Vol 14, No. 1, Spring 2024

University of Tehran Press

Journal of Water and Irrigation Management Online ISSN: 2382-9931

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

# Evaluating the impact of creating a water market on improving productivity using a mathematical programming model (Case study: Tajen watershed)

**Alireza Zarei Ghorkhodi**[1] | **Ali Shahnazari**[2]✉

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: zareia9675@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: aliponh@yahoo.com

**Article Info**

**Article type:**
Research Article

**Article history:**
Received 11 October 2023
Received in revised form
14 December 2023
Accepted 2 January 2024
Published online 14 March 2024

**Keywords:**
*Agriculture*
*Genetic algorithm*
*Water crisis*
*Water resource management*

**ABSTRACT**

The purpose of this study is the effects of the formation of water markets on the improvement of water productivity in the Tajen catchment basin. In this research, a mathematical programming model modeling system and profit maximization objective function were used in MATLAB environment. After simulating the formation of the water market, its impact on physical and economic water productivity indicators was evaluated in two groups including: farms without water restrictions group (A) and farms with water restrictions group (B). Based on the results, forming a water market leads to a 13 percent increase in profit in group (A) and 30 percent in group (B). According to the results, the formation of the water market reduces and increases the amount of water consumption in representative farms (A) and (B), respectively. The results of the evaluation of water productivity indicators indicate that in group (A), the availability of water and consequently the increase of the cultivated area, and in group (B), the compensation of the lack of water and the increase of the cultivated area have led to an increase in physical productivity. In the farms of group (A), the sale of water and in the farms of group (B), the allocation of water to products with higher economic value has led to an increase in the economic productivity of water. In general, it can be said that forming a water market leads to an increase in productivity, but alone it does not lead to achieving sustainable agriculture and reducing water consumption at the watershed level. Therefore, the implementation of other policies such as the control of extraction from surface and underground water resources, volume delivery of water based on the pattern of optimal cultivation and allocation of water to products with higher economic value along with the water market approach can improve water productivity in addition to reducing water consumption.

**Cite this article:** Zarei Ghorkhodi, A., & Shahnazari, A. (2024). Evaluating the impact of creating a water market on improving productivity using a mathematical programming model (Case study: Tajen watershed). *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (1), 207-221. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2024.366554.1110

© The Author(s).
Publisher: The University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2024.366554.1110

دوره چهاردهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۳

انتشارات دانشگاه تهران

مدیریت آب و آبیاری

شاپا الکترونیکی: ۹۹۳۱-۲۳۸۲

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

# ارزیابی تأثیر ایجاد بازار آب بر ارتقای بهره‌وری با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی (مطالعه موردی: حوضه آبریز تجن)

**علیرضا زارعی قورخودی[۱] | علی شاهنظری[۲]✉**

۱. گروه علوم و مهندسی آب دانشکده مهندسی زراعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: zareia9675@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب دانشکده مهندسی، زراعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: aliponh@yahoo.com

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:** مقالهٔ پژوهشی

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۲/۰۷/۱۹

**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۲/۰۹/۲۳

**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۲/۱۰/۱۲

**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۲/۱۲/۲۴

**کلیدواژه‌ها:**

*الگوریتم ژنتیک*

*بحران آب*

*کشاورزی*

*مدیریت منابع آب*

**چکیده**

هدف از این مطالعه اثرات تشکیل بازارهای آب بر ارتقای بهره‌وری آب در حوضه آبریز تجن می‌باشد. در این پژوهش از یک سیستم مدل‌سازی، مدل برنامه‌ریزی ریاضی و تابع هدف حداکثرسازی سود در محیط زبان برنامه‌نویسی متلب استفاده شد. پس از شبیه‌سازی تشکیل بازار آب، تأثیر آن بر شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در دو گروه شامل مزارع بدون محدودیت آب (گروه A) و مزارع با محدودیت آب (گروه B) موردارزیابی قرار گرفت. براساس نتایج، تشکیل بازار آب منجر به افزایش ۱۳ درصد سود در گروه (A) و ۳۰ درصد سود در گروه (B) می‌شود. با توجه به نتایج، تشکیل بازار آب میزان مصرف آب در مزارع نماینده (A) و (B) را به‌ترتیب کاهش و افزایش می‌دهد. نتایج ارزیابی شاخص‌های بهره‌وری آب حاکی از آن است که در گروه (A) در دسترس‌بودن آب و در نتیجه افزایش سطح زیر کشت و در گروه (B) جبران کمبود آب و افزایش سطح زیر کشت منجر به افزایش بهره‌وری فیزیکی شده است. در مزارع گروه (A) فروش آب و در مزارع گروه (B) تخصیص آب به محصولات با ارزش اقتصادی بالاتر افزایش بهره‌وری اقتصادی آب را در پی داشته است. به‌طورکلی، می‌توان بیان نمود که تشکیل بازار آب موجب افزایش بهره‌وری می‌گردد، اما تنهایی منجر به‌دستدست‌یابی به کشاورزی پایدار و کاهش مصرف آب در سطح حوضه آبریز نمی‌شود. بنابراین اجرای سیاست‌های دیگر نظیر کنترل برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی، تحویل حجمی آب براساس الگوی کشت بهینه و تخصیص آب به محصولات با ارزش اقتصادی بالاتر همراه با رویکرد بازار آب می‌تواند علاوه بر کاهش مصرف آب، بهره‌وری آب را نیز ارتقا دهد.

**استناد:** زارعی قورخودی، علیرضا و شاهنظری، علی (۱۴۰۳). ارزیابی تأثیر ایجاد بازار آب بر ارتقای بهره‌وری با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی (مطالعه موردی: حوضه آبریز تجن). *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۴ (۱)، ۲۰۷-۲۲۱. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2024.366554.1110

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

## ۱. مقدمه

کمبود منابع آب و افزایش تقاضای آب نسبت به عرضه آن از یک‌سو و سرمایه‌گذاری‌ها و هزینه بالای آب در زمینه اجرا و بهره‌برداری از طرح‌های توسعه منابع آب در زمینه اجرا و بهره‌برداری از طرح‌های توسعه منابع آب از سوی دیگر، توجه به بهره‌وری بیش‌تر از منابع آب و مدیریت تقاضای آب را در دستور کار مدیران قرار داده است (OECD, 2015). براساس گزارش مجمع جهانی اقتصاد، کمیابی منابع آب طی سال‌های پیش‌رو از جمله مهم‌ترین ریسک‌های جهانی محسوب می‌شود، لذا اگر روند مدیریت به همین شکل ادامه پیدا کند، در سال ۲۰۳۰ دنیا با کمبود ۴۰ درصدی منابع آب مواجه شده و انتظار می‌رود برای پاسخگویی به تقاضای ناشی از رشد جمعیت، تقاضا برای تولیدات کشاورزی در آن سال ۶۰ درصد اضافه شود. در نتیجه پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۳۰، شکاف بین عرضه و تقاضای آب نسبت به وضع موجود بسیار مخاطره‌ساز گردد (WEF, 2017).

