FANPAYA
Knowledge Based Company
(PUBLISHER)

Journal of Environmental Sciences Studies (JESS)
Volume 11, Number 1, Spring (2026)

Journal Homepage: www.jess.ir
Print ISSN: 2588-6851 Online ISSN: 2645-520X

Integrated Crop-Orchard Simulation Framework Incorporating Water Banking: An Analysis of Water Purchase and Sale Decisions During Drought

Nikta Letafat[1] ; Mohammadhasan Tarazkar[2*]

1. Ph.D. Candidate in Agricultural Economics, Shiraz University
[*]2. Associate Professor, Department of Agricultural Economics, School of Agriculture, Shiraz University
[*]Email Address: Tarazkar@shirazu.ac.ir

Article Info

Article Type:
Research Paper

Article History:

Received Date:
2026/02/08
Revised Date:
2026/04/19
Accepted Date:
2026/06/30
Published Date:
2026/07/01

Keywords:
Agricultural clustering,
Water banking,
Simulation modeling,
Drought,
Water resource management.

ABSTRACT

Water resource management in agriculture particularly under conditions of severe water scarcity and intensifying drought represents a pivotal challenge for environmental sustainability and food security. This study developed and implemented a hybrid agricultural–horticultural simulation model incorporating water banking in Sarvestan Plain across seven farmer clusters to examine water purchase and sale behaviors under varying drought conditions. The simulation employed four drought scenarios with delta coefficients of 1 (no drought), 0.75 (mild drought), 0.5 (moderate drought), and 0.25 (severe drought) to analyze shifts in water consumption patterns, trading activities, and economic strategies throughout a calendar year. Findings revealed that as drought intensifies, water purchase volumes increase continuously while water sales decline; under severe drought conditions, farmers conserve their available water resources for productive uses and lose the capacity to sell surplus water. Furthermore, the temporal pattern of water transactions across clusters aligned with the seasonal water demands of designated crops, playing a significant role in economic resilience. Simulation results indicated that crop diversity and land area directly influence farmers' economic flexibility in responding to drought; clusters with greater crop diversity and higher sales capacity demonstrated enhanced profitability and productivity. This research underscores that implementing water banking as a management instrument can contribute to agricultural sustainability and improve water allocation efficiency under water-scarce conditions, offering practical strategies for policymakers and water resource managers.

Cite this article: Nikta Letafat , Mohammadhasan Tarazkar (2026) Integrated Crop-Orchard Simulation Framework Incorporating Water Banking: An Analysis of Water Purchase and Sale Decisions During Drought , Journal of Environmental Sciences Studies, 11(1) , Pages 11070-11087.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The water scarcity crisis, particularly in arid and semi-arid regions worldwide, has become a serious challenge in recent decades. Multiple factors, including climate change, population growth, economic development, and rising demand, have placed immense pressure on water resources, threatening both water and food security. Groundwater, as a vital resource, plays a crucial role in supplying drinking water, supporting agriculture, and maintaining ecosystem stability. However, unsustainable extraction and environmental changes have put these resources at risk of both quantitative decline and qualitative degradation. In many regions, traditional supply-side policies (such as dam construction) have reached a dead end, especially in closed basins where there is no potential for new resource development. In such contexts, demand management and the use of economic instruments such as water pricing, extraction caps, and water markets have gained importance. Water banking, as an institutional mechanism, facilitates water trading among farmers, reduces transaction costs, and ensures optimal allocation. It can help improve water productivity, alleviate pressure on groundwater resources, and enhance drought management. In Iran, where agriculture accounts for the majority of water consumption, an agricultural water bank could serve as a key tool for sustainable water resource management. This research aims to elucidate the role of water banking in improving water allocation and promoting the sustainable management of water resources under water-scarce conditions.

Materials and methods

This study employs a Crop-Orchard simulation model to examine farmers' decision-making under water scarcity and water market conditions. The primary objective function is to maximize the farm’s gross margin (MBT), which is calculated as the difference between revenue (from crop sales and subsidies) and variable costs (including production costs and water pricing). Using a simulation of seven different clusters of field and horticultural crops, and applying four drought scenarios (with water shortages of 0%, 25%, 50%, and 75%), the model analyzes farmers’ behavior in buying and selling water through a water bank. The results indicate that as drought intensifies, water purchases increase while water sales decrease. Additionally, farmers' profits are affected by water shortages, but flexibility in resource management and the use of water markets helps mitigate the impacts of drought. Differences in behavioral patterns among clusters are also attributed to crop diversity, cultivated area, and their respective profitability.

Results and discussion

The overall results of this study indicate that access to water resources plays a vital role in determining cropping patterns, economic profitability, and farmers' water allocation behavior. Clusters with greater water accessibility (such as Clusters 1-3) benefit from higher crop diversity, significant gross profits (up to 57.7 trillion rials), and lower shadow prices of water. In contrast, clusters facing severe water constraints (such as Clusters 6 and 7) experience reduced cultivated areas, a focus on low-water-demand crops, lower economic returns (even below 1 trillion rials), and a sharp increase in the shadow price of water (exceeding 1,240,000 rials per cubic meter). The use of mechanisms such as water banking allows farmers to adapt more effectively to water scarcity by flexibly buying and selling water according to drought intensity, thereby maintaining profitability and production sustainability as much as possible. These findings underscore the importance of optimal water resource management and the design of water markets to mitigate the impacts of drought and enhance economic efficiency in the agricultural sector.

Conclusion

Based on the results of a simulation of an integrated crop-orchard model using a water bank, it was found that drought severity has a direct impact on the volume of water purchases, and by relying on this tool, farmers enhance their flexibility in managing water resources. Clusters with greater crop diversity and the ability to sell water during non-demand seasons experienced higher profitability. Consequently, expanding water banks, training farmers, implementing incentive policies, promoting low-water-consumption crops, and intelligent monitoring of water resources are proposed as key strategies to reduce drought risk and improve economic and environmental sustainability.

مجله مطالعات علوم محیط زیست
جلد ۱۱، شماره ۱
Journal Homepage: www.jess.ir
شاپای چاپی: 2588-6851 شاپای الکترونیکی: 2645-520X

FANPAYA
Knowledge Based Company
(PUBLISHER)

مدل شبیه‌سازی یکپارچه زراعی–باغی با بانک آب: تحلیل رفتار خرید و فروش آب در شرایط خشکسالی

نیکتا لطافت[۱]، محمدحسن طرازکار[۲*]

۱- دانشجوی دکترای اقتصاد کشاورزی دانشگاه شیراز
*۲- دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
*ایمیل نویسنده مسئول: Tarazkar@shirazu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۱۱/۱۹
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۵/۰۱/۳۰
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۵/۰۴/۰۹
تاریخ انتشار:
۱۴۰۵/۰۴/۱۰

کلید واژه ها:
خوشه‌بندی کشاورزی،
بانک آب،
مدلسازی،
خشکسالی،
مدیریت منابع آب.

چکیده

مدیریت منابع آب در کشاورزی، به‌ویژه در شرایط محدودیت شدید منابع آبی و افزایش شدت خشکسالی، یکی از چالش‌های محوری پایداری محیط زیست و امنیت غذایی است. این مطالعه با هدف بررسی رفتار خرید و فروش آب توسط کشاورزان در شرایط مختلف خشکسالی، یک مدل شبیه‌سازی ترکیبی زراعی–باغی با بانک آب در دشت سروستان را برای هفت خوشه کشاورزی طراحی و اجرا کرد. در این شبیه‌سازی، چهار سناریوی خشکسالی با ضرایب دلتا برابر با ۱ (بدون خشکسالی)، ۰٫۷۵ (خشکسالی خفیف)، ۰٫۵ (خشکسالی متوسط) و ۰٫۲۵ (خشکسالی شدید) به‌کار گرفته شد تا تغییرات در الگوی مصرف، فروش و استراتژی‌های اقتصادی کشاورزان در طول یک سال زراعی تحلیل شود. یافته‌ها نشان داد که با تشدید خشکسالی، حجم خرید آب به‌صورت پیوسته افزایش و فروش آب کاهش می‌یابد، به‌گونه‌ای که در شرایط خشکسالی شدید، کشاورزان منابع آبی خود را برای مصارف تولیدی حفظ می‌کنند و توانایی فروش مازاد را از دست می‌دهند. همچنین الگوی زمانی خرید و فروش آب در خوشه‌ها همسو با نیاز فصلی محصولات تعریف شده و نقش مهمی در پایداری اقتصادی دارد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که تنوع محصول و مساحت زمین بر انعطاف‌پذیری اقتصادی کشاورزان در مواجهه با خشکسالی تأثیر مستقیم دارد؛ خوشه‌هایی با تنوع محصول و ظرفیت فروش بالاتر، سودآوری و بهره‌وری بیشتری را نشان دادند. این پژوهش تأکید می‌کند که به‌کارگیری بانک آب به‌عنوان ابزار مدیریتی می‌تواند به افزایش پایداری کشاورزی و بهبود تخصیص منابع آب در شرایط کم‌آبی کمک کند و برای سیاست‌گذاران و مدیران منابع آب راهبردهای عملیاتی ارائه دهد.

