X_i}{R_i}$	نیمروز Nimrouz
8363	5801.46	3822.34	کل سطح زیر کشت (هکتار) Total Area (ha)	
1.46×10^{13}	1.27×10^{13}	1.1×10^{13}	سود (ریال) Profit (Rial)	
49645	57629	55927.8	مقدار آب (هزار مترمکعب) Amount of water (1000m ³)	
0.0000034	0.0000045	0.00000507	تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی $\frac{X_i}{R_i}$ Water allocation per unit of economic benefit $\frac{X_i}{R_i}$	زابل Zabol
6627.8	5506.3	3893.8	کل سطح زیر کشت (هکتار) Total Area (ha)	
1.53×10^{13}	1.14×10^{13}	1.2×10^{13}	سود (ریال) Profit (Rial)	
51958	51576	60848.13	مقدار آب (هزار مترمکعب) Amount of water (1000m ³)	
0.0000034	0.0000045	0.00000507	تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی $\frac{X_i}{R_i}$ Water allocation per unit of economic benefit $\frac{X_i}{R_i}$	زهک Zahak
6806.7	4950.1	4149.54	کل سطح زیر کشت (هکتار) Total Area (ha)	

می‌یابد، این نکته بیانگر نیاز آب کم‌تر برای دستیابی به یک واحد سود اقتصادی است. بنابراین با افزایش میزان راندمان آبیاری که تأثیر مستقیم بر میزان مصرف آب در بخش کشاورزی دارد میزان شاخص $\frac{X_i}{R_i}$ کاهش و مقدار سود افزایش می‌یابد. با افزایش راندمان آبیاری از ۳۵ درصد به ۵۰ و ۷۰ درصد مقدار سود به ترتیب $۰/۶۸ \times ۱۰^{۱۳}$ و $۲/۶۲ \times ۱۰^{۱۳}$ میلیون ریال نسبت به سناریو پایه افزایش می‌یابد.

با افزایش راندمان آبیاری از ۳۵ درصد به ۵۰ درصد و ۷۰ درصد مقدار ضریب جینی کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده آن است استفاده از تکنولوژی‌های جدید آبیاری منجر به تخصیص عادلانه‌تر آب بین مناطق خواهد شد. افزایش راندمان آبیاری باعث کاهش معناداری در مقدار شاخص $\frac{X_i}{R_i}$ در تمام شهرستان‌های مورد مطالعه خواهد شد که بیانگر آن است که با افزایش راندمان آبیاری میزان شاخص تخصیص آب به‌ازای هر واحد سود اقتصادی کاهش



شکل ۳- سطح زیر کشت بهینه هر یک از محصولات در سناریو راندمان آبیاری (هکتار).

Figure 3. The optimal cultivated area of each crops in the irrigation efficiency scenario (ha).

با نیاز آبی کم‌تر و ارزش اقتصادی بالاتر مانند خربزه و پیاز سوق می‌یابد به‌طوری‌که تغییرات سطح زیر کشت خربزه قابل توجه است. اگرچه سطح زیر کشت محصولات با ارزش اقتصادی بالا در سناریو پایه بالا است اما هم‌چنان با اعمال سناریوهای افزایش راندمان آبیاری به ۵۰ و ۷۰ درصد با روند صعودی همراه است. نتایج به‌دست آمده مشابه نتایج کلبعلی و همکاران (۱۳۹۵) است آن‌ها نیز در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند با افزایش راندمان آبیاری میزان سود افزایش خواهد یافت (۳۸).

در شکل ۳ سطح زیر کشت هر یک از محصولات نشان داده شده است. نتایج بیانگر آن است که با افزایش راندمان آبیاری سطح زیر کشت اکثر محصولات افزایش یافته است. با افزایش راندمان آبیاری از ۳۵ به ۵۰ درصد میزان سطح زیر کشت $۶۷۹۳/۶۵$ هکتار و با افزایش راندمان آبیاری به ۷۰ درصد میزان سطح زیر کشت نسبت به سناریو پایه ۱۶۵۴۲ هکتار افزایش نشان می‌دهد. هم‌چنین با افزایش راندمان آبیاری محصولاتی که نیاز آبی بالایی دارند مانند پیاز و هندوانه تغییرات سطح زیرکشت آن‌ها اندک است و الگوی کشت به سمت محصولاتی

احتمال و حجم آب تخصیصی به بخش کشاورزی با استفاده از تابع توزیع نرمال برای سه دوره خشک‌سالی، نرمال و ترسالی به دست آمد که نتایج مربوط به آن در جدول ۵ ارائه شده است.

سناریو شرایط اقلیمی مختلف: برای تعیین شرایط مختلف اقلیمی از جریان ورودی رودخانه هیرمند در این پژوهش استفاده شده است. با استفاده از روش داده‌های تاریخی و شبیه‌سازی مونت کارلو^۱ سطوح

جدول ۵- اطلاعات مربوط به حجم آب تخصیصی به بخش کشاورزی و احتمال انواع سطح جریان (میلیون مترمکعب).

Table 5. Information related to the amount of water allocated to the agricultural sector and the possibility of different types of flow levels (m³).

