



Research Article

Vol. 40, No. 3, Fall 2026, p. 291-317

Study of a Stable Optimal Combination for Selected Low-Water-Consuming Agricultural Crops in Iran

R. Allahverdi¹ , H. Rafiee^{1*} , E. Pishbahar¹ , S. Yazdani¹ , M. Pendar¹ , A. Liaghat²

1- Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: Hamedrafiee@ut.ac.ir)

2- Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran

Received: 10 November 2025

Revised: 31 December 2025

Accepted: 07 February 2026

Available Online: 07 February 2026

How to cite this article:

Allahverdi, R., Rafiee, H., Pishbahar, E., Yazdani, S., Pendar, M., & Liaghat, A. (2026). Study of a stable optimal combination for selected low-water-consuming agricultural crops in Iran. *Journal of Agricultural Economics & Development*, 40(3), 291-317. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jead.2026.96305.1401>

Introduction

Iran's agricultural sector plays a strategic role in ensuring food security and generating non-oil export revenues. However, growing water scarcity, climatic constraints, and global market instability have posed serious challenges to the sustainability of agricultural exports. Policies restricting exports of water-intensive crops-often implemented without considering economic water productivity-have further distorted the export structure and reduced overall efficiency. This study aims to identify the optimal export pattern of low water-consuming agricultural products in Iran while examining the dynamics and stability of target export markets. The central research question is whether Iran can restructure its agricultural exports in a way that either (a) maximizes export revenue for a given level of virtual water consumption, or (b) minimizes virtual water consumption while maintaining the same export earnings. To address this, a hybrid analytical framework combining the Markov chain model and mathematical programming was developed.

Materials and Methods

The research consisted of two complementary stages:

Stage one: Market Stability Analysis (Markov Chain Model): The Markov model was applied to analyze the persistence and transition probabilities of Iran's major agricultural exports across key destination markets during 2013–2022. This probabilistic approach enabled the identification of market stability, volatility, and dependence patterns for products such as saffron, pistachios, dates, apples, raisins, figs, almonds, and watermelons.

Stage two: Export Optimization (Mathematical Programming): Two models were formulated:

Model a: Maximize export revenue subject to a constraint on virtual water consumption.

Model b: Minimize virtual water consumption subject to a constraint on export earnings.

These models were solved under different water and income scenarios to explore the trade-offs between economic performance and water sustainability. Scenario analyses tested the impacts of stricter or more relaxed water constraints on the optimal export composition.

Results and Discussion

1. Market Stability and Dynamics

The Markov chain analysis revealed that Iran's agricultural exports are highly unstable and geographically concentrated, relying heavily on a few volatile markets. Generally, smaller markets showed greater stability, whereas larger markets were more volatile.

Saffron: Afghanistan, with only a 5% share, showed the highest stability (57%), while Spain-despite a large



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

<https://doi.org/10.22067/jead.2026.96305.1401>

share-was highly unstable.

Pistachios: China and “other destinations” had the highest stability (27%), whereas the UAE, which absorbed most exports, was volatile.

Dates: India was the most stable destination (73%) with a moderate share.

Apples: Iraq was both the dominant and most stable destination (44% share, 24% stability).

Similar trends were observed for raisins, figs, almonds, and watermelons, indicating the need for market diversification and strategic reorientation toward more stable destinations.

2. Optimal Export Composition

The optimization results demonstrated a clear trade-off between water use and income. When stricter water constraints were applied, low water-consuming crops (e.g., saffron, figs, and almonds) gained larger shares in the optimal export mix. Conversely, under relaxed constraints, water-intensive crops (e.g., watermelons, apples) expanded, yielding higher revenues but lower water productivity.

Among all crops, saffron emerged as the most efficient in both water and economic terms, consistently appearing as a core component in all optimal scenarios. Quantitatively, restructuring the export composition could reduce virtual water use by 5-40% without lowering export income, or increase export revenue by 5-55% while maintaining current water consumption.

These findings underscore the potential of aligning trade policies with water resource management to enhance both economic and environmental outcomes.

3. Policy Implications

The results indicate that export earnings could increase by approximately 5–55% while maintaining water consumption at its current level in the export pattern. Considering these findings, export incentives for products that the optimal pattern recommends reducing could provide an effective policy instrument.

The findings also call for a shift in the basis for classifying agricultural products from physical water intensity to economic water productivity. Even under a virtual-water minimization objective, the export of some physically water-intensive products may remain economically justified when they generate high economic returns per unit of water. Export policy should also account for demand conditions in individual destination markets. Accordingly, agricultural export policies should adopt a destination-oriented approach, with decisions to restrict or promote the export of each product informed by economic water indicators, the importance of the destination market, demand in the target market, and the strategic contribution of each market-product combination to national foreign-exchange earnings.