از طرف دیگر تأثیر آب در توسعه کشاورزی و پایین‌بودن قیمت نسبی نهاده آب در مقایسه با سایر نهاده‌های مورداستفاده در کشاورزی موجب از بین‌رفتن انگیزه سرمایه‌گذاری در تکنولوژی‌های نوین، به‌جای تکنولوژی‌های سنتی موجود و عدم صرفه‌جویی در مصرف آب شده است. برای گذر از این چالش‌ها و افزایش بهره‌وری و رسیدن به توسعه پایدار، مدیران از رویکردهای مختلف مدیریتی استفاده می‌کنند (Xu *et al*., 2019). در میان رویکردهای مختلف مدیریت آب، تخصیص آب مبتنی بر بازار آب[1] به یک موضوع داغ تبدیل شده است. هدف بازار آب حداکثرکردن بهره‌وری اقتصادی آب است که با تخصیص دوباره آب به جایی که ارزش اقتصادی حاشیه‌ای آن بیش‌تر است انجام می‌شود. بازارهای آب به‌عنوان یک استراتژی مدیریت تقاضا برای مقابله با کمبود آب پیشنهاد می‌شوند (Wheeler *et al*., 2021). اساساً بازار و قیمت‌گذاری نقش زیادی در تخصیص منابع به مصرف‌کنندگان دارند و در عین‌حال انگیزه‌هایی را برای حفاظت از منابع و سرمایه‌گذاری در حوزه‌های جدید به‌وجود می‌آورند. مجوز تجارت آب به‌طور ذاتی می‌تواند مشوقی برای محافظت از منابع آب باشد و از نظر اقتصادی موجب تخصیص بهینه آب‌های محدود گردد (Kiani, 2016).

بر این اساس، بازار آب به سازوکاری از تخصیص آب بر مبنای مبادله‌ی حقابه برای مصرف آب اطلاق می‌شود که به تخصیص بهینه آب می‌انجامد. این بازار شامل ترتیباتی است که از طریق آن، دارندگان مجوز بهره‌برداری از منابع آب، براساس قواعد مشخص و از پیش تعیین‌شده، حقوق خود را با یکدیگر یا با متقاضیان جدید مبادله می‌کنند (Nazari, 2016). از دیدگاهی دیگر، منظور از بازار آب تخصیص مجدد آب بین مصارف و مصرف‌کنندگان مختلف براساس تخصیص اولیه و انتقال و واگذاری حق بهره‌برداری از منابع آب به سایر مصرف‌کنندگان است. بر این اساس، ایجاد بازار آب موجبات افزایش بهره‌وری مصرف این نهاده و انتقال آن به سمت مصارف با ارزش افزوده بیش‌تر را فراهم می‌کند (Aghaie *et al*., 2020).

تشکیل بازار آب و به‌دنبال آن اشتراک‌گذاری آب آبیاری توسط کشاورزان، متناسب با مقدار تخصیص آب در هر منطقه سبب کاهش مصرف بی‌رویه این نهاده می‌شود. بازار آب به‌عنوان یک نهاد مبادله می‌تواند به‌وسیله تعیین قیمت مناسب برای خرید و فروش آب، اطلاعات مربوط به نیازها و منابع موجود را به اطلاع خریداران و فروشندگان برای انتخاب بهینه برساند و از این طریق می‌تواند فعالیت‌های اقتصادی را تنظیم کند و باعث افزایش بهره‌وری اقتصادی شود (Balali and Viaggi, 2015). در واقع می‌توان با محوری‌کردن رویکرد بازار آب در برنامه‌های مدیریت منابع آب، زمینه تغییر کاربری و حذف مصارف غیرضروری آب را ایجاد نمود و کارایی مصرف و بالتبع بهره‌وری آن را افزایش داد، بنابراین بررسی نقش بازار آب در افزایش بهره‌وری و مدیریت پایدار منابع آب از اهمیت زیادی برخوردار است (Rissman *et al*., 2017). تشکیل بازار آب آثار و پیامدهای مختلفی را به همراه دارد به‌گونه‌ای که Mozafari (2016) بیان کرد که ایجاد و توسعه بازار آب سبب افزایش ضریب اطمینان در دسترسی به آب و کاهش ریسک بهره‌برداران شده و به نحو مطلوبی مدیریت و تخصص بهینه آب را منعکس می‌کند.

حوضه آبریز تجن به‌دلیل عدم مدیریت صحیح و مصرف بی‌رویه منابع آب در سال‌های اخیر با چالش کمبود آب کشاورزی مواجه شده است. با توجه به موارد گفته‌شده، تشکیل و تقویت بازارهای آب یکی از سیاست‌های اصلاحی است که می‌تواند در تعدیل اثرات چالش‌های کمبود آب، مدیریت بهینه منابع آب و افزایش بهره‌وری آب[۲] در بخش کشاورزی این حوضه اثربخش باشد. بر این اساس، مطالعهٔ حاضر به بررسی اثرات تشکیل بازار آب بر ارتقای بهره‌وری در حوضه آبریز تجن پرداخته است.

روش‌های مختلفی برای ارزیابی تأثیر تشکیل بازار آب بر بخش‌های مختلف جامعه و مدیریت آب کشاورزی گسترش یافته است (Feike and Henseler, 2017). در مدیریت آب کشاورزی، شیوه‌هایی مانند الگوریتم ژنتیک شبکه‌های عصبی مصنوعی، سیستم اطلاعات جغرافیایی و برنامه‌ریزی ریاضی برای برآورد آب موردنیاز آبیاری و تعیین الگوهای کشت تأیید شده‌اند که از آن میان کاربرد الگوهای برنامه‌ریزی ریاضی گسترده‌تر بوده است. کاربرد این الگوها، به‌ویژه از چند دهه گذشته یکی از روش‌هایی بوده که به‌عنوان ابزار تصمیم‌گیری در مورد مسائل کشاورزی در سطح مزرعه و بخش کشاورزی معرفی شده است (Mardani *et al*., 2017).

مطالعات گسترده‌ای در زمینه بررسی بازار آب با استفاده از مدل‌های ریاضی[۳] انجام شده است. Zaman *et al*. (2012) با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی[۴] ریاضی منافع اقتصادی بالقوه حاصل از مبادله آب بین بهره‌برداران کشاورزی را در ناحیه ویکوتوریای شمالی کشور استرالیا پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد که مبادلات آب انجام شده بین کشاورزان در بلندمدت آثار مناسب و ارزشمندی را در غلبه بر خشک‌سالی شدید برای مصرف‌کنندگان آب ازجمله بهره‌برداران کشاورزی در بر خواهد داشت. Zeng *et al*. (2016) با استفاده از یک روش ابتکاری برنامه‌ریزی مشترک چندمرحله‌ای به بررسی نقش بازار آب و تجارت این نهاده به‌عنوان یکی از رویکردهای توسعه پایدار در شرایط عدم قطعیت پرداختند. نتایج نشان داد که مکانیزم بازار آب باعث تخصیص کارای منابع آب و بینش مؤثر در خصوص تبادل بین تجارت آب و اهداف اقتصادی شده است.

Bagheri *et al*. (2017) اثر سیاست قیمت‌گذاری آب بر پایداری و حفظ آبخوان مهیار شمالی در حوضه زاینده‌رود را با استفاده از مدل برنامه‌ریزی مثبت به شکل پویا ارزیابی کردند. نتایج مطالعه با شبیه‌سازی یک دوره ۲۰ ساله نشان داد که لحاظ‌کردن سیاست قیمت‌گذاری منابع آب زیرزمینی با تغییر الگوی کشت در راستای محدودترشدن درصد کشت محصولات با آبیاری غرقابی و گسترده‌ترشدن درصد کشت محصولات با آبیاری تحت‌فشار و درنتیجه تعدیل روند بهره‌برداری بی‌رویه از منابع کمیاب آب، متغیرهای هیدرولوژیکی اعم از بیلان آب زیرزمینی، ضخامت لایه اشباع آبخوان و سطح ایستایی آبخوان می‌تواند در سطح قابل‌ملاحظه‌ای بهبود یابند. Ahmadi *et al*. (2016) به ارزیابی اقتصادی پیاده‌سازی بستر فنی بازار آب کشاورزی در شبکه آبیاری مهیار واقع در حوضه آبریز زاینده‌رود پرداختند. نتایج نشان داد که بازده برنامه‌ای کشاورزان پس از ایجاد بازار به میزان ۲۸ درصد نسبت به حالت پایه افزایش می‌یابد. هم‌چنین حجم آب مبادله شده در بازار ۴۷ درصد از حجم آب مصرفی است که نشان‌دهنده مشارکت بالای کشاورزان در بازار، جهت تخصیص بهینه آب است.