میزان تخصیص Amount of allocation	احتمال مربوطه Probability	میزان آب تخصیصی به بخش کشاورزی The amount of water allocated to the agricultural sector
Low	25%	260
Normal	50%	450
High	25%	650

بخش کشاورزی میزان سود $1/99 \times 10^{13}$ و $5/94 \times 10^{13}$ ریال نسبت به حالت پایه افزایش خواهد یافت. چنانچه منطقه در شرایط نرمال قرار داشته باشد و میزان آب ورودی به بخش کشاورزی ۴۵۰ میلیون مترمکعب باشد با این مقدار آب می‌توان $7/05 \times 10^{13}$ ریال سود به دست آورد و از مجموع سطح زیرکشت کل منطقه سیستان $30269/64$ هکتار زیرکشت خواهد رفت که از این مقدار بیش‌ترین سطح کشت را زهک و کم‌ترین را هامون به خود اختصاص داده است. اگر منطقه در شرایط ترسالی قرار بگیرد مقدار سود حاصل از ۶۵۰ میلیون مترمکعب آب تخصیص داده به منطقه سیستان $1/1 \times 10^{14}$ ریال خواهد بود که با این مقدار آب می‌توان $51781/75$ هکتار از اراضی قابل‌کشت را زیر کشت برد. در این شرایط بیش‌ترین آب به شهرستان زابل و کم‌ترین آب به شهرستان هامون تخصیص داده می‌شود. در شکل ۴ نتایج مربوط به سطح زیر کشت هر یک از محصولات در پنج شهرستان منطقه سیستان آورده شده است.

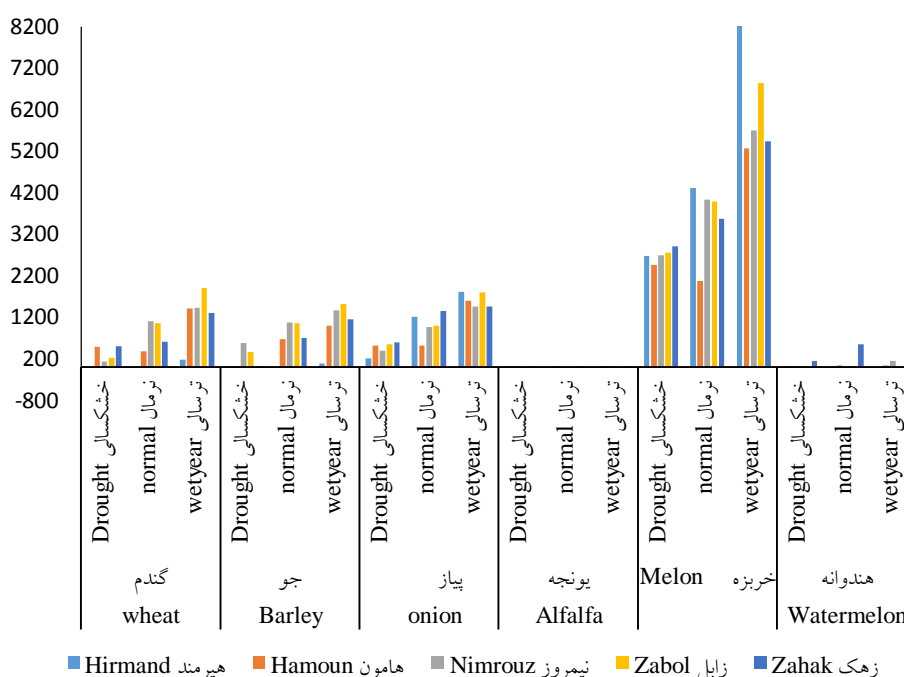
با توجه به نتایج جدول ۵ زمانی که جریان ورودی آب کم باشد در سال‌های کم‌آب قرار داشته باشیم در این حالت حجم آب تخصیصی به بخش کشاورزی ۲۶۰ میلیون مترمکعب است هنگامی که در سال‌های نرمال از نظر آبی قرار داشته باشیم، در این حالت حجم آب تخصیصی به بخش کشاورزی ۴۵۰ میلیون مترمکعب است و در سال‌های پر آب حجم آب تخصیصی به بخش کشاورزی ۶۵۰ میلیون مترمکعب خواهد بود.

با افزایش حجم آب ورودی به بخش کشاورزی مقدار ضریب جینی کاهش یافته و نشان می‌دهد هرچه میزان آب در دسترس برای بخش کشاورزی بیش‌تر باشد تخصیص آب عادلانه‌تر خواهد بود. در شرایط خشک‌سالی میزان سطح زیر کشت کاهش یافته و این منجر به کاهش سود و شرایط ترسالی باعث افزایش سطح زیر کشت شده و افزایش مقدار سود می‌شود. بیش‌ترین سود در شرایط نرمال و ترسالی متعلق به شهرستان زهک و کم‌ترین سود در شرایط نرمال متعلق به شهرستان هامون و در شرایط ترسالی متعلق به شهرستان نیمروز است. با افزایش تخصیص آب به

جدول ۶- تجزیه و تحلیل سناریو شرایط اقلیمی مختلف.