Conclusion

Integrating Markov chain analysis with optimization modeling provides a practical framework for sustainable export policy design. The results indicate that Iran’s current export strategy compromises both market stability and water efficiency. Strategic market diversification and prioritization of water-efficient crops can simultaneously enhance export performance and reduce water stress. This study suggests that Iran can save up to 40% of virtual water without reducing export income or increase export earnings by up to 55% while maintaining current water use. These findings align with Article 11, Clause 2 of Iran’s Seventh Development Plan, and emphasizing incentives for water-efficient agricultural exports. Future research should incorporate climatic variability, global price fluctuations, and partner-country trade policies to refine the model further, ultimately promoting alignment between agricultural trade strategy and sustainable water management.

Keywords: Exports, Foreign exchange earnings, Instability, Low water-consuming products, Virtual water

JEL Classification: Q17, Q25, F14, Q56, C61



مقاله پژوهشی

جلد ۴۰، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، ص. ۲۹۱-۳۱۷

مطالعه ترکیب بهینه پایدار محصولات کشاورزی منتخب کم‌آب‌بر ایران

ریحانه الهوردی^۱ - حامد رفیعی^{۱*} - اسماعیل پیش‌بهار^۱ - سعید یزدانی^۱ - مهدی پندار^۱ - عبدالمجید لیاقت^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

چکیده

محدودیت شدید منابع آبی و ناپایداری بازارهای جهانی، ضرورت بازنگری در الگوی صادرات محصولات کشاورزی را دوچندان کرده است. در سال‌های اخیر، سیاست‌های محدودکننده صادرات محصولات آب‌بر بدون توجه به بازده اقتصادی آب، موجب فاصله ترکیب صادراتی از حالت بهینه شده است. این پژوهش با هدف شناسایی الگوی بهینه صادرات محصولات کم‌آب‌بر ایران و ارزیابی پایداری بازارهای هدف، با استفاده از دو رویکرد مکمل انجام شده است. هدف این پژوهش، بررسی امکان ارتقای ترکیب صادراتی محصولات کشاورزی منتخب به حالتی بهینه است؛ به‌طوری‌که درآمد حاصل از صادرات با همان میزان مصرف آب مجازی بیشینه و یا مصرف آب مجازی با همان میزان ارزآوری حداقل شود. در این راستا، ابتدا با استفاده از الگوی زنجیره مارکوف، پایداری صادرات محصولات عمده کشاورزی ایران در بازارهای هدف طی دوره‌ی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۲ تحلیل شد. سپس دو الگوی برنامه‌ریزی ریاضی جداگانه تدوین گردید. الگوی نخست با هدف بیشینه‌سازی درآمد صادراتی تحت قید مصرف آب و الگوی دوم با هدف کمینه‌سازی مصرف آب مجازی تحت قید درآمد صادراتی برآورد شد. نتایج نشان داد محصولات زعفران، با توجه به کارایی اقتصادی بالای آب و ارزش افزوده صادراتی، گزینه‌های مناسبی برای تمرکز صادرات هستند. همچنین، بازارهایی مانند افغانستان در صادرات زعفران بیش‌ترین پایداری را داشتند، در حالی که برخی بازارهای بزرگ مانند اسپانیا و امارات ناپایدارتر بودند. بر اساس نتایج الگوهای بهینه در الگوی صادراتی ایران، بدون کاهش درآمدهای ارزی و با چالش صحیح بازارهای هدف و نسبت مناسب صادرات محصولات می‌توان در حدود ۵ تا ۴۰ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی نمود. از طرفی، نتایج بر امکان افزایش درآمد حاصل از صادرات در بازه ۵ تا ۵۵ درصدی با الزام تثبیت مصرف آب در الگو دلالت دارد. بنابراین، باتوجه به نتایج و با استناد بر جز دوم ماده ۱۱ قانون برنامه هفتم توسعه، درنظرگیری مشوق‌های صادراتی در این زمینه راه‌گشا خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: آب مجازی، ارزآوری، صادرات، کم‌آب‌بر، ناپایداری

طبقه‌بندی JEL: Q17, Q25, F14, Q56, C61

مقدمه

محصولات، به‌کارگیری فناوری‌های نوین و تحرک بخشی به زنجیره ارزش کشاورزی را به‌دنبال داشته باشد (Pishbahar et al., 2021). باتوجه به موارد گفته شده در خصوص اهمیت صادرات محصولات کشاورزی برای کشور، لازم است تا وضعیت صادرات این محصولات مورد بررسی قرار گیرد. نمودار ۱، میزان صادرات محصولات کشاورزی ایران را در سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۲ بر حسب هزار تن نشان می‌دهد. براساس این نمودار و به‌طور کلی، صادرات محصولات کشاورزی ایران دارای روند افزایشی؛ اما همراه با نوسان و ناپایداری در سال‌های مذکور بوده است.