ناشر: انتشارات فن پایا

DOI: 10.22034/jess.2026.574670.2443

۱- مقدمه

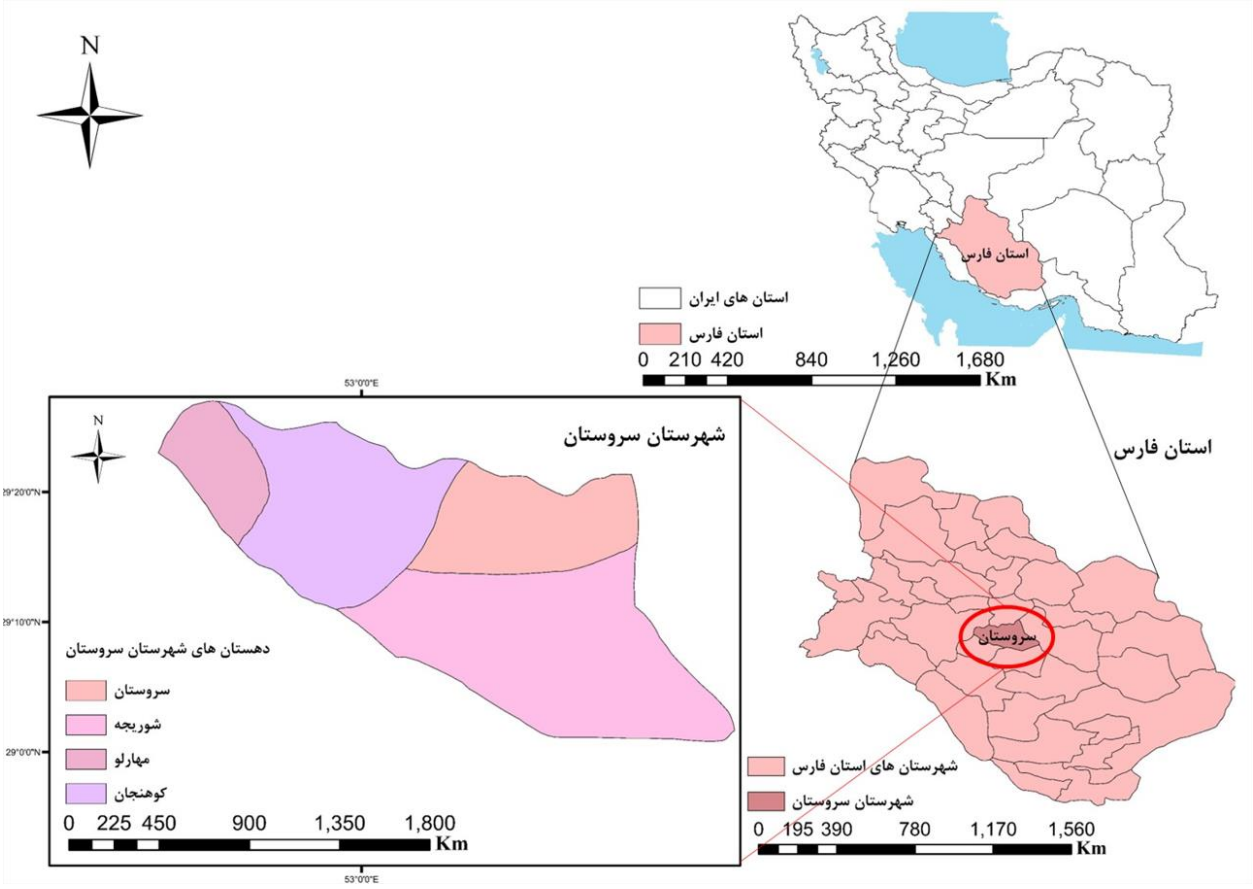
در دهه‌های اخیر، بحران کمبود آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی تبدیل شده است (Azadi et al., 2025). تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و افزایش تقاضا برای منابع آبی، فشار فزاینده‌ای بر منابع محدود آب وارد کرده و دسترسی پایدار به آب را با تهدیدهای جدی مواجه ساخته است (Matinju et al., 2023; Arefin, 2020). در بسیاری از نقاط جهان، بهره‌برداری از منابع آب به سطحی رسیده است که امکان افزایش عرضه متناسب با تقاضا وجود ندارد و این وضعیت، به‌ویژه در ترکیب با خشکسالی‌های شدید و مکرر، منجر به توزیع نامتعادل آب در زمان و مکان و تشدید تنش‌های آبی شده است.افزایش تقاضای آب در بخش کشاورزی، همراه با کاهش بارش‌ها، کمبود منابع آبی را به یکی از چالش‌های اساسی تأمین غذای بشر تبدیل کرده است. در چنین شرایطی، مدیریت هوشمندانه و پایدار منابع آب به‌منظور استفاده کارآمد از منابع محدود، حفظ امنیت غذایی و تضمین توسعه پایدار محیط‌زیست اهمیت ویژه‌ای یافته است (Berbel et al., 2013; Bjornlund et al., 2021). آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یکی از حیاتی‌ترین منابع آب، نقش اساسی در تأمین آب شرب، تولید کشاورزی و پایداری اکوسیستم‌ها ایفا می‌کنند؛ با این حال، برداشت بی‌رویه، تغییرات اقلیمی و افزایش نیازهای اقتصادی، فشار شدیدی بر این منابع وارد کرده است.حفاظت از منابع آب زیرزمینی نه‌تنها برای امنیت غذایی و توسعه پایدار ضروری است، بلکه نقش کلیدی در تحقق اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد ایفا می‌کند (Lago et al., 2015). دسترسی به آب کافی و سالم به‌طور مستقیم با سلامت عمومی، کاهش فقر و پایداری اکوسیستم‌ها در ارتباط است (Delacámara et al., 2014; Gleeson et al., 2020). در بسیاری از مناطق خشک، آب‌های زیرزمینی به‌عنوان منبع اصلی تأمین آب مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما عواملی همچون برداشت بی‌رویه، تغییرات اقلیمی، افزایش جمعیت و توسعه کشاورزی، کمیت و کیفیت این منابع را به‌طور جدی تهدید کرده‌اند (Falkenmar & Molden, 2008; Guppyet al., 2018; Gómez-Limón et al., 2020; Gleick & Shimabuku, 2023). یکی از پیامدهای جدی بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی، پدیده فرونشست زمین است که به‌ویژه در نتیجه مصرف بالای آب در بخش کشاورزی تشدید شده است (Peyravi & Karimi; 2025).در سطح جهانی، میزان برداشت آب زیرزمینی از ۱۰۰۰ میلیارد مترمکعب در سال فراتر رفته و این منابع بیش از دو میلیارد نفر را تأمین می‌کنند (Lago et al., 2015; Ling et al., 2023). هرچند آب زیرزمینی جایگزینی نسبتاً اقتصادی و در دسترس برای آب‌های سطحی به‌شمار می‌رود، اما بهره‌برداری ناپایدار و عوامل محیطی موجب افت سطح ایستابی و کاهش کیفیت آب در بسیاری از مناطق شده است (Mallick et al., 2022; Seijger & Hellegers, 2023). ازاین‌رو، مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی مستلزم کنترل تقاضا، ارزیابی آسیب‌پذیری و تدوین راهبردهای جامع مدیریتی است (Mysiak et al., 2005; Nguyen et al., 2024).در بسیاری از مناطق نیمه‌خشک جهان، از جمله ایران، کالیفرنیا، استرالیا و اسپانیا، کشاورزی آبی حدود ۸۰ درصد مصرف آب را به خود اختصاص می‌دهد. در این مناطق، سیاست‌های مدیریت منابع آب در ابتدا عمدتاً بر رویکردهای طرف عرضه، نظیر ساخت سدها و توسعه زیرساخت‌های انتقال آب، متمرکز بوده‌اند (Foster et al., 2024). با این حال، طی دهه‌های اخیر، محدودیت‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی نشان داده است که این سیاست‌ها در بسیاری از حوضه‌ها به بن‌بست رسیده‌اند، به‌ویژه در حوضه‌های بسته که امکان افزایش عرضه آب وجود ندارد (Qasemipour & Abbasi, 2019).بسته شدن حوضه‌ها مرحله‌ای از بلوغ اقتصاد آب است که در آن هرگونه تقاضای جدید تنها با کاهش دسترسی سایر کاربران قابل تأمین خواهد بود (Randall, 1981; Saqr et al., 2021). در این شرایط، رقابت میان بخش‌های کشاورزی، شهری، صنعتی و محیط‌زیستی تشدید شده و پیامدهای منفی زیست‌محیطی، از جمله کاهش جریان‌های زیست‌محیطی رودخانه‌ها، افزایش می‌یابد (Saqr et al., 2025; Fang et al., 2025). شواهد نشان می‌دهد که تداوم سیاست‌های عرضه‌محور در چنین شرایطی نه‌تنها ناکارآمد، بلکه از نظر اقتصادی و محیط‌زیستی نیز پرهزینه است (Wei et al., 2025).در پاسخ به این محدودیت‌ها، سیاست‌های مدیریت تقاضای آب به‌عنوان جایگزینی کارآمد مطرح شده‌اند. ابزارهایی نظیر قیمت‌گذاری آب، تعیین سقف برداشت و سازوکارهای مبتنی بر بازار، امکان تخصیص بهینه‌تر منابع محدود آب و کاهش آثار کم‌آبی را فراهم می‌کنند (Tuncok & Eslamian, 2017; Gallego-Ayala et al., 2011). در این میان، بانک آب به‌عنوان یک سازوکار نهادی، نقش ویژه‌ای در مدیریت تقاضای آب ایفا می‌کند. بانک آب امکان خرید، ذخیره و فروش موقت آب بین کشاورزان را در چارچوبی قانونمند و شفاف فراهم می‌سازد و به‌عنوان واسطه‌ای رسمی، مبادلات آبی را سامان‌دهی می‌کند (Calatrava & Martínez-Granados, 2018).برخلاف بازارهای آب که عمدتاً بر مبادلات مستقیم و غیرمتمرکز استوارند، بانک آب با تجمیع عرضه‌های خرد، کاهش هزینه‌های مبادله و نظارت نهادی، به تخصیص کارآمدتر منابع کمک می‌کند (Kahil et al., 2016 Reardon-Smith; Reardon-Smith et al., 2011). این سازوکار با خرید آب از کشاورزانی که داوطلبانه مصرف خود را کاهش می‌دهند و فروش آن به کشاورزان دارای نیاز بالاتر، ضمن افزایش