Table 6. Analysis Scenario of different climatic conditions.

ترسالی Wet year	نرمال Normal	خشک‌سالی Drought	شرایط اقلیمی Climatic conditions	
0.000051	0.00012	0.0053	ضریب جینی Gini Coefficient	
1.1×10^{14}	7.05×10^{13}	5.06×10^{13}	سود کل Total profit	
51781.75	30269.64	18240.32	کل سطح زیر کشت Total area	
ترسالی Wet year	نرمال Normal	خشک‌سالی Drought	شرایط اقلیمی Climatic conditions	
2.31×10^{13}	1.26×10^{13}	7.08×10^{12}	سود (ریال) Profit (Rial)	
126541	81550	39048	مقدار آب (هزار مترمکعب) Amount of water (1000m ³)	هیرمند
0.0000055	0.0000064	0.0000055	تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی $\frac{X_i}{R_i}$ Water allocation per unit of economic benefit $\frac{X_i}{R_i}$	Hirmand
10324.3	5531.21	2897.6	کل سطح زیر کشت (هکتار) Total area (ha)	
1.95×10^{13}	8.53×10^{12}	9.88×10^{12}	سود (ریال) Profit (Rial)	
117774	52247	50302.5	مقدار آب (هزار مترمکعب) Amount of water (1000m ³)	هامون
0.00000605	0.0000063	0.00000509	تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی $\frac{X_i}{R_i}$ Water allocation per unit of economic benefit $\frac{X_i}{R_i}$	Hamoun
9305.5	3692.12	3477.1	کل سطح زیر کشت (هکتار) Total area (ha)	
1.95×10^{13}	1.65×10^{13}	1.06×10^{13}	سود (ریال) Profit (Rial)	
126574	104747	53865	مقدار آب (هزار مترمکعب) Amount of water (1000m ³)	نیمروز
0.0000065	0.0000063	0.00000507	تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی $\frac{X_i}{R_i}$ Water allocation per unit of economic benefit $\frac{X_i}{R_i}$	Nimrouz
10094	7177.5	3822.34	کل سطح زیر کشت (هکتار) Total area (ha)	
2.34×10^{13}	1.63×10^{13}	1.1×10^{13}	سود (ریال) Profit (Rial)	
151056	103724	55927.8	مقدار آب (هزار مترمکعب) Amount of water (1000m ³)	زابل
0.0000065	0.0000063	0.00000507	تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی $\frac{X_i}{R_i}$ Water allocation per unit of economic benefit $\frac{X_i}{R_i}$	Zabol
12084	7089.6	3893.8	کل سطح زیر کشت (هکتار) Total area (ha)	
2.49×10^{13}	1.66×10^{13}	1.2×10^{13}	سود (ریال) Profit (Rial)	
128046	105725	60848.13	مقدار آب (هزار مترمکعب) Amount of water (1000m ³)	زهک
0.0000051	0.0000063	0.00000507	تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی $\frac{X_i}{R_i}$ Water allocation per unit of economic benefit $\frac{X_i}{R_i}$	Zahak
9974	6779	4146.54	کل سطح زیر کشت (هکتار) Total area (ha)	



شکل ۴- سطح زیر کشت بهینه هر یک از محصولات در سناریو شرایط اقلیمی.

Figure 4. The optimal cultivated area of each product in the climate scenario.

می‌رود و محصولات باثبات درآمدی بالاتر تغییرات کم‌تری دارند (۳۹). سناریو شرایط کم‌آبایی: در شرایط آبیاری کامل، هیچ‌گونه تنش آبی در دوره رشد محصولات به وجود نمی‌آید و محصولات کشاورزی نیاز آبی خود را به‌صورت کامل دریافت می‌کنند در این مطالعه سناریوهای مختلف کم‌آبایی شامل ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد در دوره رشد محصولات کشاورزی اعمال شده است. در این حالت نیاز آبی محصول به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد کاهش داده و در هر یک از این حالت‌ها میزان سود، سطح زیر کشت، آب تخصیص داده‌شده به تفکیک برای هر شهرستان محاسبه و با شرایط آبیاری کامل مقایسه شدند (جدول ۷).

نتایج مربوط به میزان سطح زیر کشت محصولات در سناریو شرایط اقلیمی نشان می‌دهد با افزایش جریان ورودی آب، سطح زیر کشت برای همه محصولات افزایش خواهد یافت و با افزایش جریان ورودی آب به میزان ۴۵۰ و ۶۵۰ میلیون مترمکعب سطح زیر کشت به ترتیب ۱۲۰۲۹/۳۲ و ۳۳۵۴۱/۴۳ هکتار نسبت به سناریو پایه افزایش خواهد داشت. بیش‌ترین افزایش سطح زیر کشت مربوط به خربزه و پیاز و کم‌ترین افزایش مربوط به یونجه و هندوانه است و سایر محصولات دارای تغییرات اندکی هستند. نتایج به‌دست آمده مشابه با نتایج مطالعه اکبری و همکاران (۱۳۹۸) است آن‌ها نیز به این نتیجه رسیدند که در سناریوی خشک‌سالی نیز به دلیل کاهش حجم آب، الگوی کشت به سمت محصول با آبیاری کم‌تر