برای درک بهتر این ناپایداری در صادرات محصولات کشاورزی به محصولات عمده (اصلی) به لحاظ میزان سهم از ارزش صادرات کشاورزی ایران پرداخته شده است. میانگین سهم این محصولات از

بخش کشاورزی یکی از پایه‌های اصلی اقتصاد در کشورهای کمتر توسعه‌یافته و در حال توسعه، از جمله ایران، به شمار می‌آید. این بخش، به‌واسطه نقش کلیدی خود در افزایش صادرات غیرنفتی و ارزآوری پایدار، جایگاهی مهم در فرآیند توسعه اقتصادی کشور دارد (Khalilian & Farhadi, 2002). توسعه صادرات کشاورزی، علاوه بر آثار مثبت اقتصادی می‌تواند، ارتقاء بهره‌وری، افزایش کیفیت

۱- گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

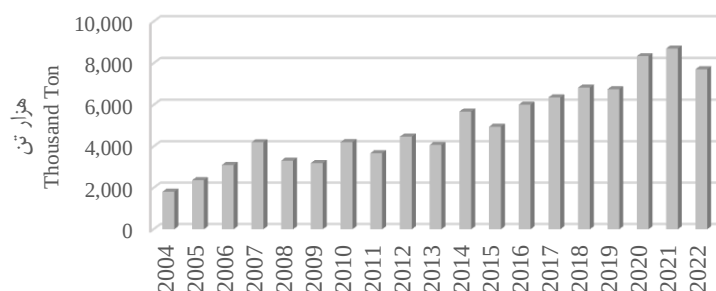
(*)- نویسنده مسئول: Email: Hamedrafiee@ut.ac.ir

۲- گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

<https://doi.org/10.22067/jead.2026.96305.1401>

زعفران، خرما، سیب، کشمش، گوجه‌فرنگی، هندوانه، انجیر و بادام بوده که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همانطور که در جدول مذکور نشان داده شده، بیش‌ترین درآمد حاصل از صادرات در بخش کشاورزی، به‌ترتیب از صادرات پسته، زعفران و خرما حاصل شده است.

کل ارزش صادرات بخش کشاورزی ایران به همراه متوسط درآمد صادرات سالانه به میلیون دلار در **جدول ۱** در دوره زمانی (۲۰۲۲-۲۰۱۳) نشان داده شده است. این محصولات در مجموع با ۴۲ درصد سهم و به‌طور جداگانه با سهم بالای ۰/۵ درصد از کل ارزش صادرات بخش کشاورزی (شامل خام و فرآوری شده)، مهم‌ترین محصولات خام صادراتی کشاورزی هستند. محصولات مذکور، شامل پسته،



نمودار ۱- میزان صادرات محصولات کشاورزی ایران در دوره زمانی (۲۰۲۲-۲۰۰۴) (واحد: هزار تن) (مأخذ: ITC (۲۰۲۵))

Figure 1- Iran's agricultural export volumes (2004-2022), in thousand tonnes

جدول ۱- سهم هر یک از محصولات اصلی از کل ارزش صادرات بخش کشاورزی ایران و متوسط صادرات سالانه به‌طور میانگین در دوره زمانی (۲۰۲۲-۲۰۱۳)

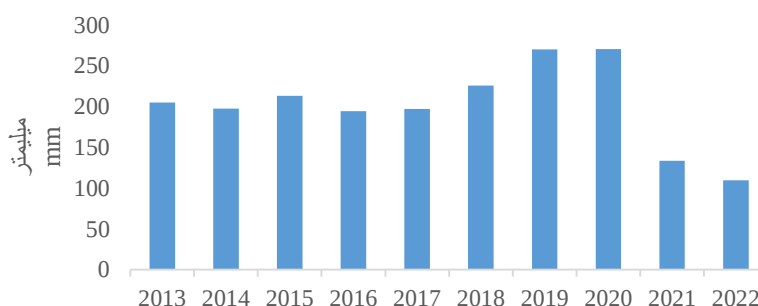
Table 1- The proportion of the main agricultural product in Iran's total agricultural export value and the mean annual exports over the period 2013-2022

محصولات Products	کد تعرفه HS-code	متوسط صادرات سالانه Average annual export value (unit: million USD)	سهم از ارزش صادرات بخش کشاورزی Share in the total value of agricultural exports (unit: percent)
پسته Pistachio	080251(25)	745	17.6
زعفران Saffron	09102020	359	4.5
خرما Date	080410	255	4.3
سیب Apple	080810	220	4
کشمش Dried Grapes	080620	215	4
گوجه‌فرنگی Tomato	070200	225	3.8
هندوانه Watermelon	080711	163	2.7
انجیر Fig	080420	35	0.6
بادام Almond	080212	26	0.5
سایر Others	-	-	58

مأخذ: ITC (۲۰۲۵)

Source: ITC, 2025

را به شدت تهدید می‌کند (Rasheed et al., 2022). این تنش در ایران نیز همانند سایر نقاط جهان وجود دارد، به‌طوری‌که باتوجه به نمودار ۲، در دهه اخیر غیر از سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰، مقدار بارش سالیانه در ایران نسبت به میانگین ۵۰ ساله (۲۵۰ میلی‌متر در سال) آن کمتر بوده است. میزان بارش سالیانه در سال ۲۰۲۱ نسبت به سال‌های پیشین، کاهش شدیدی داشته که گواه بر تغییرات اقلیمی و وقوع پدیده خشکسالی است (Babaeian et al., 2024).