Erfani *et al*. (2014) یک مدل بهینه‌سازی برای شبیه‌سازی دادوستد موقت حقابه آب سطحی به‌صورت دو به دو ارائه دادند. هدف این پژوهش ارزیابی اثرات هیدرولوژیکی و اقتصادی ایجاد بازار آب و کمک به سیاست‌گذاران در طراحی مقررات بازار آب بود. آن‌ها از یک تابع تک‌هدفه برای به حداکثررساندن رفاه اقتصادی کاربران استفاده کردند. در نهایت نتایج این پژوهش نشان داد که خریداران، برای کاهش‌دادن هزینه‌های تراکنش، فروشندگانی را ترجیح می‌دهند که توانایی عرضه حجم آب زیادی دارند. Safari *et al*. (2016) با توسعه یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی، ابتدا به بررسی سود کشاورزان در حالت پایه (بدون بازار آب) و به‌دست‌آوردن تخصیص بهینه در این شرایط در حوضه آبریز بالخلی‌چای در استان اردبیل پرداختند. سپس برای بررسی اثرات ایجاد بازار آب، مدل مورداستفاده را با درنظرگرفتن شرایط امکان دادوستد آب بین کشاورزان توسعه دادند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که ایجاد امکان دادوستد، سود خالص مجموع حوضه

را حدود هشت درصد افزایش می‌دهد.Chu and Grafton (2020) در پژوهشی به بررسی قیمت‌گذاری و ارزش افزوده آب در ویتنام پرداختند. نتایج نشان داد قیمت‌گذاری آب می‌تواند استفاده از آب را تا ۸۴ درصد کاهش دهد، البته این در حالی است که سود کشاورز نیز تا ۱۷ درصد کاهش پیدا خواهد کرد. یافته‌های پژوهش اهمیت قیمت‌گذاری آب را به‌عنوان یک گزینه ممکن در صرفه‌جویی مصرف آب و در نتیجه افزایش بهره‌وری برجسته می‌کند.

نتایج مطالعات پیشین نشان می‌دهد که ایجاد بازارهای آب محلی و منطقه‌ای و به‌دنبال آن اشتراک‌گذاری آب آبیاری توسط کشاورزان، متناسب با مقدار تخصیص آب در هر منطقه سبب افزایش رفاه اقتصادی کشاورزان می‌شود. با توجه به مطالعات صورت‌گرفته مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی توانایی قابل‌توجهی در شبیه‌سازی بازار آب و هم‌چنین ارزیابی تأثیر تشکیل بازار آب بر شرایط اقتصادی کشاورزان دارند. لذا در پژوهش حاضر نیز به ارزیابی تأثیر تشکیل بازار آب بر بهره‌وری آب حوضه آبریز تجن با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی پرداخته شد. ارزیابی تأثیر تشکیل بازار آب بر شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی و هم‌چنین تأثیر تشکیل بازار آب بر میزان آب مصرفی در حوضه آبریز تجن وجه تمایز این پژوهش با مطالعات پیشین می‌باشد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲. ۱. منطقه موردمطالعه

حوضه آبریز تجن، یکی از زیر حوضه‌های دریای خزر می‌باشد. این حوضه دارای مساحت تقریبی ۴۱۴۷ کیلومترمربع بوده است و با طول جغرافیایی ۵۳ درجه و هفت دقیقه تا ۵۳ درجه و ۴۲ دقیقه طول شرقی و عرض جغرافیایی بین ۳۵ درجه و ۵۶ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی در استان مازندران جنوب‌شرق شهرستان ساری واقع شده است (شکل ۱). حداکثر ارتفاع آن ۳۷۸۲ متر و پست‌ترین نقطه آن با ارتفاع ۲۶- متر از سطح دریای آزاد در خروجی حوضه قرار دارد. متوسط بارش سالانه حوضه بین ۵۲۵ تا ۶۸۷/۱ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه بین ۱۱/۸ تا ۱۶/۸ درجه سانتی‌گراد متغیر می‌باشد. این شبکه که به‌عنوان شبکه کانال‌های آبرسان تلقی می‌گردد، آب ذخیره و تنظیم‌شده رودخانه تجن را در محل سد انحرافی ساری دریافت و در چهار واحد عمرانی در سواحل چپ و راست رودخانه تجن برای تغذیه کانال‌های فرعی آبیاری درجه دو و سه و انهار سنتی اصلی و همین‌طور آبندان‌ها در سطح دشت منتقل و توزیع می‌نماید. میزان ۷۰ درصد کشت غالب اراضی محدوده مطالعاتی، برنج می‌باشد. سایر محصولات کشاورزی شامل غلات، سویا، کلزا، پنبه، علوفه، سبزیجات و صیفی‌جات و باغات میوه می‌باشند (Shahnazari, 2015). براساس تقسیم‌بندی توزیع آب، واحدهای عمرانی شبکه مذکور را می‌توان به دو بخش بالادست و پایین‌دست تقسیم کرد.

### ۲. ۲. سازوکار تشکیل بازار آب در منطقه

ارائه مدل بازار آب نیازمند تشریح سازوکار مبادله در بازار می‌باشد که در شکل (۲) ساختار کلی آن ارائه شده است. به‌طور عمده مدل‌های بازار آب در دو شرایط وجود و عدم وجود بازار آب ارائه می‌شوند. براساس ساختار ارائه‌شده فرض بر این است که دو گروه زارع (A) و (B) در بازار آب وجود دارند و سهم آب هرکدام در بازار، به‌ترتیب ATW (سهم آب زارعین گروه (A) در بازار آب) و BTW (سهم آب زارعین گروه (B) در بازار آب) است. در صورتی‌که بازار آب وجود نداشته باشد، هر گروه از زارعان با میزان آب موجود در دسترس به‌دنبال حداکثرسازی منفعت خود است. سطح زیر منحنی تقاضای نهاده آب برای هر گروه از زارعان برابر با کل ارزش تولیدات زارع از مصرف آب موردنیاز است (RWCF, 2010). بنابراین، در میزان آب TW مشخص برای زارعان گروه (B)، ارزش کل تولیدات (درآمد) معادل مساحت SRBTW و برای زارعان

گروه (A)، معادل مساحت LHATW است. حال اگر بازار آب تشکیل شود و امکان مبادله آب بین گروه‌های مختلف زارعان برقرار شود، در این صورت، زارعان گروه (B) (به‌دلیل ارزش تولید نهایی بالاتر) «خریدار آب» و زارعان گروه (A) (به‌دلیل ارزش تولید نهایی پایین‌تر نهاده آب) «فروشنده آب» در بازار محسوب می‌شوند. به‌عبارتی، زارعان گروه (B) با خرید آب و زارعان گروه (A) با فروش آب می‌توانند منفعت خود را حداکثر کنند. این حداکثر منفعت، در نقطه برخورد تقاضای دو گروه از زارعان، بیش‌ترین میزان منفعت برای هر دو گروه فراهم می‌کند، بدین صورت که زارعان گروه (B) معادل TW تا OW اقدام به خرید آب می‌کنند و زارعان گروه (A) همین میزان آب را به فروش می‌رسانند. بنابراین، در اثر تشکیل بازار آب و فروش آب توسط زارعان گروه (A)، منفعتی معادل OMH نصیب زارعان این گروه خواهد شد. مجموع افزایش منفعت دو گروه از زارعان مساحت ORH است که بیانگر بهبود وضعیت اقتصادی زارعان است (Noorani *et al.*, 2021). در پژوهش حاضر نیز دو گروه از زارعان در حوضه آبریز تجن برای ارائه مدل بازار آب انتخاب شده‌اند. گروه اول شامل زارعین بدون محدودیت آب و گروه دوم زارعین با محدودیت آب می‌باشند.

