



## Evaluating the Impact of the Water Rights Market on the Sustainability of Groundwater Resources with an Emphasis on Equilibrium Price (Case Study: Qazvin Plain)

Seyedeh Marziye Hosseini<sup>1</sup> | Hamed Mazandarani Zadeh<sup>2</sup> | Mohammad Mahjoub<sup>3</sup> |

Hamid Azizmohammadlou<sup>4</sup>

1. Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail:

[seyedmarziehosseini@edu.ikiu.ac.ir](mailto:seyedmarziehosseini@edu.ikiu.ac.ir)

2. Corresponding Author, Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: [mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir](mailto:mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir)

3., Executive director of Qazvin province water rights market project. E-mail: [mahjoub.ir@gmail.com](mailto:mahjoub.ir@gmail.com)

4. Department of Accounting, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail:

[azizmohammadlou@soc.ikiu.ac.ir](mailto:azizmohammadlou@soc.ikiu.ac.ir)

### Article Info

### ABSTRACT

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Dec. 6, 2025

**Revised:** Apr. 15, 2026

**Accepted:** May.22, 2026

**Published online:** April. 2026

**Keywords:**

Partial Equilibrium,  
Pricing,  
Productivity,  
Water level,  
Water Resources Sustainability

The decline of groundwater levels in Iran's plains, including the Qazvin Plain, has raised serious concerns about the sustainability of water resources and the continuity of agricultural activities. To mitigate the problems arising from the depletion of aquifer volumes, new economic instruments, such as water rights markets, have been considered for managing groundwater resources. Since February 2023, in order to increase productivity and protect groundwater resources, a water rights market has been officially established in Qazvin Plain, and based on the established market mechanism, at least 10 percent of the transaction volume is recorded and stored for the benefit of the aquifer. In this study, in order to examine the effect of water market formation on groundwater level, the simulation of groundwater level under two scenarios (a) the existence of water market and (B) the absence of water market, using the dynamics of systems in the 25-year time horizon in the secondary market is paid. Water prices play a key role in the entry of suppliers and the amount of supply to the market. To this end, the market equilibrium price was initially calculated using supply and demand functions, then the market entry rate was simulated using a combination of linear growth rate and logistics. The results showed that the establishment of the water market leads to a cumulative reduction in groundwater abstraction of approximately 49 million cubic meters over a 25-year period compared to the no-market scenario, and improves the groundwater level by about 19 centimeters (equivalent to 0.5%). However, this improvement is limited, and even under the water market scenario, the overall trend of the groundwater level remains downward. Therefore, although the water market can be effective as a complementary instrument in groundwater resource management, it is not sufficient on its own to achieve the sustainability of the Qazvin Plain aquifer.

Cite this article: Hosseini, S. M., Mazandarani Zadeh, H., Mahjoub, M., Azizmohammadlou, H., (2026) Evaluating the Impact of the Water Rights Market on the Sustainability of Groundwater Resources with an Emphasis on Equilibrium Price (Case Study: Qazvin Plain) *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (2), 491-512. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.407429.670066>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.407429.670066>



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

The Qazvin Plain, one of Iran's major agricultural regions, has experienced increasing pressure on its groundwater resources over the past decades. The declining groundwater levels pose a serious threat to the sustainability of agriculture and the economic livelihood of the region. To improve water use efficiency and protect groundwater, a formal water rights market was established in the plain in March 2023. Previous studies on water markets highlight their positive role in reallocating water to higher-value uses, improving productivity, and enhancing pricing mechanisms. However, most of these studies focus on economic outcomes, while few have examined the long-term effects of water market formation on groundwater balance. Building on this literature, the present study investigates the impacts of a water rights market on groundwater levels over a 25-year horizon. Given the crucial role of water prices in influencing water-saving behavior and market participation, economic principles combined with a system dynamics approach are used to analyze market equilibrium and its long-term effects on groundwater resources.

### Method

A system dynamics model was developed, consisting of two interacting subsystems: the water resources subsystem and the water market subsystem. In this framework, water prices influence market participation and traded volumes, which in turn affect groundwater extraction and storage. Supply and demand were represented using linear functions estimated from local data, while market growth was modeled through a combination of linear components reflecting external factors such as awareness and incentives, and logistic components capturing price-dependent participation. Annual transaction volumes were simulated, and the effect of partial aquifer recharge was incorporated into the model. The model was calibrated using observed groundwater level data from 2000 to 2019. Model performance was evaluated using RMSE, MAE, and  $R^2$  indicators, showing satisfactory agreement between observed and simulated values. Sensitivity analysis was conducted to evaluate the effect of varying storage fractions (5%, 10%, 15%, and 20%) on groundwater levels. Two scenarios were simulated: one without a water market, in which water withdrawals follow conventional patterns and illegal abstractions continue, and one with a water rights market incorporating partial recharge. Assumptions included fixed cropping patterns, constant irrigation efficiency, and rational economic behavior of market participants, while structural, technological, or institutional changes were not considered due to data limitations.

### Results and discussion

Simulation outputs indicate that groundwater levels decline over the 25-year horizon under both scenarios; however, the rate of decline is lower in the market scenario. Model results show that the establishment of a water rights market reduces cumulative groundwater withdrawals by approximately 49 million cubic meters over the study period. The difference in groundwater levels between the two scenarios increases gradually over time, reflecting the cumulative effect of reduced annual withdrawals under the market mechanism. On average, groundwater levels in the market scenario are approximately 19 cm higher than those in the absence of a market. This gap widens toward the end of the simulation period, indicating the persistent moderating effect of the market on extraction volumes.

Sensitivity analysis of storage fractions in market transactions shows that increasing the fraction can slightly improve groundwater levels by reducing withdrawals. However, excessively high storage fractions increase the effective water price, reduce participation, and limit the overall effect of the market. These findings emphasize the importance of identifying an optimal intermediate storage fraction to balance aquifer protection, economic efficiency, and social acceptance. Overall, while the water rights market provides a positive effect on groundwater sustainability, the impact is limited. The long-term declining trend persists under both scenarios, indicating that additional management and regulatory interventions are necessary.

### Conclusions

This study demonstrates that the establishment of a water rights market in the Qazvin Plain can reduce groundwater extraction and slightly improve groundwater levels. However, the effect is modest, and the long-term declining trend continues, indicating that the market alone cannot halt aquifer depletion. The market's main contribution lies in reducing withdrawal intensity and managing demand rather than producing substantial improvements in groundwater levels. These findings underline the importance of employing the water rights market as a complementary tool within a comprehensive management framework. Appropriate storage fractions, combined with policy measures such as monitoring, enforcement against illegal withdrawals, and improved irrigation efficiency, are essential to achieve meaningful impact. In summary, the water rights market has potential to alleviate pressure on groundwater resources, but it cannot independently resolve the decline in groundwater levels, and must be implemented as part of an integrated and adaptive policy package for sustainable groundwater management.

### Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

### Authorship contribution

Conceptualization, Hosseini S.M. and Mazandarani Zadeh H.; methodology, Hosseini S.M., Mazandarani Zadeh H. and Azizmohammadlou H.; software, Hosseini S.M.; validation, Hosseini S.M., Mazandarani Zadeh H; formal analysis,

Hosseini S.M., Mazandarani Zadeh H.; investigation, Hosseini S.M. and Mazandarani Zadeh H.; resources, Hosseini S.M.; data curation, Hosseini S.M., Mahjoub M.; writing—original draft preparation, Hosseini S.M.; writing—review and editing, Mazandarani Zadeh H, Mahjoub M.; Azizmohammadlou H. and Hosseini S.M.;. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process**

During the preparation of this work the authors used ChatGPT in order to simulate the water rights market. After using this tool, the authors reviewed and edited the content as needed and take full responsibility for the content of the publication.

**Data availability statement**

Data available on request from the authors.

**Acknowledgements**

The authors feel it necessary to express their gratitude to Zist Ab Porab company for their sincere cooperation in advancing the present research.

**Ethical considerations**

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

## ارزیابی اثر بازار سهم آب بر پایداری منابع آب زیرزمینی با تأکید بر قیمت تعادلی (مطالعه موردی: دشت قزوین)

سیده مرضیه حسینی<sup>۱</sup> | حامد مازندرانی زاده<sup>۲</sup> | محمد محبوب<sup>۳</sup> | حمید عزیزمحمدلو<sup>۴</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه:

[seyedmarziehhosseini@edu.ikiu.ac.ir](mailto:seyedmarziehhosseini@edu.ikiu.ac.ir)

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه:

[mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir](mailto:mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir)۳. دکتری شیمی، مدیر اجرایی پروژه بازار آب در استان قزوین. رایانامه: [mahjoub.ir@gmail.com](mailto:mahjoub.ir@gmail.com)۴. گروه حسابداری، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه: [azizmohammadlou@soc.ikiu.ac.ir](mailto:azizmohammadlou@soc.ikiu.ac.ir)

## چکیده

## اطلاعات مقاله

کاهش تراز آب زیرزمینی در دشت‌های ایران، از جمله دشت قزوین، نگرانی‌های جدی درباره‌ی پایداری منابع آب و تداوم فعالیت کشاورزی ایجاد کرده است. جهت کاهش معضلات ناشی از کاهش حجم آبخوان‌ها، ابزارهای اقتصادی جدیدی مانند بازار سهم آب برای مدیریت منابع آب زیرزمینی مورد توجه قرار گرفته است. از اسفند ۱۴۰۱ به منظور افزایش بهره‌وری و حفاظت از منابع آب زیرزمینی، بازار سهم آب به طور رسمی در دشت قزوین تشکیل شده است و بر اساس سازوکار بازار شکل گرفته، حداقل ۱۰ درصد از حجم معاملات به نفع آبخوان ضبط و ذخیره می‌گردد. در این پژوهش به منظور بررسی اثر تشکیل بازار آب بر تراز آب زیرزمینی به شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی تحت دو سناریو الف) وجود بازار آب و ب) نبود بازار آب، با استفاده از پویایی سیستم‌ها در افق زمانی ۲۵ ساله در بازار ثانویه پرداخته شده است. قیمت آب نقش کلیدی در ورود عرضه کنندگان و میزان عرضه به بازار دارد. به این منظور در ابتدا قیمت تعادلی بازار با استفاده از توابع عرضه و تقاضا محاسبه شد، سپس نرخ ورود به بازار با استفاده از ترکیب نرخ رشد خطی و لجستیک شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان داد که تشکیل بازار آب موجب کاهش برداشت تجمعی آب زیرزمینی به میزان حدود ۴۹ میلیون مترمکعب طی دوره ۲۵ ساله نسبت به سناریوی بدون بازار می‌شود و تراز آب زیرزمینی را به میزان ۱۹ سانتی‌متر (معادل ۰/۵ درصد) بهبود می‌بخشد. با این حال، این میزان بهبود اندک بوده و حتی در سناریوی وجود بازار آب نیز روند کلی تراز آب زیرزمینی همچنان نزولی باقی می‌ماند. بنابراین، بازار آب اگرچه می‌تواند به‌عنوان ابزاری مکمل در مدیریت منابع آب زیرزمینی مؤثر باشد، اما به‌تنهایی برای دستیابی به پایداری آبخوان دشت قزوین کافی نیست.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۹/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۲

تاریخ انتشار: اردیبهشت ۱۴۰۵

## واژه‌های کلیدی:

بهره‌وری،  
پایداری منابع آب،  
تراز آب،  
تعادل بخشی،  
قیمت‌گذاری

استناد: حسینی؛ سیده مرضیه، مازندرانی زاده؛ حامد، محبوب؛ محمد، عزیز محمدلو؛ حمید، (۱۴۰۵) ارزیابی اثر بازار سهم آب بر پایداری منابع آب زیرزمینی با تأکید بر قیمت تعادلی (مطالعه موردی: دشت قزوین)، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۷ (۲)، ۵۱۲-۴۹۱.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.407429.670066>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.407429.670066>

## مقدمه

منابع آب زیرزمینی با تأمین ۳۶ درصد تقاضای شرب و ۴۲ درصد تقاضای کشاورزی، یکی از منابع اصلی آب شیرین مصرفی در سطح جهان هستند (ولی پور و همکاران، ۱۴۰۲). تغییر در الگوهای بارش، افزایش تبخیر، کاهش تغذیه طبیعی و برداشت‌های بی‌رویه از منابع، موجب افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی در بسیاری از نقاط جهان شده است (اکبرپور و همکاران، ۱۴۰۴).

در ایران نیز بیشتر از نصف تقاضای سالانه برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود (آموزگاری و همکاران، ۱۳۹۹). کشاورزی در ایران بیش از ۹۰ درصد مصرف از آب‌های زیرزمینی را به خود اختصاص می‌دهد (مازندرانی زاده و حسینی، ۱۴۰۱) و یکی از ارکان اساسی و زیربنایی اقتصاد کشور است که علاوه بر تأمین نیازهای غذایی، موجب کسب درآمد و ایجاد اشتغال برای بخش عمده‌ای از نیروی کار جامعه می‌شود (مازندرانی زاده و حسینی، ۱۴۰۴).

پایین بودن قیمت نسبی آب در مقایسه با سایر نهاده‌های مورد استفاده در کشاورزی موجب از بین رفتن انگیزه کشاورزان برای سرمایه‌گذاری در تکنولوژی‌های نوین به منظور افزایش بهره‌وری و صرفه‌جویی در مصرف آب شده است (زارعی قورخودی و شاهنظری، ۱۴۰۳). برای گذر از این چالش و افزایش بهره‌وری و رسیدن به توسعه پایدار، مدیران از رویکردهای مختلف مدیریتی استفاده می‌کنند که در آن میان، بازار آب به عنوان ابزار جدی مورد توجه قرار گرفته است.