نمودار ۲- میزان بارش سالیانه در ایران (۲۰۲۲-۲۰۱۳) (مأخذ: بانک جهانی، ۲۰۲۴)
Figure 2- Annual precipitation in Iran (2013–2022) (Source: World Bank, 2024)

این رویکرد در نگاه اول، مبتنی بر ملاحظات محیط‌زیستی و ضرورت مدیریت منابع آب به نظر می‌رسد؛ اما مسئله آب‌بر بودن یک محصول صرفاً به متوسط مصرف آب به ازای واحد سطح (نیاز آبی) محدود نمی‌شود. اصولاً تعریف «آب‌بر» بودن یک محصول صرفاً بر اساس میزان آب مورد نیاز در هکتار نمی‌تواند معیار کاملی باشد؛ چراکه کل آب مصرفی یک محصول نه تنها به آب مورد نیاز در هر هکتار، بلکه به سطح زیرکشت اختصاص یافته به آن محصول نیز بستگی دارد. علاوه بر این، حذف یک محصول از سبد صادرات، تنها به دلیل آب‌بر بودن آن منطقی نیست، زیرا برخی محصولات آب‌بر ممکن است درآمد صادراتی قابل توجهی به ازای هر واحد آب مصرفی ایجاد کنند. به عبارت دیگر، ارزش اقتصادی آب مصرف‌شده در تولید و صادرات این محصولات می‌تواند، معیاری مناسب‌تری برای تصمیم‌گیری باشد. برای بررسی این موضوع، از داده‌های جدول ۲ که مربوط به نه قلم کالای اصلی صادراتی کشاورزی ایران در سال ۲۰۲۲ است، جهت تحلیل دقیق‌تر این داده‌ها در راستای سیاست‌گذاری بهینه‌تر استفاده می‌شود.

برای درک بهتر عبارت «آب‌بر بودن»، ابتدا باید معیاری جامع‌تر از آب‌بر بودن با شاخص فیزیکی تعریف نمود. یکی از بهترین معیارها، محاسبه درآمد صادراتی به ازای هر متر مکعب آب مصرفی است. این معیار نشان می‌دهد که ارزش اقتصادی معادل با آب مصرفی هر محصول چه میزان است. همچنین این معیار، از تقسیم ارزش صادرات (هزار دلار) بر کل آب مصرفی (متر مکعب) به‌دست می‌آید که در

باتوجه به مطالب مذکور و در شرایط کنونی که تحریم‌های اقتصادی، نوسانات ارزی، محدودیت منابع آبی و چالش‌های امنیت غذایی کشور را تهدید می‌کند، توسعه صادرات هدفمند و پایدار محصولات کشاورزی به‌ویژه محصولات کم‌آب‌بر، یک ضرورت راهبردی به شمار می‌رود.

در ارتباط با محدودیت آب در کشور، تنش خشکی به‌عنوان نتیجه‌ای از بحران آب، رشد و تولید محصولات و در نهایت صادرات

در سال‌های اخیر، با توجه به افزایش فشارهای ناشی از کم‌آبی و خشکسالی (Ministry of Agricultural Jihad, 2024)، دولت ایران، سیاست‌هایی را با هدف محدودیت صادرات محصولات کشاورزی آب‌بر اعمال کرده که یکی از این سیاست‌ها، اعمال عوارض صادراتی آب مجازی بوده که در بخشنامه گمرک ایران با موضوع «فهرست محصولات کشاورزی و غذایی آب‌بر مشمول نیم درصد عوارض صادراتی آب مجازی» عنوان شده است. محصولات ذکر شده در این بخشنامه که مشمول تعرفه شده‌اند، عبارت‌اند از: پیاز، گوجه زراعی، سیب‌زمینی، خیار، هندوانه، خربزه، طالبی، گرمک، ملون، فلفل، کدو، بادمجان، هویج، شلغم، کنجد، لوبیا، ماش، عدس، آفتابگردان، توتون، ذرت دانه‌ای، ذرت علوفه‌ای، سورگوم، کلزا، سویا، چغندر قند، پنبه، برنج، نیشکر، زعفران، یونجه، گوشت قرمز، تخم مرغ و شیرخشک (IRICA, 2023).

در همین راستا، بررسی اسناد بالادستی در زمینه مصرف آب محصولات کشاورزی صادراتی ایران حاکی از آن است که مطابق با بند «ه» تبصره هشت قانون بودجه سال ۱۴۰۲ کل کشور، به‌منظور حفظ منابع آبی کشور، وزارت امور اقتصادی و دارایی (گمرک جمهوری اسلامی ایران) موظف است، نیم درصد از ارزش محصولات صادراتی کشاورزی و غذایی آب‌بر را اخذ و درآمد حاصل از عوارض فوق را به ردیف درآمدی مربوط به الگوی کشت واریز نماید. بنابراین، موضوع آب را می‌توان یکی از محورهای اصلی این لایحه نیز قلمداد نمود.