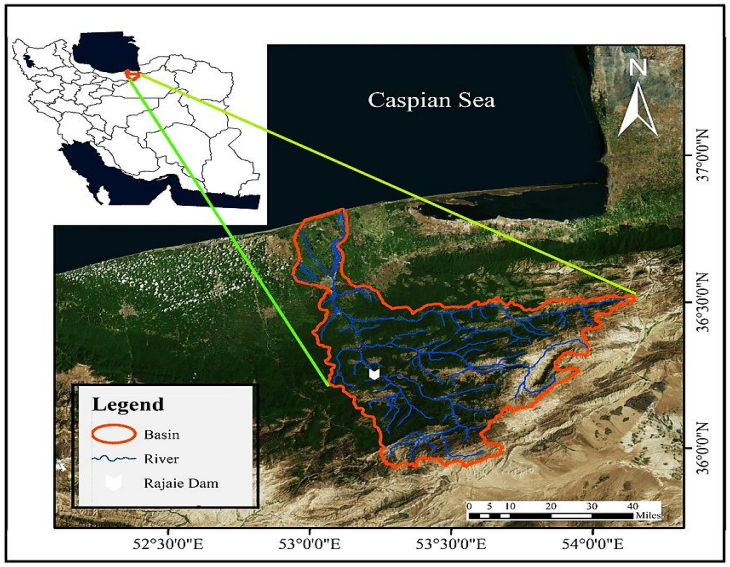


**Figure 1.** Location of the study area

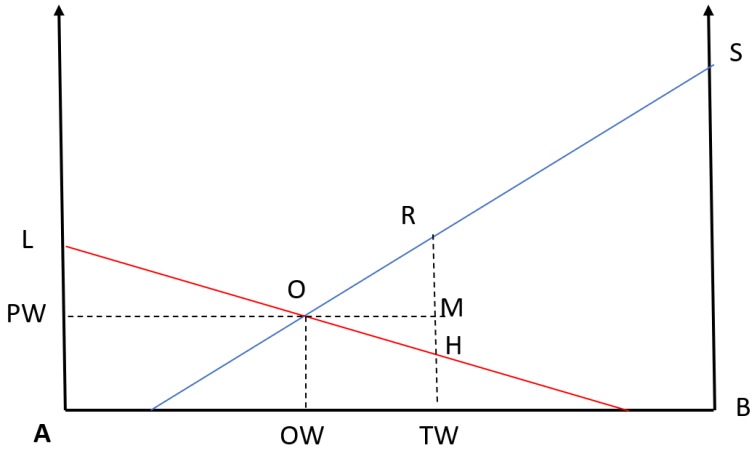


**Figure 2.** Water market formation mechanism

### ۲. ۳. الگوریتم ژنتیک[۵] (GA)

الگوریتم‌های ژنتیک فن‌های جستجوی تصادفی هستند که بر پایه مکانیسم ژنتیک و انتخاب طبیعی بنا شده‌اند. شکل معمول الگوریتم ژنتیک نخستین بار توسط Goldberg (1989) ارائه شد. الگوریتم‌های ژنتیک از مجموعه‌ای از راه‌حل‌های تصادفی اولیه به نام «جمعیت» آغاز می‌شوند. هر جزء از جمعیت «کروموزوم» نامیده می‌شود که بیانگر یک پاسخ مسئله است. کروموزوم‌ها در تکرارهای موفق که «نسل» نامیده می‌شوند متحول می‌گردند (Lalehzari and Kerachian, 2020). در هر نسل کروموزوم‌ها با محاسبه تابع برازش ارزیابی می‌شوند. برای ایجاد نسل بعد کروموزوم‌های جدید که «فرزندان» نامیده می‌شوند به‌وسیله یکی از دو عملگر جابه‌جایی و جهش ژنی ایجاد می‌شوند. نسل جدید نیز از روی انتخاب براساس مقدار تابع برازش والدین و فرزندان و یا حذف دیگران برای ثابت نگه‌داشتن جمعیت شکل می‌گیرد. بعد از چندین نسل الگوریتم به سمت بهترین کروموزوم هدایت می‌شود که در بهترین حالت ارائه‌دهنده پاسخی شبه بهینه از مسئله است (Anwar and Haq, 2013). شکل (۳) ساختار کلی الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر نیز به‌منظور بهینه‌سازی سود و الگوی کشت در شبیه‌سازی بازار آب از الگوریتم ژنتیک در محیط زبان برنامه‌نویسی متلب استفاده شد.

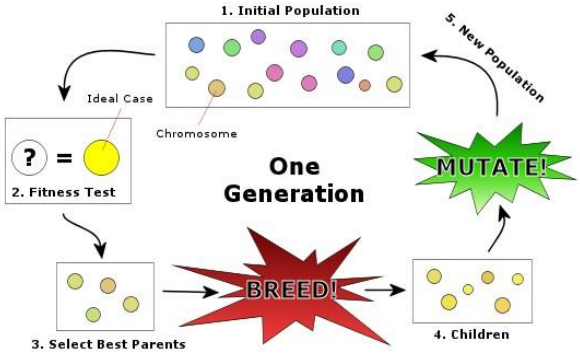


**Figure 3.** The general structure of the genetic algorithm

### ۲. ۴. تعریف تابع تولید در مزارع نماینده

در زمان شبیه‌سازی بازار آب با مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی هدف طراحی‌شده حداکثرسازی سود کشاورزان در تولید محصولات می‌باشد. بنابراین باید در ابتدا تابع تولید برای منطقه موردمطالعه در سطح مزارع موردبررسی تعریف و سپس مدل منطقه با هدف حداکثرسازی سود حاصل از تولید محصولات ارائه شود. تابع تولید برای تعیین عملکرد واقعی محصول در سطح مزارع نمونه تعریف می‌شود که در پژوهش حاضر این تابع در محیط زبان برنامه‌نویسی متلب و با بهره‌گیری از مطالعات Zibaei and Malek (2017) به‌صورت زیر تعریف شد.

$$\frac{Y_a}{Y_p} = \prod_{i=1}^{n}\left[1 - KY_i\left[1 - \frac{W_a}{W_p}\right]\right] \quad \text{رابطه ۱)}$$

که در این رابطه، Ya: مقدار محصول واقعی در شرایط موجود (محدودیت آب)، Yp: حداکثر محصول تولیدی در شرایط عدم محدودیت آب؛ KY: ضریب واکنش عملکرد نسبت به محدودیت آب در مرحله رشد i (استقرار، اوایل دوره رویشی، اواخر دوره رویشی گلدهی، شکل‌گیری عملکرد محصول و رسیدن) که قابل استنباط از پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه استنباط شد؛ n تعداد مراحل رشد و Wp: حداکثر آب موردنیاز گیاه و Wa: مقدار آب موردنیاز برای آبیاری

گیاه در مراحل مختلف رشد است که در شرایط آبیاری کامل با Wp برابر می‌باشد اما در شرایط کم‌آبیاری به‌صورت زیر محاسبه می‌شود که h مقدار کاهش نسبی مصرف آب در کل دوره رشد (کوچک‌تر یا مساوی یک) است.

رابطه ۲) $W_{ai} = (1-h)W_{pi}$

پس از تعیین تابع تولید در سطح مزارع نماینده باید مدل برنامه‌ریزی ریاضی موردنظر براساس متغیرهای تصمیم، تابع هدف و قیود ساخته شود که در این مطالعه مدل ارائه‌شده براساس توابع بهینه الگوریتم ژنتیک در محیط زبان برنامه‌نویسی متلب ساخته شده است. اجزای مختلف مدل ساخته‌شده شامل متغیرهای تصمیم، تابع هدف و قیود مربوطه به شرح زیر ارائه شده‌اند.