بازار آب، محلی است که در آن می‌توان مجوز برداشت آب را به صورت قانونی مبادله کرد. مجوز برداشت قانونی آب، همان حقابه است که خریدوفروش آن می‌تواند به صورت دائم یا موقت انجام شود و می‌تواند مشوقی برای حفاظت از منابع آب باشد؛ به طوری که برای کاربرانی که مصارف کم ارزش تری دارند، انگیزه فروش آب و برای کاربران با تولیدات با ارزش بالاتر، انگیزه خرید آب ایجاد خواهد شد (متین‌جو و علیزاده، ۱۳۹۹). بازار رسمی آب از دیرباز در کشورهای ایالات متحده، شیلی، مکزیک و استرالیا به طور وسیع فعالیت داشته است؛ در مقابل بازارهای غیررسمی در گذشته در کشور ما وجود داشته و در حال حاضر در کشورهای دیگر نظیر هندوستان، پاکستان و اسپانیا در حد وسیع مشاهده می‌شود (شعبانی روچی و همکاران، ۱۴۰۲).

دشت قزوین به عنوان یکی از قطب‌های کشاورزی کشور، با فشار فزاینده‌ای بر منابع آب زیرزمینی مواجه است (حسینی و مازندرانی زاده، ۱۴۰۱). وجود بیش از ۶۶۳۷ حلقه چاه در دشت قزوین با حجم تخلیه ۱۳۶۶/۲ میلیون مترمکعب در سال و میزان کسری ۳۰۸/۳ میلیون متر مکعب در سال باعث افت مستمر سطح آب‌های زیرزمینی شده است (جعفری و همکاران، ۱۴۰۴). در پاسخ به این شرایط، بازار سهم آب از اسفند سال ۱۴۰۱ به طور رسمی در این دشت راه اندازی شده است. با وجود اهمیت این اقدام سیاستی، تاکنون شواهد علمی منسجمی در خصوص اثر شکل‌گیری بازار سهم آب بر وضعیت منابع آب زیرزمینی دشت قزوین ارائه نشده است.

## پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر پژوهش‌های گوناگونی در زمینه بازار آب انجام شده است که ابعاد مختلف این سازوکار را پوشش می‌دهند. در جدول (۱)، مروری کوتاه بر این مطالعات ارائه شده است.

جدول ۱. مرور مطالعات انجام شده

محققان	روش پژوهش	نتایج
صبوحی و پرهیزکاری (۱۳۹۲)	بررسی اثرات اقتصادی و رفاهی تشکیل بازار آب در استان قزوین با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت (PMP) و توابع تولید منطقه‌ای محصولات کشاورزی (SWAP)	تشکیل بازارهای آب در استان قزوین سبب افزایش حدود یک، دو و دو درصدی به ترتیب در مجموع اراضی آبی، سود ناخالص کشاورزان و مجموع نیروی کار به کار گرفته شده می‌شود.
زیبایی و ملک ورنوسفادانی (۱۳۹۶)	شبیه‌سازی بازار آب با مدل PMP در استان فارس و ترکیب آن با سیاست کاهش ۲۰ و ۳۰ درصدی سهمیه برداشت از منابع آب زیرزمینی	تشکیل بازار آب سبب افزایش ۱۵ تا ۴۲ درصدی درآمد کشاورزان می‌گردد و همچنین با اجرای همزمان بازار آب و سیاست سهمیه‌بندی برداشت، مصرف آب بدون کاهش چشمگیر درآمد کاهش می‌یابد.
احمدی و همکاران (۱۳۹۷)	بررسی چالش‌ها و ملاحظات ضروری برای موفقیت بازار آب در دشت برخوار اصفهان	نتایج بازدیدهای میدانی صورت گرفته در منطقه نشان داد عموماً مبادلات بین بخشی آب مورد توجه است و برای تشکیل بازار آب کارآمد لازم است قوانین تشویقی تقویت و قوانین بازدارنده اصلاح گردد و مواردی همچون صدور سند جداگانه و مستقل از زمین برای برداشت‌ها، اصلاح

محققان	روش پژوهش	نتایج
		و تعدیل پروانه‌های بهره‌برداری، تجهیز چاه‌های منطقه به کنتورهای هوشمند و ایجاد تشکلهای آبیان زیرزمینی مورد توجه قرار گیرد.
بدیع برزین و همکاران (۱۳۹۷)	ارزیابی اثرات تشکیل بازارهای آب محلی در منطقه سیستان با استفاده از یک سیستم مدل‌سازی اقتصادی- هیدرولوژیکی مشتمل بر مدل PMP و رهیافت تابع تولید با کشتش جانشینی ثابت (CES)	تشکیل بازارهای آب افزون بر ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضای آب آبیاری و متعادل شدن دادوستد آب بین مناطق مورد مطالعه سبب افزایش سطح زیر کشت محصولات با سوددهی بالا و افزایش ۵/۵ درصدی مجموع سود ناخالص کشاورزان سیستانی می‌شود.
ابوالحسنی و همکاران (۱۳۹۸)	بررسی نقش تشکیل بازار آب بر الگوی کشت و میزان استفاده از منابع آب در دشت مشهد با استفاده از مدل PMP	تشکیل بازار آب سبب افزایش سطح زیرکشت محصولات با سوددهی بالا و کاهش ۳۷، ۲۴ و ۲۹ درصدی در مصرف آب به ترتیب در شهرستان‌های مشهد، چناران و طرقبه- شاندیز می‌شود.
کانونی و همکاران (۱۳۹۹)	بررسی اثرات توسعه بازار آب از دیدگاه اقتصادی با استفاده از مدل‌های ریاضی و سناریوهای مختلف قیمتی در شبکه آبیاری اردبیل	لغزایش قیمت آب در چارچوب بازار سبب کاهش سطح زیرکشت و عملکرد محصولات کشاورزی و در پی آن کاهش سود ناخالص شبکه آبیاری می‌شود.
کارخانه و همکاران (۱۳۹۹)	بررسی نقش بازار آب در تخصیص بهینه آب در دشت شازند با استفاده از روش PMP	بازار آب سبب افزایش ۴/۳۳ درصدی سود ناخالص کشاورزان و کاهش سطح زیر کشت محصولات با نیاز آبی بالا شامل یونجه و سیب- زمینی و افزایش سطح زیرکشت محصولات با صرفه اقتصادی بالا شامل لوبیا سفید، لوبیا چیتی، عدس و نخود می‌گردد.
متین‌جو و علیزاده (۱۳۹۹)	شبیه‌سازی بازار آب منطقه مجن با توسعه یک مدل عامل بنیان هیدرولوژیکی- اقتصادی	بازار آب سبب افزایش تعاملات میان کشاورزان، کاهش ۲۵ درصدی در تعداد کشاورزان زیر خط فقر و جلوگیری از کاهش سطح زیر کشت در سال‌های کم باران می‌شود.
زارعی قورخودی و شاهنظری (۱۴۰۳)	شبیه‌سازی اثرات تشکیل بازار آب بر شاخص‌های بهره‌وری در حوضه آبریز تجن با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی	تشکیل بازار آب موجب افزایش بهره‌وری می‌گردد اما به تنهایی منجر به دستیابی به کشاورزی پایدار و کاهش مصرف آب در سطح حوضه آبریز نمی‌شود.
دشتی‌زاده و همکاران (۱۴۰۴)	بررسی تشکیل بازار آب در دشت هشتگرد با استفاده از مدل بهینه‌سازی دوهدفه و روش محدودیت افسیلون تقویت‌شده <sup>۴</sup> (AEC) در شرایط عدم کفایت قوانین محدودکننده و نظارت بر مبادلات آب	در صورت عدم کفایت قوانین محدود کننده و نظارت بر مبادلات آب، تشکیل بازار باعث افزایش برداشت منابع آب زیرزمینی از ۲۲۷ به ۲۸۸ میلیون مترمکعب در سال و افزایش کوتاه مدت سود کل منطقه را از ۵۳/۸ میلیارد دلار به ۳۶۷۷ میلیارد دلار همراه با هزینه‌های زیست‌محیطی و تخریب منابع آب می‌گردد.
حسینی و همکاران (۱۴۰۴)	تخمین تابع عرضه در بازارهای بهره‌وری و ثانویه در بازار سهم آب دشت قزوین با بهره‌گیری از اصول اقتصاد خرد و روش رگرسیون حداقل مربعات معمولی <sup>۵</sup> (OLS)	ضریب قیمت در بازار بهره‌وری مثبت (۰/۲۷۲) و در بازار ثانویه منفی (۲/۰۴۶-) برآورد شد. پژوهشگران دلیل منفی بودن ضریب قیمت در بازار ثانویه را محدودیت زمانی فروش آب از سوی کشاورزان عنوان کرده‌اند که منجر به افزایش ریسک برای کشاورزان و در نتیجه کاهش انگیزه برای ورود به بازار می‌شود.
حسینی و همکاران (۱۴۰۴)	تعیین قیمت تعادلی آب در بازار ثانویه سهم آب دشت قزوین با شناسایی عوامل موثر بر میزان عرضه و تقاضا و تخمین توابع عرضه و تقاضا با روش OLS	قیمت تعادلی آب در بازار ثانویه ۴۶۸۲ تومان است و قیمت تعادلی بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات دما دارد.
فدایی‌فرد و همکاران (۱۴۰۴)	بررسی نقش بازار آب در بهینه‌سازی تخصیص منابع آب و افزایش ارزش اقتصادی آب کشاورزی در دشت اشتهارد با استفاده از مدل PMP و رهیافت بیشینه آتروپی	قیمت سایه‌ای آب حدود ۱۸۷۶۰ ریال به ازای هر مترمکعب برآورد شد و نتایج نشان داد اختلاف قیمت سایه‌ای با قیمت فروش آب باعث کاهش بهره‌وری می‌شود. همچنین یافته‌ها تأکید داشتند که ایجاد زیرساخت‌های نهادی و قانونی می‌تواند کشاورزان را به سمت محصولات کم‌آبر و با ارزش اقتصادی بالاتر سوق دهد و به بهره‌برداری بهینه و پایدار از منابع آبی منجر شود.
Mai et al. (2019)	مقایسه رویکرد پویایی سیستم و رویکرد کاهش گرا در شبیه‌سازی بازار سهم آب در حوضه موری- دارلینگ استرالیا	رویکرد پویایی سیستم قادر است کل ساختار بازار آب را به صورت یکپارچه تحلیل، نقاط اهرمی سیاستی را شناسایی و پیامد بلندمدت سیاست-ها را پیش‌بینی کند در حالی که رویکردهای کاهش‌گرا با بررسی تک بعدی

Constant Elasticity of Substitution

Augmented Epsilon Constraint

Ordinary Least Squares

محققان	روش پژوهش	نتایج
Razzaq et al. (2019)	بررسی تاثیر بازارهای غیررسمی آب بر میزان بهره‌وری ۱۲۰ کشور در پاکستان با استفاده از روش تحلیل پوششی داده-ها <sup>۱</sup> (DEA) و رگرسیون کوتاه شده بوت استرپ <sup>۲</sup>	اجزا ممکن است پیوندهای کلان و اثرات بین بخشی را نادیده بگیرد. مشارکت کنندگان در بازار آب، به ویژه خریداران، بهره‌وری بالایی دارند و نتایج رگرسیون بوت استرپ نشان داد که شرکت در بازار آب و دسترسی به خدمات ترویجی موجب افزایش بهره‌وری آب می‌شود.
Xu et al. (2024)	ارزیابی تاثیر اجرای سیاست بازار سهم آب بر میزان بهره‌وری با استفاده از مدل تحلیل پوششی داده‌ها سه مرحله‌ای <sup>۳</sup> (Three- Stage DEA) و تحلیل علی اثر این سیاست با روش تفاوت در تفاوت‌ها مبتنی بر امتیاز تمایل <sup>۴</sup> (PSM-DID) با بهره‌گیری از داده‌های ۱۹ استان چین طی بازه ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹	با اجرای سیاست بازار سهم آب، بهره‌وری مصرف آب در مناطق پایلوت به طور معناداری افزایش می‌یابد و این تاثیر مثبت، با استفاده از روش PSM-DID نیز تایید شد و نشان داد که سیاست مذکور توانسته است نقش موثری در بهبود کارایی تخصیص آب ایفا کند.
Zhao et al., 2024	ارزیابی عملکرد و اهمیت وجود انواع مختلف حقایق‌های قابل معامله در بازار آب جنوب حوضه موری- دارلینگ استرالیا با مجموعه‌ای از شاخص‌های بازار شامل قیمت آب، نوسانات قیمت، تعداد معاملات و حجم متوسط هر معامله	بازار آب در این منطقه توانسته هدف اصلی خود را که تخصیص آب به کاربردهایی با بالاترین ارزش است محقق کند.
Abbasi et al. (2025)	مدل‌سازی یکپارچه بازار آب ایران با رویکرد پویایی سیستم و با هدف تحلیل تعاملات پویا میان عرضه، تقاضا، قیمت‌گذاری و سازوکارهای نهادی	<b>ایجاد بازار یکپارچه آب منجر به بهبود تخصیص منابع، کاهش هدررفت آب و افزایش کارایی اقتصادی می‌شود. همچنین نتایج تاکید می‌کند که اثربخشی این بازار وابسته به طراحی نهادی متناسب با شرایط بومی و ساختارهای حقوقی ایران است و رویکرد پویایی سیستم ابزاری مناسب برای ارزیابی سیاست‌های مدیریت و بازار آب محسوب می‌شود.</b>

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اغلب پژوهش‌های حوزه بازار آب عمدتاً بر ابعاد اقتصادی آن، از جمله تحلیل قیمت، تغییر الگوی کشت، بهبود بهره‌وری و آثار رفاهی تمرکز داشته‌اند، در حالی که پیامدهای هیدرولوژیکی، به‌ویژه اثر بازار بر تراز آب زیرزمینی، کمتر بررسی شده است. در این مطالعات، معمولاً از مدل‌هایی مانند برنامه‌ریزی ریاضی مثبت و مدل‌های اقتصادی-هیدرولوژیکی استفاده شده که با وجود ارزش تحلیلی، تمرکز اصلی آن‌ها بر نتایج اقتصادی و تخصیصی بازار بوده و تحلیل اثرات بلندمدت بازار سهم آب بر تراز آب زیرزمینی، به‌خصوص با در نظر گرفتن تعاملات پویای عرضه، تقاضا، قیمت و رفتار بهره‌برداران در طول زمان، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از مدل پویایی سیستم در پی آن است که بررسی کند آیا تشکیل بازار سهم آب ثانویه می‌تواند اثر مثبتی بر تراز آب زیرزمینی داشته باشد یا خیر. بر این اساس، هدف اصلی تحقیق، شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی دشت قزوین در افق ۲۵ ساله تحت دو سناریوی وجود و عدم وجود بازار سهم آب ثانویه و ارزیابی اثر این سازوکار بر پایداری منابع آب است.