ستون نهایی جدول ۲ نمایش داده شده است. باتوجه به این جدول، این معیار نشان می‌دهد که به‌طور مثال، زعفران با $۰/۴۶$ هزار دلار به ازای هر متر مکعب آب، جز کارآمدترین محصولات از نظر اقتصادی است، در حالی که بادام با $۰/۰۲$ هزار دلار از کم‌ترین رتبه برخوردار است. مقایسه این نتایج با میزان آب مورد نیاز در هکتار و کل آب مصرفی نشان می‌دهد که انگور با نیاز آبی $۱۰,۷۴۰$ متر مکعب آب در هکتار و رتبه دوم از نظر سطح زیرکشت ($۲۷۷,۹۵۵$ هکتار)، بیش‌ترین مصرف آب را داشته؛ اما از کارایی اقتصادی بسیار کمی ($۰/۰۶$ هزار دلار/متر مکعب) برخوردار است. همچنین، خرما با $۱۵,۶۶۹$ متر مکعب آب در هکتار، دومین رتبه از نظر نیاز آبی را دارد؛ اما به‌دلیل سطح زیر کشت نسبتاً کم ($۳۶,۶۷۶$ هکتار)، کل آب مصرفی کم (۵۷۴ میلیون متر مکعب) و درآمد بالای صادراتی (۲۸۹ میلیون دلار)، در رتبه دوم از نظر نیاز آبی قرار می‌گیرد و بیش‌ترین کارایی اقتصادی ($۰/۵$ هزار دلار/متر مکعب) را دارد. در مقابل، پسته با آب مورد نیاز کمتر در هکتار ($۴,۳۰۰$ متر مکعب)، به‌دلیل سطح زیر کشت بسیار بالا ($۵۵۹,۷۴۹$ هکتار)، کل آب مصرفی بسیاری ($۲/۴$ میلیارد متر مکعب) دارد؛ اما همچنان با ارزش صادراتی ۴۰۱ میلیون دلار، کارایی اقتصادی متوسطی ($۰/۱۷$ هزار دلار/متر مکعب) را نشان می‌دهد. این داده‌ها نیز نشان می‌دهند که تعریف آب‌بر بودن تنها بر اساس آب مورد نیاز در هکتار ناکافی است. باتوجه به بخشنامه «گمرک جمهوری اسلامی ایران با موضوع فهرست محصولات کشاورزی و غذایی آب‌بر مشمول نیم درصد عوارض صادراتی آب مجازی»، در میان اقلام مذکور، نام «زعفران» نیز در فهرست محصولات آب‌بر و مشمول عوارض آب مجازی قرار گرفته که این امر، منجر به کاهش انگیزه صادرات زعفران و کاهش سهم بازاری ایران در عرصه صادرات جهانی این محصول ارزشمند و ارزآور خواهد شد (گمرک ایران، ۱۴۰۲). همچنین بر اساس این جدول، زعفران با نیاز آبی $۴,۷۶۹$ متر مکعب آب در هکتار، آب‌بر به نظر می‌رسد؛ اما کل آب مصرفی زعفران ۵۳۵ میلیون متر مکعب بوده که از این نظر دارای رتبه هشت در مقایسه با سایر محصولات است. علاوه بر این، زعفران با قیمت صادراتی ۱۱۳۴ دلار بر کیلوگرم و ارزش صادراتی ۲۴۷ میلیون دلار، دومین رتبه را در کارایی اقتصادی ($۰/۴۶$ هزار دلار/متر مکعب) دارد. این تفاوت نشان می‌دهد که سیاست‌های صادراتی نباید صرفاً بر اساس معیار فیزیکی طراحی شوند، بلکه باید کل آب مصرفی و بازده اقتصادی در نظر گرفته شود.

با توجه به بحران آب در ایران، طراحی الگوی محصولات کم آب‌بر صادراتی ضروری است؛ اما این الگو باید بر اساس کارایی اقتصادی و پایداری منابع آبی تعریف شود. محصولاتی مانند زعفران و خرما که درآمد بالایی به ازای هر مترمکعب آب ($۰/۴۶$ و $۰/۵۰$ هزار دلار) ایجاد می‌کنند، می‌توانند به‌عنوان گزینه‌های راهبردی در اولویت قرار گیرند؛ حتی اگر متوسط مصرف آب به ازای واحد سطح آن‌ها بالا

باشد. در واقع، آب‌بر بودن لزوماً به معنای ناکارآمدی اقتصادی نیست، بلکه می‌تواند با درآمد بالا جبران شود. در مقابل، محصولاتی مانند کشمش با کارایی پایین و کل آب مصرفی بالا، ممکن است نیاز به بازنگری در الگوی کشت و صادرات داشته باشند؛ چراکه منابع آبی را به شکلی ناکارآمد مصرف می‌کنند.