### ۲. ۴. ۱. معرفی متغیرهای مدل

تعریف متغیرهای تصمیم اولین گام در اجرای مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی به‌ویژه در مواقع بهینه‌سازی شرایط می‌باشد. متغیرهای تصمیمی ارائه‌شده در این پژوهش براساس نوع محصول، استراتژی و راندمان آبیاری تعریف شده‌اند. استراتژی‌های آبیاری منظورشده شامل تمام آبیاری و کم آبیاری به‌صورت ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد در مراحل مختلف رشد است. راندمان آبیاری براساس نظر کارشناسان به‌ترتیب برای سیستم آبیاری بارانی، ۶۵ درصد، برای انتقال آب با لوله‌های پلاستیکی، ۴۵ درصد و برای آبیاری سطحی ۳۵ درصد در نظر گرفته شد. براساس موارد فوق و اطلاعات موجود متغیرهای تصمیم نهایی به‌صورت موارد زیر در نظر گرفته شد.

۱- گندم یک تا گندم ۶۳ به‌ترتیب گندم در شرایط آبیاری کامل، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد تنش آبی در مراحل اواخر رشد گیاه، گلدهی، شکل‌گیری عملکرد و رسیدن به‌ترتیب با راندمان ۳۵، ۶۵ و ۴۵ درصد می‌باشد.

۲- ذرت یک تا ذرت ۳۳ به‌ترتیب ذرت در شرایط آبیاری کامل، ۱۰ و ۲۰ درصد تنش آبی در مراحل استقرار، اواخر رشد گیاه، گلدهی، شکل‌گیری عملکرد و رسیدن به‌ترتیب با راندمان ۳۵، ۶۵ و ۴۵ درصد می‌باشد.

۳- کلزا یک تا کلزا ۴۳ به‌ترتیب کلزا در شرایط آبیاری کامل، ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد تنش آبی در مراحل اوایل رشد رویشی گیاه، گلدهی و رسیدن به‌ترتیب با راندمان ۳۵، ۶۵ و ۴۵ درصد می‌باشد.

۴- ازآنجاکه برنج حساسیت بالایی نسبت به کم‌آبیاری دارد این گیاه به صورت آبیاری کامل وارد مدل شد.

### ۲. ۴. ۲. تابع هدف مدل

تعیین تابع هدف بخش اساسی شبیه‌سازی شرایط بهینه و بازار آب را به‌خود اختصاص داده است. تابع هدف در نظرگرفته‌شده حداکثرسازی سود ناخالص کشاورز است. ضرایب تابع هدف، بازده برنامه‌ای هر فعالیت است که با کسر هزینه‌های متغیر (خرید نهاده‌های تولید از جمله بذر، کود (خرید آزاد و دولتی)، سم، نیروی کار) از درآمد حاصل از کشت محصول به‌دست می‌آید. تابع هدف نهایی تعیین‌شده به‌صورت زیر می‌باشد.

رابطه ۳)
$$MaxZ = \sum_{j=1}^{m} X_{Sj} \times (GM_{Sj} - \sum_{D=1}^{n} Pw \times (water_{jD}/0.35 + \sum_{j=1}^{m} X_{Bj} \times (GM_{Bj} - \sum_{D=1}^{n} Pw \times water_{jD}/0.65)) + \sum_{j=1}^{m} X_{Lj} \times (GM_{Lj} - \sum_{D=1}^{n} Pw \times (water/0.45))$$

در این رابطه،

$X_{Sj}$: سطح زیر کشت محصولات با سیستم آبیاری سنتی (راندمان ۳۵ درصد)

$X_{Bj}$: سطح زیرکشت محصولات با سیستم آبیاری بارانی (راندمان ۶۵ درصد)

$X_{Lj}$: سطح زیر کشت محصولات با سیستم آبیاری با استفاده از لوله جهت انتقال آب (راندمان ۴۵ درصد)

$water_{jD}$: نیاز آبی محصول j ام در دوره D ام

$P_w$: قیمت آب

D: دوره رویش گیاه

$GM_{Sj}$: بازده برنامه‌ای هر هکتار محصول j ام مربوط به سیستم آبیاری سنتی

$GM_{Bj}$: بازده برنامه‌ای هر هکتار محصول j ام مربوط به سیستم آبیاری بارانی

$GM_{Lj}$: بازده برنامه‌ای هر هکتار محصول j ام مربوط به سیستم آبیاری با استفاده از لوله

### ۲. ۴. ۳. محدودیت‌های مدل

مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی با محدودیت‌های مختلفی همراه هستند. مدل‌های ارائه‌شده در سطح مزارع با دو محدودیت یا قید اساسی همراه هستند که برای سهولت در اجرای مدل به‌صورت ریاضی بیان می‌شوند و شامل موارد زیر می‌باشند.

#### ۲. ۴. ۳. ۱. محدودیت زمین

رابطه ۴) $\sum X_j \times Landuse_{jD} \leq Land_D$

$X_j$: سطح زیر کشت محصول j، $Landuse_{jD}$: زمین موردنیاز محصول j ام در دوره D ام، $Land_D$: کل زمین در دسترس در دوره D ام است. این محدودیت بیان می‌کند که کل سطح زیر کشت نباید از مقدار زمین موجود در دوره D بیش‌تر گردد.

#### ۲. ۴. ۳. ۲. محدودیت آب مصرفی

محدودیت آب مصرفی مهم‌ترین قید یا محدودیت در زمان شبیه‌سازی بازار آب است. به‌عبارتی این محدودیت، بیانگر جمع مقدار آب مصرفی گیاهان در دوره‌های مختلف تقسیم بر راندمان آبیاری توزیع و انتقال که نمی‌تواند از کل آب در دسترس بهره‌بردار بیش‌تر شود. با توجه به این‌که در یک منطقه دوره کشت، نیاز آبی محصولات و میزان موجودی آب در ماه‌های مختلف سال با یکدیگر متفاوت است در این پژوهش محدودیت آب برای مزارع نماینده به‌صورت دوره‌های ده‌روزه در نظر گرفته شد و به‌صورت رابطه (۵) در مدل به‌کار گرفته می‌شود. سمت راست معادله، بیانگر منبع آب در دسترس کشاورز است که براساس متوسط آبدهی، تعداد روزهای آبدهی و تعداد ساعات آبدهی در هر روز برحسب مترمکعب محاسبه شده است.

رابطه ۵) $\sum X_{SJ} \times (Rwater_{JD}/0.35) + \sum X_{BJ} \times (Rwater_{JD}/0.65) + \sum X_{LJ} \times (Rwater_{JD}/0.45) \leq Awater_D$

$X_{SJ}$: محصولات با سیستم آبیاری سنتی (راندمان ۳۵ درصد)

$X_{BJ}$: محصولات با سیستم آبیاری بارانی (راندمان ۶۵ درصد)

$X_{SJ}$: محصولات با سیستم آبیاری با استفاده از لوله جهت انتقال آب (راندمان ۴۵ درصد)

$Rwater_{JD}$: نیاز آبی محصول j ام در دوره D ام در واحد سطح است.

$Awater_D$: حجم آب در دسترس در دوره D ام است. این محدودیت بیان می‌کند که کل آب مصرفی برای کشت محصولات مزرعه نبایستی از کل آب موجود بیش‌تر گردد.