بهره‌وری اقتصادی، فشار بر منابع آب زیرزمینی را کاهش داده و نقش مؤثری در مدیریت خشکسالی ایفا می‌کند (Palomo-Hierro, 2023).در ایران، که بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب و وابستگی بالایی به منابع آب زیرزمینی دارد، بانک آب کشاورزی می‌تواند به‌عنوان ابزاری کلیدی برای سامان‌دهی خرید و فروش آب بین کشاورزان، افزایش بهره‌وری مصرف و کاهش برداشت بی‌رویه از سفره‌های زیرزمینی مطرح شود. با وجود اهمیت این سازوکار، بررسی جامع کارکرد بانک آب، الزامات نهادی و پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی آن در چارچوب مدیریت همزمان عرضه و تقاضای آب همچنان با خلأ پژوهشی مواجه است. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با هدف تبیین نقش بانک آب کشاورزی در مدیریت پایدار منابع آب و بهبود تخصیص آب بین کشاورزان در شرایط کم‌آبی انجام شده است.بانک‌های آب به‌عنوان یکی از ابزارهای نوین مدیریت منابع آب، نقش مهمی در تخصیص مجدد منابع آبی و افزایش کارایی مصرف آب بین تولیدکنندگان ایفا می‌کنند. مطالعات جهانی نشان می‌دهند که این بانک‌ها می‌توانند ضمن بهینه‌سازی استفاده از منابع محدود، به کاهش فشار بر منابع آب در دوره‌های خشکسالی و افزایش سود اقتصادی تولیدکنندگان کمک کنند. برای مثال، قریشی و همکاران (Qureshi et al., 2009) و مینودین و همکاران (Mainuddin et al., 2007) در حوضه موری–دارلینگ استرالیا، دیکسون و همکاران (Dixon et al., 2012) در استرالیا و مدلین آزورا و همکاران (Medellín-Azuara et al., 2013) در غرب ایالات متحده نشان دادند که بازار آب در قالب بانک‌های آب می‌توانند تصمیمات کوتاه‌مدت کشاورزان در آبیاری و تولید محصول را بهینه‌سازی کنند و به افزایش بهره‌وری اقتصادی منجر شوند.مطالعات انجام شده در اسپانیا، از جمله کار مارتینز گرانادوس و کالاتراوا (Martínez-Granados & Calatrava, 2014) و پرز بلانکو و گوتیرز مارتین (Pérez-Blanco et al., 2017)، نشان داده‌اند که بانک‌های آب قادرند حقوق آب را بین تولیدکنندگان بازتخصیص دهند و ضمن بهبود بهره‌وری اقتصادی، تصمیمات بهره‌برداران را برای کاهش مصرف آب هدایت کنند. مونتیلا لوپز و همکاران (Montilla-López et al., 2018) و گوتیرز مارتین و همکاران (Gutiérrez-Martín et al., 2020) نیز با شبیه‌سازی بانک آب در حوضه رودخانه گوادالکوویر اسپانیا نشان دادند که این سازوکار می‌تواند حجم مبادله آب و کارایی اقتصادی کلی حوضه را بهبود دهد.مطالعات دیگری مانند کونور و کاسزن (Connor & Kaczan, 2013) و پرز بلانکو و گوتیرز مارتین (Perez-Blanco & Gutierrez-Martin, 2017) نیز نقش بانک آب در بهینه‌سازی تخصیص منابع بین تولیدکنندگان را نشان داده‌اند. علاوه بر این، بازارهای آب نیز به‌عنوان ابزاری مکمل، می‌توانند با مدل‌سازی شبیه‌سازی مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی، کارایی اقتصادی و تصمیم‌گیری کشاورزان را در سطح حوضه ارتقا دهند (Gomez-Limon & Martinez, 2006; Garrido & Calatrava, 2009).با این حال، بررسی‌ها نشان می‌دهد که بانک‌های آب به طور خاص برای خرید و فروش حقوق آب بین کشاورزان با هدف افزایش کارایی اقتصادی هنوز به‌طور جامع مورد تحلیل قرار نگرفته‌اند. پژوهش حاضر با تمرکز بر بانک آب کشاورزی و معاملات حقوق آب بین تولیدکنندگان، به بررسی اثرات اقتصادی این ابزار در مدیریت منابع آب محدود می‌پردازد و شکاف موجود در ادبیات را پر می‌کند.

۲- روش تحقیق

- **منطقه مورد مطالعه**

شهرستان سروستان در فاصله حدود ۸۰ کیلومتری از مرکز استان فارس، شهر شیراز واقع شده است. مساحت این شهرستان برابر با ۱,۷۰۸ کیلومتر مربع است که معادل ۱.۴ درصد از کل مساحت استان فارس می‌باشد. حوضه آبریز مهارلو شامل پنج آبخوان اصلی سروستان، گوشنگان، قره‌باغ، مهارلو–کوار و شیراز است. بزرگ‌ترین آبخوان این حوضه، آبخوان سروستان با مساحت ۶۴۷.۹۷ کیلومتر مربع می‌باشد (Zare et al., 2020; Samani & Gouhari, 2001). آبخوان سروستان شامل روستاهای چاه‌انجیر، قنبری، بست‌خیرآباد و محدوده بالادست روستای رباط در شمال است. همچنین روستاهای سنگ‌طویله، پشت‌پر و مناطق اطراف کوهنجان در غرب و جنوب‌غربی را دربر می‌گیرد (Rasti et al., 2022). در شرق، روستاهای رباط و نظرآباد و در جنوب، شهرستان فسا در محدوده این آبخوان قرار دارند. شهرستان سروستان شامل یک ناحیه شهری و سه بخش روستایی است. مساحت آبخوان آبرفتی این منطقه برابر با ۶۴۷.۹۷ کیلومتر مربع است که از این مقدار، ۳۱۳.۵ کیلومتر مربع دشت و ۳۳۴.۴۷ کیلومتر مربع ارتفاعات را تشکیل می‌دهد (Masoudi & Sarvestani, 2024).



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه

تعداد چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق در دشت سروستان به‌ترتیب 441 و 677 حلقه است. حداقل و حداکثر عمق چاه‌های عمیق به‌ترتیب 63 و 350 متر می‌باشد. همچنین حداقل و حداکثر عمق چاه‌های نیمه‌عمیق به‌ترتیب 67متر و 406 متر گزارش شده است. در مجموع، تعداد کل چاه‌های موجود در دشت سروستان 1,117حلقه است. از این تعداد، 689 حلقه چاه غیرمجاز دارای پروانه برداشت و 194حلقه چاه غیرمجاز فاقد پروانه حفاری (چاه‌های عمیق غیرمجاز) شناسایی شده‌اند.

- **مدلسازی**

این پژوهش از رویکرد حداکثرسازی سود مزرعه استفاده می‌کند. تابع هدف مدل، حداکثر کردن سود (MBT) بر اساس تصمیمات کوتاه‌مدت کشاورزان در آبیاری و انتخاب محصولات است. سود برنامه‌ای کل مزرعه (MBT) به‌صورت تفاوت بین درآمد عملیاتی (فروش محصول و یارانه) و هزینه‌های متغیر و هزینه آب محاسبه می‌شود (Montilla-López et al., 2018):

$$MB_{ij} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left[Y_{ij}\cdot P_i + S_i - CV_{ij} - \left(Wr_{ij}\cdot P_w\right)\right] \quad (۱)$$

که در آن:

Y_{ij} عملکرد محصول i و تکنیک آبیاری j (به کیلوگرم در هکتار)، P_i قیمت فروش محصول i (به یورو/کیلوگرم)، S_i یارانه برای تولید محصول i (به یورو در هکتار) ، CV_{ij} هزینه های تولید محصول i و تکنیک آبیاری j (به یورو در هکتار)، wr_{ij} نیاز آبی محصول i و تکنیک آبیاری j (به متر مکعب در هکتار)، P_w تعرفه آب یا نرخ آب (به هزار ریال / متر مکعب) است.