موارد ذکر شده، لزوم تفکیک صحیح محصولات به لحاظ مفهوم اقتصادی نیاز آبی و سپس به‌کارگیری سیاست‌های بازاریابی مناسب جهت در نظرگیری الگوی پایدار و مناسب برای صادرات محصولات کشاورزی که صادرات آن‌ها به منزله خروج آب به‌عنوان یک منبع مهم حیاتی از کشور است را فراهم می‌آورد. همچنین، لازم است، پرداختن به الگوی محصولات کم آب‌بر صادراتی با در نظر گرفتن تعادل بین پایداری زیست‌محیطی و رشد اقتصادی، در دستور کار قرار گیرد که این امر مستلزم سیاست‌گذاری مبتنی بر داده و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین کشاورزی است.

لازم به ذکر است، باتوجه به این نکته که ارقام این جدول به لحاظ نوسان موجود در ساختار صادرات محصولات ممکن است در طول زمان تغییر نماید، مطالعه یک ترکیب بهینه از این محصولات که بیش‌ترین ارزآوری و کم‌ترین میزان آب‌بری را داشته باشند، امری ضروری است.

درحقیقت، با توجه به محدودیت منابع آبی در کشور لازم است، در استفاده پایدار از آب به عنوان منبع طبیعی با ارزش دقت نمود. در شرایطی که کشور با بحران آب رو به رو است، چنانچه اهتمام لازم در راستای انتخاب الگوی صادراتی پایدار برای محصولات عمده کشاورزی صورت نگیرد، صادرات غیر نفتی ایران مستقیماً تحت تأثیر پیامدهای تنش خشکی قرار خواهد گرفت.

پایداری منابع طبیعی به‌عنوان رویکردی برای توسعه؛ امکان برآورده شدن نیازهای نسل حاضر بدون به خطر انداختن قابلیت نسل‌های آینده را ممکن می‌سازد. این رویکرد به حفظ منابع طبیعی، تنوع زیستی، کاهش تأثیرات منفی بر محیط زیست، بهبود کیفیت زندگی انسان‌ها و توسعه اقتصاد پایدار کمک می‌کند. به‌طور ساده پایداری محیط‌زیست به معنای تعادل بین توسعه اقتصادی، پایداری اجتماعی و حفظ محیط‌زیست است (Javaheri et al., 2024).

از طرفی بی‌ثباتی در اقتصاد از جمله ناپایداری سهم ایران در بازارهای هدف اصلی محصولات عمده می‌تواند منجر به هدررفت آب به کار رفته در تولید و صادرات این محصولات شود. سهم ایران از صادرات جهانی برخی از محصولات عمده از جمله (پسته، زعفران، خرما، کشمش، گوجه‌فرنگی و هندوانه) در دهه اخیر نشان می‌دهد که ناپایداری در سهم ایران از بازارهای اصلی صادرات اقلام عمده، کاملاً مشهود است و این ناپایداری منجر به بی‌ثباتی و کاهش درآمد صادراتی و نهایتاً تضییع آب خواهد شد (ITC, 2025).

جدول ۲- مصرف آب و صادرات نه محصول کشاورزی ایران در ۲۰۲۲

Table 2- Water consumption and export performance of nine major Iranian agricultural products in 2022

نام محصول Product name	متوسط مصرف آب به ازای واحد سطح (m ³ /ha) Average water consumption per unit area	کل سطح زیر کشت (ha) Total cultivated area (ha)	کل آب مصرفی بر اساس سطح زیر کشت (m ³) Total water consumption based on cultivated area (m ³)	متوسط مصرف آب به ازای واحد تولید (m ³ /tonne) Average water consumption per unit of production (m ³ /tonne)	تولید کل (ton) Total production (ton)	کل آب مصرفی بر اساس تولید کل (m ³) Total water consumption based on total production (m ³)	ارزش صادرات (هزار دلار) Export value (thousand USD)	مقدار صادرات (ton) Export quantity (ton)	قیمت صادرات (دلار بر کیلوگرم) Export price (USD/kg)	ارزش صادرات به کل آب مصرفی (هزار دلار/متر مکعب) Export value to total water consumption (thousand USD/m ³)
پسته Pistachio	4300 (9)	559749 (1)	2406920700 (2)	8377 (2)	287339 (6)	2406920700 (2)	401209 (1)	65866 (6)	6.09 (3)	0.17 (5)
گوجه‌فرنگی Tomato	7221 (3)	103303 (6)	745950963 (5)	148 (9)	5049910 (1)	745950963 (5)	321232 (2)	691919 (3)	0.46 (7)	0.43 (3)
خرما Date	15669 (1)	36676 (9)	574676244 (7)	360 (6)	1596790 (4)	574676244 (7)	289545 (3)	339569 (4)	0.85 (6)	0.50 (1)
زعفران Saffron	4769 (8)	112307 (5)	535592083 (8)	1312726 (1)	408 (9)	535592083 (8)	246605 (4)	217 (9)	1134 (1)	0.46 (2)
هندوانه Watermelon	7180 (4)	84168 (7)	604326240 (6)	213 (8)	2839775 (3)	604326240 (6)	201872 (5)	927962 (1)	0.22 (9)	0.33 (4)
سیب درختی Apple	5902 (6)	236641 (3)	1396655182 (3)	351 (7)	3982157 (2)	1396655182 (3)	199798 (6)	722795 (2)	0.28 (8)	0.14 (7)
کشمش Dried Grapes	10740 (2)	277955 (2)	2985236700 (1)	3280 (4)	910190 (5)	2985236700 (1)	171787 (7)	107878 (5)	1.60 (5)	0.06 (8)
انجیر Fig	5808 (7)	44473 (8)	258299184 (9)	2492 (5)	103642 (8)	258299184 (9)	42009 (8)	14055 (7)	2.99 (4)	0.16 (6)
بادام درختی Almond	5903 (5)	144936 (4)	855557208 (4)	6280 (3)	136239 (7)	855557208 (4)	17218 (9)	1932 (8)	8.91 (2)	0.02 (9)