## روش‌شناسی پژوهش

### منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی قزوین در شمال حوضه آبریز دریاچه نمک واقع شده است. این ناحیه مطالعاتی ۹۵۵۱/۷ کیلومتر مربع وسعت دارد که ۵۰۵۹ کیلومتر مربع آن دشت و مابقی نواحی کوهستانی و ارتفاعات است. محدوده مطالعاتی دارای سه جریان ورودی از محدوده‌های مطالعاتی ابرهر، آوج و قیدار و یک جریان خروجی به محدوده مطالعاتی اشتهارد است. بر اساس آمار ایستگاه‌های هیدرومتری، متوسط بیست ساله جریان ورودی از محدوده‌های مطالعاتی ابرهر، آوج و قیدار ۹۴/۹۳ میلیون متر مکعب و جریان سطحی انتقالی به محدوده مطالعاتی قزوین از سد طالقان ۲۱۹/۳۶ میلیون متر مکعب است. آبخوان این محدوده در بخش مرکزی با مساحت ۳۹۵۰ کیلومتر مربع قرار دارد. منابع بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی در این محدوده مطالعاتی شامل ۷۹۸۱ حلقه چاه با تخلیه سالانه ۱۳۸۰/۸۷ میلیون متر مکعب، ۲۷۳ رشته قنات با تخلیه سالانه ۳۶/۹۷ میلیون متر مکعب و ۲۱۹۶ دهنه چشمه با تخلیه ۲۵/۵۱ میلیون متر مکعب در سال است (جعفری و همکاران، ۱۴۰۴). مصرف آب در این محدوده شامل ۱۷۲۹/۴۲ میلیون متر مکعب در سال است که از چاه، چشمه، قنات

<sup>۱</sup>Data Envelopment Analysis

<sup>۲</sup>Bootstrapped truncated regression

<sup>۳</sup>Three- Stage Data Envelopment Analysis

<sup>۴</sup>Propensity Score Matching - Difference-in-Differences

و آب سطحی تامین می‌شود.

### بازار سهم آب

بازار سهم آب بر اساس ابلاغیه شرکت مدیریت منابع آب ایران به صورت پایلوت در استان قزوین اجرا شده است. در این سازوکار، دارندگان مجوز برداشت آب زیرزمینی می‌توانند مزاد سهم سالانه خود را به دیگران واگذار کنند. بازار ایجاد شده در قزوین شامل دو بخش «بازار بهره‌وری» و «بازار ثانویه» است. در بازار بهره‌وری کشاورزان در صورت احراز شرایط می‌توانند حداکثر ۱۰ درصد سهم آب سالیانه خود را به بخش صنعت منتقل کنند. در بازار ثانویه، که عرضه‌کنندگان و متقاضیان آن کشاورزان هستند، امکان واگذاری تا سقف ۴۰ درصد سهم آب سالیانه وجود دارد. به منظور کمک به احیا و تعادل بخشی آبخوان، دشت قزوین بر اساس هدایت الکتریکی آب (شوری) به ۱۱ کلاس تقسیم شده و بر این اساس ماتریسی طراحی شده است که در هر معامله، بسته به سطح شوری، بین ۱۰ تا ۶۰ درصد از حجم آب خریداری شده به‌عنوان ضریب ذخیره به خریدار تخصیص نمی‌یابد و به نفع آبخوان ذخیره می‌شود (حسینی و همکاران، ۱۴۰۴). بر اساس شیوه‌نامه‌های اجرایی، فرآیند ورود واگذارکننده و متقاضی به بازار سهم آب مطابق شکل (۱) انجام می‌شود.

۱	تسهیلگری ورود به بازار سهم آب	شناخت وضعیت موجود کشاورزی در دشت قزوین اطلاع‌رسانی بازار سهم آب در جامعه هدف
۲	حضور در دفتر کارگزاری جهت اطلاعات تکمیلی و تشکیل پرونده	مراجعه به دفتر کارگزاری
۳	تشکیل پرونده ورود به بازار سهم آب	تکمیل فرم‌های مربوطه، گرفتن پروانه و سایر اطلاعات مربوط به شخصیت حقیقی یا حقوقی
۴	انجام بازدید میدانی بررسی دبی واقعی چاه و کالیبراسیون کنتور	بررسی صحت عملکرد کنتور
۵	ارسال پرونده به کمیسیون	بررسی پرونده‌ها در کمیسیون «رسیدگی به درخواست‌های بازار محلی سهم آب» تایید یا رد مدارک یا میزان سهم آب قابل خرید و فروش
۶	صدور نامه مجوز خرید یا فروش توسط کمیسیون	صدور مجوز
۷	انجام معامله	تشکیل جلسه معامله در دفتر کارگزاری توافق نهایی در رابطه با قیمت و شیوه پرداخت
۸	تایید تعهدات طرفین معامله با نظارت کارگزاری	تایید پرداخت تعهدات طرفین
۹	نامه انتقال سهم آب	ارسال نامه انتقال سهم آب همراه با قرارداد معامله از طرف دفتر کارگزاری به مدیرعامل شرکت آب منطقه‌ای استان قزوین
۱۰	تایید نامه انتقال توسط مدیر بازار سهم آب و ارسال نامه داخلی به امور آب محدوده چاه فروشنده جهت کسر سهم آب فروشنده	نامه کسر سهم آب
۱۱	پیگیری دفتر کارگزار	اطلاع‌رسانی به فروشنده جهت مراجعه به امور آب محدوده خود جهت کسر سهم آب از کارت شارژ کنتور در صورت نیاز به مراجعه
۱۲	ارسال نامه‌ی کسر سهم آب چاه فروشنده از طرف امور آب مربوطه به شرکت آب منطقه‌ای	نامه کسر سهم آب توسط امور آب
۱۳	نامه افزایش سهم آب	ارسال نامه از آب منطقه‌ای استان به امور آب محدوده چاه خریدار جهت افزایش سهم آب خریدار
۱۴	ارسال نامه‌ی افزایش سهم آب چاه خریدار از طرف امور آب مربوطه به شرکت آب منطقه‌ای	نامه افزایش سهم آب توسط امور آب

شکل ۱. مراحل ورود به بازار سهم آب

از زمان انجام اولین معامله در بازار، تیر ۱۴۰۲، تا آذر ۱۴۰۳ تعداد ۶۷ حلقه چاه در بازار سهم آب دشت قزوین مشارکت داشته‌اند که ۲۳ حلقه عرضه‌کننده سهم آب، ۲۴ حلقه متقاضی خرید سهم آب در بازار ثانویه و ۲۰ حلقه متقاضی خرید سهم آب در بازار بهره‌وری بودند و ۸۰ معامله در بازار صورت گرفته است که ۴۱ معامله در بازار بهره‌وری و ۳۹ معامله در بازار ثانویه بوده است؛ در این معاملات ۲۹۴۶۱۸۸ متر مکعب آب معامله شده است که از این حجم ۱۹۸۸۳۶۰ متر مکعب در بازار ثانویه و ۹۵۷۸۲۸ متر مکعب در بازار بهره‌وری بوده است. قیمت فروش آب در طی این مدت در بازار ثانویه در بازه ۲ تا ۶ هزار تومان و در بازار بهره‌وری در بازه ۹ تا ۱۴ هزار تومان بوده است. با تشکیل بازار سهم آب در دشت قزوین و اصلاح پروانه‌ها بر اساس آبدی واقعی چاه‌ها مقدار سهم آب سالیانه چاه‌های مشارکت

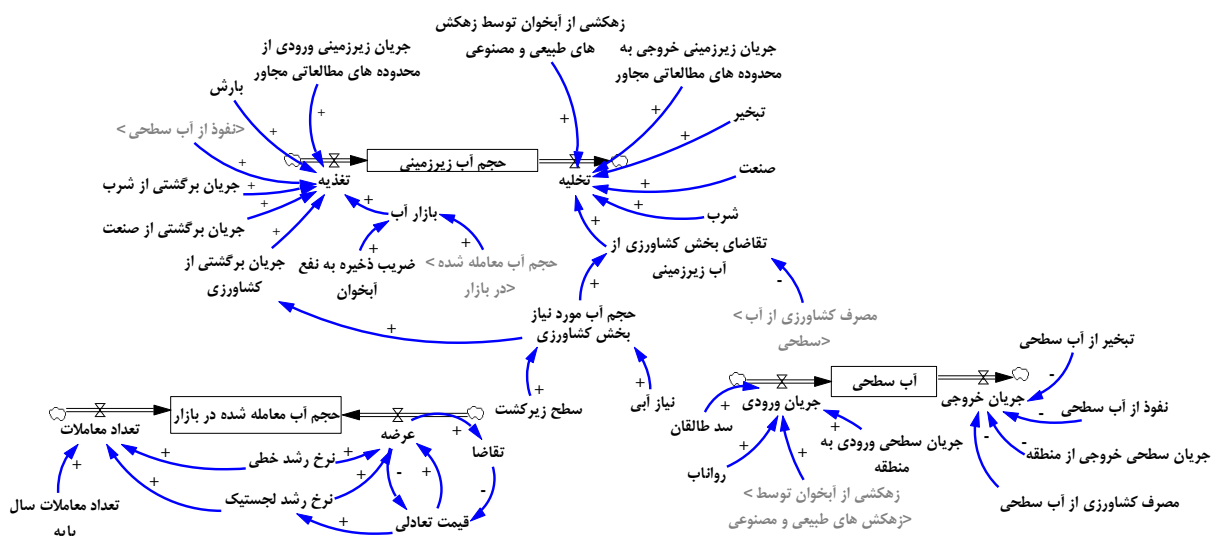
کننده در بازار ثانویه از ۱۳/۳۵ به ۱۰/۸۲ میلیون متر مکعب در سال رسیده است.

### پویایی سیستم

پویایی سیستم اولین بار توسط فارستر جهت درک بهتر مسائل راهبردی در سیستم‌های پویا معرفی شد. این رویکرد یک روش مدل‌سازی و شبیه‌سازی بازخوردی است که به عنوان روشی که بر اساس تفکر سیستماتیک بنا نهاده شده، برای مطالعه و مدل‌سازی ارتباطات بین اجزاء سیستم‌های پیچیده به کار می‌رود. بازخوردها، متغیرهای حالت، جریان، تاخیرهای زمانی و رفتار غیرخطی، ضروری‌ترین اجزاء مدل‌سازی پویا سیستم هستند (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۹).

### توسعه مدل مفهومی

با توجه به هدف اصلی پژوهش، یک مدل سیستم دینامیک مطابق شکل (۲) توسعه داده شد که قادر به شبیه‌سازی تعاملات پیچیده میان بازار سهم آب و منابع آب و زیرزمینی است. مدل توسعه داده شده دارای دو زیرسیستم منابع آب و زیرسیستم بازار آب است. زیرسیستم منابع آب با ترکیب منابع آب سطحی و زیرزمینی، تراز آب زیرزمینی را شبیه‌سازی می‌کند و زیرسیستم بازار آب وظیفه شبیه‌سازی بازار و رفتار بهره‌برداران را بر عهده دارد. تعامل بین این دو زیرسیستم به صورت بازخوردی است به گونه‌ای که تغییر قیمت آب در بازار می‌تواند بر میزان حجم عرضه شده در بازار و در نتیجه بر وضعیت منابع آب زیرزمینی تاثیر بگذارد. چنین ساختاری امکان شبیه‌سازی اثرات بلندمدت بازار سهم آب و ارزیابی پایداری منابع را فراهم می‌کند و مدل را به ابزاری مناسب برای تحلیل سیاست‌های بازارمحور و مدیریت منابع آب تبدیل می‌نماید.



شکل ۲. مدل مفهومی توسعه داده شده

### زیرسیستم منابع آب

این زیرسیستم با هدف شبیه‌سازی تغییرات حجم و تراز آب در محدوده مطالعاتی طراحی شده است و همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است زیرسیستم منابع آب شامل دو متغیر حالت آب سطحی و آب زیرزمینی است. در بخش کشاورزی تامین نیاز آبی به صورت سلسله مراتبی انجام می‌شود؛ به این معنا که در ابتدا نیاز آبی خالص محصولات از منابع آب سطحی برداشت می‌شود و چنانچه حجم آب سطحی موجود کمتر از نیاز آبی باشد، کمبود باقی مانده مستقیماً از منابع آب زیرزمینی برداشت خواهد شد. این مکانیزم باعث ایجاد پیوند دینامیکی بین دو بخش آب سطحی و زیرزمینی می‌شود، به طوری که کاهش ورودی‌های جریان سطحی باعث انتقال فشار برداشت به سمت منابع آب زیرزمینی می‌شود.

