



# Investigating the Parameters Affecting the Economic Approach and Costs of Virtual Water Imports in Iran for Key Products Used in the Agricultural Industry

Jabbar Piri<sup>1</sup>, Gholamali Haji<sup>2\*</sup>, Maryam Sharifnezhad<sup>3</sup>, Reza Keyhani Hekmat<sup>4</sup>

1. PhD. Candidate, Dept. of Economics, Ar.C., Islamic Azad University, Arak, Iran

2. Assoc. Prof., Dept. of Economics, Ar.C., Islamic Azad University, Arak, Iran  
(Corresponding Author) [gh.haji@iau.ac.ir](mailto:gh.haji@iau.ac.ir)

3. Assist. Prof., Dept. of Economics, Ar.C., Islamic Azad University, Arak, Iran

4. Assist. Prof., Dept. of Economics, Qor.C., Islamic Azad University, Qorveh, Iran



<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.551827.3519>

Original Paper

## Abstract

Water scarcity, caused by both limited access and deteriorating quality, is a growing global challenge. This study investigates the dynamic relationship between macroeconomic variables and virtual water imports in Iran from 2003 to 2022. The research employs the Vector Autoregression model for simultaneous and multivariate time-series analysis. In this model, variables such as exchange rate, trade balance, economic growth, government income, and virtual water imports were examined. The model results show that exchange rate fluctuations and economic growth have a significant and positive impact on virtual water imports. Specifically, the coefficient for the exchange rate is 0.33 (t-statistic=2.95, significance level=0.008), indicating a direct and significant effect of exchange rate changes on water dependence. Additionally, improvements in the trade balance and increases in government income help reduce the country's water dependency, with the trade balance coefficient at -0.19 (t-statistic=-2.06, significance level=0.047). The Granger causality test revealed a bidirectional relationship between exchange rate and virtual water flows. Moreover, the results of statistical tests, including the Augmented Dickey-Fuller unit root test, Durbin-Watson autocorrelation test (DW=1.91), and White heteroskedasticity test, confirm the statistical validity of the model. The final VAR model results show a high R-squared value of 0.84, indicating a good fit of the model. These findings indicate that Iran's exchange rate and trade policies play a crucial role in managing the country's water dependency, suggesting that appropriate policy measures can help alleviate pressure on domestic water resources.

## Keywords:

Virtual Water, Water Footprint, Financial Costs, Food Security, Water Resources Management.



Received: Apr. 8, 2025  
Revised: May 21, 2025  
Accepted: June 14, 2025

## To cite this article:

Piri, J., Haji, Gh., Sharifnezhad, M., Keyhani Hekmat, R., 2025. Investigating the parameters affecting the economic approach and costs of virtual water imports in Iran for key products used in the agricultural industry. *Water and Wastewater*, 36(2), 107-127. <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.551827.3519>.

Use your device to scan and read the article online



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



## 1. Introduction

This paper examines the flow of virtual water imported from cereals in Iran, taking into account its financial costs. The main innovation of this study is the combination of economic approaches and modeling of virtual water flows, which leads to a more detailed analysis of Iran's dependence on external water resources. This study not only calculates the volume of virtual water imported, but also estimates the financial costs associated with this import and examines its economic and managerial implications. This comprehensive and integrated approach distinguishes this study from previous research and makes it usable as a practical tool for policymakers and economic and water planners.

## 2. Methodology

The opportunity cost<sup>1</sup> of allocating foreign exchange to virtual water imports<sup>2</sup> instead of other investments can be estimated as shown in equation 1:

$$OC = VWI \times (j - i) \quad (1)$$

Where,

VWI is the portion of virtual water imports paid in foreign exchange, obtained from trade data.  $i$  is the return that could be obtained by investing foreign exchange in Iranian government bonds, using annual bond yield data.  $j$  is the counterfactual return that could have been obtained by investing in priority sectors such as industry, technology, or domestic agriculture. Its value is estimated based on the expected returns in these sectors based on past performance and growth prospects.  $(j-i)$  represents the return or opportunity cost foregone from allocating foreign exchange to VWI instead of investing in alternative sectors. This simple opportunity cost model provides an estimate of the amount of lost returns over the sample period from 2003-2022.

The financial cost ( $FC_{it}$ ) of importing virtual water of product  $i$  in year  $t$  is:

$$FC_{it} = ICP_{it} - DPC_{it} \quad (2)$$

Where,

In  $DPC_{it}$  is the cost of domestic production of product  $i$  in year  $t$ ,  $ICP_{it}$  is the cost of importing virtual water of product  $i$  in year  $t$ , if  $FC_{it} > 0$ , the financial cost of importing virtual water is higher than domestic production. If  $FC_{it} < 0$ , importing

virtual water of product  $i$  in year  $t$  leads to financial savings. Then

$$DPC_{it} = \sum_{j=1}^m (I_{ijt} \times P_{ijt}) / Y_{it} \quad (3)$$

Where,

$I_{ijt}$  is the amount of input  $j$  to produce one unit of product  $i$  in year  $t$ ,  $P_{ijt}$  is the price of input  $j$  to produce one unit of product  $i$  in year  $t$ ,  $Y_{it}$  is the yield of product  $i$  in year  $t$ :

$$ICP_{it} = Q_{it} \times P_{wit} \times ER_t \quad (4)$$

Where,

$P_{wit}$  is the world price of product  $i$  in year  $t$ ,  $ER_t$  is the official exchange rate in year  $t$ , and  $Q_{it}$  is the amount of virtual water imported in year  $t$ . This model determines whether the increase in the world price of products has overcome the decrease in domestic production costs over time.

To examine the relationships between macroeconomic variables and virtual water import flows, the data from 2003 to 2022 were used. The aim of this analysis was to determine the effect of variables such as trade balance<sup>3</sup>, government revenue<sup>4</sup>, government expenditure, economic growth<sup>5</sup>, exchange rate<sup>6</sup> and world food price index ( $P$ ) on virtual water imports<sup>7</sup> of cereals in Iran. The econometric model is defined as equation 5:

$$VIM_t = \alpha + \beta_1 TB_t + \beta_2 GR_t + \beta_3 GE_t + \beta_4 GDPG_t + \beta_5 ER_t + \beta_6 P_t + \varepsilon_t \quad (5)$$

Where,

$\varepsilon_t$  is the random error term and all variables are transformed in percentage or natural logarithm to make their stability and scale the same.

## 3. Discussion and results

In examining the overall flow of grain virtual water imports, which shows Iran's virtual water imports broken down into green, blue, and gray water footprints, provides a deep insight into Iran's patterns of dependence on external water

<sup>3</sup> Trade Balance (TB)

<sup>4</sup> Government Revenue (GR)

<sup>5</sup> Gross Domestic Product Growth (GDPG)

<sup>6</sup> Exchange Rate (ER)

<sup>7</sup> Virtual Water Imports (VWI)



resources. Based on this data, Iran's total virtual water imports in the form of rice, wheat, corn, and barley products were equivalent to 297,030.75 million cubic meters during the study period. This figure indicates Iran's significant dependence on external virtual water resources, which is mainly provided through grain imports. Given the country's water scarcity conditions, this dependence is not only an economic challenge but also a strategic issue in water resource management in the country.

The results show that exchange rate, government spending, and world food prices have the most positive and significant impact on virtual water imports; while trade balance and government revenue have a negative impact. In other words, in periods when the trade balance has improved or government tax revenue has increased, dependence on virtual water imports has decreased. In contrast, an increase in exchange rate and world product prices has increased import costs and increased dependence on foreign water resources. These findings indicate that macroeconomic management, especially the government's foreign exchange and fiscal policies, can directly affect the sustainability of the country's water and food security.

The findings of this study showed that the import of virtual water for cereals in Iran has been increasing during the years 2003 to 2022, and corn is the most important carrier of virtual water in the country, with a share of about 48%. This pattern is consistent with global results; [Mekonnen et al. \(2024\)](#) also reported that more than 70% of the world's virtual water trade is related to water-intensive crops such as wheat, corn, and soybeans.

#### 4. Conclusions

This study examined the flow of grain virtual water imports in Iran during the period 2003 to 2022 and analyzed the financial costs and management implications of this dependence using detailed modeling. The findings showed that, Iran is significantly dependent on grain virtual water imports, which plays a key role in the management of domestic water resources and food security of the country. The total volume of grain virtual water imports during this period was 297,030.75 million cubic meters, with the largest share attributable to corn (48.49%), wheat

(26.42%), barley (14.48%), and rice (10.63%). This pattern indicates the vital role of corn in meeting domestic needs, especially in the livestock and feed production sectors. Water footprint analysis showed that green water constitutes the largest component of Iran's virtual water imports (58.68% of total virtual water imports). This indicates Iran's strong dependence on rainwater resources in exporting countries.

In contrast, blue water and grey water play a smaller role in these imports, with a share of 29.44% and 11.88%, respectively. This distribution indicates that Iran's grain imports are largely dependent on natural resources and are less affected by direct consumption of artificial water resources. However, the high share of grey water in some crops, especially rice and barley, indicates dependence on countries whose production has been accompanied by extensive use of chemical inputs and pesticides. This highlights the need to monitor and assess the environmental impacts of virtual water imports to Iran.

The financial costs of virtual water imports have also increased significantly during this period. For example, the cost of importing virtual water for wheat has increased from 64.35 billion rials in 2003 to 84,954.90 billion rials in 2022. This increase is due to several factors, including the growth in global product prices, the increase in import volumes, and severe exchange rate fluctuations. Comparing the cost of imports with the cost of domestic production shows that domestic wheat production, even with inflation-related costs, is significantly more economical than its import. This difference highlights the importance of investing in domestic production and strengthening agricultural infrastructure to reduce dependence on imports.

The geographical analysis showed that Iran depends on a wide range of countries to meet its food needs. A prominent share of virtual water imports comes from regions such as Europe (especially Russia, Switzerland, and Germany) and Asia (such as the United Arab Emirates, India, and Turkey). This dependence can be influenced by a variety of factors, including trade policies, climate change, domestic water constraints, and diplomatic relations. In particular, fluctuations in virtual water imports of barley and rice reflect changes in domestic demand, trade policies, and global conditions.