### ۲. ۴. ۳. ۳. مدل برنامه‌ریزی ریاضی نهایی

به‌منظور ارائه مدل نهایی برای منطقه موردمطالعه باید قیمت آب در دهه‌های مختلف، الگوی کشت بهینه و سود حاصل برای مزارع نمونه محاسبه شود. برای این منظور از معادله (۳) استفاده می‌شود. در نهایت از مدل ریاضی و موارد محاسبه‌شده از معادله (۳) منافع حاصل از بازار آب ارزیابی می‌شود.

رابطه ۶) $$MaxZ = \sum_{k=1}^{o} X_{jk} \times GM_k - \sum_{k=1}^{o} BW_k \times P_{bw} + \sum_{k=1}^{o} SW_k \times \mu$$

Z: کل بازده ناخالص مزارع است که هدف حداکثرکردن آن است.

$GM_k$: بازده ناخالص مزرعه نماینده گروه K است که با روش برنامه‌ریزی ریاضی به‌دست می‌آید.

K: گروه همگن موردنظر

$X_{jk}$: سطح زیر کشت محصول j ام در مزرعه K ام

μ: قیمت فروش آب (کم‌ترین هزینه آب در دهه‌های کم‌آبی که از نتایج حاصل از مدل قبلی نماینده هر گروه به‌دست می‌آید)

$P_{bw}$: قیمت خرید آب، قیمتی که توسط زارع پرداخت می‌شود

$BW_k$: مقدار آب خریداری شده توسط مزرعه K ام

$SW_k$: مقدار آب فروش رفته توسط مزرعه K ام

### ۲. ۴. ۳. ۴. محاسبه شاخص‌های بهره‌وری کشاورزی

شاخص‌های بهره‌وری آب کشاورزی به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های مؤثر در مناطقی که محدودیت منابع آب دارند، در برنامه‌ریزی‌های ملی موردتوجه قرار گرفته‌اند (Çetin and Kara, 2019). یکی از اثرات مهم تشکیل بازار آب افزایش بهره‌وری آب می‌باشد. به‌طورکلی، بازار آب مقدار آب مصرفی سطح زیرکشت و الگوی کشت را به‌صورت بهینه ارائه می‌دهد. در مطالعه حاضر نیز به‌منظور ارزیابی تأثیر تشکیل بازار آب بر بهره‌وری حوضه آبریز تجن شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی (CPD)[۶] و بهره‌وری اقتصادی (NBPD)[۷] در شرایط فعلی حوضه و در حالت بهینه (بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک) با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

رابطه ۷) $$CPD = \frac{TP}{TW_c}$$

که در آن، TP مقدار محصول تولیدشده یا میزان عملکرد محصول (کیلوگرم در هکتار) و TWc حجم آب مصرف‌شده (مترمکعب در هکتار) بدون درنظرگرفتن بارندگی می‌باشد. واضح است هرچه این نسبت بالاتر باشد نشان‌دهنده مصرف صحیح‌تر آب است، اما نشانگر سود اقتصادی بیش‌تر می‌تواند باشد (Sun *et al*., 2017). بهترین شاخص برای بررسی بهره‌وری آب کشاورزی NBPD یا سود خالص به‌ازای واحد آب مصرفی می‌باشد که نه‌تنها میزان سود خالص را به‌ازای واحد حجم آب مصرف‌شده تعیین می‌نماید، بلکه این شاخص اهمیت زیادی در برنامه‌ریزی الگو و ترکیب کشت در مناطقی که با محدودیت آب مواجه هستند، دارد (Hao *et al*., 2018). چراکه از این طریق می‌توان منابع کمیاب آب را به کشت‌هایی اختصاص داد که با کم‌ترین واحد مصرف آب بالاترین سود را نصیب بهره‌برداران نماید. این شاخص توسط فرمول زیر قابل محاسبه است.

رابطه ۸) $$NBPD = \frac{NB}{TW_c}$$

که در آن، NB میزان سود خالص (ریال) در هر هکتار است. اطلاعات موردنیاز برای محاسبه شاخص‌های بهره‌وری حوضه آبریز تجن در جدول (۱) ارائه شده است.

**Table 1.** Information needed to calculate water productivity indicators

| Row | Product type | Area under cultivation (ha) | Product performance (kg/ha) | Volume of water used ($m^3ha^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Rice | 27741 | 4309 | 13427 |
| 2 | canola | 5750 | 2374 | 5083 |
| 3 | corn | 1550 | 3769 | 2680 |
| 4 | wheat | 1868 | 3579 | 2032 |

## ۳. نتایج و بحث

### ۳. ۱. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بازار آب

در مطالعه حاضر بازار آب با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی و توابع بهینه الگوریتم ژنتیک شبیه‌سازی شد و به‌عنوان یک استراتژی برای بهبود بهره‌وری کشاورزی موردارزیابی قرار گرفت. به‌منظور دست‌یابی به اهداف پژوهش مدل ارائه‌شده برای حوضه آبریز تجن در مرحله اول با شرط عدم وجود بازار آب اجرا و قیمت سایه‌ای آب در دهه‌های مختلف، الگوی کشت بهینه و سود برای مزارع نماینده محاسبه شد. در مرحله دوم مدل با شرط وجود بازار آب و با استفاده از سود و قیمت سایه‌ای آب به‌دست‌آمده از مدل قبلی اجرا و منافع حاصل از بازار آب موردارزیابی قرار گرفت که نتایج به‌دست‌آمده در هر دو مرحله به شرح زیر ارائه شده است.

### ۳. ۲. بررسی الگوی کشت بهینه و درآمد در حالت عدم وجود بازار آب با استفاده از بهینه‌سازی سود

نتایج حاصل از اجرای مدل در شرایط عدم وجود بازار آب در جدول (۲) ارائه شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده برای الگوی کشت بهینه در مزارع گروه (B) محدودیت آب سبب حذف محصول برنج از الگوی کشت شده است. سطح زیرکشت برای این مزارع نشان‌دهنده به‌کارگیری استراتژی‌های کم آبیاری و استفاده از سیستم‌های نوین آبیاری می‌باشد. از طرفی محدودیت آب در این مزارع سبب شده است که کل اراضی موجود زیر کشت قرار نگیرد. در مزارع گروه (A) دسترسی به آب موجب تحت کشت قراردادن کل اراضی موجود شده است از طرفی محصول برنج در این مزارع جزء اصلی الگوی کشت بهینه به‌دست‌آمده می‌باشد. به‌طورکلی، در مزارع گروه (B) محدودیت آب و در نتیجه آن کاهش سطح زیر کشت و عدم کشت برنج، سبب کاهش سود حاصل از تولید محصولات شده است.

**Table 2.** Optimal cultivation pattern and income in the absence of water market

| Farms without water restrictions (group A) | | Farms with limited water (group B) | |
|---|---|---|---|
| **Product** | **Area under cultivation (ha)** | **Product** | **Area under cultivation (ha)** |
| Wheat 11 | 100 | Wheat 42 | 500 |
| Canola 11 | 2 | Canola 11 | 1 |
| Canola 21 | 2.5 | Corn 12 | 1250 |
| Corn 12 | 3 | Corn 15 | 250 |
| Corn 23 | 1 | Corn 16 | 500 |
| Rice | 3000 | | |
| Profit (thousand rials) | 106043 | Profit (thousand rials) | 95051 |

### ۳. ۳. بررسی الگوی کشت بهینه و درآمد در حالت وجود بازار آب با استفاده از بهینه‌سازی سود

جدول (۳) نتایج حاصل از اجرای مدل در شرایط تشکیل بازار آب در حوضه آبریز تجن را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که در مزار ع گروه (A) عدم وجود محدودیت آب سبب شده است که استفاده از روش‌های نظیر کم‌آبیاری، سیستم‌های نوین آبیاری کم‌تر موردتوجه قرار گیرد. درصورتی‌که در مزارع گروه (B) وجود محدودیت آب سبب شده است که کشاورزان برای دست‌یابی به سود بیش‌تر از تولید محصول، به سمت استراتژی‌های کم‌آبیاری و استفاده از روش‌های نوین آبیاری گرایش پیدا کنند. چراکه تنها راه حداکثرسازی سود در این مزارع کاهش مصرف آب و کشت محصولات با ارزش اقتصادی بالاتر می‌باشد.