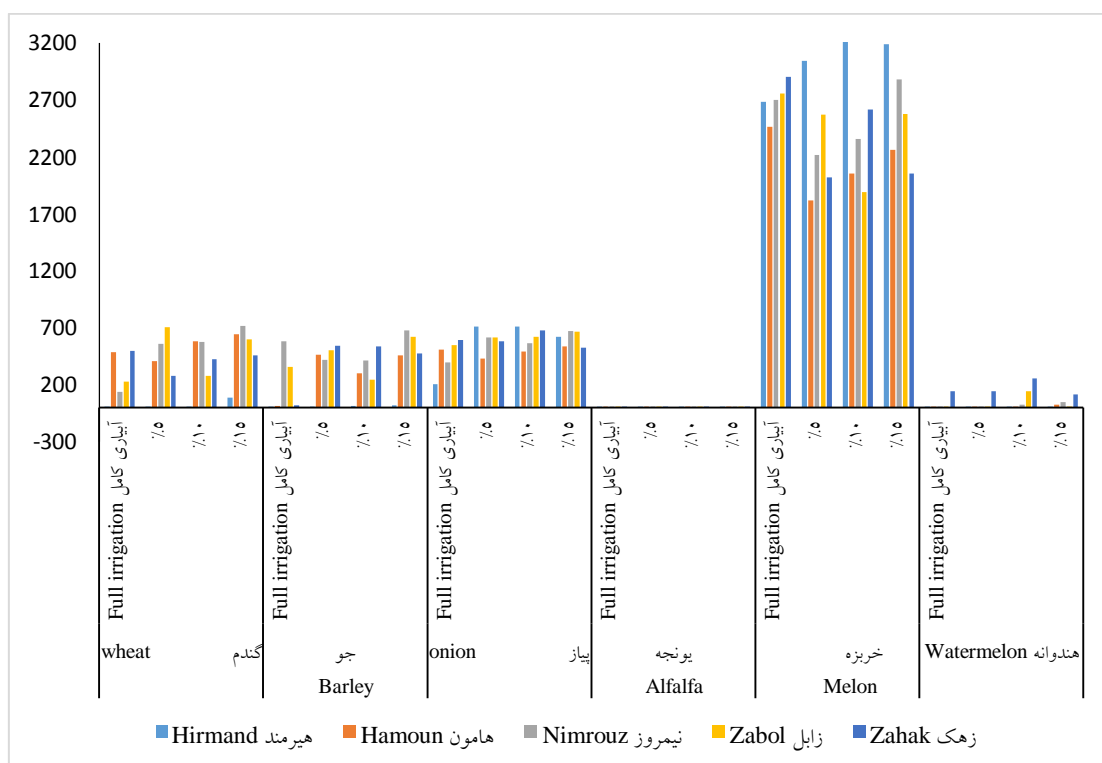
جدول ۷- تجزیه و تحلیل سناریو شرایط کم آبیاری.

Table 7. Analysis Scenario of Dificit irrigation conditions.

15%	10%	5%	آبیاری کامل Full irrigation	شرایط کم آبیاری Deficit irrigation condition	
0.000123	0.00012	0.00051	0.0053	ضریب جینی Gini Coefficient	
4.83×10^{13}	4.81×10^{13}	4.44×10^{13}	5.06×10^{13}	سود کل Total profit	
20919	19613	18638.83	18240.32	کل سطح زیر کشت Total area	
15%	10%	5%	Full irrigation	شرایط کم آبیاری Deficit irrigation condition	
8.83×10^{12}	1.07×10^{13}	8.69×10^{12}	7.08×10^{12}	سود (ریال) Profit (Rial)	
47595	58355	51645	39048	مقدار آب (هزار مترمکعب) Amount of water (1000m ³)	
0.0000054	0.00000545	0.0000059	0.0000055	تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی $\frac{X_i}{R_i}$ Water allocation per unit of economic benefit $\frac{X_i}{R_i}$	هیرمند Hirmand
3919	4563.3	3754.74	2897.6	کل سطح زیر کشت (هکتار) Total area (ha)	
9.05×10^{12}	8.35×10^{12}	7.14×10^{12}	9.88×10^{12}	سود (ریال) Profit (Rial)	
48775	45033	43152	50302.5	مقدار آب (هزار مترمکعب) Amount of water (1000m ³)	
0.0000054	0.0000054	0.0000058	0.00000509	تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی $\frac{X_i}{R_i}$ Water allocation per unit of economic benefit $\frac{X_i}{R_i}$	هامون Hamoun
3918.7	3420.4	3118.3	3477.1	کل سطح زیر کشت (هکتار) Total area (ha)	
1.15×10^{13}	9.62×10^{12}	9.14×10^{12}	1.06×10^{13}	سود (ریال) Profit (Rial)	
62030	51865	53319	53865	مقدار آب (هزار مترمکعب) Amount of water (1000m ³)	
0.0000054	0.0000054	0.00000583	0.00000507	تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی $\frac{X_i}{R_i}$ Water allocation per unit of economic benefit $\frac{X_i}{R_i}$	نیمروز Nimrouz
4986.6	3934.02	3803.12	3822.34	کل سطح زیر کشت (هکتار) Total area (ha)	
1.03×10^{13}	8.08×10^{12}	1.05×10^{12}	1.1×10^{13}	سود (ریال) Profit (Rial)	
55755	43637	61074	55927.8	مقدار آب (هزار مترمکعب) Amount of water (1000m ³)	
0.0000054	0.0000054	0.00000583	0.00000507	تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی $\frac{X_i}{R_i}$ Water allocation per unit of economic benefit $\frac{X_i}{R_i}$	زابل Zabol
4465.3	3181.66	4396.45	3893.8	کل سطح زیر کشت (هکتار) Total area (ha)	
8.51×10^{12}	1.14×10^{13}	8.71×10^{12}	1.2×10^{13}	سود (ریال) Profit (Rial)	
45842	61105	50806	60848.13	مقدار آب (هزار مترمکعب) Amount of water (1000m ³)	
0.0000054	0.00000583	0.00000583	0.00000507	تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی $\frac{X_i}{R_i}$ Water allocation per unit of economic benefit $\frac{X_i}{R_i}$	زهک Zahak
3629.8	4513.53	3566.23	4149.54	کل سطح زیر کشت (هکتار) Total area (ha)	