تابع هدف کلی به صورت زیر است:

$$MBT = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} MB_{ij}\cdot x_{ij} \quad (۲)$$

که x_{ij} تصمیم به انتخاب تکنیک آبیاری و سطح کشت محصول (i) با تکنیک (j) است. این مدل امکان شبیه‌سازی خرید و فروش حقوق آب بین کشاورزان در چارچوب بانک آب و تعیین تأثیر آن بر سود اقتصادی مزرعه و تخصیص بهینه آب را فراهم می‌کند.

$$MB_{ij} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left[Y_{ij}\cdot P_i + S_i - CV_{ij} - \left(Wr_{ij}\cdot P_w\right)\right] \quad (۱)$$

برای بررسی رفتار کشاورزان تحت شرایط خشکسالی، مدل ترکیبی زراعی–باغی با در نظر گرفتن بانک آب در هفت خوشه شبیه‌سازی شد. در این مدل، هر خوشه شامل محصولات متنوع زراعی و باغی بود و مساحت زمین‌ها بر اساس داده‌های واقعی تعیین شد. چهار سناریوی خشکسالی با ضرایب دلتا ۱، ۰٫۷۵، ۰٫۵ و ۰٫۲۵ اعمال شد تا تأثیر شدت‌های مختلف کمبود آب بر خرید و فروش آب توسط کشاورزان ارزیابی شود. مقادیر خرید و فروش آب به‌صورت ماهانه در طول یک سال شبیه‌سازی شد و جمع سالانه نیز محاسبه گردید. این روش اجازه می‌دهد تا:

۱- رفتار کشاورزان در مواجهه با تنش‌های آبی مشخص شود.

۲- ارتباط بین شدت خشکسالی و میزان خرید و فروش آب مورد ارزیابی قرار گیرد.

۳- اثر تغییرات دسترسی به منابع آب بر سود ناخالص کشاورزی و استراتژی‌های اقتصادی تحلیل شود.

با استفاده از این شبیه‌سازی، توانستیم روندهای عمومی مانند افزایش خرید آب با تشدید خشکسالی، کاهش فروش آب در شرایط بحرانی، و حفظ الگوی زمانی مشخص برای خرید و فروش را مشاهده کنیم. این روندها در هفت خوشه با توجه به نوع محصول، مساحت زمین و سطح سودآوری متفاوت بودند، که نشان‌دهنده اهمیت انعطاف‌پذیری کشاورزان و مدیریت مؤثر منابع آب در شرایط کم‌آبی است.

۳- نتایج

- **شبیه‌سازی مدل ترکیبی زراعی–باغی بدون بانک آب**

در این بخش، وضعیت مزارع نماینده‌ای که محصولات زراعی و باغی را همزمان کشت می‌کنند، در شرایطی که بانک آب وجود ندارد، شبیه‌سازی شد. در این شبیه‌سازی، الگوی کشت، سود ناخالص و قیمت‌های سایه‌ای ماهانه برای گروه‌های همگن تعیین گردید.قیمت‌های سایه‌ای به‌ازای هر متر مکعب آب (هزار ریال) و سود ناخالص در مقیاس هزار تریلیون ریال ارائه شده است. این مقادیر از مدل زراعت–باغ استخراج شده و به عنوان ورودی برای اجرای مدل منطقه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند.جدول ۱ سطح زیرکشت، سود ناخالص و قیمت سایه‌ای آب محصولات زراعی و باغی را در ماه‌های مختلف نشان می‌دهد و تصویری جامع از نحوه تخصیص منابع آبی و اقتصادی فراهم می‌کند.

جدول ۱. نتایج سطح زیر کشت، سود ناخالص، و قیمت سایه‌ای محصولات زراعی و باغی در ماه‌های مختلف

محصول	گندم، جو، پسته بادام	یونجه پسته انجیر	گندم، جو، پسته انجیر	گندم، جو، بادام انار	گندم، جو پسته	گندم، طالبی ذرت زیتون	یونجه جو پسته
سود ناخالص	۵۷٫۷	۱۴٫۸	۲۵٫۱	۲۳٫۰	۲۲٫۰	۱۲٫۳	۰٫۸
ماه	کلاستر۱	کلاستر۲	کلاستر۳	کلاستر۴	کلاستر۵	کلاستر۶	کلاستر۷
آبان	۰	۰	۱۶۰	۰	۱۹۰	۱۲۴۰	۰
آذر	۵۲۰	۰	۴۵۰	۰	۰	۰	۰
دی	۰	۰	۰	۰	۳۳۰	۰	۰
بهمن	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
اسفند	۰	۰	۰	۱۴۰	۰	۰	۰
فروردین	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰
اردیبهشت	۱۳۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷۰
خرداد	۰	۷۳۰	۲۷۰	۰	۰	۶۳۰	۴۱۰
تیر	۰	۳۶۰	۰	۰	۰	۰	۰
مرداد	۰	۰	۵۴۰	۰	۰	۰	۰
شهریور	۰	۰	۰	۱۱۱۰	۰	۰	۰
مهر	۰	۰	۰	۰	۰	۹۰	۰

نتایج نشان می‌دهد که میزان دسترسی به آب به طور مستقیم بر سطح زیرکشت، ترکیب محصولات، سود ناخالص و قیمت سایه‌ای آب تأثیر می‌گذارد .در خوشه‌هایی که دبی آب بیشتر است (خوشه‌های ۱ تا ۳)، سطح زیرکشت محصولات متنوع و سود ناخالص بالاتر گزارش شده است؛ برای مثال، سود ناخالص در خوشه ۱ برابر با ۵۷٫۷ هزار تریلیون ریال و در خوشه ۳ برابر با ۲۵٫۱ هزار تریلیون ریال است. در مقابل، خوشه‌هایی با محدودیت شدید منابع آبی (خوشه‌های ۶ و ۷) ترکیب محصولات محدود و سود ناخالص بسیار پایین‌تر دارند؛ به عنوان مثال، سود ناخالص خوشه ۷ تنها ۰٫۸ هزار تریلیون ریال است.همچنین، قیمت سایه‌ای آب به‌طور چشمگیری تحت تأثیر محدودیت منابع قرار دارد .در خوشه‌های کم‌آب، قیمت سایه‌ای در ماه‌های بحرانی به بیش از ۱۲۴۰ هزار ریال برای هر متر مکعب آب می‌رسد (خوشه ۶)، در حالی که خوشه‌هایی با دسترسی مناسب به آب، قیمت سایه‌ای پایین‌تر دارند (۱۳۰ تا ۵۲۰ هزار ریال). این نشان می‌دهد که ارزش اقتصادی آب در شرایط کم‌آبی به شدت افزایش می‌یابد و تصمیمات بهینه تخصیص آب اهمیت حیاتی پیدا می‌کند.به طور کلی، تحلیل خوشه‌ها نشان می‌دهد که کمبود منابع آبی منجر به کاهش سطح زیرکشت، محدودیت تنوع محصول و کاهش سود اقتصادی می‌شود .این وضعیت نیاز به مکانیزم‌های مؤثر برای تخصیص بهینه منابع آب، مانند بانک آب و بازارهای آب، را برجسته می‌کند .بانک آب می‌تواند با توزیع حقوق آب بین کشاورزان، اثرات محدودیت آبی را کاهش داده و سود و کارایی اقتصادی را در کل حوضه افزایش دهد.

- **شبیه‌سازی مدل ترکیبی زراعی-باغی با استفاده از بانک آب**

جدول‌های ۲ تا ۸ شامل داده‌های هفت خوشه کشاورزی هستند که الگوهای زراعی و باغی متنوعی دارند. هر جدول نشان‌دهنده میزان خرید و فروش آب توسط کشاورزان در طول یک سال تحت چهار سطح خشکسالی مختلف است:

- دلتا = ۱: آبیاری کامل (بدون خشکسالی)
- دلتا = ۰٫۷۵: خشکسالی خفیف
- دلتا = ۰٫۵: خشکسالی متوسط
- دلتا = ۰٫۲۵: خشکسالی شدید

مقادیر آب به مترمکعب گزارش شده و سود ناخالص به هزار تریلیون ریال آمده است. این شبیه‌سازی امکان بررسی رفتار کشاورزان در تنظیم خرید و فروش آب با توجه به شدت خشکسالی را فراهم می‌کند و اثر آن بر پایداری اقتصادی و تولید محصولات را نشان می‌دهد.

جدول ۲. نتایج مربوط به خوشه ۱ در مدل تولیدات زراعی باغی در مدل منطقه‌ای

شماره کلاستر	ماه	ضریب خشکسالی =۱		ضریب خشکسالی =۰.۷۵		ضریب خشکسالی =۰.۵		ضریب خشکسالی =۰.۲۵		سود ناخالص	سطح زیر کشت
		مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش آب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز		
کلاستر۱ زراع باغی	فروردین	۰	۱۳۹۸۸	۰	۱۶۷۸.۶	۱۰۶۳۱.۶	۰	۲۲۹۴۱.۸	۰	۸۵.۵	۱۴ گندم ۸ ۱ جو ۸ ۵۰ پسته۱=۵ بادام ۱=۸
	اردیبهشت	۰	۷۱۸۱.۴	۳۹۰۵.۹	۰	۱۴۹۹۳.۲	۰	۲۶۰۸۰.۵	۰		
	خرداد	۰	۴۶۶۳۷.۱	۰	۲۶۴۵۷.۱	۰	۶۲۷۷.۱	۱۳۹۰۲.۹	۰		
	تیر	۰	۴۵۲۹۹	۰	۲۵۷۰۲.۰	۰	۶۱۰۴.۸	۱۳۴۹۲.۳	۰		
	مرداد	۰	۴۱۰۱۲	۰	۲۳۳۱۸.۷	۰	۵۶۲۵.۴	۱۲۰۶۷.۸	۰		
	شهریور	۰	۳۴۵۱۸	۰	۱۹۵۴۱.۳	۰	۴۵۶۴.۶	۱۰۴۱۲.۰	۰		
	مهر	۰	۱۹۴۹۷	۰	۱۰۹۱۸.۷	۰	۲۳۴۰.۴	۶۲۳۷.۸	۰		
	آبان	۱۸۱۰	۰	۳۲۰۲.۳	۰	۴۵۹۴.۱	۰	۵۹۸۵.۹	۰		
	آذر	۰	۲۲۱.۱	۱۱۰۵.۰	۰	۲۴۳۱.۱	۰	۳۷۵۷.۲	۰		
	دی	۰	۴۷۴.۱	۱۲۴۰.۹	۰	۲۹۵۵.۹	۰	۴۶۷۰.۹	۰		
	بهمن	۰	۷۳۵۸.۴	۰	۳۳۳۸.۱	۶۸۲.۱	۰	۴۷۰۲.۴	۰		
	اسفند	۰	۱۴۳۲۹	۰	۵۸۱۶.۲	۲۶۹۶.۸	۰	۰	۰		
جمع کل (سالانه)		۱.۸۱۱	۲۳۰.۵۱	۹.۴۵۴	۱۱۶.۷۷۱	۳۸.۹۸۵	۲۴.۹۱۳	۱۲۴.۲۵۲	۰		