### آب سطحی

تغییرات ذخیره آب سطحی ( $\Delta S_{s,t}$ ) در هر محدود مطالعاتی تابعی از مجموع ورودی‌ها ( $Q_{si,t}$ ) و خروجی‌ها ( $Q_{so,t}$ ) است. ورودی‌ها شامل رواناب ( $Q_{Rs}$ )، مقدار جریان زهکشی از آبخوان به رودخانه ( $Q_d$ )، جریان سطحی ورودی از محدوده‌های مطالعاتی مجاور ( $Q_{in}^s$ ) و آب

سطحی انتقالی به قزوین از سد طالقان ( $Q_T$ ) و خروجی‌ها شامل نفوذ از جریان سطحی ( $I_s$ )، تبخیر از سطح آزاد آب ( $Q_{Es}$ )، جریان سطحی خروجی از محدوده مطالعاتی به اشتهارد ( $Q_{out}^s$ ) و برداشت کشاورزی ( $D_{agri}^s$ ) است. مقدار تغییرات ذخیره آب سطحی با استفاده از روابط (۱) تا (۳) در هر سال ( $t$ ) برآورد می‌گردد.

$$\Delta S_{s,t} = Q_{si,t} - Q_{so,t} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$Q_{si,t} = Q_{Rs} + Q_d + Q_{in}^s + Q_{T,t} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$Q_{so,t} = I_s + Q_{Es} + Q_{out}^s + D_{agri,t}^s \quad \text{رابطه (۳)}$$

#### آب زیرزمینی

تغییرات حجم آب زیرزمینی در سال  $t$  یکی دیگر از متغیرهای حالت در زیرسیستم منابع آب است که با استفاده از معادله بیلان (رابطه ۴) قابل محاسبه است.

$$\Delta S_{G,t} = Q_{Gi,t} - Q_{Go,t} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه (۴)،  $\Delta S_{G,t}$  تغییرات آب زیرزمینی در سال  $t$  مقدار تغذیه و  $Q_{Go,t}$  مقدار تخلیه در سال  $t$  است که با استفاده از روابط (۵) و (۶) برآورد می‌گردد.

$$Q_{Gi,t} = Q_{in}^g + Q_P + Q_{I,t} + Q_{SW,t} + Q_R \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$Q_{Go,t} = Q_{Eg} + Q_d + Q_{out} + D_{agri,t}^g + D_{I,t} + D_{Dr,t} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در روابط (۵) و (۶)،  $Q_{in}^g$  جریان زیرزمینی ورودی،  $Q_P$  مقدار نفوذ از بارندگی،  $Q_I$  جریان آب برگشتی از کشاورزی،  $Q_{SW}$  پساب آب مصرفی شرب و صنعت،  $Q_R$  تغذیه از جریان‌های سطحی،  $D_I$  تقاضا بخش صنعت،  $D_{Dr}$  تقاضای شرب،  $D_{agri}^g$  تقاضای بخش کشاورزی از آب زیرزمینی،  $Q_{out}^g$  جریان زیرزمینی خروجی،  $Q_{Eg}$  تبخیر و  $Q_d$  مقدار جریان زهکشی از آبخوان به رودخانه است.

در رابطه (۵) برای محاسبه جریان برگشتی از بخش کشاورزی، شرب و صنعت از گزارش بیلان منابع آب محدوده مطالعاتی قزوین ارائه شده توسط مهندسین مشاور ری‌آب بهره گرفته شده است. مقدار ضریب جریان برگشتی از بخش کشاورزی ۲۵ درصد و مقدار ضریب جریان برگشتی از مصارف شرب و صنعت ۷۵ درصد در نظر گرفته شده است (مهندسین مشاور ری‌آب، ۱۴۰۲).

پس از برآورد تغییرات حجم ذخیره آب با استفاده از رابطه (۴)، تراز آب زیرزمینی با استفاده از رابطه (۷) برآورد می‌شود.

$$GW\_I_t = \frac{\Delta S_{G,t}}{A_{aq} \times S} + GW\_I_{t-1} \quad \text{رابطه (۷)}$$

در رابطه (۷)،  $GW\_I_t$  تراز آب زیرزمینی در سال  $t$ ،  $GW\_I_{t-1}$  تراز آب زیرزمینی در سال  $t-1$ ،  $A_{aq}$  مساحت آبخوان و  $S$  ضریب ذخیره آبخوان است که بر اساس گزارش‌های شرکت مهندسین مشاور ری‌آب ۶ درصد در نظر گرفته شده است (مهندسین مشاور ری‌آب، ۱۴۰۲).

#### ب) زیرسیستم بازار آب

بازار آب به عنوان یک مکانیزم تخصیص منابع آب عمل می‌کند که در آن قیمت نقش تعیین کننده‌ای در رفتار عرضه کنندگان و مصرف کنندگان دارد (Howe and Goemans, 2003). در این زیرسیستم قیمت به عنوان محرکی برای صرفه‌جویی و تمایل به عرضه در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که قیمت افزایش می‌یابد کشاورزان انگیزه پیدا می‌کنند تا سهم آب بیشتری را به بازار عرضه کنند و بالعکس کاهش قیمت، انگیزه عرضه را کاهش می‌دهد (Bruno et al., 2024). بنابراین بررسی سازوکار قیمت، نرخ رشد، تعداد عرضه کنندگان و حجم عرضه شده در طول زمان برای درک پویایی بازار ضروری است.

#### قیمت تعادلی

قیمت تعادلی آب به عنوان نقطه‌ای که در آن میزان عرضه با تقاضا برابر می‌شود، منعکس کننده کمیابی واقعی منابع آب است (Zetland, 2021). این قیمت امکان مدل‌سازی پویا اثر بازار آب بر منابع آب زیرزمینی را فراهم می‌کند و پایه‌ای برای محاسبه ورود عرضه کنندگان جدید به بازار در دوره‌های بعدی محسوب می‌شود. در این پژوهش برای تعریف رفتار عرضه کنندگان و متقاضیان در بازار سهم آب قزوین از توابع خطی عرضه و تقاضا برآورد شده توسط حسینی و همکاران (۱۴۰۴) استفاده شده است. این توابع به صورت روابط (۸) و (۹) است.

$$Q_d = 176921.713 - 7088.785S - 0.663P \quad \text{رابطه (۸)}$$

رابطه ۹)  $Q_s = 150068.551 - 2.091P$   
 در روابط (۸) و (۹)،  $Q_d$  مقدار تقاضا بر حسب متر مکعب،  $Q_s$  مقدار عرضه بر حسب متر مکعب و  $P$  قیمت فروش بر حسب ریال و  $S$  ضریب ذخیره در هر معامله به نفع آبخوان است.

#### نرخ رشد بازار

برای بازتاب دقیق تر واقعیت های بازار و اثرات اقتصادی آن، نرخ رشد بازار ( $R_t$ ) در این مطالعه مطابق رابطه (۱۰) به صورت ترکیبی از مدل خطی ( $R_{linear}$ ) و لجستیک ( $R_{logistic}$ ) طراحی شده است.

$$R_t = R_{linear} \times R_{logistic} \quad \text{رابطه ۱۰)}$$

بخش خطی بیانگر افزایش پیوسته بازار است که ناشی از عوامل خارجی و مستقل از قیمت مانند تبلیغات، آموزش و سیاست های تشویقی است (Alam et al., 2024; Mponji et al., 2024) و به صورت رابطه (۱۱) تعریف می شود. این بخش موجب می شود حتی در شرایطی که قیمت ثابت باشد بازار رشد طبیعی خود را تجربه کند.

$$R_{linear} = 1 + r(t - 1) \quad \text{رابطه ۱۱)}$$

در رابطه (۱۱)،  $r$  نرخ رشد در سال  $t$  است. با توجه به اینکه در سال های ابتدایی راه اندازی بازار رشد بیشتری انتظار می رود، مقدار  $r$  برای ۱۰ سال اول ۵ درصد و پس از آن یک درصد فرض شده است.

بخش لجستیک، رشد وابسته به قیمت تعادلی را بازتاب می دهد. استفاده از تابع لجستیک برای مدل سازی پاسخ عرضه کنندگان به قیمت در بازارهای آب و منابع محدود توصیه شده است، زیرا با افزایش قیمت تعادلی انگیزه عرضه کنندگان برای ورود به بازار بیشتر می شود اما این رشد به صورت نامحدود ادامه نمی یابد (Kucharavy and De Guio, 2015). نرخ رشد لجستیک به صورت رابطه (۱۲) تعریف می شود.

$$R_{logistic} = \frac{L}{1 + e^{-k(P_{t-1} - P_0)}} \quad \text{رابطه ۱۲)}$$

در رابطه (۱۲)،  $P_{t-1}$  قیمت تعادلی سال قبل،  $P_0$  قیمت مرجع (نقطه میانی)،  $k$  ضریب شیب و  $L$  حداکثر نرخ رشد لجستیک است. این تابع با افزایش  $P_{t-1}$  به صورت صعودی اما با شیب کاهنده به  $L$  نزدیک می شود.

#### تعداد معاملات

به منظور شبیه سازی تعداد معاملات سالانه در بازار آب، از نرخ ورود بهره برداران در بازار و تعداد معاملات پایه استفاده شده است (رابطه ۱۳). این روش از رشد تصاعدی یا افت شدید معاملات که ممکن است در مدل های بازگشتی رخ دهد جلوگیری می کند.

$$N_t = R_t \times N_0 \quad \text{رابطه ۱۳)}$$

در رابطه (۱۳)،  $N_t$  تعداد معاملات بازار در سال  $t$  و  $N_0$  تعداد معاملات سال پایه است.

#### حجم عرضه

برای شبیه سازی حجم معامله شده در بازار از تابع عرضه، نرخ ورود به بازار و تعداد معاملات استفاده شده است. در تابع عرضه تخمین زده شده، ضریب قیمت منفی برآورد شده است؛ به گونه ای که با افزایش قیمت، مقدار عرضه روند کاهشی پیدا کرده و حتی به مقادیر منفی می رسد. از آنجا که از نظر اقتصادی و منطقی غیرقابل پذیرش است به منظور رفع این مشکل یک کران حداقلی تعریف گردید. این کران حداقلی برابر با ۲۰ درصد از مقدار عرضه اولیه (عرض از مبدا) در نظر گرفته شده است. بر این اساس حجم معامله شده در بازار با استفاده از روابط (۱۴) و (۱۵) برآورد می شود.

$$Q_{s_t} = R_t \times (\text{MAX}(150068.551 - 2.091P_{t-1}, 0.2 \times A_s)) \quad \text{رابطه ۱۴)}$$

$$\text{Total volume}_t = N_t \times Q_{s_t} \quad \text{رابطه ۱۵)}$$

در روابط (۱۴) و (۱۵)،  $Q_{s_t}$  حجم عرضه تعدیل شده در سال  $t$ ،  $A_s$  عرض از مبدا تابع عرضه تخمین زده شده و  $\text{Total volume}_t$  کل حجم عرضه شده در سال  $t$  هست.

بر اساس قوانین بازار سهم آب شکل گرفته در دشت قزوین، در هر معامله حداقل ۱۰ درصد از حجم معامله شده باید به نفع آبخوان ذخیره گردد. با توجه به اینکه میانگین ضریب ذخیره در معاملات حدود ۱۳ درصد بوده، در مدل ۱۳ درصد در نظر گرفته شده است. این مقدار به عنوان کاهش در برداشت در بیلان آب زیرزمینی لحاظ می شود و به تغذیه موثر اضافه می گردد.

### واسنجی مدل پویایی سیستم

به منظور افزایش دقت مدل و کاهش خطای ناشی از محدودیت داده‌ها، به ویژه سطح زیرکشت محصولات و نیاز آبی که می‌تواند باعث اختلاف میان مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی گردد، فرایند واسنجی برای دوره زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۸ انجام شد. به این منظور مطابق رابطه (۱۶) از یک رابطه خطی به عنوان معادله اصلاحی میان داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهده‌ای استفاده شد.

$$H_{Obs} = a \times H_{Sim} + b \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

در رابطه (۱۶)  $H_{Obs}$  مقادیر مشاهداتی،  $H_{Sim}$  مقادیر شبیه‌سازی شده،  $a$  و  $b$  به ترتیب ضریب مقیاس و ضریب تصحیح ثابت هستند. این ضرایب با استفاده از الگوریتم ژنتیک و از طریق کمینه‌سازی مجموع مربعات خطا تعیین شدند. تابع هدف در الگوریتم ژنتیک مطابق رابطه (۱۷) است.

$$\text{Minimize } F(a, b) = \sum_{t=1}^n (H_{Obs,t} - (a \times H_{Sim,t} + b))^2 \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

در رابطه (۱۷)،  $H_{Obs,t}$  مقدار مشاهداتی در سال  $t$ ،  $H_{Sim,t}$  مقدار شبیه‌سازی شده در سال  $t$  و  $F(a,b)$  مجموع مربعات خطا بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی است.

### ارزیابی عملکرد مدل

در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد مدل از شاخص‌های ریشه متوسط مربعات خطا<sup>۱</sup> (RMSE) (Hyndman and Koehler, 2006)، میانگین قدرمطلق خطا<sup>۱</sup> (MAE) (Stanski et al., 1989) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) استفاده شده است. شاخص‌های مذکور مطابق روابط (۱۸) تا (۲۰) است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (H_{Obs,t} - H_{Sim,t})^2} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |H_{Obs,t} - H_{Sim,t}| \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (H_{Obs,t} - H_{Sim,t})^2}{\sum_{t=1}^n (H_{Obs,t} - \bar{H}_{Obs})^2} \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

در رابطه (۲۰)،  $\bar{H}_{Obs}$  میانگین مقادیر مشاهداتی است.

### تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت تکنیکی برای ارزیابی تأثیر تغییر متغیرهای ورودی بر متغیر خروجی است (عباسی و همکاران، ۱۴۰۱). در این پژوهش به منظور ارزیابی حساسیت تراز آب زیرزمینی نسبت به ضریب ذخیره در بازار سهم آب، تحلیل حساسیت پارامتری انجام شده است. بدین منظور مقدار ضریب ذخیره در بازار ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد در نظر گرفته شد و اثر آن بر تراز آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است.