کم‌آبیاری ۵ درصد اعمال شود سطح زیر کشت نسبت به حالت پایه ۳۹۸/۵۱ هکتار بیشتر خواهد شد چنانچه سناریوی کم‌آبیاری ۱۰ و ۱۵ درصد کم‌آبیاری اعمال شود سطح زیر کشت به ترتیب ۱۳۷۲/۶۸ و ۲۶۷۸/۶۸ هکتار نسبت به حالت پایه بیشتر خواهد شد. به‌طورکلی، نتایج به‌کارگیری روش کم‌آبیاری بیانگر آن است که با اعمال این راهبرد تحت سناریوهای مختلف می‌توان از سطح زیر کشت محصولاتی که نیاز آبی بالایی دارند (مانند هندوانه و یونجه) کاسته و با حجم آب صرفه‌جویی شده، سطح زیر کشت محصولات با سود بیشتر و نیاز آبی کم‌تر را افزایش داد. در شکل ۵ میزان سطح زیر کشت هر محصول در شرایط مختلف کم‌آبیاری نشان داده شده است.

با اعمال سناریو کم‌آبیاری مقدار ضریب جینی نسبت به حالت پایه کاهش یافته است و نشان می‌دهد اعمال کم‌آبیاری منجر به تخصیص عادلانه‌تر آب بین مناطق خواهد شد. هم‌چنین با اعمال این سناریو سود کشاورزان نسبت به حالت آبیاری کامل کاهش می‌یابد به‌طوری‌که با اعمال سناریوی کم‌آبیاری ۵ درصد میزان سود 0.62×10^{13} ، در سناریوی ۱۰ درصد کم‌آبیاری 0.25×10^{13} و در سناریوی ۱۵ درصد کم‌آبیاری 0.23×10^{13} ریال نسبت به حالت پایه کاهش یافته است؛ اما این کاهش سود با صرفه‌جویی حجم زیادی از آب آبیاری در سطح مزرعه همراه است این حجم آب ذخیره‌شده منجر به افزایش سطح زیر کشت محصولاتی که صرفه اقتصادی بالاتری دارند، تخصیص داده می‌شود. چنانچه اگر سناریو



شکل ۵- سطح زیر کشت بهینه هر یک از محصولات در سناریو کم‌آبیاری.

Figure 5. The optimal cultivated area of each crops in the scenario of Deficit irrigation.

است که نتایج نشان می‌دهد تغییر این پارامترها روی الگوی تخصیص آب تأثیر داشته و باعث تغییر در سود اقتصادی، ضریب جینی و سطح زیر کشت خواهد شد. به طوری که با افزایش راندمان آبیاری از ۳۵ درصد به ۵۰ و ۷۰ مقدار سود به ترتیب $۱۰^{۱۳} \times ۵/۷۴$ و $۱۰^{۱۳} \times ۷/۶۸$ ریال خواهد رسید. با اعمال سناریوهای شرایط اقلیمی با افزایش حجم آب تخصیص یافته به بخش کشاورزی مقدار ضریب جینی کاهش می‌یابد و نشان می‌دهد هرچه میزان آب در دسترس برای بخش کشاورزی بیشتر باشد تخصیص آب عادلانه‌تر خواهد بود. همچنین با افزایش جریان ورودی آب، میزان سود کل برای هر شهرستان و سطح زیر کشت برای همه محصولات افزایش خواهد یافت که اعمال سیاست‌های کم‌آبیاری اگرچه به صورت ناچیز سبب کاهش میزان عملکرد محصولات در واحد سطح می‌شود اما با صرفه‌جویی از نیاز آبی گیاهان، حجم زیادی از آب آبیاری ذخیره شده که می‌توان با افزایش سطح زیر کشت محصولات، کاهش عملکرد به وجود آمده جریان نمود. بنابراین پیشنهاد می‌شود که این راهبرد به صورت عملی در سطح مزارع به کار گرفته شود. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان پیشنهادهای زیر را ارائه نمود: با توجه به نتایج، محصولاتی که دارای ارزش اقتصادی بالاتر و نیاز آبی کم‌تر بودند آب بیش‌تری به آن‌ها تخصیص داده شده است بنابراین محصولات زراعی که نسبت به آب مصرفی سود کم‌تری را حاصل می‌کنند و همچنین محصولاتی که دارای نیاز آبی بالایی هستند از الگوی کشت حذف شوند و محصولات با صرفه اقتصادی بالاتر و نیاز آبی کم‌تر در الگوی کشت جایگزین شوند که این می‌تواند راهکار مناسبی برای مواجهه با شرایط کمبود آبی نیز باشد. اعمال سیاست‌های