در خوشه یک، کشاورزان گندم، جو، پسته و بادام را در مساحت‌های ۱۴، ۱، ۵ و ۸ هکتار کشت می‌کنند. سود ناخالص این خوشه با استفاده از بانک آب برابر با ۸۵٫۵ هزار تریلیون ریال برآورد شده است. در شرایط آبیاری کامل، یعنی زمانی که ضریب خشکسالی برابر با ۱ است، کشاورز تنها در ماه آبان ۱٬۸۱۱ مترمکعب آب خریداری کرده و در باقی ماه‌ها مجموعاً ۲۳۰٬۵۱۷ مترمکعب آب را به فروش رسانده است. با افزایش شدت خشکسالی و کاهش ضریب دلتا، حجم خرید آب به تدریج افزایش یافته و در سناریوی شدیدترین خشکسالی (دلتا = ۰٫۲۵) به ۱۲۴٬۲۵۲ مترمکعب رسیده است، در حالی که فروش آب متوقف شده است. این رفتار نشان می‌دهد که کشاورزان با توجه به دسترسی به منابع آب و شدت خشکسالی، به‌صورت انعطاف‌پذیر تصمیم‌گیری می‌کنند و استراتژی خرید و فروش خود را به گونه‌ای تنظیم می‌کنند که حداکثر سود و کارایی در مصرف منابع آبی حفظ شود.

جدول ۳. نتایج مربوط به خوشه ۲ در مدل تولیدات زراعی باغی در مدل منطقه‌ای

شماره کلاستر	ماه	ضریب خشکسالی =۱		ضریب خشکسالی =۰.۷۵		ضریب خشکسالی =۰.۵		ضریب خشکسالی =۰.۲۵		سود ناخالص	سطح زیر کشت محصول
		مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش آب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز		
کلاستر۲ زراع باغی	فروردین	۶۷۵.۶	۰	۱۷۶۳	۰	۲۸۵۱	۰	۳۹۴۰	۰	۱۵.۱	یونجه۸=۱ پسته۸=۱ انجیر۸=۸
	اردیبهشت	۵۳۳.۸	۰	۳۷۹۶	۰	۷۰۵۸	۰	۱۰۳۲۰	۰		
	خرداد	۷۹۳.۲	۰	۵۶۴۴	۰	۱۰۴۹۶	۰	۱۵۳۴۸	۰		
	تیر	۱۱۲۳	۰	۵۶۸۶	۰	۱۰۲۴۸	۰	۱۴۸۱۰	۰		
	مرداد	۷۹.۴	۰	۴۱۱۵	۰	۸۱۵۲	۰	۱۲۱۸۸	۰		
	شهریور	۰	۲۴۴.۳	۳۱۳۸	۰	۶۵۲۰	۰	۹۹۰۳	۰		
	مهر	۰	۴۱۶.۹	۱۵۷۲	۰	۳۵۶۲	۰	۵۵۵۲	۰		
	آبان	۰	۶۰۶.۵	۰	۶۳.۰	۴۸۰.۴	۰	۱۰۲۳	۰		
	آذر	۰	۲۵۴.۰	۰	۷۲.۶	۱۰۸.۸	۰	۲۹۰.۲	۰		
	دی	۰	۱۶۳.۴	۰	۴۶.۷	۶۹.۹	۰	۱۸۶.۶	۰		
	بهمن	۰	۳۲۰.۷	۰	۹۱.۶	۱۳۹.۵	۰	۳۶۶.۶	۰		
	اسفند	۰	۳۴۷.۶	۰	۹۹.۲	۱۴۹.۰	۰	۳۹۷.۳	۰		
جمع کل (سالانه)		۳.۲۰۶	۲.۳۵۳	۲۵.۷۱۸	۳۷۳	۴۹.۸۳۷	۰	۷۴.۳۲۹	۰		

خوشه دوم شامل یونجه، پسته و انجیر است که در زمین‌هایی با مساحت ۱، ۱ و ۸ هکتار کشت شده‌اند و سود ناخالص حاصل از فعالیت کشاورزی با بانک آب برابر با ۱۵٫۱ هزار تریلیون ریال برآورد شده است. در سناریوی بدون خشکسالی، کشاورز در ماه‌های فروردین تا مرداد، مجموعاً ۳٫۲۰۶ مترمکعب آب خریداری کرده و در ماه‌های شهریور تا اسفند ۲٫۳۵۳ مترمکعب آب فروخته است. با تشدید خشکسالی، میزان خرید آب افزایش یافته و فروش کاهش پیدا می‌کند، به طوری که در شدیدترین خشکسالی، تمام نیاز به آب از طریق خرید تأمین شده و هیچ آبی فروخته نمی‌شود. این خوشه نشان می‌دهد که کشاورزان در شرایط کم‌آبی شدید کاملاً به بانک آب وابسته هستند و برای حفظ تولید، فروش آب را متوقف می‌کنند، در حالی که در شرایط خشکسالی خفیف و متوسط، ترکیبی از خرید و فروش آب انجام می‌دهند تا هم نیازهای تولیدی و هم سود اقتصادی حفظ شود.

جدول ۴. نتایج مربوط به خوشه ۳ در مدل تولیدات زراعی باغی در مدل منطقه‌ای

شماره کلاستر	ماه	ضریب خشکسالی =۱		ضریب خشکسالی =۰.۷۵		ضریب خشکسالی =۰.۵		ضریب خشکسالی =۰.۲۵		سود ناخالص	سطح زیر کشت محصول
		مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش آب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز		
کلاستر۳ زراع باغی	فروردین	۰	۱۳۰۹۲	۰	۲۳۵۵	۸۳۸۱	۰	۱۹۱۱۸	۰	۳۰.۳	گندم۸=۱۱ جو۸=۱ پسته۸=۱۰ انجیر۱=۳
	اردیبهشت	۰	۷۵۹۶	۱۹۳۰	۰	۱۱۴۵۸	۰	۲۰۹۸۵	۰		
	خرداد	۰	۴۱۱۸.۹	۳۰۴۳	۰	۱۰۲۰۵.۹	۰	۱۷۳۶۸.۳	۰		
	تیر	۰	۳۹۹۵.۵	۲۸۸۱	۰	۹۷۵۷	۰	۱۶۶۳۴.۶	۰		
	مرداد	۰	۳۵۵۰.۸	۲۳۹۰	۰	۸۳۳۱	۰	۱۴۲۷۲.۰	۰		
	شهریور	۰	۳۸۱۱.۲	۱۴۰۹	۰	۶۶۲۹	۰	۱۱۸۵۰.۳	۰		
	مهر	۰	۲۵۸۲.۶	۵۷۹.۶	۰	۳۷۴۱	۰	۶۹۰۴.۰	۰		
	آبان	۱۰۵.۸	۰	۱۳۴۵	۰	۲۵۸۵	۰	۳۸۲۵.۱	۰		
	آذر	۰	۴۹۲.۸	۶۳۷.۹	۰	۱۷۶۸	۰	۲۸۹۹.۵	۰		
	دی	۰	۷۵۱.۴	۷۰۲.۹	۰	۲۱۵۷	۰	۳۶۱۱.۵	۰		
	بهمن	۰	۵۵۵۲.۵	۰	۲۴۱۰	۷۳۲.۰	۰	۳۸۷۴.۳	۰		
	اسفند	۰	۱۰۹۹۷	۰	۴۲۹۰	۲۴۱۷	۰	۹۱۲۴.۵	۰		
جمع کل (سالانه)		۱۰۶	۵۶.۵۴۲	۱۴.۹۲۱	۹.۰۵۶	۶۸.۱۶۷	۰	۱۳۰.۴۶۸	۰		

خوشه سوم شامل جو و ذرت است که در مساحت‌های ۱ و ۲۱ هکتار کشت شده‌اند و سود ناخالص این خوشه با بانک آب تنها ۰/۸ هزار تریلیون ریال است. در سناریوی بدون خشکسالی، کشاورز در ماه‌های خرداد تا مهر مجموعاً ۱۶۷٬۵۴۴ مترمکعب آب خریداری کرده و در ماه‌های سردتر مجموعاً ۱۴۱٬۵۲۷ مترمکعب آب فروخته است. با افزایش شدت خشکسالی، حجم خرید به ۱۸۰٬۷۷۱ مترمکعب افزایش یافته و فروش به ۳۱٬۱۹۶ مترمکعب کاهش یافته است. الگوی زمانی خرید و فروش ثابت باقی مانده است، به گونه‌ای که خرید در ماه‌های تابستان و فروش در ماه‌های سرد سال انجام می‌شود. کاهش سود ناخالص نسبت به خوشه‌های قبلی احتمالاً ناشی از نوع محصول و محدودیت در فروش آب در شرایط خشکسالی شدید است.