**Table 3.** Optimum cultivation pattern and income in the case of water market formationc

| Farms without water restrictions (group A) | | Farms with limited water (group B) | |
|---|---|---|---|
| **Product** | **Area under cultivation (ha)** | **Product** | **Area under cultivation (ha)** |
| Wheat 1 | 100 | Wheat 16 | 200 |
| Canola 11 | 4.5 | Wheat 22 | 700 |
| Corn 12 | 5.5 | Canola 11 | 2.5 |
| Rice | 3000 | Corn 12 | 1356 |
| Profit (thousand rials) | 121949 | Profit (thousand rials) | 134972 |

## ۳. ۴. نتایج حاصل از اجرای مدل در حوضه آبریز تجن

هدف از تشکیل بازار آب و مدل برنامه‌ریزی ریاضی در این پژوهش، حداکثرسازی سود حاصل از کشت و فروش محصولات و مبادله آب برای کشاورزان می‌باشد. منافع به‌دست‌آمده از تشکیل بازار آب در موردمطالعه به دو بخش اصلی تقسیم می‌شوند که شامل ۱- منفعت حاصل از افزایش سطح زیر کشت به‌دلیل خرید آب موردنیاز و جبران کمبود آب یا کشت محصول با ارزش اقتصادی بالاتر و ۲- سود و درآمد حاصل از فروش آب مازاد بر مصرف کشاورز. براساس نتایج ارائه شده در جدول (۴) تشکیل بازار آب منجر به افزایش سود در کلیه مزارع نماینده گروه‌های (A) و (B) شده است. بیش‌ترین سود حاصل از تشکیل بازار آب مربوط به مزارع گروه (B) به‌دلیل جبران کمبود آب و در نتیجه افزایش سطح زیر کشت می‌باشد. از طرفی مزارع گروه (A) به‌دلیل داشتن آب مازاد بر مصرف (در بیش‌تر ماه‌های سال) بیش‌ترین میزان آب خالص فروخته‌شده را به‌خود اختصاص داده‌اند. مزارع گروه (B) هدف جبران کمبود آب موردنیاز برای تولید محصول بیش‌ترین مقدار آب را خریداری نموده‌اند. این امر حاصل از قیمت پایین خرید آب نسبت به هزینه فرصت آب در دهه‌های کم‌آبی این مزارع می‌باشد که این امر تمایل کشاورزان این مزارع را برای خرید آب حتی با قیمت‌های بالاتر را نیز افزایش داده است. به‌طورکلی اجرای رویکرد بازار آب در منطقه موردمطالعه منجر به افزایش منافع اقتصادی برای مزارع نماینده در هر دو گروه (A) و (B) شده است. به‌گونه‌ای که مزارع گروه (A) با فروش آب مازاد بر مصرف و مزارع گروه (B) با خرید آب موردنیاز خود و جبران کمبود آب سطح زیر کشت و بالتبع درآمد خود را افزایش می‌دهند.

**Table 4.** The results of water exchange among representative farms

| | **Farms (group A)** | **Farms (group B)** |
|---|---|---|
| Farmer's profit before entering the water market (thousand Rials) | 106043 | 95051 |
| Farmer's profit after entering the water market (thousand Rials) | 121949 | 134972 |
| Volume of water sold ($m^3$) | 4575 | 4219 |
| Volume of water purchased ($m^3$) | 0 | 22412 |
| Increase in profit due to the water market (thousand Rials) | 15906 | 39921 |
| Increase in profit due to the water market (%) | 13 | 30 |

با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول (۵)، تشکیل بازار آب منجر به افزایش مصرف آب در مزارع نماینده گروه (B) و کاهش مصرف آب در گروه (A) می‌شود. بنابراین می‌توان دریافت که تشکیل بازار آب به‌تنهایی منجر به تعدیل تقاضای آب در حوضه آبریز تجن نمی‌شود. براساس نتایج ارائه‌شده تشکیل بازار آب افزایش درآمد زارعین و افزایش بازدهی هر مترمکعب آب را در پی داشته است. درحالی‌که میزان مصرف آب با تشکیل بازار در این حوضه افزایش یافته است. لذا به‌منظور جلوگیری از تأثیر منفی تشکیل بازار آب در سطح حوضه آبریز پیشنهاد می‌شود سیاست ایجاد بازار آب با سیاست سهمیه‌بندی و کنترل میزان برداشت آب از سفره‌های آب زیرزمینی و سطحی باهم به‌کار گرفته شود تا سبب بهره‌وری بیش‌تر آب و مصرف بهینه آن شود.

**Table 5.** Results of water consumption among representative farms

| | Farms (group A) | Farms (group B) |
|---|---|---|
| Volume of water used before the water market ($m^3$) | 23222 | 2172 |
| The volume of water consumed after the water market ($m^3$) | 14067 | 3509 |
| Changes in water consumption caused by the water market ($m^3$) | -9155 | 1337 |

## ۳. ۵. نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های بهره‌وری آب

نتایج حاصل از تأثیر تشکیل بازار آب بر بهره‌وری فیزیکی در مزارع نماینده گروه (A) و (B) به‌ترتیب در جدول (۶) ارائه شده است. براساس نتایج ارائه‌شده تشکیل بازار آب منجر به افزایش بهره‌وری فیزیکی آب در هر دو گروه (A) و (B) می‌شود. در گروه (A) در دسترس‌بودن منابع آب بیش‌تر و در نتیجه آن سطح زیر کشت بیش‌تر منجر به افزایش بهره‌وری آب شده است. در گروه (B) سطح زیرکشت محصولات به مقدار آب تأمین‌شده از تشکیل بازار آب بستگی دارد و همین امر سبب شده است که میزان افزایش بهره‌وری فیزیکی آب در این گروه نسبت به گروه (A) کم‌تر باشد.

**Table 6.** The results related to the physical productivity of water

| Row | Product type | Farms (group A) | | Farms (group B) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Physical productivity of water before entering the water market ($kg/m^3$) | Physical productivity of water after entering the water market ($kg/m^3$) | Physical productivity of water before entering the water market ($kg/m^3$) | Physical productivity of water after entering the water market ($kg/m^3$) |
| 1 | Rice | 0.32 | 0.75 | 0.21 | 0.52 |
| 2 | Canola | 0.47 | 2.73 | 0.32 | 1.5 |
| 3 | Corn | 1.41 | 4.09 | 0.92 | 2.56 |
| 4 | Wheat | 1.76 | 4.30 | 1.1 | 2.89 |

براساس نتایج ارائه‌شده در جدول (۷) با تشکیل بازار آب بهره‌وری اقتصادی در هر دو گروه مزارع نماینده (A) و (B) افزایش یافته است. در گروه (A) درآمد حاصل فروش آب منجر به افزایش سود و در نتیجه افزایش بهره‌وری اقتصادی شده است و تخصیص منابع آب به محصولات با ارزش اقتصادی بالاتر علت افزایش بهره‌وری اقتصادی آب در گروه (B) می‌باشد.