# بررسی پارامترهای تأثیر گذار بر رویکرد اقتصادی و هزینه‌های واردات آب مجازی در کشور ایران برای محصولات کلیدی مورد استفاده در صنعت کشاورزی

جبار پیری<sup>۱</sup>، غلامعلی حاجی<sup>۲\*</sup>، مریم شریف‌نژاد<sup>۳</sup>، رضا کیهانی حکمت<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکترا، گروه اقتصاد، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران  
 ۲- دانشیار، گروه اقتصاد، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران (نویسنده مسئول) [gh.haji@iau.ac.ir](mailto:gh.haji@iau.ac.ir)  
 ۳- استادیار، گروه اقتصاد، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران  
 ۴- استادیار، گروه اقتصاد، واحد قروه، دانشگاه آزاد اسلامی، قروه، ایران



<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.551827.3519>

مقاله پژوهشی

## چکیده

واژه‌های کلیدی:  
 آب مجازی، ردپای آب،  
 هزینه‌های مالی، امنیت  
 غذایی، مدیریت منابع آب

کمبود آب که هم ناشی از محدودیت دسترسی و هم کیفیت رو به وخامت است، یک چالش جهانی روبه افزایش است. این پژوهش به بررسی رابطه پویا میان متغیرهای کلان اقتصادی و واردات آب مجازی در ایران از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ پرداخت. پژوهش از مدل خود رگرسیون برداری برای تحلیل هم‌زمان و چندمتغیره داده‌های سری زمانی استفاده کرد. در این مدل، متغیرهای نرخ ارز، تراز تجاری، رشد اقتصادی، درآمد دولت و واردات آب مجازی بررسی شدند. نتایج مدل نشان داد که تغییرات نرخ ارز و رشد اقتصادی تأثیر مثبت و معناداری در افزایش واردات آب مجازی دارند. به‌طور خاص، ضریب مربوط به نرخ ارز برابر با ۰/۳۳ آماره t برابر با ۲/۹۵ و سطح معنی‌داری ۰/۰۰۸ بود که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم و معنادار نرخ ارز بر وابستگی آبی است. همچنین، بهبود تراز تجاری و افزایش درآمد دولت موجب کاهش وابستگی آبی کشور می‌شود، به‌طوری که ضریب تراز تجاری برابر با ۰/۱۹- آماره t برابر با ۰/۶۲- و سطح معنی‌داری ۰/۰۴۷ گزارش شد. آزمون علیت گرنجر نشان داد که بین نرخ ارز و جریان واردات آب مجازی رابطه دوسویه وجود دارد. علاوه بر این، نتایج آزمون‌های آماری شامل آزمون‌های مانایی، خودهم‌بستگی (۱/۹۱) و ناهمسانی واریانس وایت نشان‌دهنده اعتبار آماری مدل است. نتایج نهایی مدل VAR نیز از اعتبار بالای مدل با مقدار ضریب تعیین ۰/۸۴ حکایت داشت که نشان‌دهنده برازش مناسب مدل است. این نتایج به‌طور خاص نشان دادند که سیاست‌های ارزی و تجاری ایران نقش مهمی در مدیریت وابستگی آبی کشور دارند و می‌توانند با اعمال سیاست‌های مناسب به کاهش فشار بر منابع آب داخلی کمک کنند.



دریافت: ۱۴۰۴/۱/۱۹

اصلاح: ۱۴۰۴/۲/۳۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۲۴

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



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

پیری، ج.، حاجی، غ.، شریف‌نژاده، م.، کیهانی حکمت، ر.، ۱۴۰۴، بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر رویکرد اقتصادی و هزینه‌های واردات آب مجازی در کشور ایران برای محصولات کلیدی مورد استفاده در صنعت کشاورزی.

آب و فاضلاب، ۳۶(۲)، ۱۰۷-۱۲۷.

<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.551827.3519>



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



## ۱- مقدمه

مجازی عمدتاً از کشورهای پر آب به کشورهای خشک‌تر جریان دارد (Hoekstra and Chapagain, 2008). همچنین، در برخی پژوهش‌ها تأکید شده است که رشد اقتصادی، بهره‌وری آب و ساختار تجارت جهانی نقش مهمی در پایداری منابع دارند (Wang and Ma, 2024, Hekmatnia et al., 2020, Ma et al., 2025). در پژوهشی سیاست‌های بهره‌برداري از منابع آب در حوضه آبریز با روش پویایی سیستم تحلیل شده است. برای بررسی سناریوهای موجود، ۱۰ سری زمانی ۲۰ ساله برای رواناب هر زیرحوضه با استفاده از مدل ARMA(1,1) تولید و تراز آب دریاچه بررسی شده است (Golian et al., 2007). بحران آب در برخی نقاط کشور ریشه در عوامل طبیعی و مدیریت نادرست منابع آب دارد (Chelvarforoush et al., 2024).

با وجود این پیشینه، بیشتر مطالعات در سطح ملی تنها به محاسبه حجم آب مجازی پرداخته و کمتر به ابعاد اقتصادی و هزینه فرصت<sup>۲</sup> تخصیص ارز برای واردات توجه کرده‌اند. از این رو، این پژوهش با تمرکز بر دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲، به مدل‌سازی جریان واردات آب مجازی غلات در ایران و تحلیل پیوند آن با متغیرهای کلان اقتصادی و هزینه‌های مالی پرداخت. هدف، ارائه چارچوبی تحلیلی برای تصمیم‌گیری‌های تجاری و آبی کشور در راستای مدیریت پایدار منابع و کاهش وابستگی بود.

نوآوری اصلی این پژوهش در توسعه و به‌کارگیری مدل ترکیبی اقتصاد کلان آب مجازی برای تحلیل هزینه‌های مالی و فرصت ازدست‌رفته واردات آب مجازی در ایران بود. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً به برآورد حجم فیزیکی یا ردپای آب محدود شده بودند، این پژوهش برای نخستین بار پارامترهای اقتصادی کلان از جمله تراز تجاری<sup>۳</sup>، درآمد دولت<sup>۴</sup> و مخارج دولت<sup>۵</sup>، رشد تولید ناخالص داخلی، ذخایر ارزی و شاخص قیمت جهانی غذا را در قالب یک مدل پویای خود رگرسیون برداری<sup>۶</sup> با جریان واردات آب مجازی ترکیب کرد.

این رویکرد امکان تحلیل هم‌زمان پیامدهای مالی، ارزی و سیاستی واردات غلات را فراهم می‌سازد و به سیاست‌گذاران اجازه

ایران به دلیل قرار گرفتن در اقلیم خشک و نیمه‌خشک با خطر فزاینده بحران آب روبه‌رو است؛ از این رو مدیریت دقیق منابع آبی در همه بخش‌ها ضرورتی حیاتی دارد. یکی از مفاهیم کلیدی در این زمینه، آب مجازی است که به حجم آبی اشاره دارد که در فرایند تولید کالاها و خدمات مصرف و بخشی از آن در محصول نهایی نهفته می‌شود. در نتیجه، تجارت بین‌المللی کالاها موجب انتقال غیرمستقیم آب میان کشورها می‌شود. تجارت آب مجازی می‌تواند از رویکرد نظری ابزاری برای افزایش بهره‌وری و کاهش فشار بر منابع داخلی باشد، اما در صورت وابستگی شدید به واردات، تهدیدی برای امنیت غذایی و آبی کشورها محسوب می‌شود، به ویژه در شرایطی که بحران‌های جهانی یا اقلیمی دسترسی به بازارهای خارجی را محدود کنند.

در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی در ایران و سایر کشورها انجام شده است. مناطق شمالی ایران با وجود منابع آبی کافی واردکننده آب مجازی هستند، در حالی که مناطق خشک‌تر نقش صادرکننده دارند (Qasemipour et al., 2020). با استفاده از مدل بهینه‌سازی-شبهه‌سازی نشان داده شده، سیاست‌های مناسب تخصیص آب می‌تواند هم‌زمان درآمد کشاورزان را افزایش و منابع آبی را حفظ کند (Dehghanipour et al., 2020). مدیریت مصرف آب در حوضه گاوخونی موجب کاهش هزینه انرژی و یارانه‌ها می‌شود (Momeni et al., 2007). در سطح ملی، اصلاح الگوی کشت و کاهش ضایعات باعث کاهش مصرف آب می‌شود (Karandish et al., 2020). در حالی که واردات آب مجازی<sup>۱</sup> راهبردی برای مدیریت بحران آب است (Younis et al., 2025). Hekmatnia et al., 2020 نتایج این پژوهش نشان داد واردات غلات، موجب صرفه‌جویی سالانه بیش از ۲۱ میلیارد مترمکعب آب در ایران شده است.

در حوزه ارزش‌گذاری اقتصادی، با ترکیب داده‌های سنجش‌ازدور و تحلیل اقتصادی نشان می‌دهند که ارزش واقعی آب آبیاری حدود ۰/۰۷ دلار به‌ازای هر مترمکعب است و قیمت‌گذاری صحیح آن می‌تواند بهره‌وری را افزایش دهد (Bashe et al., 2022). در سطح جهانی، پژوهش‌های متعددی نشان می‌دهند که تجارت آب

<sup>۱</sup> Virtual Water Import (VWI)

<sup>۲</sup> Opportunity Cost (OC)

<sup>۳</sup> Trade Balance (TB)

<sup>۴</sup> Government Revenue (GR)

<sup>۵</sup> Government Expenditure (GE)

<sup>۶</sup> Vector Autoregression (VAR)



استان زنجان را با استفاده از اطلاعات طرح آمارگیری از کارگاه‌های صنعتی ۱۰ نفر کارکن و بیشتر مرکز آمار ایران برای دوره ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۰ ارزیابی کردند. آن‌ها ضمن دسته‌بندی صنایع، نیاز آبی و تولیدات این صنایع، میزان آب موردنیاز آن‌ها را برآورد کردند. نتایج پژوهش بیانگر آن است که استان زنجان در بخش صنعت در مجموع صادرکننده خالص آب مجازی بوده است (Tahami Pourzarandi and Abedi, 2017).

شیرزادی و همکاران عوامل مؤثر بر تجارت آب مجازی محصول گندم در ایران را با مدل جاذبه بررسی و به این نتیجه رسیدند که بیشترین اثرگذاری بر مدل جاذبه مربوط به سطح زیر کشت گندم با ضریب تعیین ۲/۵۴- است. با توجه به بی‌اثر بودن قیمت آب بر تجارت آب مجازی می‌توان بر ارزش‌گذاری منطقی قیمت آب به‌منظور تفکیک تعرفه نرخ آب‌بها توجه ویژه نشان داد (Shirzadi et al., 2019).

زارعی و جعفری با بررسی تجارت آب مجازی در ایران از دیدگاه بهره‌وری اقتصادی به این نتیجه رسیدند که تولید محصولات راهبردی در داخل دارای هزینه فرصت زیادی است. صادرات میوه‌هایی مانند کیوی، مرکبات، انگور و نیز برخی از محصولات سبزی و صیفی مانند هندوانه، خیار و گوجه‌فرنگی ارزش آب مجازی بالایی ایجاد می‌کنند، به‌گونه‌ای که حتی صادرات آن‌ها نسبت به پسته اولویت دارد. با این حال و با توجه به وضعیت کنونی و بحرانی منابع آب کشور، ارزش آب مجازی ایجاد شده در قبال ارزش واقعی آب، ناچیز به نظر می‌رسد (Zarei and Jafari, 2019).

سپاسخواه در پژوهشی مفاهیم برنامه‌ریزی برای آب مجازی را بررسی کرد. ایشان معتقد است در انتخاب استفاده از تجارت آب مجازی باید ملاحظات منطقه‌ای، امنیت غذایی، خودکفایی غذایی، سلامت مواد غذایی، حق حاکمیت غذایی، حفظ محیط‌زیست، اشتغال و فقر مورد توجه قرار گیرد. به‌عبارت‌دیگر سیاست‌گذاران با اصول تجارت آب مجازی آشنا شوند تا تصمیمات درست گرفته شود (Sepaskhah, 2019).

حکمت‌نیا و همکاران عوامل مؤثر بر تجارت آب مجازی محصولات کشاورزی ایران را بررسی کردند. بر اساس نتایج پژوهش قیمت نسبی صادراتی بیشترین تأثیر را بر صادرات آب مجازی محصولات کشاورزی ایران دارد. شوک وارد شده بر درآمد

می‌دهد تا علاوه بر صرفه‌جویی آبی، هزینه فرصت تخصیص ارز خارجی را نیز برآورد کنند. در مقایسه با پژوهش‌های پیشین، مدل پیشنهادی مزیت‌هایی چون تلفیق بعد اقتصادی و زیست‌محیطی، سنجش اثر نرخ ارز و متغیرهای کلان بر واردات آب مجازی و مقایسه هزینه واردات با تولید داخلی را دارد؛ بنابراین، می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تصمیم‌سازی در حوزه تجارت و مدیریت پایدار منابع آب ایران استفاده شود.