جدول ۵. نتایج مربوط به خوشه ۴ در مدل تولیدات زراعی باغی در مدل منطقه‌ای

شماره کلاستر	ماه	ضریب خشکسالی =۱		ضریب خشکسالی =۰.۷۵		ضریب خشکسالی =۰.۵		ضریب خشکسالی =۰.۲۵		سود ناخالص	سطح زیر کشت محصول
		مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش آب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز		
کلاستر۴ زراع باغی	فروردین	۰.۳۰۰	۰	۱۹۶۶.۶	۰	۳۹۳۳.۰	۰	۵۸۹۹.۳	۰	۲۳.۰	گندم۱=۲ جو۱=۲ بادام۱=۵ انار۱=۱
	اردیبهشت	۰	۰	۲۲۷۵.۴	۰	۴۵۵۰.۹	۰	۶۸۲۶.۴	۰		
	خرداد	۰.۲۰۰	۰	۲۵۴۷.۲	۰	۵۰۹۴.۳	۰	۷۶۴۱.۴	۰		
	تیر	۰.۲۰۰	۰	۲۴۳۷.۱	۰	۴۸۷۴.۰	۰	۷۳۱۰.۹	۰		
	مرداد	۰.۲۰۰	۰	۲۲۱۱.۴	۰	۴۴۲۲.۷	۰	۶۶۳۳.۹	۰		
	شهریور	۰.۲۰۰	۰	۱۹۰۳.۹	۰	۳۸۰۷.۷	۰	۵۷۱۱.۵	۰		
	مهر	۰	۰.۲۰۰	۱۰۸۵.۵	۰	۲۱۷۱.۲	۰	۳۲۵۶.۹	۰		
	آبان	۰.۱۰۰	۰	۴۱۵.۵	۰	۸۳۰.۹	۰	۱۲۴۶.۳	۰		
	آذر	۰	۰	۲۰۰.۱	۰	۴۰۰.۲	۰	۶۰۰.۳	۰		
	دی	۰	۰	۲۵۶.۱	۰	۵۱۲.۲	۰	۷۶۸.۳	۰		
	بهمن	۰	۰.۲۰۰	۵۱۱.۲	۰	۱۰۲۲.۶	۰	۱۵۳۴.۰	۰		
	اسفند	۰.۱۰۰	۰	۱۱۰۰.۸	۰	۲۲۰۱.۵	۰	۳۳۰۲.۰	۰		
جمع کل (سالانه)		۱	۰	۱۶.۹۱۱	۰	۳۳.۸۲۲	۰	۵۰.۷۳۲	۰		

در خوشه چهارم، گندم، جو، یونجه و ذرت در زمین‌هایی به مساحت ۱۱، ۱، ۱ و ۱ هکتار کشت شده‌اند و سود ناخالص با بانک آب برابر با ۱۵/۱ هزار تریلیون ریال است. در سناریوی بدون خشکسالی، کشاورز هیچ نیازی به خرید آب نداشته و تمام مازاد آب را به فروش رسانده است. با افزایش شدت خشکسالی، مقدار فروش کاهش یافته و کشاورز در برخی ماه‌ها نیاز به خرید آب پیدا کرده است. در شدیدترین خشکسالی، خرید آب در تمام ماه‌های سال انجام شده و فروش متوقف شده است. این خوشه نمونه‌ای از توانایی تطبیق انعطاف‌پذیر کشاورز با شرایط خشکسالی و حفظ سود اقتصادی از طریق تنظیم استراتژی خرید و فروش آب است.

جدول ۶. نتایج مربوط به خوشه ۵ در مدل تولیدات زراعی باغی در مدل منطقه‌ای

شماره کلاستر	ماه	ضریب خشکسالی =۱		ضریب خشکسالی =۰.۷۵		ضریب خشکسالی =۰.۵		ضریب خشکسالی =۰.۲۵		سود ناخالص	سطح زیر کشت محصول
		مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش آب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز		
کلاستر۵ زراع باغی	فروردین	۱۳۹۵۶.۹	۰	۱۳۹۵۶.۹	۰	۱۳۹۵۶.۹	۰	۱۳۹۵۶.۹	۰	۰.۷	گندم۱=۷ جو۱=۱ جو۸=۴ پسته۱=۱۲
	اردیبهشت	۸۷۴۴.۴	۰	۸۷۴۴.۴	۰	۸۷۴۴.۴	۰	۸۷۴۴.۴	۰		
	خرداد	۰	۰.۴۰۰	۰	۰.۴۰۰	۰	۰.۴۰۰	۰	۰.۴۰۰		
	تیر	۰	۰.۵۰۰	۰	۰.۵۰۰	۰	۰.۵۰۰	۰	۰.۵۰۰		
	مرداد	۰	۰.۵۰۰	۰	۰.۵۰۰	۰	۰.۵۰۰	۰	۰.۵۰۰		
	شهریور	۰	۰	۰	۰.۱۰۰	۰	۰.۱۰۰	۰	۰.۱۰۰		
	مهر	۰	۰.۳۰۰	۰	۰.۳۰۰	۰	۰.۳۰۰	۰	۰.۳۰۰		
	آبان	۲۶۴۹.۴	۰	۲۶۴۹.۴	۰	۲۶۴۹.۴	۰	۲۶۴۹.۴	۰		
	آذر	۲۸۷۵.۴	۰	۲۸۷۵.۴	۰	۲۸۷۵.۴	۰	۲۸۷۵.۴	۰		
	دی	۳۵۷۴.۸	۰	۳۵۷۴.۸	۰	۳۵۷۴.۸	۰	۳۵۷۴.۸	۰		
	بهمن	۳۶۱۰.۴	۰	۳۶۱۰.۴	۰	۳۶۱۰.۴	۰	۳۶۱۰.۴	۰		
	اسفند	۸۶۰۱.۲	۰	۸۶۰۱.۲	۰	۸۶۰۱.۲	۰	۸۶۰۱.۲	۰		
جمع کل (سالانه)		۴۴.۰۱۳	۲	۴۴.۰۱۳	۲	۴۴.۰۱۳	۲	۴۴.۰۱۳	۲		

خوشه پنجم شامل گندم و جو است که در زمین‌هایی به مساحت ۹ و ۱ هکتار کشت شده‌اند و سود ناخالص حاصل از بانک آب تنها ۰/۷ هزار تریلیون ریال است. در سناریوی بدون خشکسالی، کشاورز تنها در ماه آبان ۳۷۵ مترمکعب آب خریداری کرده و مجموعاً ۲۹٬۷۸۵ مترمکعب آب را فروخته است. با افزایش شدت خشکسالی، فروش آب کاهش یافته و در سناریوهای شدیدتر به صفر رسیده است، در حالی که میزان خرید آب به ۳۷٬۸۰۶ مترمکعب افزایش یافته است. این خوشه نشان‌دهنده وابستگی شدید به بانک آب در شرایط خشکسالی و کاهش توانایی فروش برای کسب درآمد است.

جدول ۷. نتایج مربوط به خوشه ۶ در مدل تولیدات زراعی باغی در مدل منطقه‌ای

شماره کلاستر	ماه	ضریب خشکسالی =۱		ضریب خشکسالی =۰.۷۵		ضریب خشکسالی =۰.۵		ضریب خشکسالی =۰.۲۵		سود ناخالص	سطح زیر کشت محصول
		مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش آب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز		
کلاستر۶ زراع باغی	فروردین	۰	۰	۴۰۸۵	۰	۸۷۷۸	۰	۱۳۴۷۲	۰	۱۵.۵	گندم۸=۶ ذرت۱= ۱ طالبی ۱=۱ زیتون۱=۵
	اردیبهشت	۲۶۸۵	۰	۶۱۹۱	۰	۱۰۰۷۰	۰	۱۳۹۴۸	۰		
	خرداد	۶۰۹۶	۰	۸۷۱۴	۰	۱۱۳۳۳	۰	۱۳۹۵۱	۰		
	تیر	۴۸۹۳	۰	۷۷۴۷	۰	۱۰۶۰۱	۰	۱۳۴۵۵	۰		
	مرداد	۳۵۰۹	۰	۶۳۴۴	۰	۹۱۷۹	۰	۱۲۰۱۴	۰		
	شهریور	۸۶۷۸	۰	۱۲۶۳۴	۰	۱۶۵۹۱	۰	۲۰۲۴۸	۰		
	مهر	۳۸۰۷	۰	۵۲۷۹	۰	۶۷۵۱.۴	۰	۸۲۲۳	۰		
	آبان	۱۹۹۴	۰	۳۰۵۳	۰	۴۲۰۳	۰	۵۳۵۲	۰		
	آذر	۴۲۰	۰	۱۲۱۱	۰	۲۱۱۲	۰	۳۰۱۳	۰		
	دی	۰	۲۷۴.۰	۵۱۶.۹	۰	۱۴۴۶	۰	۲۳۷۵	۰		
	بهمن	۰	۲۲۰.۹	۸۳۴.۸	۰	۲۰۶۹	۰	۳۳۰۳	۰		
	اسفند	۰	۳۹۲.۵	۲۱۵۶	۰	۵۱۱۳	۰	۸۰۶۹	۰		
جمع کل (سالانه)		۳۲.۰۸۶	۸۸۷	۵۸.۷۷۱	۰	۸۸.۲۵۰	۰	۱۱۷.۷۲۹	۰		