### سناریوها

برای بررسی اثر تشکیل بازار آب بر تراز آب زیرزمینی دو سناریو مدیریتی تعریف شده است. در سناریو پایه (بدون بازار آب)، برداشت آب و تغذیه آن مطابق الگوی مرسوم و بدون وجود مکانیزم مبادله آب در نظر گرفته شده است. در سناریو بازار، مقدار تغذیه مطابق الگوی مرسوم نیست و به طور متوسط ۱۳ درصد از حجم معامله به نفع آبخوان ضبط و ذخیره می‌گردد و برداشت غیرمجاز از آبخوان بر حسب حجم معاملات در بازار کاهش می‌یابد. در این پژوهش تراز آب زیرزمینی از سال ۱۳۹۹ تا ۱۴۲۶ شبیه‌سازی شده است که از سال ۱۴۰۲ همزمان با تشکیل بازار سهم آب در قزوین، اثر بازار بر تراز آب زیرزمینی بررسی شده است.

### داده‌ها و اطلاعات

آمار و اطلاعات اقلیمی، حجم جریان‌های زیرزمینی ورودی و خروجی، زهکش از آبخوان، حجم جریان‌های سطحی ورودی و خروجی و

همچنین حجم برداشت صنعت و شرب از منابع آب زیرزمینی از گزارش بیلان منابع آب محدوده مطالعاتی قزوین ارائه شده توسط شرکت مهندسی مشاور ری آب (مهندسی مشاور ری آب، ۱۴۰۲) اخذ شده است. اطلاعات مربوط به سطح زیر کشت محصولات در بازه زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۴۰۲ از آمار نامه‌های وزارت جهاد کشاورزی (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۲-۱۳۷۹) استخراج شده است. نیاز آبی گیاهان در بازه زمانی ۱۴۰۲-۱۳۷۹ از سامانه نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی کشور (موسسه تحقیقات آب و خاک، ۱۴۰۴) دریافت شده است. حجم معامله شده در بازار و قیمت فروش آب در بازار از کارگزاری بازار آب قزوین اخذ شده است.

### فرضیات و محدودیت‌های مدل

چارچوب تحلیلی این پژوهش بر مجموعه‌ای از فروض مشخص استوار است که به منظور ساده‌سازی تحلیل اتخاذ شده‌اند. در این چارچوب، الگوی کشت و وضعیت منابع آب سطحی بر اساس آخرین سال داده‌ها تثبیت شده و در طول افق تحلیل ثابت فرض شده‌اند؛ از این رو، تغییرات ساختاری بلندمدت در ترکیب محصولات یا دسترس‌پذیری منابع آب سطحی در واکنش به تحولات قیمتی، سیاستی یا اقلیمی در مدل لحاظ نشده است. پویایی بازار در قالب یک سازوکار ترکیبی مدل‌سازی شده است. بدین صورت که افزایش تدریجی آگاهی کشاورزان از طریق یک نرخ رشد خطی مستقل از قیمت بازنمایی می‌شود؛ به گونه‌ای که برای ده سال نخست نرخ رشد سالانه ۵ درصد و پس از آن نرخ ۱ درصد در نظر گرفته شده است. هم‌زمان، اثر قیمت بر گسترش بازار از طریق یک تابع رشد لجستیک وارد مدل شده تا رفتار غیرخطی و اشباع‌پذیر بازار در واکنش به تغییرات قیمتی منعکس شود. رفتار متقاضیان و عرضه‌کنندگان در این پژوهش به صورت عقلایی کامل فرض شده است؛ به این معنا که کنشگران اقتصادی تصمیمات عرضه و تقاضا خود را با هدف حداکثرسازی منفعت اقتصادی و بر مبنای قیمت‌های مشاهده شده بازار اتخاذ می‌کنند و حجم عرضه شده در بازار برابر با حجم تقاضا در نظر گرفته شده است. افزون بر این، کارایی سیستم‌های آبیاری در سراسر افق تحلیل ثابت فرض شده و امکان ذخیره‌سازی استراتژیک آب نیز در ساختار عرضه و تقاضا لحاظ نشده است؛ از این رو، تغییرات فناورانه یا نهادی مؤثر بر بهره‌وری و مدیریت آب در مدل وارد نشده است. از منظر داده‌ای، یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های این پژوهش به نوبت بودن بازار مورد مطالعه باز می‌گردد؛ به گونه‌ای که داده‌های در دسترس تنها شامل ۱۸ ماه داده مقطعی است. بر این اساس، تمامی برآوردهای اقتصادسنجی مبتنی بر این مجموعه داده محدود انجام شده است. همچنین در شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی فرض بر این است که در صورت عدم وجود بازار به اندازه مجموع حجم معاملات در بازار برداشت غیرمجاز صورت خواهد گرفت به این مفهوم که عرضه‌کننده به دلیل عدم امکان عرضه آب، تمام سهم آب خود را مصرف می‌کند و متقاضی به دلیل عدم امکان خرید آب اقدام به برداشت غیرمجاز می‌نماید.

### نتایج و بحث

#### واسنجی مدل آب زیرزمینی

به منظور ارزیابی دقت مدل در شبیه‌سازی تغییرات سطح آب زیرزمینی، ابتدا مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی (۱۳۷۹-۱۳۹۸) مطابق شکل (۳) با یکدیگر مقایسه شدند. بررسی بصری نشان می‌دهد که مدل توانسته است روند کلی و نوسانات سالانه سطح آب زیرزمینی را با دقت قابل قبول دنبال کند. برای ارزیابی کمی دقت مدل، داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در قالب نمودار پراکندگی مطابق شکل (۴) بررسی شدند. برازش خطی بین دو مجموعه داده، شبیهی برابر با ۱/۰۶۹ و عرض از مبدا ۸۳/۷۶۶- نشان داد. این نتایج بیانگر آن است که مقادیر شبیه‌سازی شده کمی بیشتر از مقادیر واقعی هستند. به منظور همسویی مدل با داده‌های مشاهداتی، مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از رابطه خطی برازش داده شده (رابطه ۲۱) اصلاح شدند. همانطور که در جدول (۲) نشان داده شده است با اعمال این اصلاح مدل توانست تغییرات تراز آب زیرزمینی را با دقت بالاتر و همخوانی نزدیک به داده‌های مشاهداتی شبیه‌سازی نماید. جناب و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی که به شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در قزوین پرداختند مقدار RMSE را کمتر از یک متر، مکوندی و همکاران (۱۳۹۹) در آبخوان نجف آباد مقدار RMSE و MAE را به ترتیب ۰/۸ متر و ۰/۶ متر، رجبی خمسه و همکاران (۱۳۹۹) مقدار RMSE در دشت ایزد ۱/۲ متر بدست آوردند و با توجه به نتایج جدول (۲) می‌توان نتیجه گرفت دقت شبیه‌سازی مناسب است.

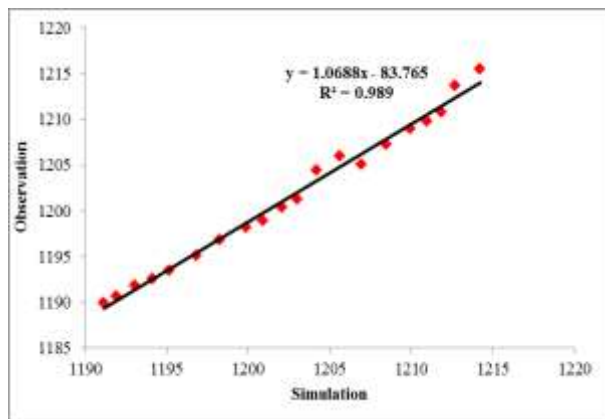
$$H_{sim}^* = 1.0688H_{sim} - 83.765$$

رابطه (۲۱)

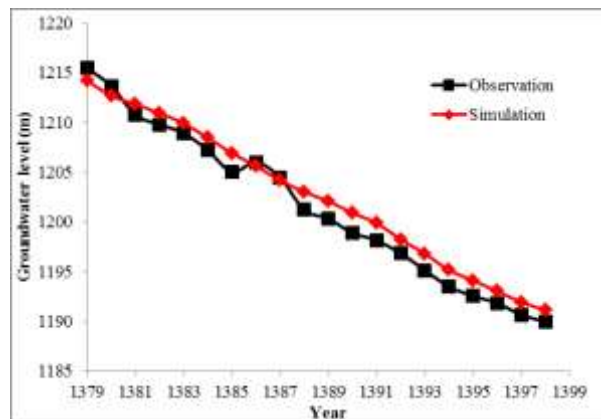
جدول ۲. شاخص‌های آماری مدل قبل و بعد از واسنجی

شاخص‌های آماری	قبل از کالیبراسیون	بعد از کالیبراسیون
----------------	--------------------	--------------------

۰/۹۸۹	۰/۹۸۹	R <sup>2</sup>
۰/۶۸۹	۱/۳۲۳	MAE
۰/۷۹۸	۱/۳۹۷	RMSE



شکل ۴. نمودار پراکندگی مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی



شکل ۳. تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی

### شبیه‌سازی بازار

#### تحلیل و برآورد نرخ رشد بازار

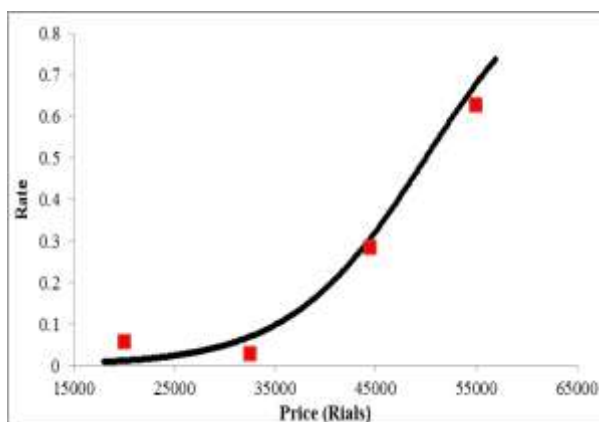
به‌منظور تحلیل پویایی بازار آب و بررسی نحوه‌ی تغییرات ورود عرضه‌کنندگان به بازار در طول زمان، نرخ رشد بازار به‌صورت ترکیبی از مدل لجستیک و خطی برآورد شد. هدف از این تحلیل، درک رفتار تدریجی و مرحله‌ای عرضه‌کنندگان در فرآیند شکل‌گیری و توسعه‌ی بازار ثانویه بود. مدل لجستیک از آن جهت انتخاب شد که به‌خوبی توانایی نمایش فرآیندهایی را دارد که در ابتدا رشد آهسته‌ای داشته و سپس با افزایش آگاهی و انگیزه‌ی مشارکت‌کنندگان، سرعت رشد افزایش یافته و نهایتاً در اثر محدودیت‌های نهادی یا اشباع بازار به تعادل می‌رسد. از سوی دیگر، مؤلفه‌ی خطی به مدل اضافه گردید تا روندهای ساختاری و بلندمدت توسعه‌ی بازار را که به‌تدریج و مستقل از تغییرات قیمت شکل می‌گیرند، در مدل لحاظ کند. پارامترهای این تابع با استفاده از تعداد معاملات در بازه قیمت‌های مختلف مطابق رابطه (۲۲) برآورد شد.

$$R_{logistic} = \frac{1}{1 + e^{-0.000149(P_{t-1} - 50000)}} \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

نتایج برازش مدل لجستیک در جدول (۳) نشان می‌دهد که انطباق مدل با داده‌های مشاهده‌شده بسیار مطلوب است. شکل (۵) منحنی لجستیک برآوردشده را نشان می‌دهد. نتایج برازش تابع لجستیک نشان می‌دهد که بازار آب در محدوده قیمت‌های فعلی هنوز به مرحله اشباع نرسیده است. در این تابع، پارامتر  $P_0$  نقطه‌ی عطف منحنی است و زمانی که  $P = P_0$  باشد، مقدار نرخ رشد برابر ۰/۵ خواهد بود. به عبارت دیگر، در قیمت ۵۰۰۰۰ ریال، بازار در وضعیت نیمه‌اشباع قرار دارد و هنوز بخش قابل توجهی از ظرفیت رشد باقی است. این ویژگی با منطق اقتصادی بازار آب کاملاً سازگار است، زیرا انتظار می‌رود در مراحل اولیه شکل‌گیری بازار، افزایش قیمت‌ها منجر به رشد تدریجی نرخ ورود عرضه‌کنندگان و تقاضاکنندگان شود و رسیدن به اشباع کامل تنها در سطوح قیمتی بسیار بالاتر اتفاق افتد. رفتار صعودی و غیرخطی تابع لجستیک نشان می‌دهد که با افزایش قیمت، نرخ رشد ورود به بازار شتاب می‌گیرد؛ اما به تدریج به حد اشباع نزدیک می‌شود. این روند طبیعی بازارهای نوپا است که در آن ابتدا انگیزه‌های اقتصادی باعث رشد سریع مشارکت می‌شوند، ولی در ادامه محدودیت‌های فنی، قانونی و منابع موجب کاهش سرعت رشد و نزدیک شدن به تعادل بلندمدت می‌گردد. در مدل حاضر، چون  $P_0 = 50000$  نقطه میانی منحنی است، بازار هنوز در نیمه مسیر رشد خود قرار دارد و اشباع کامل تنها در قیمت‌های بالاتر از ۱۰۰۰۰۰ ریال قابل انتظار است؛ بنابراین، نتایج تابع لجستیک بیانگر پویایی در حال رشد بازار و فاصله معنی‌دار آن از مرحله اشباع است.