## ۲- مروری بر پیشینه پژوهش ۱-۲- مروری بر مطالعات ملی

عابدی و تهامی‌پور با اندازه‌گیری و تحلیل تراز تجاری آب مجازی در بخش کشاورزی استان زنجان به این نتیجه رسیدند که صادرات محصولات کشاورزی حدود ۲۶/۵۳ میلیون مترمکعب صادرات آب مجازی را در بر گرفته است. به‌علاوه، ۹۵ درصد آب مجازی صادراتی مربوط به محصولات باغی و ۵ درصد آن متعلق به محصولات زراعی است. همچنین شدت مصرف آب در بخش کشاورزی ۲۴ درصد از منابع آب تجدیدشونده برآورد شده است (Abedi and Tahamipour, 2016).

قدوسی و داوری با بررسی ابعاد تجارت آب مجازی از منظر مدل تجارت بین‌الملل هکشر اوهلین<sup>۱</sup>، نظریه اولیه آلن مبنی بر بهبود مسئله توزیع نابرابر آب در جهان، برخلاف پیش‌بینی خوش‌بینانه اولیه نشان دادند که تجارت آب مجازی حتی در برخی کشورهای کم‌آب ممکن است موجب تشدید فشار بر منابع آب شود (Ghoddusi and Davari, 2016).

کیانی با بررسی وضعیت تجارت داخلی و بین‌المللی آب مجازی در ایران به این نتیجه رسید که استان‌های کرمان، هرمزگان و سمنان جزو استان‌های خشک کشور هستند، صادرکننده آب مجازی به سایر استان‌ها و خارج کشور و در مقابل استان‌های پرباران گیلان، چهارمحال و بختیاری، لرستان، کردستان، آذربایجان غربی، کهگیلویه و بویراحمد و کرمانشاه واردکننده آب مجازی هستند. بر این اساس، امکان مدیریت بهتر منابع آب از طریق اصلاح الگوی تجارت داخلی و خارجی آب مجازی وجود دارد (Kiani, 2018).

تهامی پورزندگی و عابدی تجارت آب مجازی در بخش صنعت

<sup>۱</sup> Heckscher- Ohlim



روش‌های تخمین مشاهده کرد و به‌ویژه، هنگامی که زیر نمونه‌های کوچکتری از کشورها (مانند قاره‌ها و گروه‌های منطقه‌ای) در نظر گرفته می‌شوند. این امر به توضیح شواهد متناقض در ادبیات در مورد اهمیت مواهب آب برای جریان‌های VWT کمک می‌کند (Fracasso, 2014).

تامیا و همکاران در سال ۲۰۱۴ محرک‌های تجارت آب مجازی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که جمعیت، تولید ناخالص داخلی و فاصله جغرافیایی، محرک‌های اصلی جریان آب مجازی هستند و سهم ناچیزی (غیرقابل اغماض) از تولیدات کشاورزی کشورهای صادرکننده به آن‌ها اختصاص دارد. چنین محرک‌هایی در طول سال‌ها برای تعداد فزاینده‌ای از کشورها اهمیت پیدا کرده‌اند، به‌طوری که واریانس فزاینده‌ای توسط فاصله بین کشورها و نقش روبه کاهش تولید ناخالص داخلی توضیح داده می‌شود. ضریب تعیین تعدیل شده جهانی مدل قانون جاذبه برآزش شده، ۰/۵۷ (در سال ۲۰۱۰) است و باگذشت زمان افزایش یافته است که قابلیت توصیفی خوب محرک‌های انتخاب شده برای تجارت آب مجازی را تأیید می‌کند (Tamea et al., 2014).

تیان و همکاران در سال ۲۰۲۳ الگوها و عوامل محرک واردات آب مجازی کشاورزی در چین را بر اساس مدل جاذبه پانل و رگرسیون کوانتایل بر اساس محتوای آب مجازی و داده‌های تجارت کشاورزی ۲۴۵ دسته از محصولات زراعی و حیوانی کدگذاری شده ۶ رقمی از ۴۹ صادرکننده عمده در طول سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۸ بررسی کردند. نتایج اصلی این پژوهش به شرح زیر بود: ۱- واردات آب مجازی کشاورزی در چین روند صعودی قوی با میانگین نرخ رشد سالانه ۱۳/۰۹ درصد نشان می‌دهد و محصولات نفتی بیشترین سهم را دارند. هم تعداد منابع واردات (حاشیه‌های گسترده) و هم حجم واردات از هر شهرستان روند رو به رشدی را نشان می‌دهند، اما آمریکا بیشترین سهم را در واردات آب مجازی چین دارد.

۲- واردات آب مجازی کشاورزی چین می‌تواند به‌خوبی با منابع آب صادرکنندگان مطابقت داشته باشد و همچنین می‌تواند به صرفه‌جویی خالص جهانی در آب منجر شود که برای پایداری مصرف جهانی آب مفید است.

۳- منابع آب و زمین و مقیاس اقتصادی صادرکننده به‌عنوان سه عامل عرضه ضروری، تأثیر مثبتی بر واردات آب مجازی کشاورزی

شرکای عمده تجاری منجر به کاهش صادرات آب مجازی شده است. همچنین قیمت‌های نسبی وارداتی و درآمد داخلی بیشترین تأثیر را بر واردات آب مجازی محصولات کشاورزی ایران دارند (Hekmatnia et al., 2021).

گل‌پذیر و همکاران در پژوهشی نشان دادند با اصلاح الگوی کشت بر مبنای آب مجازی در استان اصفهان می‌توان ارزش اقتصادی منابع آب را افزایش، مصرف منابع آب را کاهش و به توسعه پایدار دست یافت (Golpazir et al., 2023).

حیدری و تاران وضعیت آب مجازی گندم آبی در ایران را بررسی و به این نتیجه رسیدند که کشت گندم در استان گلستان، اردبیل و خوزستان با توجه به مقدار آب مجازی آبی و دیگر ویژگی‌های این مناطق دارای برتری است. همچنین کشت گندم در برخی مناطق ایران، به‌ویژه در مناطق مرکزی و جنوب شرقی، مناسب نبوده و توصیه نمی‌شود (Heydari and Taran, 2025).

متقی و همکاران سناریوهای فراروی کاربست آب مجازی در حکمرانی محلی استان اصفهان را با رویکرد آینده‌پژوهی بررسی کردند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده هماهنگی میان نهادها و ذی‌نفعان مختلف، مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی به‌طور هم‌راستا با سایر بخش‌ها، رویکرد منافع جمعی، توسعه صنایع آب‌بر، تغییرات اقلیمی، الگوی بارش و میزان جمعیت، از جمله متغیرهای کلیدی مؤثر در کاربرد آب مجازی در حکمرانی محلی استان اصفهان هستند (Mottaghi et al., 2024).

## ۲-۲- مروری بر مطالعات بین‌المللی

فراکاسو در سال ۲۰۱۴ به بررسی عوامل تعیین‌کننده جریان‌های «تجارت آب مجازی»<sup>۱</sup> دوجانبه با استفاده از یک مدل جاذبه تخمینی تجارت که برای خدمات آب موجود در کالاهای کشاورزی مبادله شدن بین کشورها اعمال می‌شود، پرداخت. این پژوهش، همسو با ادبیات اخیر در مورد مدل جاذبه تجارت، مجموعه‌ای از روش‌های تخمین را ارائه داد. این تجزیه و تحلیل نشان داد که جریان‌های VWT دوجانبه تحت تأثیر عوامل تعیین‌کننده کلاسیک تجارت، مواهب آب ملی و سطح فشار بر منابع آب قرار دارند. این یافته‌های کلی قوی هستند، اگرچه می‌توان برخی تغییرات را در

<sup>۱</sup> Virtual Water Trading (VWT)



تصمیم‌گیرندگان در بهینه‌سازی ساختار اقتصادی با ادغام عوامل کمیّت و کیفیت آب و تحقق مدیریت پایدار منابع آب کمک کند (Hou et al., 2023).

### ۳- مواد و روش‌ها (روش پژوهش)

#### ۳-۱- متغیرهای پژوهش

متغیرهای مورداستفاده شامل:

۱- تراز تجاری به‌عنوان مابه‌التفاوت کل صادرات و واردات کالا و خدمات ایران به‌صورت درصدی از تولید ناخالص داخلی، درآمد دولت شامل درآمد مالیاتی و غیر مالیاتی به‌صورت درصدی از تولید ناخالص داخلی، مخارج دولت، کل مصرف دولت و مخارج سرمایه‌گذاری را به‌صورت درصدی از تولید ناخالص داخلی که از داده‌های بانک مرکزی گردآوری شده‌اند.

۲- نرخ رشد اقتصادی<sup>۱</sup> که بر اساس تولید ناخالص داخلی ایران به قیمت‌های ثابت که از داده‌های صندوق بین‌المللی پول گردآوری شده است.

۳- واردات آب مجازی به‌صورت حجم کل محصولات وارداتی منتخب مرتبط با جریان آب مجازی ایران گردآوری شده است.

۴- شاخص جهانی قیمت مواد غذایی<sup>۲</sup> که بر مبنای شاخص قیمت محصولات منتخب صندوق بین‌المللی پول بوده و بر اساس تورم و نرخ ارز تعدیل شده است.

۵- شاخص بازده محصول<sup>۳</sup> بهره‌وری کشاورزی داخلی ایران که بر اساس شاخصی از بازده محصولات عمده فائو است.

#### ۳-۲- داده‌ها، منابع و نحوه محاسبه متغیرها

در جدول ۱ متغیرها، نمادها، تعریف، واحد اندازه‌گیری، دوره زمانی موردبررسی، نحوه محاسبه آن‌ها و اینکه از چه پایگاه داده‌ای استخراج شده‌اند بیان شده است.

#### ۳-۳- هزینه فرصت استفاده از ارز برای واردات آب مجازی

هزینه فرصت تخصیص ارز به واردات آب مجازی به‌جای

چین دارند. در میان عوامل تقاضا، تقاضای آب محصول و مقیاس اقتصادی چین تأثیر مثبتی دارد، درحالی‌که قیمت واردات، تأثیر منفی دارد. علاوه بر این، عوامل عرضه و تقاضا در چندک‌های بالاتر تأثیر قوی‌تری دارند. علاوه بر این، عوامل هزینه تجارت، از جمله میانگین تعرفه، نرخ ارز دوجانبه و واگذاری تجارت آزاد نیز می‌توانند به‌طور معناداری بر واردات آب مجازی کشاورزی تأثیرگذار باشند (Tian et al., 2023).

در پژوهشی جریان آب مجازی محصولات کشاورزی ترکیه را با استفاده از یک مدل جاذبه بررسی شد که جریان‌های آب مجازی تجارت کشاورزی برای ۳۲۶ محصول و ۱۹۲ شریک تجاری برای سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۹ محاسبه شد. متغیر وابسته، کل مقدار آب موجود در تجارت محصولات کشاورزی بود. علاوه بر معادلات پایه که شامل متغیرهای توضیحی مرسوم مانند درآمد، جمعیت، فاصله جغرافیایی و متغیرهای مجازی وابستگی بودند، آن‌ها مدل‌های توسعه‌یافته‌ای را تخمین زدند که شامل دو معیار دسترسی به آب و فشار آب بود. علاوه بر این، متغیرهایی که اندازه فعالیت کشاورزی و دسترسی به زمین‌های کشاورزی در کشور شریک را نشان می‌دهند، در تحلیل گنجانده شدند. علاوه بر این، مدل‌های جاذبه برای کل جریان‌های آب مجازی به کالاهای واسطه‌ای و مصرفی تفکیک شدند و در این خصوص اطلاعات بیشتری ارائه می‌دهند (Akbostanci et al., 2023).