اعداد داخل پرانتز رتبه محصولات می‌باشد. رتبه‌ها از ۱ (بالاترین مقدار یا مثبت‌ترین در اختلاف) تا ۹ (پایین‌ترین مقدار یا منفی‌ترین در اختلاف) در هر ستون محاسبه شده‌اند. The numbers in parentheses are the product rankings. The rankings range from 1 (highest value or most positive difference) to 9 (lowest value or most negative difference) in each column.

ارزش و مقدار صادرات پسته: مجموع ارقام کدهای تعرفه ۰۸۰۲۵۱ و ۰۸۰۲۵۲، قیمت صادرات پسته: میانگین ارقام کدهای تعرفه ۰۸۰۲۵۱ و ۰۸۰۲۵۲. Value and quantity of pistachio exports: Total figures of tariff codes 080251 and 080252, pistachio export price: Average figures of tariff codes 080251 and 080252.

ضریب ۴ برای کشمش در قسمت تولید اعمال شد: زیرا به طور متوسط از هر ۴ کیلو انگور یک کیلو کشمش حاصل می‌شود. A factor of 4 was applied to raisins in the production section because, on average, one kilo of raisins is produced from every 4 kilos of grapes.

کل آب مصرفی بر اساس سطح زیر کشت: حاصل ضرب متوسط مصرف آب به ازای واحد سطح در کل سطح زیر کشت. Total water consumption based on cultivated area: The product of average water consumption per unit area by the total cultivated area.

کل آب مصرفی بر اساس تولید کل: حاصل ضرب متوسط مصرف آب به ازای واحد تولید در تولید کل. Total water consumption based on total production: The product of average water consumption per unit of production by total production.

قیمت صادرات: حاصل تقسیم ارزش صادرات (هزار دلار) بر مقدار صادرات (تن). Export price: The result of dividing the export value (thousand dollars) by the export quantity (tons).

ارزش صادرات به کل آب مصرفی: حاصل تقسیم ارزش صادرات (دلار) بر کل آب مصرفی (m³) برای هر روش (سطح زیر کشت یا تولید کل). Export value to total water consumption: The result of dividing export value (dollars) by total water consumption (m³) for each method (area under cultivation or total production).

Area under cultivation (column 3): مقادیر تقریبی برای خرما، زعفران، سیب درختی، انگور، و بادام درختی. مقادیر تقریبی ممکن است با واقعیت‌های محلی متفاوت باشند. (ستون ۳): Approximate values for dates, saffron, apple, grapes, and almond (may differ from local realities).

تجارت آب بوده، از اهمیت بسزایی برخوردار است. پژوهش حاضر با استفاده از تحلیل زنجیره مارکوف، برای نخستین بار در ایران، سهم بازار و مقدار صادرات نه محصول عمده صادراتی را به تفکیک مقصدهای صادراتی، طی دو سال متوالی (۲۰۲۳ و ۲۰۲۴) پیش‌بینی

بنابراین، با توجه به بحران منابع آب در ایران و ضرورت تمرکز بر محصولات کشاورزی کم‌آب‌بر، مطالعه دقیق ساختار صادراتی محصولات، شناسایی بازارهای پایدار (کم‌ترین نوسان واردات از ایران) صادراتی و جهت‌گیری مناسب در تجارت این محصولات که به نوعی

می‌نماید. این مطالعه، ابزاری کارآمد برای شناسایی مقاصد پایدار و تعیین جهت‌گیری آینده صادرات این محصولات ارائه می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند در بهینه‌سازی ترکیب محصولات صادراتی، افزایش تاب‌آوری تجارت کشاورزی و ارتقای سیاست‌گذاری‌های صادراتی با توجه به بحران آب در کشور مورد استفاده قرار گیرد.