جدول ۳. شاخص‌های ارزیابی برازش تابع لجستیک

مقدار	شاخص‌های آماری
۰/۹۷۳	R <sup>2</sup>
۰/۰۳۷	MAE

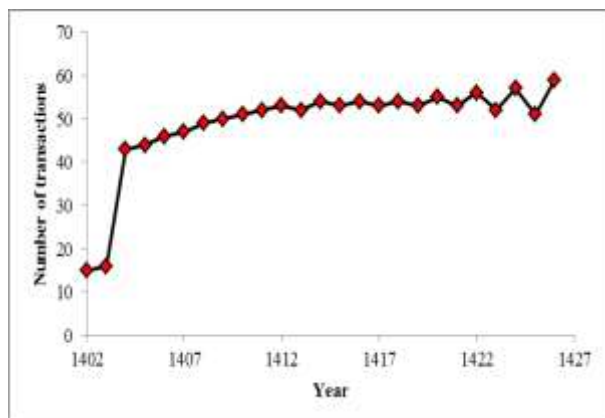


شکل ۵. تابع لجستیک برازش داده شده

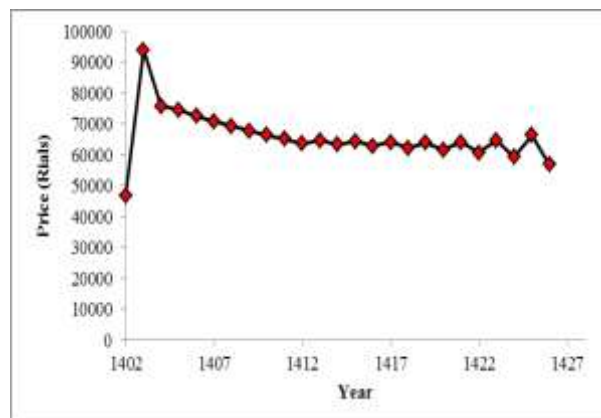
در گام دوم، برای لحاظ کردن روندهای پایدار و بلندمدت، مؤلفه‌ای خطی به مدل افزوده شد. این بخش بیانگر عواملی نظیر افزایش آگاهی کشاورزان، بهبود زیرساخت‌های فنی، ارتقای اعتماد نهادی به بازار و سیاست‌های حمایتی دولت است که اثر خود را به صورت خطی و مستمر در طول زمان نشان می‌دهند. نتایج حاصل از ضرب دو مؤلفه‌ی لجستیک و خطی نشان داد که مدل ترکیبی توانسته است رفتار واقعی بازار آب را با دقت بالاتری نسبت به مدل‌های تک‌بعدی (صرفاً لجستیک یا صرفاً خطی) شبیه‌سازی کند.

#### مقایسه سناریوها

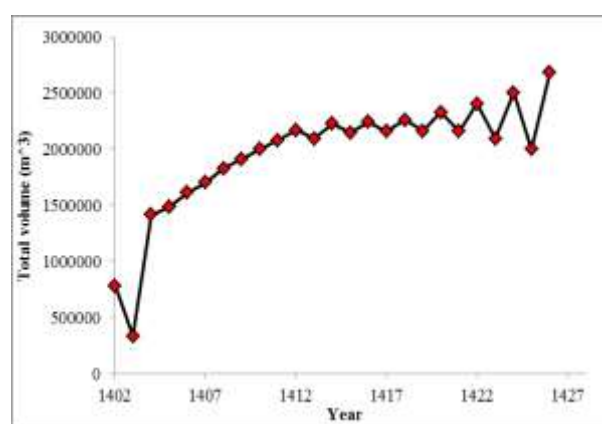
در این بخش، تأثیر شکل‌گیری و پویایی بازار آب بر روند تغییرات تراز آب زیرزمینی در منطقه مطالعه شده بررسی شده است. هدف از این تحلیل، درک چگونگی اثرگذاری سازوکارهای بازار، از جمله تغییر قیمت آب و حجم معاملات، بر پایداری منابع آب زیرزمینی و تعدیل برداشت‌ها در طول زمان است. قیمت‌های گزارش شده در این پژوهش بدون لحاظ کردن تورم است؛ بنابراین تغییرات مشاهده شده در قیمت تعادلی ناشی از پویایی‌های مدل است و اثر تورم در آن لحاظ نشده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بازار مطابق شکل‌های (۶) تا (۸) است. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی بازار (شکل ۶) نشان می‌دهد که با آغاز فعالیت بازار در سال ۱۴۰۲، قیمت تعادلی آب حدود ۴۶۸۰۰ ریال بوده و قیمت در سال‌های ابتدایی به تدریج افزایش یافته است. رشد قیمت در این مرحله ناشی از محدودیت عرضه بوده است. با گذشت زمان و افزایش تعداد عرضه‌کنندگان، قیمت آب از روند افزایشی خود فاصله گرفته و به تدریج به سمت تعادل جدید حرکت کرده است، به طوری که در سال ۱۴۲۶ قیمت آب حدود ۵۶۸۰۰ ریال برآورد گردید. بر اساس روند مشاهده‌شده، بازار آب در طول دوره مورد بررسی از مرحله‌ی رشد سریع عبور کرده و وارد فاز پایداری نسبی شده است. همزمان با تثبیت قیمت، حجم کل مبادلات نیز روندی صعودی داشته و از حدود ۷۸۰ هزار مترمکعب در سال ۱۴۰۲ به بیش از ۲/۶ میلیون مترمکعب در سال ۱۴۲۶ رسیده است. این افزایش بیانگر اعتماد و مشارکت تدریجی کشاورزان در بازار و شکل‌گیری رفتار اقتصادی منسجم در عرضه و تقاضای آب است. تعداد معاملات نیز از ۱۵ مورد در سال آغازین به حدود ۵۹ معامله در پایان دوره رسیده که نشانگر پویایی و بلوغ تدریجی بازار آب است. افزایش حجم مبادلات در کنار روند تعدیل قیمت، بیانگر آن است که بازار توانسته است بخشی از نیاز مناطق کم‌آب را از طریق انتقال داوطلبانه آب از مناطق دارای مازاد تأمین کند و در نتیجه فشار بر منابع زیرزمینی کاهش یافته است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، ۴۸/۸ میلیون مترمکعب آب در افق زمانی ۲۵ ساله در بازار ثانویه معامله می‌شود که ۶/۳ میلیون مترمکعب از آن به نفع آبخوان ضبط و ذخیره می‌گردد و ۴۲/۵ میلیون مترمکعب آب برداشت می‌شود در حالی که در صورت عدم وجود بازار ثانویه علاوه بر تخلیه ۴۸/۸ میلیون مترمکعب آب توسط عرضه‌کنندگان حدود ۴۲/۵ میلیون مترمکعب آب توسط متقاضیان سهم آب در بازار ثانویه به صورت غیرمجاز برداشت می‌شود. در واقع فعال شدن بازار سهم آب سبب شده است بخشی از سهم آب کشاورزان در مناطق با نیاز آبی پایین به کشاورزان در مناطق با نیاز آبی بالا منتقل شود و انگیزه‌ی برداشت غیرمجاز کاهش یابد.



شکل ۷. روند تغییرات تعداد معاملات در بازار ثانویه



شکل ۶. روند تغییرات قیمت تعادلی آب در بازار ثانویه



شکل ۸. روند تغییرات حجم معامله شده در بازار ثانویه

به منظور سنجش تأثیر بازار بر وضعیت آبخوان، تغییرات تراز آب زیرزمینی در دو سناریو «با بازار» و «بدون بازار» مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی در جدول (۴) ارائه شده است. روند کلی هر دو سناریو نشان‌دهنده کاهش سطح آب زیرزمینی در طول دوره‌ی مطالعه است، با این تفاوت که نرخ افت در حالت بازار کمتر از حالت بدون بازار می‌باشد. در ابتدای دوره، سطح آب زیرزمینی در هر دو حالت تقریباً برابر و معادل ۱۱۸۰/۸ متر از سطح دریا بود. در پایان دوره (۱۴۲۶)، سطح آب در حالت بدون بازار به ۱۱۴۴/۰ متر کاهش یافت، در حالی که در سناریوی دارای بازار مقدار آن ۱۱۴۴/۲ متر برآورد گردید. اختلاف عددی میان دو سناریو کمتر از ۰/۲ متر و نشان‌دهنده تأثیر مثبت اندک بازار بر کاهش نرخ افت سطح ایستابی است.

تحلیل روند تغییرات نشان می‌دهد که در سال‌های ابتدایی (۱۴۰۲ تا ۱۴۰۸) تفاوت چشمگیری میان دو سناریو مشاهده نمی‌شود، اما با توسعه بازار و افزایش حجم معاملات، فاصله بین منحنی‌ها بیشتر شده است. این امر نشان می‌دهد که اثر بازار بر پایداری منابع زیرزمینی تدریجی و تجمعی است؛ به بیان دیگر، بازار در کوتاه‌مدت بیشتر اثر اقتصادی دارد، ولی در بلندمدت منجر به کاهش برداشت غیرمجاز و افت کمتر سطح آب زیرزمینی می‌شود. در واقع، سازوکار بازار موجب می‌شود کشاورزان مناطق کم‌آب بتوانند بخشی از نیاز خود را از طریق خرید رسمی آب تأمین کنند و از برداشت اضافی از چاه‌ها اجتناب نمایند. از سوی دیگر، کشاورزانی که دارای آب مازاد هستند با فروش بخشی از سهم خود درآمد کسب کنند. در نتیجه، توزیع مکانی و اقتصادی آب بهبود یافته و بهره‌برداری از منابع زیرزمینی به سمت تعادل پیش می‌رود.

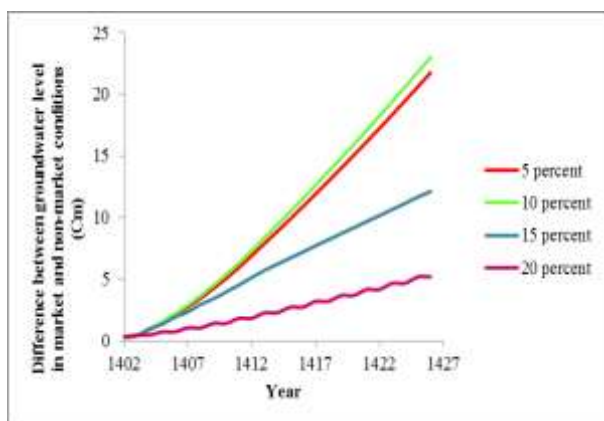
#### تحلیل حساسیت ضریب ذخیره بازار سهم آب بر تراز آب زیرزمینی

نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که حجم معاملات بازار سهم آب به‌طور قابل‌توجهی تابع مقدار ضریب ذخیره است (شکل ۹). با افزایش ضریب ذخیره، بخشی از حجم معامله به نفع آبخوان ضبط می‌شود افزایش می‌یابد که این امر عملاً قیمت مؤثر هر مترمکعب آب قابل‌استفاده برای بهره‌برداران را افزایش می‌دهد. افزایش قیمت مؤثر آب، انگیزه عرضه‌کنندگان و متقاضیان برای ورود به بازار را کاهش داده و در نتیجه حجم معاملات کاهش پیدا می‌کند. به‌طوری‌که حجم معاملات در افق ۲۵ ساله با ضرایب ذخیره ۰/۵٪ و ۱۰٪ تقریباً برابر و در حدود ۵۷ میلیون مترمکعب است، در حالی‌که با افزایش ضریب ذخیره به ۱۵٪ و ۲۰٪، حجم معاملات به ترتیب به حدود ۲۹ و ۱۲

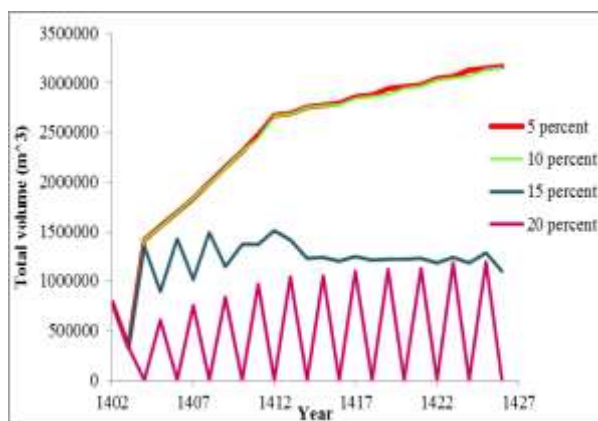
میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد. کاهش حجم معاملات موجب تضعیف اثرگذاری بازار بر تراز آب زیرزمینی می‌شود (شکل ۱۰). بررسی تغییرات تراز نشان می‌دهد که بیشترین بهبود تراز آب زیرزمینی نسبت به حالت بدون بازار مربوط به ضریب ذخیره ۱۰٪ و در حدود ۲۳ سانتی‌متر در افق ۲۵ ساله است، در حالی که این مقدار برای ضرایب ذخیره ۵٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ به ترتیب حدود ۲۲، ۱۲ و ۵ سانتی‌متر در افق ۲۵ ساله برآورد می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که هرچند افزایش ضریب ذخیره از نظر حفاظت از آبخوان مطلوب است، اما در صورت افزایش بیش از حد، با کاهش حجم معاملات، کارایی بازار در بهبود وضعیت تراز آب زیرزمینی محدود خواهد شد و وجود یک مقدار میانی برای ضریب ذخیره می‌تواند تعادل بهتری میان مشارکت در بازار و حفاظت از آبخوان ایجاد کند.