در پژوهشی دیگر جاذبه جریان‌های آب مجازی جهانی از دیدگاه کمیّت و کیفیت بررسی شد. آن‌ها از روش‌های داده‌ستانده چند منطقه‌ای و جاذبه برای بررسی تأثیر عوامل متعدد بر جریان‌های تجارت آب سبز، آبی و خاکستری در بین ۱۷۷ کشور در سال ۲۰۱۴ استفاده کردند. چندین عامل به‌شدت با تجارت آب خاکستری مرتبط بودند و بینش ارزشمندی در مورد مدیریت منابع آب، به‌ویژه در مورد آلودگی آب، ارائه می‌دهند. یافته‌ها، اثرات محرک وضعیت اجتماعی-اقتصادی و فعالیت‌های کشاورزی بر تجارت آب مجازی را تأیید می‌کنند. این پژوهش نشان داد که تأثیر موهبت منابع آب بر جریان تجارت آب مجازی در مقایسه با ساختار اقتصادی در تعیین جریان‌های تجارت آب مجازی نسبتاً کم است. این پژوهش به بررسی در مورد تعامل بین تجارت آب مجازی و عوامل مختلف کمک می‌کند که می‌تواند به

<sup>1</sup> Gross Domestic Product Growth Rate (GDPG)

<sup>2</sup> World Food Price Index (P)

<sup>3</sup> Crop Yield Index (Y)



جدول ۱- مشخصات متغیرهای مورد استفاده در مدل اقتصادسنجی

Table 1. Characteristics of variables used in the econometric model

Variable	Symbol	Definition and explanation	Unit of measurement	Period	Exact data source	How to calculate / explain
Import of cereal virtual water	(VWI)	Total volume of imported virtual water including wheat, barley, corn and rice	million cubic meters	2003–2022	FAO (AQUASTAT, Trade water flow dataset)	Calculation based on the sum of imports $\times$ virtual water coefficient of each product
Trade balance	(TB)	The difference between exports and imports of goods and services as a percentage of GDP	Percentage of GDP	2003–2022	Central Bank of Iran (CBI annual report)	-
Government revenue	(GR)	Government tax and non-tax revenues	Percentage of GDP	2003–2022	Central Bank, public budget department	Real data as a percentage of GDP
Government expenditures	(GE)	Total consumption and capital expenditures of the government	Percentage of GDP	2003–2022	Central Bank, national accounts	The sum of current expenditures and government investment
Economic growth	(GDPG)	GDP growth rate at constant prices in 2015	Percentage	2003–2022	International Monetary Fund (IMF, World Economic Outlook Database)	-
Official exchange rates	(ER)	Annual average official dollar rate	Rial to US dollar	2003–2022	Central Bank of Iran, exchange rate time series	Annual average official rate
World food price index	(P)	Inflation-adjusted world food price index	Index (2015=100)	2003–2022	International monetary fund (IMF) commodity price index	Real data: become the base index 2015
Product return index	(Y)	Average yield index of selected agricultural products in Iran	Index (2015=100)	2003–2022	FAO (FAOSTAT, yield index dataset)	Average yield of wheat, maize, barley and rice
Cost of domestic production	(DPC)	Total cost of domestic production of selected cereals	Billion Rials	2003–2022	Ministry of Agricultural Jihad (office of agricultural production statistics)	Real data of production cost per hectare $\times$ cultivated area
Import cost	(IMC)	Annual Cost of Importing Selected Grains	Billion Rials	2003–2022	Islamic Republic of Iran Customs, UN Comtrade	Import value $\times$ annual exchange rate
Exchange opportunity cost	(OC)	The lost returns of allocation of imported currency instead of domestic investment	Billion Rials	2003–2022	Calculation of Formulas (1)	Based on the difference between the yield of government bonds and the productive sector
Domestic inflation index	(INF)	Consumer inflation rate (CPI)	Percentage	2003–2022	Statistical Center of Iran / IMF	-



سایر سرمایه‌گذاری‌ها را می‌توان به صورت معادله ۱ برآورد کرد

که در آن

$$I_{ijt} = \text{مقدار نهاده ز برای تولید یک واحد محصول } i \text{ در سال } t, P_{ijt} \quad (۱)$$

$Y_{ijt}$  قیمت نهاده ز برای تولید یک واحد محصول  $i$  در سال  $t$ ,  
عملکرد محصول  $i$  در سال  $t$  است.

$$OC = VWI \times (j - i)$$

که در آن

$$ICP_{it} = Q_{it} \times P_{wit} \times ER_t \quad (۴)$$

که در آن

$P_{wit}$  قیمت جهانی محصول  $i$  در سال  $t$ ,  $ER_t$  نرخ ارز رسمی در سال  $t$ ,  $Q_{it}$  مقدار آب مجازی وارد شده برای یک واحد محصول  $i$  در سال  $t$  است. این مدل تعیین می‌کند که آیا افزایش قیمت جهانی محصولات بر کاهش هزینه‌های تولید داخلی در طول زمان غلبه کرده است یا خیر؟

VWI بخشی از واردات آب مجازی است که به صورت ارزی پرداخت می‌شود و از داده‌های تجارت به دست می‌آید.  $i$  بازدهی است که می‌توان با سرمایه‌گذاری ارز خارجی در اوراق قرضه دولتی ایران، با استفاده از داده‌های بازده سالانه اوراق بهادار به دست آورد.  $i$  بازده خلاف واقع است که می‌توانست با سرمایه‌گذاری در بخش‌های اولویت‌دار مانند صنعت، فناوری و یا کشاورزی داخلی به دست آید. مقدار آن بر مبنای بازده پیش‌بینی شده در این بخش‌ها بر اساس عملکرد گذشته و چشم‌انداز رشد برآورد می‌شود.  $(j-i)$  نشان‌دهنده بازده یا هزینه فرصت از بین رفته از تخصیص ارز به واردات آب مجازی به جای سرمایه‌گذاری در بخش‌های جایگزین است. این مدل هزینه فرصت ساده تخمینی از مقدار بازدهی از دست‌رفته در دوره نمونه از ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ را ارائه می‌دهد.

### ۳-۵- پردازش مدل و آزمون‌های آماری

به منظور بررسی روابط میان متغیرهای کلان اقتصادی و جریان واردات آب مجازی، از مدل خودرگرسیون برداری<sup>۳</sup> استفاده شد. این مدل به دلیل توانایی در تحلیل روابط پویا و دوطرفه بین متغیرها، برای داده‌های سری‌مانی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ مناسب‌تر از مدل OLS تشخیص داده شد. مدل اقتصادسنجی با استفاده از نرم‌افزار EViews نسخه ۱۲ و یا معادل آن مانند Stata17 برآورد شد. داده‌ها پس از پاک‌سازی و نرمال‌سازی، برای حذف اثر مقیاس، به لگاریتم طبیعی تبدیل شدند. پیش از برآورد، چند آزمون مقدماتی برای اطمینان از اعتبار مدل اجرا شد. کلیه تخمین‌های مدل VAR و آزمون‌های علیت گرنجر در محیط نرم‌افزار EViews12 انجام شد.

الف) آزمون مانایی<sup>۴</sup>: برای هر یک از متغیرهای  $GR$ ,  $TB$ ,  $VWI$ ,  $GE$ ,  $GDPG$ ,  $ER$  و  $P$  آزمون دیکی-فولر تعمیم یافته انجام شد. نتایج نشان داد که تمامی متغیرها در سطح ۵ درصد معناداری پس از یک‌بار تفاضل‌گیری مانا هستند.  $(I(1))$  این امر مانع از بروز رگرسیون کاذب<sup>۵</sup> در مدل نهایی می‌شود. پس از اطمینان از مانایی

### ۳-۴- هزینه‌های مالی واردات آب مجازی

هزینه مالی<sup>۱</sup> واردات آب مجازی محصول  $i$  در سال  $t$  عبارت است از

$$FC_{it} = ICP_{it} - DPC_{it} \quad (۲)$$

اگر  $FC_{it} > 0$  باشد، واردات آب مجازی هزینه برتر از تولید داخلی است؛ و اگر  $FC_{it} < 0$ ، واردات منجر به صرفه‌جویی مالی می‌شود. هزینه تولید داخلی<sup>۲</sup> محصول  $i$  در سال  $t$  از معادله ۳ برآورد می‌شود

$$DPC_{it} = \sum_{j=1}^m (I_{ijt} \times P_{ijt}) / Y_{it} \quad (۳)$$

<sup>3</sup> Vector Auto Regression (VAR)

<sup>4</sup> Augmented Dickey-Fuller (ADF)

<sup>5</sup> Spurious Regression

<sup>1</sup> Financial Cost (FC)

<sup>2</sup> Domestic Production Cost (DPC)



واریانس خطاها در سطح ۵ درصد ثابت بوده و ناهمسانی واریانس وایت وجود ندارد.

ه) آزمون پایداری مدل: برای بررسی پایداری ساختاری مدل VAR از آزمون مقادیر ویژه<sup>۱۰</sup> استفاده شد. نتایج نشان داد که تمامی مقادیر ویژه داخل دایره واحد قرار دارند؛ بنابراین مدل از نظر پایداری معتبر است.

و) انتخاب شکل تبعی: با استفاده از آزمون رمزی<sup>۱۱</sup> شکل تبعی خطی مدل تأیید شد (Prob=0.46>0.05)؛ بنابراین، مدل خطی چندمتغیره برای تحلیل روابط بین متغیرها مناسب تشخیص داده شد.

با توجه به آزمون‌های فوق، مدل نهایی برآورد شده در بخش ۴-۹ (تحلیل اقتصادسنجی) از نظر آماری معتبر است و فروض کلاسیک رگرسیون (مانایی، نرمال بودن، عدم خودهمبستگی و ناهمسانی واریانس وایت) برقرار هستند. این نتایج اطمینان می‌دهد که ضرایب برآورد شده، بدون تورش و سازگار بوده و می‌توان از آن‌ها برای استنتاج سیاستی استفاده کرد.

در فلوچارت ارائه شده، مراحل مختلف تحلیل واردات آب مجازی با استفاده از مدل اقتصادسنجی به‌خوبی نمایش داده شده است. با این حال، لازم است تا به ترتیب مراحل و تفاوت‌های بین برخی از مراحل توضیحاتی ارائه شود (شکل ۱):

۱- Data Collection: مرحله جمع‌آوری داده‌ها شامل گردآوری اطلاعات از منابع مختلف است. در این مرحله، داده‌های مرتبط با واردات آب مجازی، نرخ ارز، تراز تجاری، رشد اقتصادی و سایر متغیرهای کلان اقتصادی از جمله شاخص‌های اقتصادی، قیمت‌های جهانی و سایر داده‌های مرتبط با بخش کشاورزی و صنعتی است که از منابع معتبر جمع‌آوری می‌شوند.

۲- Calculations and Indicators: در این مرحله، داده‌ها محاسبه و شاخص‌های کلیدی برای تحلیل آماده می‌شوند. این محاسبات شامل محاسبه میزان آب مجازی وارداتی، شاخص‌های اقتصادی کلیدی و سایر داده‌های ضروری برای مدل‌سازی است.

۳- Preprocessing and Normalization: این مرحله شامل آماده کردن داده‌ها مانند پیش‌پردازش و نرمال‌سازی، تبدیل واحدها و

متغیرها در مرتبه اول، طول وقفه بهینه مدل با استفاده از معیارهای اطلاعاتی آکائیک<sup>۱</sup>، شوارتز<sup>۲</sup> و هنان-کوئین<sup>۳</sup> تعیین شد. بر اساس کمینه مقدار معیار AIC، طول وقفه بهینه مدل VAR برابر با ۲ انتخاب شد.