اعمال کم‌آبیاری منجر به کاهش عملکرد محصولات می‌شود که این کاهش عملکرد باعث کاهش مقدار سود می‌شود. در شرایط کم‌آبیاری سطح زیر کشت محصولاتی مانند گندم و جو افزایش یافته و سطح زیرکشت خربزه کاهش یافته است که به علت کاهش نیاز آبی این محصولات، کاهش عملکرد محصول برای خربزه بیش‌تر و برای گندم و جو کم‌تر بوده است و از آنجایی که کاهش عملکرد باعث کاهش سود می‌شود الگوی کشت به سمت محصولاتی می‌رود که حساسیت آن‌ها نسبت به کاهش آب کم‌تر باشد و تغییرات عملکرد و میزان سود نیز به حداقل برسد. نتایج به دست آمده با نتایج مطالعه پرهیزکاری و همکاران (۱۳۹۵) مشابه است آن‌ها نیز در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که با اعمال سیاست‌های کم‌آبیاری همراه با کاهش آب در دسترس میزان سود نسبت به حالت پایه کاهش و میزان سطح زیر کشت نسبت به حالت پایه افزایش می‌یابد (۴۰).

بحث و نتیجه‌گیری

هدف این مطالعه تخصیص آب آبیاری و تعیین الگوی بهینه کشت در بخش کشاورزی جهت توسعه پایدار است که برای این منظور از مدل تعادلی استاکلبرگ استفاده شده است. سود خالص سالانه در سناریو پایه $۱۰^{۱۳} \times ۵/۰۶$ ریال است و میزان کل آب در دسترس برای بخش کشاورزی ۲۶۰ میلیون مترمکعب است. مقدار ضریب جینی به دست آمده در این سناریو $۰/۰۰۵۳$ است که مقدار این شاخص نزدیک به صفر است و نشان می‌دهد تخصیص آب بین مناطق عادلانه بوده است. جهت به دست آوردن اطلاعات بیش‌تر در زمینه الگوهای آبیاری میزان راندمان آبیاری و حجم آب تخصیصی به بخش کشاورزی تغییر داده شده

کشاورزی شهرستان‌های زابل، زهک، هیرمند، نیمروز و هامون، سازمان آب و منطقه‌ای شهرستان زابل مهیا شده است. این پژوهش بخشی از طرح پژوهشی نویسندگان بوده که با مکاتبه با نویسنده مسئول قابل دسترس می‌باشد

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این متن به شکل ذیل است: نویسنده اول: جمع‌آوری داده‌ها، انجام محاسبات، نگارش مقاله، نویسنده دوم: تفسیر نتایج، مشارکت در آنالیزها و نظارت بر پژوهش، مشاوره در انجام پژوهش نویسنده سوم: نهایی سازی مقاله و اصلاح نهایی مقاله پیش از ارسال، مشارکت در جمع‌آوری داده‌ها

اصول اخلاقی

بدیهی است که نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها می‌باشد.

حمایت مالی

این پژوهش با حمایت مالی پژوهشگاه زابل در قالب یک طرح پژوهشی صورت گرفته است.

کم‌آبیاری اگرچه باعث کاهش عملکرد در واحد سطح و به دنبال آن کاهش سود کل می‌شود اما با صرفه‌جویی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد از نیاز آبی گیاهان، حجم زیادی از آب آبیاری ذخیره شده که می‌توان با مقدار آب ذخیره شده سطح زیر کشت محصولات را افزایش داد. امروزه افزایش سطح زیر کشت در کشورهای توسعه‌یافته موجب کاهش بیکاری، افزایش سطح رفاه جامعه، کاهش آسیب‌های اجتماعی، ایجاد امنیت غذایی می‌گردد که این اثرات مثبت بیانگر بهره‌گیری هرچه بیشتر از استراتژی‌های کم‌آبیاری در مدیریت منابع آب کشاورزی است. افزایش راندمان آبیاری باعث افزایش سود کل شده است بنابراین صرفه‌جویی در مقدار آب مصرفی گیاهان از طریق بهبود تکنولوژی آبیاری و افزایش راندمان آبیاری توصیه می‌شود. از مدل پیشنهادی در این مطالعه می‌توان به‌منظور برنامه‌ریزی صحیح و کارآمد برای کشاورزی و مدیریت منابع آب در شرایط مختلف استفاده نمود.

تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت‌های مالی پژوهشگاه زابل مستخرج از طرح پژوهشی با کد PR-RIOZ-1401-0702-1 اجرا گردید.

داده‌ها و اطلاعات

داده‌های این پژوهش از مکاتبه با سازمان جهاد کشاورزی استان سیستان و بلوچستان، اداره جهاد

منابع

1. Rafiee, V., Shourian, M., and Attari, J. 2017. Optimum Crop Patterning by Integrating SWAT and the Harmony Search Optimization Algorithm, Iran - Water Resources Research. 13: 3. 73-88. (In Persian)
2. Li, M., Cao, X., Liu, D., Fu, Q., Li, T., and Shang, R. 2022. Sustainable management of agricultural water and land resources under changing climate and socio-economic conditions: A multi-dimensional optimization approach, Agricultural Water Management. 259:107235.
3. Asadi, E., Shirzadi Laskukalayeh, S., and Mehrjou, A. 2021. The Application of Asymmetric Nash Solution in Optimal Allocation of Water Resources (Case study: Qarehsou basin), J. of Water and Soil Conservation, 28: 2. 43-62. (In Persian)
4. Zeng, Y., Li, J., Cai, Y., Tan, Q., and Dai, C. 2019. A hybrid game theory and mathematical programming model for solving trans-boundary water conflicts, Journal of Hydrology. 570: 666-681.
5. Pereira, L.S. 2017. Water, agriculture and food: challenges and issues, Water Resources Management. 31: 10. 2985-2999.
6. Lalehzari, R., Nasab, B., Moazed, H., and Haghghi, A. 2015. Multiobjective management of water allocation to sustainable irrigation planning and optimal cropping pattern, J. Irrig. Drain. Eng. 142: 1. 1-10.
7. Abdulbaki, D., Al-Hindi, M., Yassine, A., and Abou Najm, M. 2017. An optimization model for the allocation of water resources, Journal of Cleaner Production. 164: 994-1006.
8. Al-Jawad, J.Y., Alsaffar, H.M., Bertram, D., and Kalin, R.M. 2019. A comprehensive optimum integrated water resources management approach for multidisciplinary water resources management problems, Journal of environmental management. 239: 211-224.
9. Martinsen, G., Liu, S., Mo, X., and Bauer-Gottwein, P. 2019. Joint optimization of water allocation and water quality management in Haihe River basin, Science of the total environment. 654: 72-84.
10. Milan, S.G., Roozbahani, A., and Banihabib, M.E. 2018. Fuzzy optimization model and fuzzy inference system for conjunctive use of surface and groundwater resources, Journal of hydrology. 566: 421-434.
11. Ye, Q., Li, Y., Zhuo, L., Zhang, W., Xiong, W., Wang, C., and Wang, P. 2018. Optimal allocation of physical water resources integrated with virtual water trade in water scarce regions: A case study for Beijing, China, Water research. 129: 264-276.
12. Nori, S., Shahraki, J., and Sardar Shahraki, A. 2019. Optimal allocation of water resources in Sistan Chah-Nime reservoirs under the water and soil management scenario, J. of Water and Soil Conservation, 25: 6. 25-46. (In Persian)
13. Li, M., Fu, Q., Singh, V.P., Liu, D., Li, T., and Zhou, Y. 2020. Managing agricultural water and land resources with tradeoff between economic, environmental, and social considerations: A multi-objective non-linear optimization model under uncertainty, Agricultural systems. 178: 102685.
14. Ren, C.F., Li, Z.H., and Zhang, H.B. 2019. Integrated multi-objective stochastic fuzzy pro-gramming and AHP method for agricultural water and land optimization allocation under multiple uncertainties, J. Clean. Prod. 210: 12-14.
15. Regulwar, D.G., and Gurav, J.B. 2011. Irrigation planning under uncertainty-a multi objective fuzzy linear programming approach, Water Resour. Manage. 25: 1387-1416.
16. Mosleh, Z., Salehi, M.H., Fasakhodi, A.A., Jafari, A., Mehnatkesh, A., and Borujeni, I.E. 2017. Sustainable allocation of agricultural lands and water resources using suitability analysis and mathematical multi-objective programming, Geoderma. 303: 52-59.
17. Amanat Behbahani, L., Moghaddasi, M., Ebrahimi, H., and Babazadeh, H. 2020. Optimal water allocation and distribution management in irrigation networks under uncertainty by multi-