جدول ۴. نتایج شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در دو سناریو وجود بازار و بدون بازار

سال	تراز آب زیرزمینی با بازار (متر)	تراز آب زیرزمینی بدون بازار (متر)	اختلاف (سانتی‌متر)	سال	تراز آب زیرزمینی با بازار (متر)	تراز آب زیرزمینی بدون بازار (متر)	اختلاف (سانتی‌متر)
۱۴۰۲	۱۱۸۰/۸۱۷	۱۱۸۰/۸۱۴	۰/۳۱۰	۱۴۱۵	۱۱۶۰/۹۹۳	۱۱۶۰/۸۹۸	۹/۴۴۶
۱۴۰۳	۱۱۷۹/۲۹۱	۱۱۷۹/۲۸۷	۰/۴۴۴	۱۴۱۶	۱۱۵۹/۴۶۸	۱۱۵۹/۳۶۵	۱۰/۳۳۷
۱۴۰۴	۱۱۷۷/۷۶۶	۱۱۷۷/۷۵۶	۱/۰۰۶	۱۴۱۷	۱۱۵۷/۹۴۴	۱۱۵۷/۸۳۲	۱۱/۱۹۳
۱۴۰۵	۱۱۷۶/۲۴۱	۱۱۷۶/۲۳۵	۱/۵۹۶	۱۴۱۸	۱۱۵۶/۴۱۹	۱۱۵۶/۳۹۸	۱۲/۰۹۱
۱۴۰۶	۱۱۷۴/۷۱۶	۱۱۷۴/۶۹۴	۲/۲۳۶	۱۴۱۹	۱۱۵۴/۸۹۴	۱۱۵۴/۷۶۵	۱۲/۹۵۰
۱۴۰۷	۱۱۷۳/۱۹۱	۱۱۷۳/۱۶۲	۲/۹۱۲	۱۴۲۰	۱۱۵۳/۳۷۰	۱۱۵۳/۲۳۱	۱۳/۸۷۴
۱۴۰۸	۱۱۷۱/۶۶۶	۱۱۷۱/۶۳۰	۳/۶۳۷	۱۴۲۱	۱۱۵۱/۸۴۵	۱۱۵۱/۶۹۷	۱۴/۷۳۱
۱۴۰۹	۱۱۷۰/۱۴۱	۱۱۷۰/۱۰۹۷	۴/۳۹۷	۱۴۲۲	۱۱۵۰/۳۲۰	۱۱۵۰/۱۶۳	۱۵/۶۸۶
۱۴۱۰	۱۱۶۸/۶۱۷	۱۱۶۸/۵۶۵	۵/۱۹۰	۱۴۲۳	۱۱۴۸/۷۹۵	۱۱۴۸/۶۳۰	۱۶/۵۱۸
۱۴۱۱	۱۱۶۷/۰۹۲	۱۱۶۷/۰۳۲	۶/۰۱۶	۱۴۲۴	۱۱۴۷/۲۷۱	۱۱۴۷/۰۹۶	۱۷/۵۱۲
۱۴۱۲	۱۱۶۵/۵۶۷	۱۱۶۵/۴۹۸	۶/۸۷۸	۱۴۲۵	۱۱۴۵/۷۴۶	۱۱۴۵/۵۶۳	۱۸/۳۰۵
۱۴۱۳	۱۱۶۴/۰۴۲	۱۱۶۳/۹۶۵	۷/۷۰۹	۱۴۲۶	۱۱۴۴/۲۲۲	۱۱۴۴/۰۲۸	۱۹/۳۷۰
۱۴۱۴	۱۱۶۲/۵۱۸	۱۱۶۲/۴۳۲	۸/۵۹۳				



شکل ۱۰. اثر تشکیل بازار آب بر تراز آب زیرزمینی با تغییر ضریب ذخیره به مقدار ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد



شکل ۹. روند تغییرات حجم معامله شده در بازار با تغییر ضریب ذخیره به مقدار ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد

## نتیجه‌گیری

دشت قزوین طی دهه‌های اخیر شاهد افت مداوم و نگران‌کننده‌ی تراز آب زیرزمینی بوده است؛ به گونه‌ای که ادامه روند موجود می‌تواند پایداری کشاورزی و حیات اقتصادی منطقه را با تهدید جدی روبه‌رو سازد. در این پژوهش، با بهره‌گیری از رویکرد پویایی سیستم‌ها و شبیه‌سازی بازار سهم آب زیرزمینی، اثر استقرار بازار سهم آب بر روند تغییرات تراز آبخوان دشت قزوین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استقرار بازار سهم آب تنها قادر است مقدار بسیار اندکی از شدت افت تراز آب زیرزمینی بکاهد و بخش ناچیزی از کسری

مخزن را جبران نماید. به گونه‌ای که در افق زمانی ۲۵ ساله، تراز آب زیرزمینی در سناریو وجود بازار آب تنها ۱۹ سانتی‌متر بالاتر از سناریو بدون بازار قرار می‌گیرد که بیانگر اثر بسیار اندک این ابزار بر بهبود وضعیت آبخوان دشت قزوین است. این بهبود محدود عمدتاً ناشی از کاهش برداشت غیرمجاز است که اگرچه موجب کاهش نسبی برداشت می‌شود، اما برای تغییر معنادار روند افت کافی نیست. از این رو بازار سهم آب به تنهایی قادر به توقف روند افت تراز آب زیرزمینی نبوده و از منظر مدیریتی بیش از آنکه یک راهکار مستقل و تعیین‌کننده باشد، ابزاری مکمل برای کاهش شدت افت و مدیریت تقاضا محسوب می‌شود و نمی‌تواند جایگزین سیاست‌های کنترلی، نظارتی و محدودکننده برداشت گردد. بر این اساس، اثربخشی این ابزار اقتصادی زمانی به‌طور معنادار افزایش می‌یابد که در قالب یک بسته سیاستی جامع و در کنار اقداماتی نظیر کنترل برداشت‌های غیرمجاز، پایش مستمر بهره‌برداری و بهبود بهره‌وری مصرف آب در بخش کشاورزی به کار گرفته شود.

علاوه بر این، نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که کارایی بازار آب به شدت به نحوه تنظیم ضریب ذخیره وابسته است. افزایش بیش از حد این ضریب، اگرچه از منظر حفاظت از آبخوان مطلوب به نظر می‌رسد، اما با افزایش هزینه مؤثر آب، مشارکت بهره‌برداران را محدود کرده و در نهایت اثر بازار بر بهبود تراز آب زیرزمینی را تضعیف می‌کند. از این رو، تعیین یک مقدار میانی و بهینه برای ضریب ذخیره می‌تواند به عنوان یک اهرم کلیدی سیاست‌گذاری، تعادلی میان اهداف حفاظتی و کارکرد اقتصادی بازار ایجاد کند و نقش مهمی در پذیرش اجتماعی و موفقیت بلندمدت بازار آب داشته باشد. نتایج این مطالعه قابل مقایسه با پژوهش‌های Safari et al. (2023) و Abbasi et al. (2025) است در تمامی مطالعات بر نقش مؤثر بازار در مدیریت منابع آب زیرزمینی تأکید می‌شود اما در آن‌ها به بررسی اثر تشکیل بازار آب بر تراز آب زیرزمینی پرداخته نشده است. در نهایت، پیشنهاد می‌شود مطالعات آتی به بررسی اثر هم‌زمان بازار سهم آب و سایر سیاست‌های کنترلی و حفاظتی در قالب رویکردهای یکپارچه مدیریتی بپردازند؛ چرا که دستیابی به پایداری منابع آب زیرزمینی تنها با ترکیب هوشمندانه ابزارهای اقتصادی، مدیریتی و نظارتی امکان‌پذیر خواهد بود.

## ملاحظات اخلاقی

### حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه بین‌المللی امام خمینی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

### مشارکت نویسندگان

سیده مرضیه حسینی: گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله.

حامد مازندرانی زاده: طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله.

محمد محجوب: مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله.

حمید عزیزمحمملو: مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله.

### اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

در طول آماده‌سازی این اثر، نویسندگان از چت‌جی‌پی‌تی به منظور شبیه‌سازی بازار سهم آب استفاده کردند. پس از استفاده از این ابزار، نویسندگان مطالب را در صورت نیاز بررسی و ویرایش کرده و مسئولیت کامل محتوای نشریه را بر عهده می‌گیرند.

### بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

### سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از شرکت زیست آب پر آب به خاطر همکاری صمیمانه‌شان در پیشبرد پژوهش حاضر، تشکر و قدردانی نمایند.

### پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

## تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

## منابع

- ابوالحسنی، لیلی؛ شاهنوشی، ناصر؛ رهنما، علی؛ اعظم رحمتی، الهه و حیران، فاطمه. (۱۳۹۸). نقش تشکیل بازار آب در میزان استفاده از منابع آبی در بخش کشاورزی (مطالعه موردی دشت مشهد). *اقتصاد کشاورزی و توسعه*، ۲۷(۲)، ۱-۲۹.
- احمدی، آزاده؛ ذوالفقاری پور، محمدمین و ابراهیمی، بابک. (۱۳۹۷). چالش‌ها و ملاحظات حقوق بازار آب محلی، مطالعه موردی: دشت اصفهان-برخورار. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۴(۵)، ۱۴۶-۱۵۹.
- اکبرپور، ابوالفضل؛ توسن، معین و شمشیرگران، راضیه. (۱۴۰۴). روندهای نوظهور در ادغام سنجش از دور و یادگیری ماشین در مدیریت منابع آب زیرزمینی: یک مطالعه علم‌سنجی. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۳۱(۱)، ۱۲۷-۱۴۸.
- آموزگاری، پیام؛ پناهی، مصطفی و میرنیا، سید خلاق. (۱۳۹۹). تحلیل بازار محلی مبادلات منابع آب زیرزمینی در حوزه آبخیز الشتر. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۲(۲)، ۴۵۴-۴۶۶.
- بدیع برزین، حسین؛ خمزی، عیسی؛ غفاری، زهرا و پرهیزکاری، ابودر. (۱۳۹۷). اثرات تشکیل بازارهای آب منطقه‌ای بر تعادل بخشی عرضه و تقاضای آب آبیاری در منطقه سیستان. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۴(۳)، ۲۵۳-۲۵۶.
- جعفری، اتابک؛ شرافتی، احمد؛ نشات، امین رضا و حسینی، سید عباس. (۱۴۰۴). چالش‌های حکمرانی منابع آب تحت تأثیر تغییر اقلیم و انتقال آب. *مجله اکوهیدرولوژی*، ۱۲(۲)، ۷۷۹-۷۹۴.
- جناب، مهنوش؛ رضانی اعتدالی، هادی و دانش کار آراسته، پیمان. (۱۴۰۱). بررسی تغییرات خصوصیات هیدرودینامیک آبخوان در گذر زمان با استفاده از مدل GMS (مطالعه موردی: آبخوان دشت قزوین). *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳(۶)، ۱۳۷۳-۱۳۸۶.
- حسینی، سیده مرضیه و مازندرانی زاده، حامد. (۱۴۰۱). بررسی تأثیر بهینه‌سازی توأم توزیع آب و الگوی کشت بر درآمد کشاورزان (مطالعه موردی: شبکه قزوین). *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۵(۳)، ۴۷-۶۱.
- حسینی، سیده مرضیه؛ مازندرانی زاده، حامد؛ عزیز محمد لو، حمید و محبوب، محمد. (۱۴۰۴). برآورد تابع عرضه آب در بازارهای ثانویه و بهره‌وری مطالعه موردی: بازار سهم آب قزوین. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۲۱(۱)، ۱۱۲-۱۲۶.
- حسینی، سیده مرضیه؛ مازندرانی زاده، حامد؛ عزیزمحمدلو، حمید و محبوب، محمد. (۱۴۰۴). تحلیل اقتصادی بازار ثانویه آب و تعیین قیمت تعادلی (مطالعه موردی: استان قزوین). *مدیریت آب و آبیاری*، ۱۵(۳)، ۵۴۳-۵۶۲.
- دشتی‌زاده، رویا؛ لیاقت، عبدالمجید؛ سهرابی، تیمور؛ نوری، حمیده؛ کراچیان، رضا و بذرافشان، جواد. (۱۴۰۴). بررسی اثرات تشکیل بازار آب بر منابع آب زیرزمینی و اقتصاد در شرایط عدم کفایت قوانین مدیریتی محدود کننده و نظارت بر مبادلات (مورد مطالعه: دشت هشتگرد). *تحقیقات منابع آب ایران*، ۲۱(۲)، ۱۶۳-۱۸۱.
- رجبی خمسه، کریم؛ نیکبخت شهبازی، علیرضا؛ فتحیان، حسین و ظهراهی، نرگس. (۱۳۹۹). مدل‌سازی فرونشست دشت ایذه با استفاده از کد ریاضی MODFLOW. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۶(۴)، ۱۱۲-۱۲۶.
- 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). *مدیریت آب و آبیاری*، ۱۴(۱)، ۲۰۷-۲۲۱.
- زیبایی، منصور و ملک ورنوسفادرانی، مرضیه. (۱۳۹۶). اثرات بالقوه ایجاد بازار آب بر ارتقاء بهره‌وری و کاهش منازعات مربوط به آب در استان فارس. *مجله آب و فاضلاب*، ۲۸(۱)، ۱۲۶-۱۳۸.
- شعبانی روحی، زهره؛ یزدانی، سعید و مقدسی، رضا. (۱۴۰۲). برآورد میزان صرفه‌جویی در مصرف آب در شرایط تشکیل بازار آب و بررسی آثار رفاهی آن: مطالعه موردی: دشت هشتگرد استان البرز. *اقتصاد کشاورزی و توسعه*، ۳۱(۴)، ۷۳-۱۰۱.
- صیوحی، محمود و پرهیزکاری، ابودر. (۱۳۹۲). تحلیل اثرات اقتصادی و رفاهی تشکیل بازار آب آبیاری در استان قزوین. *مجله اقتصاد و توسعه کشاورزی*، ۲۷(۴)، ۳۳۸-۳۵۰.
- عباسی، رضا؛ صدقاتی، حمیدرضا و شفیع، شکوفه. (۱۴۰۱). ارائه مدل مقدار سفارش اقتصادی برای کالاهای رشدکننده با کیفیت ناقص و دارای تقاضای تصادفی. پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، ۱۳(۱)، ۱۰۵-۱۲۷.
- فدایی‌فرد، محمدنویید؛ ابراهیمی، کیومرث و بهزادپور، مهدی. (۱۴۰۴). نقش بازار آب در ارتقای ارزش اقتصادی منابع آب کشاورزی.