ب) آزمون هم‌خطی<sup>۴</sup>: با استفاده از شاخص عامل تورم واریانس<sup>۵</sup> بررسی شد که مقدار VIF برای هیچ‌یک از متغیرها بیش از ۵ نبوده است، بنابراین هم‌خطی شدید بین متغیرهای توضیحی وجود ندارد.

ج) آزمون نرمال بودن خطاها: توزیع باقیمانده‌ها با آزمون جاک برآ بررسی شد. مقدار آماره ۱/۸۲ و سطح معناداری بیش از ۰/۰۵ به دست آمد؛ در نتیجه فرض نرمال بودن باقیمانده‌ها پذیرفته شد.

د) آزمون خودهمبستگی<sup>۶</sup> و ناهمسانی واریانس وایت<sup>۷</sup>: برای بررسی خودهمبستگی، از آزمون دوربین-واتسون<sup>۸</sup> استفاده شد (DW=1.91) که نشان‌دهنده نبود خودهمبستگی معنادار بین پسماندها است. مقدار آماره دوربین-واتسون (۱/۹۱) بر اساس معادله ۵ محاسبه شد

$$DW = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2} \quad (5)$$

که در آن

$e_t$  باقیمانده‌های مدل در هر سال هستند. این مقدار از محاسبه نسبت مجموع تفاضل مربعات پسماندهای متوالی به مجموع مربعات کل پسماندها در داده‌های سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ به دست آمده است. خروجی نرم‌افزار EViews مقدار ۱/۹۱ را گزارش کرد که در بازه نزدیک ۲ قرار دارد؛ بنابراین، خودهمبستگی معناداری میان خطاها وجود ندارد و فرض استقلال برقرار است. همچنین با آزمون ناهمسانی واریانس وایت مشخص شد که

<sup>1</sup> Akaike Information Criterion (AIC)

<sup>2</sup> Schwartz Criterion (SC)

<sup>3</sup> Hannan-Quinn (HQ)

<sup>4</sup> Multicollinearity

<sup>5</sup> Variance Inflation Factor (VIF)

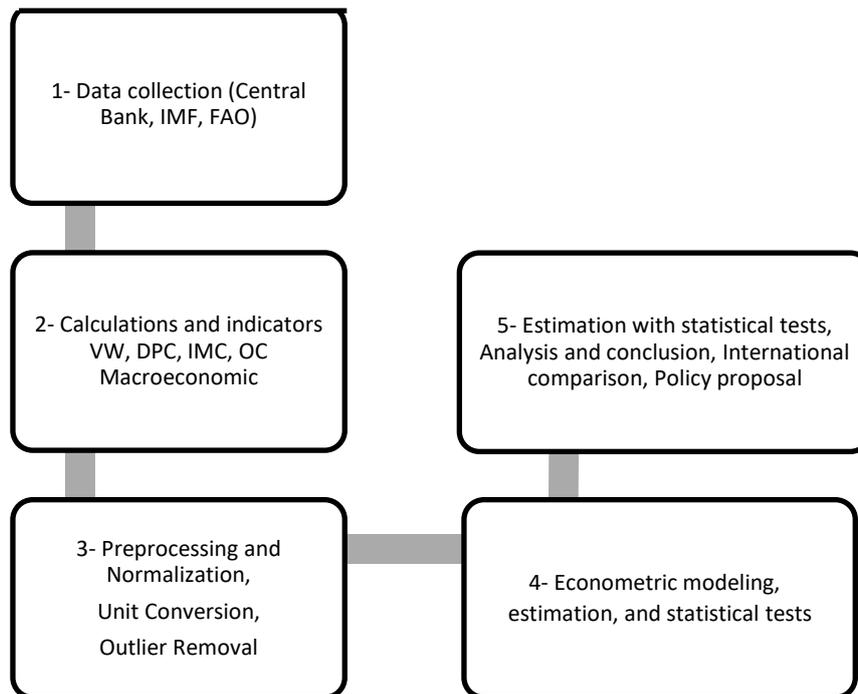
<sup>6</sup> Jarque-Bera

<sup>7</sup> Durbin-Watson

<sup>8</sup> White Heteroskedasticity Test

<sup>9</sup> Durbin-Watson





**Fig. 1.** Flowchart of the research methodology and steps for implementing the hybrid macroeconomic-virtual water model

شکل ۱- فلوچارت روش پژوهش و مراحل اجرای مدل ترکیبی اقتصاد کلان- آب مجازی

برای وارد شدن به مدل‌های اقتصادسنجی است.

- **Econometric Modeling:** در این مرحله، مدل‌سازی اقتصادسنجی با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده و محاسبه شده انجام می‌شود. هدف این مرحله، تحلیل روابط پیچیده میان متغیرهای مختلف و پیش‌بینی نتایج بر اساس داده‌ها است.

#### ۴- نتایج و بحث

در بررسی جریان کلی واردات آب مجازی غلات جدول ۲ که مربوط به واردات آب مجازی ایران به تفکیک ردپای آب سبز، آبی و خاکستری را نشان می‌دهد، بینش عمیقی از الگوهای وابستگی ایران به منابع آب خارجی را فراهم می‌کند. بر اساس این داده‌ها، مجموع واردات آب مجازی ایران در قالب محصولات برنج، گندم، ذرت و جو، معادل  $297,030/75$  میلیون مترمکعب در طول دوره مورد مطالعه بوده است. این رقم نشان‌دهنده وابستگی قابل توجه ایران به منابع آب مجازی خارجی است که عمدتاً از طریق واردات غلات تأمین می‌شود. با توجه به شرایط کم‌آبی کشور، این وابستگی نه تنها به‌عنوان یک چالش اقتصادی، بلکه به‌عنوان یک مسئله استراتژیک در مدیریت منابع آب در کشور مطرح است.

حذف داده‌های پرت است برای آنکه در مرحله بعد برآوردهای لازم انجام شود.

۴- **Econometric Modeling:** در این مرحله، مدل‌سازی اقتصادسنجی انجام می‌شود. داده‌های محاسبه شده در مرحله قبل وارد مدل‌های آماری می‌شوند و روابط بین متغیرها تحلیل می‌شود. در این مرحله، مدل‌های VAR برای تحلیل داده‌های سری زمانی و آزمون‌های آماری مختلف مانند آزمون علیت و آزمون‌های مانایی استفاده می‌شوند.

۵- **Assessment of Virtual Water Imports:** در این مرحله، نتایج مدل‌سازی ارزیابی شده و تحلیل‌های نهایی انجام می‌شود. در این مرحله، تأثیرات مختلف بر واردات آب مجازی بررسی می‌شود و سیاست‌های پیشنهادی برای کاهش وابستگی به واردات و بهبود مدیریت منابع آب داخلی ارائه می‌شود.

تفاوت بین «Calculations and Indicators» و «Econometric Modeling»:

- **Calculations and Indicators:** در این مرحله، هدف اصلی جمع‌آوری داده‌ها و محاسبات اولیه است که برای مدل‌سازی و تحلیل‌های بعدی ضروری است. این مرحله شامل آماده‌سازی داده‌ها



جدول ۲- واردات آب مجازی غلات (میلیون مترمکعب)

Table 2. Virtual water import of cereals (million cubic meters)

Product	Green	Blue	Gray	Total
Rice	18,473.80	9,365.10	3,696.80	31,535.70
Wheat	46,219.20	22,572.20	9,637.80	78,429.20
Corn	84,388.20	42,756.70	16,877.60	144,022.50
Barley	25,193.70	12,764.80	5,038.70	42,997.20
Total	174,274.90	87,458.80	35,250.90	296,984.60

جمعیت، تغییر الگوهای مصرف و محدودیت‌های منابع آب داخلی قرار داشته است. در سال ۲۰۰۵، واردات آب مجازی به حداقل خود در این دوره، یعنی ۶۶۶،۱/۳۴ میلیون مترمکعب رسیده است. کاهش واردات آب مجازی در سال‌های اخیر (مانند سال ۲۰۲۳ با ۲۲،۱۲۰/۰۳ میلیون مترمکعب) می‌تواند نشان‌دهنده تلاش‌های دولت برای کاهش وابستگی به واردات و بهبود مدیریت منابع آب داخلی باشد (جدول ۳).

#### ۴-۱- واردات آب مجازی محصول گندم

واردات آب مجازی گندم در ایران از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ روندی افزایشی داشته است. این افزایش عمدتاً به دلیل رشد تقاضا و کاهش تولید داخلی در سال‌های کم‌آب بوده است. به‌ویژه در سال ۲۰۰۷، واردات آب مجازی گندم به ۸،۶۴۲/۴۲ میلیون مترمکعب رسید که یکی از بالاترین مقادیر در این دوره بود. کاهش واردات گندم در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ که به ۰/۵۳ و ۰/۲۷ میلیون مترمکعب رسید، ممکن است به سیاست‌های حمایتی دولت و همچنین تلاش برای افزایش تولید داخلی مربوط باشد. در مجموع، روند کلی واردات آب مجازی گندم با نوساناتی همراه بوده است، اما در طول زمان به دلیل کاهش توان تولید داخلی و افزایش تقاضا، وابستگی به واردات گندم بیشتر شده است (جدول ۴).

قاره اروپا سهم قابل توجهی در تأمین آب مجازی گندم وارداتی ایران دارد. فدراسیون روسیه با ۱۵۹۷۸/۹ میلیون مترمکعب بیشترین میزان آب مجازی را در میان کشورهای اروپایی به ایران صادر کرده است. پس‌از آن، سوئیس (۱۰۰۹۹/۲۱ میلیون مترمکعب) و آلمان (۸۸۱۳/۶ میلیون مترمکعب) در جایگاه‌های بعدی قرار دارند. سایر کشورهای اروپایی مانند هلند (۴۱۷۳/۲۷ میلیون مترمکعب)، بریتانیا (۳۵۹۷/۹۳ میلیون مترمکعب)، اتریش (۸۴۴/۲۹ میلیون مترمکعب) و فرانسه (۲۸۶/۴۷ میلیون مترمکعب) نیز در این صادرات مشارکت داشته‌اند.

با توجه به حجم بالای صادرات از روسیه و سوئیس، می‌توان نتیجه گرفت که ایران در تأمین آب مجازی موردنیاز از طریق واردات گندم، به‌ویژه به بازارهای اروپای شرقی و مرکزی وابستگی بیشتری دارد (جدول ۵).

از میان انواع مختلف ردپای آب، آب سبز با سهم ۱۷۴،۲۷۴ میلیون مترمکعب (۵۸/۶۸ درصد از کل)، بزرگ‌ترین مؤلفه واردات آب مجازی ایران را تشکیل می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از وابستگی ایران به آب مجازی مرتبط با استفاده از آب بارانی در کشورهای صادرکننده است. در مقابل، آب آبی با ۸۷،۴۵۸/۸۰ میلیون مترمکعب (۲۹/۴۴ درصد) و آب خاکستری با ۳۵،۲۵۰/۹۰ میلیون مترمکعب (۱۱/۸۸ درصد) سهم کمتری دارند. ذرت با مجموع ۱۴۴،۰۲۲/۵۰ میلیون مترمکعب، بزرگ‌ترین سهم را در واردات آب مجازی ایران دارد که حدود ۴۸/۴۹ درصد از کل واردات آب مجازی را تشکیل می‌دهد. این رقم نشان‌دهنده نقش کلیدی ذرت در واردات آب مجازی ایران است و می‌تواند به دلیل تقاضای بالای این محصول در بخش‌های مختلف، از جمله تغذیه دام و صنایع غذایی، باشد.