**Table 7.** The results related to the economic efficiency of water

| Row | Product type | Farms (group A) | | Farms (group B) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Economic efficiency of water before entering the water market (1000 rials per cubic meter) | Economic efficiency of water after entering the water market (1000 rials per cubic meter) | Economic efficiency of water before entering the water market (1000 rials per cubic meter) | Economic efficiency of water after entering the water market (1000 rials per cubic meter) |
| **1** | Rice | 952 | 2700 | 301 | 1500 |
| **2** | canola | 101 | 310 | 86 | 102 |
| **3** | corn | 42 | 92 | 15 | 41 |
| **4** | wheat | 236 | 986 | 98 | 236 |

## ۴. نتیجه‌گیری

کمبود منابع آب یکی از مهم‌ترین چالش‌های مدیریت آب در حوضه آبریز تجن است. تلقی آب به‌عنوان یک کالای با ارزش و دارای قیمت واقعی می‌تواند راه مناسب مصرف و مشوقی برای ذخیره و حفاظت آن را فراهم کند. در همین راستا، پژوهش حاضر نیز با هدف بررسی تأثیر بازار آب در ارتقای بهره‌وری آب حوضه آبریز تجن انجام شد. به‌منظور شبیه‌سازی بازار آب و تأثیر آن بر شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با هدف حداکثرسازی سود در محیط زبان برنامه‌نویسی متلب استفاده شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده در مزارع بدون محدودیت

آب (گروه A) تشکیل بازار آب منجر به کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی شده است. هم‌چنین تشکیل بازار افزایش مصرف آب و افزایش بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب را در مزارع با محدودیت آب (گروه B) را در پی داشته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که تشکیل بازار آب درآمد کشاورزان و بازدهی یک مترمکعب آب را افزایش می‌دهد، اما قادر به تعدیل تقاضای آب در سطح حوضه نمی‌شود. همین امر لزوم اجرای سیاست‌ها و برنامه‌های تکمیلی نظیر تخصیص بهینه منابع آب، اصلاح الگوی کشت و مدیریت هم‌زمان منابع آب سطحی و زیرزمینی را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

## ۵. پی‌نوشت‌ها

1. Water market
2. Water efficiency
3. Mathematical model
4. Programming model
5. Genetic Algorithm
6. Crop Per Drop
7. Net Benefit Per Drop

## ۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافعی توسط نویسندگان وجود ندارد.

## ۷. منابع


Aghaie, V., Alizadeh, H., & Afshar, A. (2020). Agent-Based hydro-economic modelling for analysis of groundwater-based irrigation Water Market mechanisms. *Agricultural Water Management*, 234, 106140.

Ahmadi, A., Zolfagharipour, MA., Nikoee, A., & Darali, M. (2016) Economic evaluation of the implementation of the technical platform market agricultural water irrigation network Mahyar part of the study. *Iranian Water Resources Researches Journal*, 37(3), 35-49. (In Persian).

Anwar, AA., & Haq, ZU. (2013). Genetic algorithms for the sequential irrigation scheduling problem. *Irrigation Science*, 31 (4), 815-829.

Bagheri, A., Nikoyi, A., Khodadad Kashi, F., & Shaukat Fadaei, M. (2017). Evaluation of the water pricing policy on the stability and preservation of the aquifer: a study of the northern Mehyar aquifer in the Zayandeh Rood basin. *Journal of Agricultural Economics and Development*, 31(2), 105-120. (In Persian).

Balali, H., & Viaggi, D. (2015). Applying a system dynamics approach for modeling groundwater dynamics to depletion under different economical and climate change scenarios. *Water*, 7(10), 5258-5271.

Çetin, O., & Kara, A. (2019). Assessment of water productivity using different drip irrigation systems for cotton. *Agricultural Water Management*, 223, 105693.

Chu, L., & Grafton, Q. (2020). Water pricing and the value-add of irrigation water in Vietnam: Insights from a crop choice model fitted to a national household survey. *Agricultural Water Management. Journal of Environmental Management*, 183, 453-459.

Erfani, T., Binions, O., & Harou, JJ. (2014) Simulating water markets with transaction costs. *Water Resources Research*, 50(6), 4726-4745.

Feike, T., & Henseler, M. (2017). Multiple policy instruments for sustainable water management in crop production: a modeling study for the chinese Aksu-Tarim region. *Ecological Economics*, 135, 42-54.

Goldberg, DE. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. *Addison-Wesley*.

Hao, LN., Su, XL., & Singh, VP. (2018). Cropping pattern optimization considering uncertainty of water availability and water saving potential. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(1), 178-186.

Kiani, G., & Bagheri, A. (2016). Examining the economic consequences of local water markets (Case study of Ardabil city). *Journal of Iran's Water Research*, 1(10), 163-169. (In Persian).

Lalehzari, R., & Kerachian, R. (2020). Developing a framework for daily common pool groundwater allocation to demands in agricultural regions. *Agricultural Water Management*, 241, 106278.

Mardani, M., Nikouei, A., Ziaei, S. & Ahmadpour, M. (2017). Codifying regional cropping pattern of agricultural and horticultural products in Isfahan province: multi-objective structural planning approach. *Journal of Agricultural Economics and Development*, 30(3), 188-206. (In Persian).

Mozafari, M.M. (2016). Irrigation water demand management in Ardalan Plain with emphasis on pricing policy. *Water and Soil Resources Protection Quarterly*, 5(4), 47-68. (In Persian).

Nazari, M. (2016). Water Market in Theory and Practice: Market Failure and Public Policy. *Journal of Water and Sustainable Development*, 3(1), 103-114. (In Persian).

Noorani, L., Mousavi, S.N., & Shirvanian, A.R. (2021). Evaluating the economic effects of forming an agricultural water market in the Ramjard plain irrigation network. *Agricultural Economics and Development*, 29(116), 177-204. (In Persian).

OECD. (2015). Water resources allocation: sharing risks and opportunities. *OECD Studies on Water*.

Rissman, A.R., Kohl, P.A., & Wardropper, C.B. (2017). Public support for carrot, stick, and no-government water quality policies. *Environmental Science and Policy*, 76, 82-89.

RWCF. (2010). Mahab Ghods, collection of reports of performance evaluation plan and monitoring of operation management, maintenance, improvement, repair and improvement of Doroodzan irrigation and drainage network. Shiraz: *Redional Water Company of Fars (RWCF).* (Persian).

Safari, N., Zarghami, M., Behbodi, D., & Alami, M. (2016). Modeling the welfare effect of the market in the allocation between water districts in comparison with public allocation with cooperative market development; Case Study. *Iran Water Resources Research*, 12(3), 22-34. (In Persian).

Shahnazari, A. (2015). Studies on the integration and preparation of the decision support system (DSS) of water resources and uses in order to optimize water resources and uses in Mazandaran province. volume, 5, 73 p. (In Persian).

Sun, S., Zhang, C., Li, X., Zhou, T., Wang, Y., Wu, P., & Cai, H. (2017). Sensitivity of crop water productivity to the variation of agricultural and climatic factors: A study of Hetao irrigation district, China. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2562-2569.

WEF. (2017). Global Risks Report 2017. 12th Edition. *World Economic Forum (WEF)*.

Wheeler, S. A., Loch, A., Crase, L., Young, M., & Grafton, R. Q. (2021). Developing a water market readiness assessment framework. *In Water Markets. Edward Elgar Publishing*.

Xu, L., Li, X., Wang, X., Xiong, X., & Wang, F. (2019). Comparing the grain yields of direct seeded and transplanted rice: A meta-analysis. *Journal of Agronomy*, 9(11), 767.

Zaman, AM/, Malano, HM., & Avidson, BD. (2012). An integrated water trading–allocation model, applied to a water market in Australia. *Agricultural Water Management,* 96,149-159.

Zeng, XT., Li, YP., Huang, GH., & Liu, J. (2016). Modeling water trading under uncertainty for supporting water resources management in an arid region. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(2), 72-89.

Zibaei, M., & Malek, M. (2017). The potential effects of creating a water market on improving productivity and reducing water-related conflicts in Fars's province. *Water and Wastewater Journal*, 28(1), 126-138. (In Persian).