خوشه ششم شامل جو و ذرت است که در مساحت‌های ۱ و ۲۱ هکتار کشت شده‌اند و سود ناخالص با بانک آب برابر با ۱۲ هزار تریلیون ریال است. در سناریوی بدون خشکسالی، کشاورز در ماه‌های خرداد تا مهر ۶۶٬۹۴۶ مترمکعب آب خریداری کرده و در ماه‌های سرد سال مجموعاً ۱۴۰٬۳۷۵ مترمکعب آب فروخته است. با تشدید خشکسالی، حجم خرید افزایش یافته و فروش کاهش یافته، به طوری که در شدیدترین خشکسالی، خرید به ۹۵٬۹۶۸ مترمکعب و فروش به ۳۰٬۹۰۸ مترمکعب رسیده است. این خوشه نشان‌دهنده وابستگی متوسط به مدیریت منابع آب، ثبات الگوی زمانی خرید و فروش و سودآوری مناسب در شرایط کم‌آبی است.

جدول ۸. نتایج مربوط به خوشه ۷ در مدل تولیدات زراعی باغی در مدل منطقه‌ای

شماره کلاستر	ماه	ضریب خشکسالی =۱		ضریب خشکسالی =۰.۷۵		ضریب خشکسالی =۰.۵		ضریب خشکسالی =۰.۲۵		سود ناخالص	سطح زیر کشت محصول
		مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش آب توسط کشاورز	مقدار خرید آب توسط کشاورز	مقدار فروش اب توسط کشاورز		
کلاستر۷ زراع باغی	فروردین	۰	۵۸۰۶.۱	۰	۲۹.۳	۵۷۴۷.۳	۰	۱۱۵۲۴.۰	۰	۰.۹	یونجه۵=۱ جو۸=۷ پسته۱=۴
	اردیبهشت	۰	۲۵۰۳.۵	۱۹۷۵.۳	۰	۶۴۵۴.۱	۰	۱۰۹۳۲.۹	۰		
	خرداد	۳۷۹۲.۷	۰	۶۳۳۳.۷	۰	۸۸۷۴.۷	۰	۱۱۴۱۵.۷	۰		
	تیر	۳۵۹۶.۱	۰	۶۱۶۴.۰	۰	۸۷۳۲.۰	۰	۱۱۲۹۹.۹	۰		
	مرداد	۱۳۳۷.۳	۰	۵۴۹۲.۸	۰	۷۸۴۸.۴	۰	۱۰۲۰۳.۹	۰		
	شهریور	۲۶۹۹.۸	۰	۴۸۱۲.۳	۰	۶۹۲۴.۹	۰	۹۰۳۷.۴	۰		
	مهر	۱۶۱۹.۲	۰	۲۹۷۹.۸	۰	۴۳۴۰.۴	۰	۵۷۰۱.۰	۰		
	آبان	۱۹۸.۴	۰	۷۴۹.۰	۰	۱۲۹۹.۶	۰	۱۸۵۰.۲	۰		
	آذر	۰	۷۸۳.۲	۰	۱۴۶.۰	۴۹۱.۱	۰	۱۱۲۸.۳	۰		
	دی	۰	۹۴۵.۰	۰	۲۲۰.۱	۵۰۴.۸	۰	۱۲۲۹.۷	۰		
	بهمن	۰	۳۰۵۱.۶	۰	۷۷۳.۸	۱۵۰۳.۹	۰	۳۷۸۱.۷	۰		
	اسفند	۰	۶۰۹۷.۲	۰	۱۶۳۵	۲۸۲۵.۹	۰	۷۲۸۷.۴	۰		
جمع کل (سالانه)		۱۵.۰۴۴	۱۹.۱۸۷	۲۸.۵۰۷	۲.۸۰۵	۵۵.۵۴۷	۰	۸۵	۰		

خوشه هفتم شامل گندم و جو است که در زمین‌هایی به مساحت ۴ و ۱ هکتار کشت شده‌اند و سود ناخالص تنها ۰٫۱ هزار تریلیون ریال برآورد شده است. در سناریوی بدون خشکسالی، کشاورز در ماه‌های آذر و دی ۵۰۲ مترمکعب آب خریداری کرده و مجموعاً ۱٫۶۹۳ مترمکعب آب فروخته است. با افزایش شدت خشکسالی، حجم خرید آب به طور پیوسته افزایش یافته و در شدیدترین خشکسالی به ۱۵۰۱۴۱ مترمکعب رسیده است، در حالی که فروش آب کاملاً متوقف شده است. این خوشه نمایانگر وابستگی کامل به منابع غیرطبیعی در شرایط بحرانی و کم‌ترین عملکرد اقتصادی به دلیل محدودیت زمین و هزینه‌های خرید بالای آب است.

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از هفت خوشه کشاورزی، شبیه‌سازی مدل ترکیبی زراعی–باغی با استفاده از بانک آب نشان داد که:

۱- روند افزایشی خرید آب با تشدید خشکسالی: کاهش ضریب دلتا از ۱ به ۰٫۲۵ منجر به افزایش چشمگیر حجم خرید آب و کاهش یا توقف فروش آن شد. این امر نشان‌دهنده وابستگی شدید کشاورزان به منابع جایگزین آب در شرایط خشکسالی است.

۲- الگوی ثابت زمانی خرید و فروش: در تمام خوشه‌ها، خرید آب عمدتاً در ماه‌های گرم و فروش در ماه‌های سرد انجام شد که ارتباط نزدیکی با نیاز فصلی محصولات دارد و بیانگر هماهنگی فعالیت‌های کشاورزی با منابع آب موجود است.

۳- انعطاف‌پذیری مدیریت آب: کشاورزان با توجه به شدت خشکسالی، استراتژی‌های متفاوتی برای خرید و فروش آب اتخاذ می‌کنند. خوشه‌های با تنوع محصول بالاتر، انعطاف‌پذیری بیشتری داشتند و سود ناخالص بالاتری ایجاد کردند.

۴- تأثیر بر سودآوری: خوشه‌هایی که توانایی فروش آب داشتند و محصولات متنوع کشت می‌کردند (مانند خوشه ۱)، بالاترین سود ناخالص را تجربه کردند، در حالی که خوشه‌های کوچک و محدود (مانند خوشه ۷) کمترین سود را داشتند.

بنابراین، پیشنهاد می‌شود اقدامات زیر در دستور کار قرار گیرد:

- گسترش بانک‌های آب: توسعه بانک آب در مناطق کم‌آب می‌تواند انعطاف‌پذیری کشاورزان را در شرایط خشکسالی افزایش دهد و به کاهش ریسک اقتصادی کمک کند.
- آموزش کشاورزان : ارائه آموزش‌های عملیاتی برای بهینه‌سازی خرید و فروش آب و تنظیم آن با شدت خشکسالی و نیاز محصولات ضروری است.
- سیاست‌های تشویقی: تدوین سیاست‌هایی برای تشویق فروش آب مازاد در شرایط غیرخشکسالی و حفظ منابع در شرایط بحرانی.
- تنوع محصول و انتخاب محصولات کم‌آب: تشویق به کشت محصولاتی با نیاز آبی متناسب با منابع موجود و استفاده از تکنیک‌های کاهش مصرف آب.
- پایش و مدیریت فصلی: ایجاد سیستم‌های پایش دقیق منابع آب و تنظیم برنامه‌های خرید و فروش براساس فصل و نیاز واقعی محصولات.

سپاسگزاری

پژوهش حاضر بخشی از رساله دکتری با عنوان امکان‌سنجی و شبیه‌سازی تشکیل بانک آب در دشت سروستان است که در قالب طرح پژوهشی و با حمایت شرکت سهامی آب منطقه ای فارس انجام شده است. بدین وسیله از مسئولین محترم شرکت سهامی آب منطقه ای فارس قدردانی به عمل می آید.

منابع

- Arefin, R. (2020). Groundwater potential zone identification using an analytic hierarchy process in Dhaka City, Bangladesh. Environmental Earth Sciences, 79(11), 268.
- Azadi, Y., Yaghoubi, J., Gholizadeh, H., Gholamrezai, S., & Rahimi-Feyzabad, F. (2025). Social barriers to water scarcity adaptation: A grounded theory exploration in arid and semi-arid regions. Agricultural Water Management, 309, 109338.
- Berbel, J., Pedraza, V., & Giannoccaro, G. (2013). The trajectory towards basin closure of a European river: Guadalquivir. International Journal of River Basin Management, 11(1), 111-119.
- Bjornlund, H., van Rooyen, A., Pittock, J., & Bjornlund, V. (2021). Changing the development paradigm in African agricultural water management to resolve water and food challenges. Water International, 46(7-8), 1187-1204.
- Calatrava, J., & Martínez-Granados, D. (2018). The limited success of formal water markets in the Segura River basin, Spain. International Journal of water resources development, 34(6), 961-981.
- Connor, J. D., & Kaczan, D. (2013). Principles for economically efficient and environmentally sustainable water markets: The Australian experience. In Drought in arid and semi-arid regions: A multi-disciplinary and cross-country perspective (pp. 357-374). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Delacámara, G., Gómez, C. M., & Maestu, J. (2014). Water trading opportunities and challenges in Europe. Routledge handbook of water economics and institutions, 281-295.
- Dixon, J., Levine, M., Reicher, S., & Durrheim, K. (2012). Beyond prejudice: Are negative evaluations the problem and is getting us to like one another more the solution?. Behavioral and brain sciences, 35(6), 411-425.
- Falkenmark, M., & Molden, D. (2008). Wake up to realities of river basin closure. International journal of water resources development, 24(2), 201-215.