در رتبه بعدی، گندم با ۷۸،۴۲۹/۲۰ میلیون مترمکعب (۲۶/۴۲ درصد) و جو با ۴۲،۹۹۷/۲۰ میلیون مترمکعب (۱۴/۴۸ درصد) قرار دارند. برنج با ۳۱،۵۳۵/۷۰ میلیون مترمکعب (۱۰/۶۳ درصد) کمترین سهم را دارد، اما با توجه به ردپای آب بالای این محصول (به‌ویژه آب آبی)، واردات آن همچنان به‌عنوان یک چالش مهم در مدیریت منابع آب مطرح است (جدول ۲). مجموع واردات آب مجازی غلات در سال ۲۰۰۴ معادل ۵۹۲۷/۵۷ میلیون مترمکعب بوده است، در حالی که این رقم در سال ۲۰۲۳ به ۲۲۱۲۰/۰۳ میلیون مترمکعب رسیده است. این افزایش قابل توجه نشان‌دهنده روند رو به رشد وابستگی ایران به واردات آب مجازی است که تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند رشد



جدول ۳- جریان واردات آب مجازی غلات در ایران (میلیون مترمکعب)

Table 3. Virtual water import flow of cereals in Iran (million cubic meters)

Year	Import of virtual water for cereals	Year	Import of virtual water for cereals	Year	Import of virtual water for cereals
2003	5,147.77	2010	8,056.90	2017	14,548.07
2004	5,927.57	2011	19,908.31	2018	16,956.24
2005	1,666.34	2012	141,312.10	2019	171,812.14
2006	5,328.88	2013	22,983.52	2020	23,135.31
2007	16,476.39	2014	16,095.09	2021	25,378.25
2008	15,632.49	2015	13,286.06	2022	24,082.52
2009	8,176.76	2016	8,056.90	2023	22,120.03

جدول ۴- ردپای آب و جریان آب مجازی واردات گندم در ایران (میلیون مترمکعب)

Table 4. Water footprint and virtual water flow of wheat imports in Iran (million cubic meters)

Year	Green water	Blue water	Grey water	Total virtual water import	Year	Green water	Blue water	Grey water	Total virtual water import
2003	191.21	93.38	40.02	324.61	2013	6,388.62	3,120.03	1,337.15	10,845.80
2004	100.24	48.95	20.98	170.17	2014	2,854.52	1,394.07	597.46	4,846.04
2005	376.81	184.02	78.78	639.61	2015	1,271.38	620.91	266.10	2,158.40
2006	162.97	79.50	34.07	276.54	2016	63.52	31.02	13.30	107.84
2007	5,090.74	2,486.18	1,065.50	8,642.42	2017	0.31	0.15	0.06	0.53
2008	4,352.10	2,125.44	910.90	7,388.44	2018	0.16	0.08	0.03	0.27
2009	747.47	365.04	156.45	1,268.96	2019	2,857.35	1,395.45	598.05	4,850.85
2010	242.75	118.57	50.81	412.13	2020	4,763.87	2,326.54	997.09	8,087.50
2011	5,769.60	2,817.73	1,207.60	9,794.93	2021	4,562.39	2,228.15	954.92	7,745.46
2012	3,411.78	1,666.22	714.09	5,792.09	2022	3,011.55	1,470.76	630.33	5,112.64

کرده است (جدول ۶).

#### ۳-۴- واردات آب مجازی محصول جو

واردات آب مجازی جو در ایران از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ با نوسانات زیادی روبه‌رو بوده است. بالاترین میزان واردات در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۱ مشاهده شد که به‌طور مستقیم به افزایش تقاضا برای این محصول و همچنین محدودیت‌های تولید داخلی در شرایط کم‌آبی و سیاست‌های تجاری جهانی مربوط است. در سال ۲۰۰۶، واردات آب مجازی جو به ۱۳۷/۱۱ میلیون مترمکعب کاهش یافت که یکی از کمترین مقادیر در این دوره است. این کاهش واردات ممکن است به دلیل تغییرات در تولید داخلی یا سیاست‌های وارداتی کشور باشد؛ اما از سال ۲۰۱۴ به بعد، واردات جو به‌طور چشمگیری افزایش یافت و در سال ۲۰۱۹ به

#### ۲-۴- واردات آب مجازی محصول برنج

واردات آب مجازی برنج به ایران در دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲، نوسانات قابل توجهی داشته است. در برخی سال‌ها، مانند ۲۰۱۲ و ۲۰۲۲، واردات برنج به میزان زیادی افزایش یافت. این افزایش‌ها نشان‌دهنده نیاز بالای داخلی به برنج، به‌ویژه در شرایطی است که منابع آبی محدود شده‌اند. به‌عنوان مثال، در سال ۲۰۱۲، واردات آب مجازی برنج به ۵,۲۹۹/۷۶ میلیون مترمکعب رسید که نشان‌دهنده وابستگی بالای ایران به واردات این محصول است. در سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰، واردات کاهش یافت که احتمالاً به دلیل بهبود وضعیت تولید داخلی یا تغییرات در الگوهای مصرف بوده است. روند واردات برنج نشان می‌دهد که ایران به‌شدت به واردات آب مجازی برنج وابسته است و این وابستگی تحت تأثیر سیاست‌های داخلی و جهانی تغییرات زیادی را تجربه



جدول ۵- واردات آب مجازی گندم به ایران بر اساس مناطق جغرافیایی (میلیون مترمکعب)

Table 5. Import of virtual water for wheat into Iran by geographical region (million cubic meters)

Region	Country	Virtual water import	Region	Country	Virtual water import
Europe	Russian Federation	15,978.90	Asia	United Arab Emirates	10,741.24
Europe	Switzerland	10,099.21	Asia	Turkey	4,184.92
Europe	Germany	8,813.60	Asia	Kazakhstan	3,679.35
Europe	Netherlands	4,173.27	Asia	Iraq	1,377.10
Europe	United Kingdom	3,597.93	Asia	Uzbekistan	801.80
Europe	Austria	844.29	Asia	Turkmenistan	253.86
Europe	France	286.47	Asia	Republic of Azerbaijan	62.80
Europe	Italy	270.13	Asia	India	12.94
Europe	Latvia	293.87	Asia	Afghanistan	4.26
Europe	Lithuania	1,293.54	Asia	China	131.11
Europe	Denmark	8.39	Asia	Republic of Korea	232.72
Europe	Cyprus	7.50	Asia	Japan	--
Europe	Ireland	3.80	Middle East and Africa	Oman	17.36
Europe	Serbia	0.35	Middle East and Africa	Lebanon	204.69
America	Canada	3,691.10	Middle East and Africa	Estonia	8.61
America	United States	1,709.73	Middle East and Africa	South Africa	--
America	Brazil	337.74	Free Zones	Free Zones	16.29
America	Argentina	417.25	Free Zones	Hong Kong, China	602.75
America	Mexico	0.05	Free Zones	Singapore	1,977.41
Oceania	Australia	1,980.52	Oceania	New Zealand	--

جدول ۶- ردپای آب و جریان آب مجازی واردات برنج در ایران (میلیون مترمکعب)

Table 6. Water footprint and virtual water flow of rice imports in Iran (million cubic meters)

Year	Green water	Blue water	Grey water	Total virtual water import	Year	Green water	Blue water	Grey water	Total virtual water import
2003	991	1,388.08	297.45	2,676.53	2013	1,207.34	1,690.28	362.2	3,259.82
2004	1,162.02	1,626.83	348.61	3,137.46	2014	746.19	1,044.67	223.86	2,014.72
2005	459.11	642.76	137.73	1,239.60	2015	840.91	1,177.28	252.27	2,270.46
2006	1,067.19	1,409.07	320.16	2,796.42	2016	1,293.74	1,811.23	388.12	3,493.09
2007	1,389.06	1,944.68	416.72	3,750.46	2017	1,615.19	2,261.27	484.56	4,361.02
2008	1,290.04	1,806.05	387.01	3,483.10	2018	1,680.03	2,352.04	504.01	4,536.08
2009	1,090.75	1,527.04	327.22	2,945.01	2019	1,314.22	1,839.91	394.27	3,548.40
2010	1,516.13	2,122.58	454.84	4,093.55	2020	738.62	1,034.07	221.59	1,994.28
2011	1,296.87	1,815.62	389.06	3,501.55	2021	1,791.78	2,508.49	537.53	4,837.80
2012	1,962.87	2,748.02	588.86	5,299.75	2022	1,191.57	1,688.20	357.47	3,237.24



۴.۲۱۱/۱۳ میلیون مترمکعب رسید که نشان‌دهنده وابستگی بیشتر ایران به واردات جو است.

#### ۴-۴- واردات آب مجازی محصول ذرت

واردات آب مجازی ذرت در ایران در طول سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ روندی افزایشی داشته است. در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱، واردات آب مجازی ذرت به بیشترین میزان خود یعنی ۱۲.۹۶۳/۳۵ و ۱۲.۲۴۶/۰۸ میلیون مترمکعب رسید که عمدتاً به دلیل افزایش تقاضا در کشور و کاهش تولید داخلی در سال‌های خشک‌سالی بوده است. در مقابل، واردات ذرت در سال ۲۰۰۶ به کمترین میزان خود، یعنی ۳۰۱/۸۶ میلیون مترمکعب، رسید. این نوسانات نشان‌دهنده وابستگی زیاد ایران به واردات ذرت و تأثیرپذیری آن از شرایط اقتصادی و تجاری جهانی است. به‌ویژه، در سال‌های اخیر، افزایش وابستگی به کشورهای صادرکننده ذرت که از سیستم‌های آبیاری مصنوعی برای تولید استفاده می‌کنند، به افزایش واردات آب مجازی ذرت منجر شده است.

#### ۴-۵- هزینه‌های مالی واردات آب مجازی در ایران برای محصول گندم

هزینه واردات گندم در دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. به‌طوری‌که از ۷۷/۲۲ میلیارد ریال در سال ۲۰۰۳ به ۹۱.۲۹۳/۴۰ میلیارد ریال در سال ۲۰۲۲ رسیده است. این روند صعودی به‌وضوح نشان‌دهنده تأثیر ترکیبی از افزایش حجم واردات، رشد قیمت جهانی گندم و جهش نرخ ارز است. به‌ویژه از سال ۲۰۱۸ به بعد، نوسانات شدید در نرخ ارز ایران منجر به افزایش چشمگیر هزینه‌های واردات شده است. نرخ ارز که در سال ۲۰۱۸ حدود ۱۲.۳۵۰ ریال بود، در سال ۲۰۲۲ به ۴۲.۶۵۰ ریال رسید. این جهش باعث شد هزینه‌های ارزی واردات به سطحی بی‌سابقه برسد که فشار زیادی بر منابع مالی کشور وارد کرده است. یکی دیگر از جنبه‌های مهم این تحلیل، تفاوت میان هزینه واردات و هزینه تولید داخلی است. اگرچه هزینه تولید داخلی در طول زمان با توجه به نرخ تورم و افزایش قیمت نهاده‌های کشاورزی رشد کرده، اما همچنان به‌طور قابل‌توجهی کمتر از هزینه واردات باقی مانده است. برای مثال، در سال ۲۰۲۲ هزینه تولید داخلی تنها ۳۷/۵۵ میلیارد ریال بود، در حالی که هزینه واردات به

۹۱.۲۹۳/۴۰ میلیارد ریال رسید.

#### ۴-۶- هزینه‌های مالی واردات آب مجازی در ایران برای محصول جو

هزینه واردات جو طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ به‌طور پیوسته افزایش یافته است. این هزینه از ۶۴/۳۵ میلیارد ریال در سال ۲۰۰۳ به ۸۴.۹۵۴/۹۰ میلیارد ریال در سال ۲۰۲۲ رسیده است. افزایش قابل‌توجه هزینه واردات ناشی از چند عامل است: رشد قیمت جهانی جو، افزایش حجم واردات و نوسانات نرخ ارز. در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲، جهش شدید نرخ ارز به‌عنوان یکی از عوامل اصلی، باعث افزایش نمایی هزینه واردات شد. برای مثال، نرخ ارز از حدود ۱۲.۳۵۰ ریال در سال ۲۰۱۸ به ۴۲.۶۵۰ ریال در سال ۲۰۲۲ رسید که این افزایش مستقیماً هزینه واردات را تحت تأثیر قرار داده است. هزینه تولید داخلی در طول این دوره با توجه به تورم داخلی رشد کرده، اما همچنان بسیار کمتر از هزینه واردات باقی مانده است.