- stage stochastic case study: Irrigation and drainage networks of Maroon, *Irrigation and Drainage*. 69: 4. 531-545.
18. Linker, R. 2020. Unified framework for model-based optimal allocation of crop areas and water, *Agricultural Water Management*. 228: 105859.
19. Li, M., Li, J., Singh, P., Fu, Q., Liu, D., and Yang, G. 2019. Efficient allocation of agricultural land and water resources for soil environment protection using a mixed optimization-simulation approach under uncertainty, *Geoderma*. 353: 55-69.
20. Xie, Y. L., Xia, D. X., Ji, L., and Huang, G. H. 2018. An inexact stochastic-fuzzy optimization model for agricultural water allocation and land resources utilization management under considering effective rainfall, *Ecological indicators*. 92: 301-311.
21. Hao, L., Su, X., and Singh, V.P. 2018. Cropping pattern optimization considering uncertainty of water availability and water saving potential, *International Journal of Agriculture and Biological Engineering*. 11: 1. 178-186.
22. Valizadegan, E., and Dindarsooha, A. 2021. Model of optimal allocation of water and land to agricultural crops in deterministic and stochastic conditions, *Water and soil resources conservation*. 10: 3. 31-46. (In Persian)
23. Emamifar, S., Mohammadian, F., Mohammadi, R., Abadi, A., and AliMadadi, M. 2021. Investigation of Optimum Cropping Pattern Proportional to Allocable Water and Balancing Aquifer (Case Study of Qom-Kahak Study Area), *Water and soil resources conservation*. 9: 4. 35-55. (In Persian)
24. Meftah Halaghi, M., Ghorbani, KH., Keramatzadeh, A., and Salarijazi, M. 2021. Application of Game Theory to Determining Optimal Harvesting of Water Resources and Determination of Optimal crop pattern (Case study: Gharesu basin), *J. of Water and Soil Conservation*, 27: 5. 69-87. (In Persian)
25. Siasar, H., and Honar, T. 2017. Optimization of Water Allocation Pattern crops using a Genetic Algorithm. 3rd. International Conference on Agricultural Engineering and Natural Resources. July. (In Persian)
26. Reports of Iran Meteorological Organization, Climatology Research Institute of the country, 2014. (In Persian)
27. Sardar Shahraki, A. 2016. Optimal Allocation of Water Resources of Hirmand Basin by Application of Game Theory and Evaluating the Managerial Scenarios. PhD Thesis in agricultural economic university of Sistan and Baluchestan. (In Persian)
28. Agricultural Statistics. 2016. Ministry of Agricultural Jihad, Deputy Planning and Economic Department, Tehran, first volume. (In Persian)
29. Mas-Colell, A., Whinston, M.D., and Green, J.R. 1995. *Microeconomic theory*. Appendix J. Harvard University. 199p.
30. Ankur, S., Malo, P., Frantsev, A., and Deb, K. 2014. Finding optimal strategies in a multi-period multi-leader-follower Stackelberg game using an evolutionary algorithm, *Computers & Operations Research*. 41: 374-385.
31. Safari, N. Optimal Surface Water Resources Allocation by Public and Market-Based Mechanisms with the Approach of Cooperative Game; Case Studies. Ph.D. Thesis university of Tabriz. (In Persian)
32. Gibbons, R. 1997. An Introduction to Applicable Game Theory, *Journal of Economic Perspective*. 11: 1. 127-149.
33. Hu, Z., Wei, C., Yao, L., Li, C., and Zeng, Z. 2016. Integrating equality and stability to resolve water allocation issues with a multiobjective bilevel programming model, *J. Water Resour Plann. Manage*. 142: 7. 1-12.
34. Xu, Z., Yao, L., Zhou, X, Moudi, M., and Zhang, L. 2019. Optimal irrigation for sustainable development considering water rights transaction: A Stackelberg-Nash-Cournot equilibrium model, *Journal of Hydrology*. 575: 628-637.
35. Ghaffari Moghadam, Z., Moradi, E., Hashemitabar, M., and Sardarshahraki, A. 2022. Optimal Allocation of Water Resources in the Agricultural Sector by Using the Stackelberg-Nash-Cournot Model and emphasis on water market (Case Study: Sistan Plain Pipe Water Transfer Project), *Ecohydrology*. 9: 1. 273-289.

36. Ghaffari Moghadam, Z., Moradi, E., Hashemi Tabar, M., and Sardar Shahraki, A. 2022. Developing a Bi-level programming model for water allocation based on Nerlove's supply response theory and water market, *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02658-z>.
37. Ministry of Energy. 2011. River Water Resources Planning Report and Well Reservoirs in Sistan, Volume II, Regional water Company of Sistan and Baluchistan Province, Zabol.
38. Kalbali, E., Sabouhi, M., and Ahmadpour, M. 2017. Strategies of Voshmgir Dam Water Allocation Using Two-Stage Stochastic Programming, *Journal of water and soil*. 30: 6. 1832-1847. (In Persian)
39. Akbari, M., Najafi Alamdarlo, H., and Mossavi, S.H. 2019. Impacts of Climate Change and Drought on Income Risk and Crop Pattern in Qazvin Plain Irrigation Network, *Journal of water Research in agriculture*. 33: 2. 265-281. (In Persian)
40. Parhizkari, A., Sabouhi, M., Ahmadpour, M., and Badie Barzin, H. 2016. Assessment of the Effects of Deficit Irrigation and Decrease in Water Allocation on Agricultural Sector Production in Qazvin Province, *Journal of water Research in agriculture*. 30: 2. 173-185. (In Persian)