- Fang, Q., Su, Y., Geng, J., Shu, S., & Liu, Y. (2025). A Comprehensive Study of Water Resource–Environment Carrying Capacity via a Water-Socio-Ecological Framework and Differential Evolution-Based Projection Pursuit Modeling. Water, 17(11), 1624.
- Foster, T., Pérez-Blanco, C. D., Schmidt, G., Amarasinghe, U. A., Amaranath, G., Sikka, A., ... & Foster, W. (2024). Improving water management in agriculture: Irrigation and food production (Vol. 138). Burleigh Dodds Science Publishing.
- Gallego-Ayala, J., Gómez-Limón, J. A., & Arriaza, M. (2011). Irrigation water pricing instruments: A sustainability assessment. Spanish journal of agricultural research, 9(4), 981-999.
- Garrido, A., & Calatrava, J. (2009). Trends in water pricing and markets. Water policy in Spain, 151-164.
- Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G., & Perrone, D. (2020). Global groundwater sustainability, resources, and systems in the Anthropocene. Annual review of earth and planetary sciences, 48(1), 431-463.
- Gleick, P. H., & Shimabuku, M. (2023). Water-related conflicts: definitions, data, and trends from the water conflict chronology. Environmental Research Letters, 18(3), 034022.
- Gomez-Limon, J. A., & Martinez, C. (2006). Simulation of water markets for efficient allocation. Water Resources Management, 20, 23–42.
- Gómez-Limón, J. A., Gutiérrez-Martín, C., & Montilla-López, N. M. (2020). Agricultural water allocation under cyclical scarcity: The role of priority water rights. Water, 12(6), 1835.
- Guppy, L., Uyttendaele, P., Villholth, K. G., & Smakhtin, V. U. (2018). Groundwater and sustainable development goals: Analysis of interlinkages.
- Gutiérrez-Martín, C., Gómez-Limón, J. A., & Montilla-López, N. M. (2020). Self-financed water bank for resource reallocation to the environment and within the agricultural sector. Ecological Economics, 169, 106493.
- Kahil, M. T., Albiac, J., Dinar, A., Calvo, E., Esteban, E., Avella, L., & Garcia-Molla, M. (2016). Improving the performance of water policies: evidence from drought in Spain. Water, 8(2), 34.
- Lago, M., Mysiak, J., Gómez, C. M., Delacámara, G., & Maziotis, A. (2015). Defining and assessing economic policy instruments for sustainable water management. In Use of Economic Instruments in Water Policy: Insights from International Experience (pp. 1-13). Cham: Springer International Publishing.
- Lago, M., Mysiak, J., Gómez, C. M., Delacámara, G., & Maziotis, A. (2015). Defining and assessing economic policy instruments for sustainable water management. In Use of Economic Instruments in Water Policy: Insights from International Experience (pp. 1-13). Cham: Springer International Publishing.
- Ling, M., Chen, J., Zhang, P., Wei, X., & Yu, L. (2023). An early warning method on the carrying capacity of regional groundwater resources. Water Supply, 23(8), 3179-3191.
- Mainuddin, M., Kirby, M., & Qureshi, M. E. (2007). Integrated hydrologic–economic modelling for analyzing water acquisition strategies in the Murray River Basin. Agricultural water management, 93(3), 123-135.
- Mallick, J., Talukdar, S., Alsubih, M., Almesfer, M. K., Shahfahad, Hang, H. T., & Rahman, A. (2022). Integration of statistical models and ensemble machine learning algorithms (MLAs) for developing the novel hybrid groundwater potentiality models: a case study of semi-arid watershed in Saudi Arabia. Geocarto International, 37(22), 6442-6473.
- Martínez-Granados, D., & Calatrava, J. (2014). The role of desalinisation to address aquifer overdraft in SE Spain. Journal of Environmental Management, 144, 247-257.
- Masoudi, M., & Sarvestani, A. R. (2024). Evaluation of Ecological Capability and Current Establishment of Industrial, Rural, and Urban Development Using GIS in Parts of Fars Province, Iran. 6 (3): 72-81. DOI: https://doi. org/10.30564/jees. v6i3, 6736.
- Matinju, M. H., Alizadeh, H., Loch, A., & Aghaie, V. (2023). Analysis of social network effects on water trade in an informal water market. Journal of Cleaner Production, 425, 138917.
- Medellín-Azuara, J., Howitt, R. E., & Lund, J. R. (2013). Modeling economic-engineering responses to drought: The California case. In Drought in Arid and Semi-Arid Regions: A Multi-Disciplinary and Cross-Country Perspective (pp. 341-356). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Montilla-López, N. M., Gómez-Limón, J. A., & Gutiérrez-Martín, C. (2018). Sharing a river: Potential performance of a water bank for reallocating irrigation water. Agricultural Water Management, 200, 47-59.

- Montilla-López, N. M., Gómez-Limón, J. A., & Gutiérrez-Martín, C. (2018). Sharing a river: Potential performance of a water bank for reallocating irrigation water. Agricultural Water Management, 200, 47-59.
- Mysiak, J., Giupponi, C., & Rosato, P. (2005). Towards the development of a decision support system for water resource management. Environmental modelling & software, 20(2), 203-214.
- Nguyen, M. H., Doan, D. M., Dong, H. K., Nguyen, V. T., Dao, H. H., Trinh, D. D., ... & Do, V. C. (2024). Effects of water scarcity awareness and climate change belief on recycled water usage willingness: Evidence from New Mexico, United States.
- Palomo-Hierro, S. (2023). Assessing water markets as a tool for water scarcity management and climate change adaptation in Spain.
- Pérez-Blanco, C. D., & Gutiérrez-Martín, C. (2017). Buy me a river: Use of multi-attribute non-linear utility functions to address overcompensation in agricultural water buyback. Agricultural Water Management, 190, 6-20.
- Perez-Blanco, C., & Gutierrez-Martin, C. (2017). Water banks and environmental flows in Spain. Water Resources Management, 31(12), 3781–3796.
- Peyravi, M., & Karimi, S. (2025). Examining the Causes of Water Scarcity in the World and the Impact of Water Economy. Global Water Scarcity: Causes, Impacts, and Management Strategies, 113-132.
- Qasemipour, E., & Abbasi, A. (2019). Assessment of agricultural water resources sustainability in arid regions using virtual water concept: Case of South Khorasan Province, Iran. Water, 11(3), 449.
- Qureshi, M. E., Shi, T., Qureshi, S. E., & Proctor, W. (2009). Removing barriers to facilitate efficient water markets in the Murray-Darling Basin of Australia. Agricultural Water Management, 96(11), 1641-1651.
- Randall, A. (1981). Property entitlements and pricing policies for a maturing water economy. Australian Journal of Agricultural Economics, 25(3), 195-220.
- Rasti, M., Nasrabadi, T., & Ardestani, M. (2022). Spatio-Temporal Variation of an Aquifer Salinity in a Semi-Arid Area, Case Study of Sarvestan Plain, Iran. Pollution, 8(1), 147-157.
- Reardon-Smith, K., Mushtaq, S., Scobie, M., Eberhard, J., & Maraseni, T. N. (2022). Efficient water management and irrigation on farms.
- Samani, N., & Gouhari, M. (2001). Hydrogeological Evaluation and Management of Sarvestan Basin, by UNGW Model.
- Saqr, A. M., Alao, J. O., Chaurasia, P. K., Pant, R. R., & Abd-Elmaboud, M. E. (2025). Characterizing groundwater drought: A bibliometric analysis of publication trends, delineation methods, and sustainability implications. Developments in Environmental Science, 19, 3-19.
- Saqr, A. M., Ibrahim, M. G., Fujii, M., & Nasr, M. (2021). Sustainable development goals (SDGs) associated with groundwater over-exploitation vulnerability: geographic information system-based multi-criteria decision analysis. Natural Resources Research, 30(6), 4255-4276.
- Seijger, C., & Hellegers, P. (2023). How do societies reform their agricultural water management towards new priorities for water, agriculture, and the environment?. Agricultural Water Management, 277, 108104.
- Tuncok, I. K., & Eslamian, S. (2017). Drought Management Strategies in Water-Stressed/Water-Scarce Regions. In Handbook of Drought and Water Scarcity (pp. 95-152). CRC Press.
- Wei, Y., Tang, X., Luo, D., Wu, Z., Xu, B., & Wang, X. (2025). Unreasonable Agricultural Engineering Accelerates Exhaustion of Water Resources in Arid Basins of Northwest China Under Global Warming. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 63, 1-15.
- Zare, K., Sheykhi, V., & Zare, M. (2020). Investigating the heavy metals' removal capacity of some native plant species from the wetland groundwater of Maharlu Lake in Fars province, Iran. International Journal of Phytoremediation, 22(7), 781-788.