#### ۴-۷- هزینه‌های مالی واردات آب مجازی در ایران برای محصول ذرت

هزینه واردات ذرت در طول دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ به‌شدت افزایش یافته است. این هزینه از ۶۰/۱۳ میلیارد ریال در سال ۲۰۰۳ به ۸۱.۴۱۱/۹۰ میلیارد ریال در سال ۲۰۲۲ رسیده است. این رشد ناشی از چندین عامل است، از جمله افزایش قیمت جهانی ذرت، رشد حجم واردات و افزایش نرخ ارز. جهش نرخ ارز از حدود ۷۹۹ ریال در سال ۲۰۰۳ به ۴۲.۶۵۰ ریال در سال ۲۰۲۲ نقش عمده‌ای در این افزایش داشته است، به‌ویژه در سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ که نرخ ارز به‌طور تصاعدی افزایش یافت. هزینه تولید داخلی به‌واسطه تورم و افزایش هزینه‌های نهاده‌های کشاورزی رشد کرده است، اما همچنان بسیار کمتر از هزینه واردات باقی مانده است. در سال ۲۰۲۲، هزینه تولید داخلی تنها ۳۷/۵۵ میلیارد ریال بود، در حالی که هزینه واردات به ۸۱.۴۱۱/۹۰ میلیارد ریال رسید. این اختلاف نشان‌دهنده ناکارآمدی اقتصادی واردات در مقایسه با تولید داخلی و اهمیت حمایت از کشاورزی داخلی است. نرخ ارز، به‌ویژه از سال ۲۰۱۸ به بعد، تأثیر مستقیمی بر افزایش هزینه واردات داشته است.



مدل بر اساس داده‌های تفاضلی مرتبه اول برآورد شد تا از بروز رگرسیون کاذب جلوگیری شود.

مقدار آماره F برابر ۲۳/۱۸ و سطح احتمال آن کمتر از ۰/۰۵ بوده، پس مدل در حالت کلی معنادار است. مقدار ضریب تعیین مدل هم ۰/۸۴ بوده است که نشان‌دهنده برازش مناسب مدل برآورد شده دارد.

به منظور شناسایی برای روابط علی بین متغیرها، آزمون علیت گرنجر بر اساس مدل VAR اجرا شد. نتایج نشان داد که نرخ ارز و قیمت جهانی مواد غذایی هر دو به صورت علی باعث افزایش واردات آب مجازی در ایران می‌شوند ( $P\text{-value} < 0.05$ ). در مقابل، تراز تجاری و درآمد دولت اثر علی معکوس بر واردات دارند.

آزمون خودهم‌بستگی دوربین - واتسون (DW) مقدار ۱/۹۱ و آزمون ناهمسانی واریانس وایت در سطح ۵ درصد غیر معنادار بود؛ بنابراین، فرض کلاسیک مدل برقرار است. توزیع پسماندها نیز بر اساس آزمون جاک-برا نرمال تشخیص داده شد. نتایج نشان می‌دهد که نرخ ارز، مخارج دولت و قیمت جهانی غذا بیشترین تأثیر مثبت و معنادار بر واردات آب مجازی را دارند؛ در حالی که تراز تجاری و درآمد دولت اثر منفی دارند. به عبارت دیگر، در دوره‌هایی که تراز تجاری بهبود یافته یا درآمد مالیاتی دولت افزایش یافته است، وابستگی به واردات آب مجازی کاهش یافته است. در مقابل، افزایش نرخ ارز و قیمت جهانی محصولات باعث افزایش هزینه‌های واردات و رشد وابستگی به منابع آب خارجی شده است. این یافته‌ها بیانگر آن است که مدیریت اقتصاد کلان، به‌ویژه سیاست‌های ارزی و مالی دولت، می‌تواند به‌طور مستقیم بر پایداری امنیت آبی و غذایی کشور تأثیرگذار باشد.

#### ۴-۱۰- مقایسه نتایج با مطالعات بین‌المللی

یافته‌های این پژوهش نشان داد که واردات آب مجازی غلات در ایران طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ روندی افزایشی داشته و ذرت با سهم حدود ۴۸ درصد، مهم‌ترین حامل آب مجازی کشور است. این الگو با نتایج جهانی هم‌خوانی دارد؛ به‌طوری‌که مکنون و همکاران نیز گزارش کردند بیش از ۷۰ درصد تجارت آب مجازی جهان مربوط به محصولات پرمصرف آب مانند گندم، ذرت و سویا است (Mekonnen et al., 2024). بررسی‌های جغرافیایی نشان

#### ۴-۸- هزینه‌های مالی واردات آب مجازی در ایران برای محصول برنج

هزینه واردات برنج طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. این هزینه از ۱۲۷/۹۰ میلیارد ریال در سال ۲۰۰۳ به ۱۲۳،۹۶۷/۹۰ میلیارد ریال در سال ۲۰۲۲ رسیده است. این افزایش ناشی از چند عامل است: افزایش قیمت جهانی برنج، قیمت جهانی برنج از ۲۰۰ دلار/تن در سال ۲۰۰۳ به ۳۸۰ دلار/تن در سال ۲۰۲۲ افزایش یافته است. رشد حجم واردات، واردات برنج به دلیل تقاضای بالای داخلی به‌طور مداوم افزایش یافته است. نوسانات نرخ ارز، جهش نرخ ارز از ۷۹۹ ریال/دلار در سال ۲۰۰۳ به ۴۲،۶۵۰ ریال/دلار در سال ۲۰۲۲، اثر تصاعدی بر هزینه واردات داشته است.

#### ۴-۹- تحلیل اقتصادسنجی و آزمون‌های آماری واردات آب مجازی

برای بررسی روابط میان متغیرهای کلان اقتصادی و جریان واردات آب مجازی، از داده‌های سری‌مانی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ استفاده شد. هدف این تحلیل، تعیین اثر متغیرهایی همچون تراز تجاری، درآمد دولت، مخارج دولت، رشد اقتصادی، نرخ ارز (ER) و شاخص قیمت جهانی مواد غذایی (P) بر واردات آب مجازی غلات در ایران بوده است (جدول ۷).

الف) مدل پایه

مدل اقتصادسنجی به صورت معادله ۶ تعریف می‌شود

$$VIM_t = \alpha + \beta_1 TB_t + \beta_2 GR_t + \beta_3 GE_t + \beta_4 GDPG_t + \beta_5 ER_t + \beta_6 P_t + \varepsilon_t \quad (6)$$

که در آن

( $\varepsilon$ ) جمله خطای تصادفی است و تمام متغیرها برحسب درصد یا لگاریتم طبیعی تبدیل شده‌اند تا پایداری و مقیاس آن‌ها یکسان شود.

ب) آزمون مانایی

پیش از برآورد مدل، مانایی متغیرها با آزمون دیکی فولر تعمیم یافته بررسی شد. نتایج نشان داد که همه متغیرها در سطح ۵ درصد معناداری، پس از یک‌بار تفاضل‌گیری مانا هستند؛ بنابراین،



جدول ۷- نتایج برآورد مدل اقتصادسنجی واردات آب مجازی (۲۰۲۲-۲۰۰۳)

Table 7. Results of the estimation of the econometric model of virtual water import (2003-2022)

Variable	Impact on virtual water imports (VWI)	Coefficient at (Lag=1)	T Statistic	P-value	Interpret
$\Delta VWI(-1)$	The effect of insider dynamics	0.41	3.28	0.004	Previous year's imports have a positive impact on the current year
$\Delta ER(-1)$	Exchange rate	0.33	2.95	0.008	An increase in the exchange rate increases water dependence
$\Delta P(-1)$	World grain price	0.26	2.41	0.020	An increase in world prices increases the cost of imports
$\Delta TB(-1)$	Trade balance	-0.19	-2.06	0.047	An improvement in the trade balance reduces virtual water imports
$\Delta GR(-1)$	Government revenue	-0.12	-1.95	0.056	An increase in government revenue slightly reduces import dependence
$\Delta GDPG(-1)$	Economic growth	0.17	2.10	0.041	Economic growth increases demand for grains and imports

دقیق، هزینه‌های مالی و پیامدهای مدیریتی این وابستگی را تحلیل کرد. یافته‌ها نشان داد که:

ایران به‌طور قابل توجهی به واردات آب مجازی غلات وابسته است که این موضوع نقش کلیدی در مدیریت منابع آب داخلی و امنیت غذایی کشور ایفا می‌کند. کل حجم واردات آب مجازی غلات در این دوره معادل ۲۹۷/۷۵، ۰۳۰ میلیون مترمکعب بوده است که بیشترین سهم مربوط به ذرت (۴۸/۴۹ درصد)، گندم (۲۶/۴۲ درصد)، جو (۱۴/۴۸ درصد) و برنج (۱۰/۶۳ درصد) بود.

این الگو نشان‌دهنده نقش حیاتی ذرت در تأمین نیازهای داخلی، به‌ویژه در بخش دامداری و تولید خوراک دام، است. تحلیل ردپای آب نشان داد که آب سبز بزرگ‌ترین مؤلفه واردات آب مجازی ایران را تشکیل می‌دهد (۵۸/۶۸ درصد از کل واردات آب مجازی). این موضوع نشان‌دهنده وابستگی شدید ایران به منابع آب بارانی در کشورهای صادرکننده است.

در مقابل، آب آبی و خاکستری به ترتیب با سهم ۲۹/۴۴ و ۱۱/۸۸ درصد، نقش کمتری در این واردات دارند. این توزیع نشان می‌دهد که واردات غلات ایران عمدتاً به منابع طبیعی وابسته است و کمتر تحت تأثیر مصرف مستقیم منابع آبی مصنوعی قرار دارد. با این حال، بالا بودن سهم آب خاکستری در برخی محصولات، به‌ویژه برنج و جو، نشان‌دهنده وابستگی به کشورهای است که تولید آن‌ها با استفاده گسترده از نهاده‌های شیمیایی و آفت‌کش‌ها

می‌دهد که عمده واردات ایران از کشورهای اروپایی و آسیایی انجام می‌شود، الگویی که با یافته‌های زارعی و نصراللهی (Zarei and Nasrollahi, 2021) و هوکسترا و چاپاگین (Hoekstra and Chapagain, 2008) مطابقت دارد و تأیید می‌کند جریان تجارت آب مجازی از مناطق پرآب به مناطق خشک‌تر جهت‌گیری دارد. از منظر اقتصادی و پایداری منابع آب، نتایج نشان داد افزایش نرخ ارز و قیمت جهانی مواد غذایی موجب رشد هزینه واردات آب مجازی می‌شود؛ که با پژوهش وانگ و ما (Wang and Ma, 2024) در چین و باش و همکاران (Bashe et al., 2022) در آفریقا مشابهت دارد. همچنین، بیش از ۵۸ درصد از واردات آب مجازی ایران به آب سبز وابسته است که با نتایج یاو سن (Yawson, 2022) و مکونن و همکاران (Mekonnen et al., 2024) هم‌راستا است و بیانگر انتقال فشار آبی از کشورهای خشک به مناطق پرباران است. در مجموع، الگوی ایران از نظر ترکیب محصولات و اثرات اقتصادی با کشورهای در حال توسعه‌ای مانند چین و هند مشابه است، اما برخلاف کشورهای توسعه‌یافته، ایران همچنان واردکننده خالص آب مجازی است؛ امری که ضرورت بازنگری در سیاست‌های تجاری و آبی کشور را برجسته می‌سازد.

### ۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی جریان واردات آب مجازی غلات در ایران طی دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ پرداخت و با استفاده از مدل‌سازی



ملی فراهم می‌کند. در حالی که پژوهش‌های پیشین اغلب تنها به کمی‌سازی حجم آب مجازی یا ردپای آبی محصولات کشاورزی پرداخته‌اند، مدل حاضر برای نخستین بار در ایران، با واردکردن متغیرهای کلان اقتصادی مانند تراز تجاری، نرخ رشد تولید ناخالص داخلی، نرخ ارز و هزینه فرصت تخصیص ارز به تحلیل، توانسته است تأثیرات مالی و سیاستی واردات آب مجازی را به صورت عددی ارزیابی کند.

این مدل افزون بر برآورد مستقیم هزینه‌های واردات آب مجازی، قادر است بازده از دست‌رفته ناشی از تخصیص ارز به واردات به جای سرمایه‌گذاری در بخش‌های مولد داخلی را نیز محاسبه کند؛ موضوعی که در هیچ‌یک از مطالعات پیشین به طور کمی بررسی نشده بود. برتری این رویکرد در آن است که ضمن حفظ دقت مدل‌سازی هیدرولوژیک، بُعد مالی تصمیم‌گیری‌های تجاری را وارد معادله مدیریت آب می‌کند و به تصمیم‌سازان اجازه می‌دهد بین صرفه‌جویی آبی و هزینه اقتصادی آن تعادل برقرار کنند؛ بنابراین، مدل ترکیبی ارائه شده می‌تواند به‌عنوان چارچوب سیاست‌گذاری یکپارچه برای مدیریت پایدار منابع آب، تجارت کشاورزی و تخصیص بهینه منابع ارزی مورد استفاده نهادهای تصمیم‌گیر در سطح ملی قرار گیرد.

## ۶- قدردانی

از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک بابت فرصتی که در اختیار نویسندگان برای انجام این پژوهش قرار دادند، همچنین از داوران محترم مجله آب و فاضلاب که پژوهش را با دقت بررسی و نکات ارزشمندی را برای بهبود آن مطرح کردند، قدردانی می‌شود.

همراه بوده است. این موضوع الزامی برای پایش و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی واردات آب مجازی به ایران را برجسته می‌کند.

هزینه‌های مالی واردات آب مجازی نیز طی این دوره روند افزایشی قابل توجهی داشته است. به‌عنوان مثال، هزینه واردات آب مجازی گندم از ۶۴/۳۵ میلیارد ریال در سال ۲۰۰۳ به ۸۴،۹۵۴/۹۰ میلیارد ریال در سال ۲۰۲۲ رسیده است. این افزایش ناشی از عوامل متعددی از جمله رشد قیمت جهانی محصولات، افزایش حجم واردات و نوسانات شدید نرخ ارز است. مقایسه هزینه واردات با هزینه تولید داخلی نشان می‌دهد که تولید داخلی گندم، حتی با وجود هزینه‌های مرتبط با تورم، به‌طور قابل‌توجهی اقتصادی‌تر از واردات آن است. این اختلاف نشان‌دهنده اهمیت سرمایه‌گذاری در تولید داخلی و تقویت زیرساخت‌های کشاورزی برای کاهش وابستگی به واردات است.

تحلیل جغرافیایی نشان داد که ایران از طیف گسترده‌ای از کشورها برای تأمین نیازهای غذایی خود وابسته است. سهم برجسته‌ای از واردات آب مجازی از مناطقی مانند اروپا (به‌ویژه روسیه، سوئیس و آلمان) و آسیا (مانند امارات متحده عربی، هند و ترکیه) تأمین شده است. این وابستگی می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله سیاست‌های تجاری، تحولات اقلیمی، محدودیت‌های آبی داخلی و روابط دیپلماتیک قرار گیرد. به‌ویژه، نوسانات در واردات آب مجازی جو و برنج نشان‌دهنده تغییرات در تقاضای داخلی، سیاست‌های تجاری و شرایط جهانی است.

نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب چارچوب اقتصاد کلان با تحلیل جریان‌های آب مجازی، رویکردی نوین و کارآمد برای تبیین روابط میان تجارت، منابع آب و هزینه‌های مالی در مقیاس

## References

- Abedi, S. and Tahamipour, M., 2016. Measurement and analysis of virtual water trade balance in agriculture sector of Zanjan Province. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 47(4), 805-814. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijaedr.2016.61310>.
- Akbostancı, E., Tunç, G. İ. and Türüt-Aşık, S., 2023. Virtual water flows of Turkey's agricultural products: a gravity approach. *Journal of Cleaner Production*, 420, 138453. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138453>.
- Bashe, A., Alamirew, T. and Dejen, Z., 2022. Economic valuation and productivity of irrigation water as a mechanism for sustainable water management. *Water Resources and Economics*, 39, 100191.
- Chelvarforoush, H., Mortazavi, M. and Mosapour Negari, F., 2024. Water crisis and the need to reassess water ownership and utilization methods in Baluchestan (case study: Saravan). *Journal of Water and Wastewater*, 35(5), 39-58. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.504673.3469>.



- Dehghanipour, A. H., Schoups, G., Zahabiyoun, B. and Babazadeh, H., 2020. Meeting agricultural and environmental water demand in endorheic irrigated river basins: a simulation-optimization approach applied to the Urmia Lake basin in Iran. *Agricultural Water Management*, 241, 106353. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106353>.
- Fracasso, A., 2014. A gravity model of virtual water trade. *Ecological Economics*, 108, 215-228. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.10.010>.
- Ghoddusi, H. and Davari, H., 2016. Critically analysis of virtual water from the perspective of policy-making. *Journal of Water and Sustainable Development*, 3(1), 47-58. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jwsd.v3i1.59520>.
- Golian, S., Abrishamchi, A. and Tajrishy, M., 2007. A system dynamics-based analysis of operation policies for water resources at river basin scale. *Journal of Water and Wastewater*, 18(3), 70-80. (In Persian). [[Link](#)]
- Golpazir, M., Ebrahimi, K., Modaresi, F. and Shamsi, M., 2023. Quantifying the economic value of Isfahan agricultural water sources with the approach of modifying the cultivation pattern and based on virtual water. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 54(3), 575-592. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijaedr.2023.353719.669200>.
- Hekmatnia, H., Hosseini, S. M. and Safdari, M., 2020. Determination and assessment of green, blue and gray water footprints in the international trade of agricultural products of Iran. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 14(2), 446-463. (In Persian). [[Link](#)]
- Hekmatnia, M., Safdari, M., Hosseini, S. M. and Dadres Moghadam, A., 2021. Factors affecting the virtual water trade of agricultural crops of Iran (application of panel vector autoregression model). *Environment and Water Engineering*, 7(2), 344-355. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/jewe.2020.249815.1429>.
- Heydari, N. and Taran, F., 2025. Investigating the status of virtual water of irrigated wheat and providing technical and policy solutions for its improvement in Iran. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 25(97), 15-34. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/idser.2025.367448.1596>.
- Hoekstra, A. Y. and Chapagain, A. K., 2008. *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources*. Blackwell Publishing, Routledge, London. [[Link](#)]
- Hou, S., Xu, M. and Qu, S., 2023. The "Gravity" for global virtual water flows: From quantity and quality perspectives. *Journal of Environmental Management*, 329, 116984. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116984>.
- Karandish, F., Hoekstra, A. Y. and Hogeboom, R. J., 2020. Reducing food waste and changing cropping patterns to reduce water consumption and pollution in cereal production in Iran. *Journal of Hydrology*, 586, 124881. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124881>.
- Kiani, G. H., 2018. Study of domestic and international virtual water trade in Iran. *Journal of Water and Soil Science*, 22(1), 115-125. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.29252/jstnar.22.1.115>.
- Ma, W., Li, C., Kou, J., Ma, Z., Yang, H. and Xue, B., 2025. Value-added based inequity in global virtual water trade. *The Geographical Journal*, 191(1), e12603. <https://doi.org/10.1111/geoj.12603>.
- Mekonnen, M. M., Kebede, M. M., Demeke, B. W., Carr, J. A., Chapagain, A., Dalin, C. et al., 2024. Trends and environmental impacts of virtual water trade. *Nature Reviews Earth and Environment*, 5(12), 890-905. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00605-2>.
- Mottaghi, A., Yosefi Shatori, M. and Ghorbani Sepehr, A., 2024. Scenarios for the application of virtual water in the local governance of Isfahan Province with a future research approach. *Journal of Water and Sustainable Development*, 11(3), 85-98. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jwsd.v11i3.2404-1321>.
- Qasemipour, E., Tarahomi, F., Pahlow, M., Malek Sadati, S. S. and Abbasi, A., 2020. Assessment of virtual water flows in Iran using a multi-regional input-output analysis. *Sustainability*, 12(18), 7424. <https://doi.org/10.3390/su12187424>.



- Shirzadi, E., Sayehmiri, A. and Asgari, H., 2019. Investigating factors affecting virtual water trade in wheat production using gravity model. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 50(3), 501-513. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijaedr.2019.260123.668616>.
- Sepaskhah, A. R., 2019. Concepts of planning for virtual water. *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 4(1), 63-80. (In Persian). <https://doi.org/10.22047/srjasnr.2019.112970>.
- Momeni, E., Tajrishy, M. and Abrishamchi, A., 2007. System dynamics modeling of multipurpose reservoir operation. *Journal of Water and Wastewater*, 17(1), 47-58. (In Persian). [\[Link\]](#)
- Tahami Pourzarandi, M. and Abedi, S., 2017. Evaluation of virtual water trade by the industrial sector of Zanjan Province. *Journal of Water and Wastewater*, 28(3), 36-45. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2016.40799>.
- Tamea, S., Carr, J. A., Laio, F. and Ridolfi, L., 2014. Drivers of the virtual water trade. *Water Resources Research*, 50(1), 17-28. <https://doi.org/10.1002/2013WR014707>.
- Tian, Q., Yu, Y., Xu, Y., Li, C. and Liu, N., 2023. Patterns and driving factors of agricultural virtual water imports in China. *Agricultural Water Management*, 281, 108262. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108262>.
- Wang, H. and Ma, T., 2024. Optimal water resource allocation considering virtual water trade in the Yellow River Basin. *Scientific Reports*, 14(1), 79. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50319-6>.
- Yawson, D. O., 2022. Balancing water scarcity, food production, and trade imperatives in the Caribbean: could virtual water analysis help?. *Journal of Cleaner Production*, 376, 134285. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134285>.
- Younis, O., Davies, E. G., Chiappori, D. V., Binsted, M., Siddiqui, M. S., Arbuckle, E. J. et al., 2025. Exploring water use pathways under deep decarbonization scenarios in Canada at subnational scales using GCAM-Canada. *Journal of Environmental Management*, 391, 126416. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126416>.
- Zarei, G. and Jafari, A., 2019. Virtual water trade in Iran with respect to economic productivity. *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 4(1), 49-62. (In Persian). <https://doi.org/10.22047/srjasnr.2019.112969>.
- Zarei, M. and Nasrollahi, Z., 2020. Virtual water trade between Iran and the European Union (EU28) - a sectoral-country analysis using the input-output model. *Iranian Journal of Economic Studies*, 9(2), 413-436. (In Persian). <https://doi.org/10.22099/ijes.2021.38632.1714>.