مدیریت آب و آبیاری، ۱۵(۱)، ۵۵-۷۳.

کارخانه، مجید؛ سرلک، احمد و هژبر کیانی، کامبیز. (۱۳۹۹). بررسی نقش بازار در تخصیص بهینه آب در دشت شازند. مدیریت آب و آبیاری، ۱۰(۲)، ۳۴۷-۳۶۳.

کانونی، امین؛ حسینی، یوسف؛ قرائی، کریم و دیندار، اسدالله. (۱۳۹۹). بررسی اثرات توسعه بازار آب بر الگوی کشت انتخابی کشاورزان در شبکه آبیاری سبلان، اردبیل. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۶(۲)، ۳۲۳-۳۳۳.

مازندرانی زاده، حامد و حسینی، سیده مرضیه. (۱۴۰۱). ارزیابی اثر پیش‌بینی قیمت محصولات کشاورزی بر کاهش افت تراز آب زیرزمینی با روش پویایی سیستم‌ها. تحقیقات آب و خاک ایران، ۱۱(۵۳)، ۲۵۶۵-۲۵۸۲.

مازندرانی زاده، حامد و حسینی، سیده مرضیه. (۱۴۰۴). بررسی بازده اقتصادی توزیع آب بر مبنای قیمت تمام شده آب در بخش کشاورزی با استفاده از اصلاح الگوی کشت (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت قزوین). علوم و مهندسی آبیاری، ۴۸(۱)، ۳۹-۵۷.

متین‌جو، محمدحسین و علیزاده، حسین. (۱۳۹۹). توسعه یک مدل عامل بنیان هیدرولوژیکی-اقتصادی برای شبیه‌سازی بازار آب منطقه مجن. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۶(۴)، ۱۲۷-۱۴۲.

مکوندی، اشرف؛ محمدی، حسین؛ کردوانی، پرویز؛ جوادی، سامان و فرج زاده اصل، منوچهر. (۱۳۹۹). بررسی پایداری منابع آب در حوضه زاینده رود با استفاده از شاخص‌های پایداری و مدل GMS (مطالعه موردی: آبخوان نجف آباد در حوضه زاینده رود). علوم و مهندسی آبیاری، ۴۳(۳)، ۱۹۷-۲۱۱.

مهندسین مشاور ری آب. (۱۴۰۲). تهیه بیان منابع آب منتهی به سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ در حوضه آبریز دریاچه نمک. شرکت مدیریت منابع آب ایران.

مؤسسه تحقیقات آب و خاک. (۱۴۰۴). سامانه نیاز آبی گیاهان کشور.

وزارت جهاد کشاورزی. (۱۴۰۲-۱۳۷۹). آمارنامه کشاورزی.

ولی‌پور، المیرا؛ رسولی، محمد مهدی و کتابچی، حامد. (۱۴۰۲). روش‌های برآورد مقادیر برداشت و تخلیه منابع آب زیرزمینی بخش اول: روش‌های مبتنی بر تجربیات بین‌المللی. مدیریت آب و آبیاری، ۱۳(۲)، ۳۸۵-۴۰۵.

هاشمی، معصومه السادات؛ مازندرانی زاده، حامد؛ دانش‌کار آراسته، پیمان و ضرغامی، مهدی. (۱۳۹۹). ارزیابی سیاست‌های مدیریتی حفظ همزمان منابع آب زیرزمینی و معیشت کشاورزان با استفاده از پویایی سیستم و نظریه بازی‌ها. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۶(۳)، ۱-۱۷.

## REFERENCES

- Abbasi, H., Minouei, M., & Rahnamay Roodposhti, F. (2025). Dynamic Modeling of Iran's Integrated Water Market. *Journal of Resource Management and Decision Engineering*, 4(2), 1-12.
- Abbasi, R., Sedaghati, H. R., & Shafiei, S. (2022). Proposing an economic order quantity (EOQ) model for imperfect quality growing goods with stochastic demand. *Research in Production and Operations Management*, 13(1), 105-127. (In Persian).
- Abolhassani, L., Shahnoushi, N., Rahnama, A., Azam Rahmati, E., & Heiran, F. (2019). The Role of Water Market Formation in Using the Water Resources in Agricultural Sector: A Case Study of Mashhad Plain in Iran. *Agricultural Economics and Development*, 27(2), 1-29. (In Persian).
- Ahmadi, A., Zolfagharipour, M. A., & Ebrahimi, B. (2019). Challenges and considerations of regional water market rights, a case study: Isfahan-Borkhar Plain. *Iran-Water Resources Research*, 14(5), 146-159. (In Persian).
- Akbarpour, A., Tosan, M., & Shamshirgaran, R. (2025). Emerging Trends in the Integrating Remote Sensing and Machine Learning for Groundwater Resources Management: A Bibliometric Study. *Iran-Water Resources Research*, 21(1), 127-148. (In Persian).
- Alam, M. J., Sarma, P. K., Begum, I. A., Connor, J., Crase, L., Sayem, S. M., & McKenzie, A. M. (2024). Agricultural Extension Service, Technology Adoption, and Production Risk Nexus: Evidence from Bangladesh. *Heliyon*, 10(14).
- Amouzegari, P., Panahi, M., & Mirnia, M. K. (2020). Local Market Analysis of Groundwater Resources Exchange in Alashtar Watershed, Iran. *Watershed Engineering and Management*, 12(2), 454-466. (In Persian).
- Badie Barzin, H., Khamri, E., Fari Moghadam, Z., & Parhizkari, A. (2018). The Effects of Regional Water Markets Formation on Balancing the Supply and Demand of Irrigation Water in the Sistan Region. *Iran-Water Resources Research*, 14(3), 253-256. (In Persian).
- Bruno, E. M., Jessoe, K. K., & Hanemann, W. M. (2024). The Dynamic Impacts of Pricing Groundwater. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 11(5), 1201-1227.

- Dashtizadeh, R., Liaghat, A., Sohrabi, T., Noory, H., Kerachian, R., & Bazr Afshan, J. (2025). Examining the Impacts of Water Market Establishment on Groundwater Resources and Economy in the Absence of Sufficient Management Rules and Monitoring: A Case Study of Hashtgerd Plain. *Iran-Water Resources Research*, 21(2), 163-181. (In Persian).
- Fadaei Fard, M. N., Ebrahimi, K., & Behzadpour, M. (2025). The role of water market in improving the economic value of agricultural water resources. *Water and Irrigation Management*, 15(1), 55-73. (In Persian).
- Hashemi, M., Mazandarani zadeh, H., Daneshkare Arasteh, P., & Zarghami, M. (2020). Evaluation of Management Policies to Simultaneously Maintain Groundwater Resources and Farmers' Livelihoods Using the System Dynamics and Game Theory. *Iran-Water Resources Research*, 16(3), 1-17. (In Persian).
- Hosseini, S. M., & Mazandarani Zadeh, H. (2022). Optimal Water Allocation among Agricultural Consumers Using Crop Pattern Change Approach to Improve Farmers' Livelihood. *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(3), 47-61. (In Persian).
- Hosseini, S. M., Mazandarani Zadeh, H., Azizmohammadlou, H., & Mahjoub, M. (2025). Estimating the Water Supply Function in Secondary and Productivity Markets, Case Study: Qazvin Water Share Market. *Iran-Water Resources Research*, 21(1), 112-126. (In Persian)
- Hosseini, S. M., Mazandarani Zadeh, H., Azizmohammadlou, H., & Mahjoub, M. (2025). Economic Analysis of the Secondary Water Market and Estimating the Equilibrium Price (Case Study: Qazvin Province). *Water and Irrigation Management*, 15(3), 543-562. (In Persian).
- Howe, C. W., & Goemans, C. (2003). Water transfers and their impacts: Lessons from three Colorado water markets 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 39(5), 1055-1065.
- Hyndman, R. J., & Koehler, A. B. (2006). Another Look at Measures of Forecast Accuracy. *International journal of forecasting*, 22(4), 679-688
- Jaffari, A., Sharafati, A., Neshat, A., & Hosseini, S. A. (2025). Challenges of Water Resources Governance under the Impact of Climate Change and Water Transfer. *Journal of Ecohydrology*, 12(2), 780. (In Persian).
- Jenab, M., Ramezani Etedali, H., & Daneshkar Arasteh, P. (2022). Investigation of groundwater level decreasing effects on Qazvin aquifer hydrodynamic characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(6), 1373-1386. (In Persian).
- Kanooni, A., Hasani, Y., Garaei, K., & Dindar, A. (2020). The Effects of Water Market Development on Farmers' Selective Cultivation Pattern in Sabalan Irrigation Network, Ardabil. *Iran-Water Resources Research*, 16(2), 323-333. (In Persian).
- Karkhaneh, M., Sarlak, A., & Hozhbar Kiani, K. (2020). The Role of Market in Optimum Allocation of Water in Shazand Plain. *Water and Irrigation Management*, 10(2), 347-363. (In Persian).
- Kucharavy, D., & De, Guio R. (2015). Application of Logistic Growth Curve. *Procedia engineering*, 131, 280-290.
- Mai, T., Mushtaq, S., Loch, A., Reardon-Smith, K., & An-Vo, D. A. (2019). A systems thinking approach to water trade: Finding leverage for sustainable development. *Land Use Policy*, 82, 595-608.
- Makvandi, A., Mohamadi, H., Kardavani, P., Jvadi, S., & Farajzadeh as, M. (2020). A Survey of Water Resources Sustainability in Zayandehrood Basin Using Sustainability Indices and GMS Model (Case Study: Najaf Abad Aquifer in Zayandehrood Basin). *Irrigation Sciences and Engineering*, 43(3), 197-211. (In Persian).
- Matinju, M. H., & Alizadeh, H. (2021). Hydro-Economic Agent-Based Modelling for Simulation of the Water Market in Mojen. *Iran-Water Resources Research*, 16(4), 127-142. (In Persian).
- Mazandarani Zadeh, H., & Hoseini, M. (2023). Investigating the Effect of Agricultural Product Price Forecasting on Groundwater Level Using Systems Dynamics, in order to Simultaneously Maintain the Welfare of Farmers and Groundwater Resources. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(11), 2565-2582. (In Persian).
- Mazandarani Zadeh, H., & Hosseini, S. M. (2025). Assessing the Economic Efficiency of Water Distribution in the Agricultural Sector through Crop Pattern Modification (Case Study: Qazvin Plain Irrigation Network). *Irrigation Sciences and Engineering*, 48(1), 39-57. (In Persian).
- Ministry of Jihad Agriculture. (2000–2023). *Agricultural Statistics Yearbook*. (In Persian).
- Mponji, R. F., Cao, X., Wang, J., & Jia, X. (2024). Meta-analysis on Farmers' Adoption of Agricultural Technologies in East Africa: Evidence from Chinese Agricultural Technology Demonstration Centers. *Agriculture*, 14(11), 2003.
- Rajabi Khamse, K., Nikbakht Shahbazi, A., Fathian, H., & Zohrabi, N. (2021). Izeh Plain Subsidence Modeling Using MODFLOW Mathematical Code. *Iran-Water Resources Research*, 16(4), 112-126. (In Persian).
- Razzaq, A., Qing, P., Abid, M., Anwar, M., & Javed, I. (2019). Can the Informal Groundwater Markets Improve Water Use Efficiency and Equity? Evidence From a Semi-arid Region of Pakistan. *Science of The Total Environment*, 666: 849-857
- Riab Consulting Engineers. (2023). Preparation of the water resources balance up to the 2017–2018 water year in the Namak Lake Basin. Iran Water Resources Management Company.
- Sabuhi, M., & Parhizkari, A. (2014). Analysis of the economic and welfare impacts of establishing irrigation water market in Qazvin Province. *Journal of Agricultural Economics & Development*, 27(4), 338-350. (In Persian).
- Safari, S., Sharghi, S., Kerachian, R., & Noory, H. (2023). A Market-based Mechanism for Long-term Groundwater Management Using Remotely Sensed Data. *Journal of Environmental Management*, 332, 117409.
- Shabani rouchi, Z., Yazdani, S., & Moghaddasi, R. (2024). Estimating the Amount of Saving in Water Consumption

- under the Condition of Forming a Water Market and Examining Its Welfare Effects: A Case Study of Hashtgerd Plain in Alborz Province of Iran. *Agricultural Economics and Development*, 31(4), 73-101. (In Persian).
- Soil and Water Research Institute of Iran. (2025). *Iranian Crop Water Requirement System*. (In Persian).
- Stanski, H. R., Wilson, L. J., & Burrows, W. R. (1989). Survey of Common Verification Methods in Meteorology.
- Valipour, E., Rasouli, M. M., & Ketabchi, H. (2023). Groundwater Resources Withdrawal and Depletion Estimation Methods (Part 1: Methods Based on International Experiences). *Water and Irrigation Management*, 13(2), 385-405. (In Persian).
- Xu, T., Wu, Z., Tian, G., & Shi, Z. (2024). Does Water Rights Trading Promote the Efficiency of Water Use? Empirical Evidence from Pilot Water Rights Trading in China. *Water Supply*, 24(8), 2670-2687.
- 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). *Water and Irrigation Management*, 14(1), 207-221. (In Persian).
- Zetland, D. (2021). The Role of Prices in Managing Water Scarcity. *Water Security*, 12: 100081.
- Zhao, M., Ancev, T., & Vervoort, R. W. (2024). Water Market Functionality: Evidence from the Australian Experience. *Water Resources Research*, 60(2), e2022WR033938.
- Zibaei, M., & Malek varnosfaderani, M. M. (2017). Potential Effects of a Water Market on Enhancing Water Productivity and Reducing Water-related Conflicts in Fars Province, Iran. *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab*, 28(1), 126-138. (In Persian).