پیشینه پژوهش

مطالعات مرتبط با پیش‌بینی صادرات

الگوی زنجیره مارکوف نخستین بار توسط آندری مارکوف (Andrey Markov, 1906) برای الگوسازی احتمالاتی معرفی شد و به تدریج در حوزه‌های اقتصادی از جمله توزیع دستمزد (Solow, 1951)، تحرک اجتماعی (Prais, 1955) و توزیع اندازه بنگاه‌ها (Adelman, 1958) به کار رفت. از دهه ۱۹۶۰، این روش در تجارت بین‌الملل نیز کاربرد یافت؛ به‌طوری‌که تیل (Theil, 1961) در تحلیل سهم بازار و تلسر (Telser, 1962) در بررسی وفاداری برند از آن استفاده کردند. در ادامه، جرت و دنت (Jarrett, 1966) در صنعت نساجی و دنت (Dent, 1967) در صادرات پشم استرالیا این الگو را به کار گرفتند. نخستین استفاده صریح از آن در کشاورزی به مطالعه فالوشی (Falusi, 1976) برای پیش‌بینی تقاضای نهاده‌های کشاورزی بازمی‌گردد و از دهه ۱۹۷۰ این روش در تحلیل تغییر کاربری اراضی، انتخاب محصول و شبیه‌سازی بازارهای کشاورزی گسترش یافت. مطالعات بعدی شامل وینا و همکاران (Veena, 1944) درباره پویایی صادرات قهوه هند (۱۹۹۰-۱۹۵۰) بود که رشد چشمگیر تولید و تغییر مقصدهای صادراتی را نشان داد. مورتی و سوبراهمانیام (Murthy & Subrahmanyam, 1999) نیز با تحلیل صادرات پیاز هند در دهه ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۵ بازارهای باثباتی چون مالزی، امارات و سنگاپور را شناسایی کردند. نتایج این پژوهش‌ها بر اهمیت شناسایی بازارهای پایدار، انطباق با تغییرات تقاضا و بهبود کیفیت و بهره‌وری برای تقویت صادرات محصولات کشاورزی تأکید دارند.

در دهه‌های اخیر نیز پژوهش‌های متعددی به‌کارگیری زنجیره مارکوف در تحلیل صادرات پایدار و تولید محصولات کشاورزی را بررسی کرده‌اند. در بعد بین‌المللی، گانش‌کومار و همکاران (Ganeshkumar et al., 2016)، در تحلیل صادرات انار هند طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ بیان نمودند که امارات، بنگلادش و نپال بازارهای باثباتی هستند که از ظرفیت تقویت روابط تجاری برخوردارند. سونیل و همکاران (Sunil & Singh, 2021) با بررسی صادرات بادام‌زمینی هند نشان دادند که مالزی و روسیه پایدارترین بازارها و اندونزی و تایلند ناپایدارترین مقصدها هستند. در چین، ژو و همکاران (Xu et al., 2023) با ترکیب الگوریتم‌های یادگیری ماشین

(SVM)^۱ و ARIMA^۲ نشان دادند که دقت پیش‌بینی صادرات با ادغام روش‌های آماری و داده‌کاوی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. شاهو و همکاران (Sahu et al., 2024) با ترکیب الگوهای ARIMA و زنجیره مارکوف برای تحلیل تولید و صادرات سیب‌زمینی نتیجه گرفتند که اگرچه تولید رشد داشته؛ اما بهره‌وری پایین بوده و پیش‌بینی می‌شود واردات کشورهای عمده به‌جز عربستان و عمان کاهش یابد. در مطالعات داخلی، امیری و بیگلری (Amiri & Biglari, 2014) کارایی الگوی مارکوف را در پیش‌بینی شاخص صنایع داو جونز^۳ نشان داده و کاربرد آن را در تحلیل روندهای تصادفی کشاورزی نیز قابل تعمیم دانستند. پیش‌بهار و همکاران (Pishbahar et al., 2021) با استفاده از اقتصادسنجی و پویایی سیستم برای بخش کشاورزی ایران (۱۳۹۶-۱۳۵۷) پیش‌بینی کردند که در افق ۲۰ ساله، ارزش صادرات، واردات و عرضه کل افزایش می‌یابد و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های کارآمد ضروری است.

مطالعات مرتبط با ردپای آب^۴

در راستای تبیین اهمیت منابع آب در برنامه‌ریزی اقتصادی و تجاری، آلن (Allan, 1997) برای اولین بار در مقاله خود با معرفی مفهوم «آب مجازی»^۵ بر چالش‌های فزاینده کم‌آبی تأکید نمود. این مطالعه، با تأکید بر نقش آب به‌عنوان یک منبع استراتژیک، زمینه‌ساز توسعه نظریه‌هایی چون تجارت آب مجازی و مدیریت پایدار منابع شده است. اولین مطالعه‌ای که به‌طور رسمی مفهوم رد پای آب را در تجارت معرفی و تبیین کرد، توسط هوکسترا (Hoekstra, 2003) ارائه شد. در این گزارش، هوکسترا برای نخستین‌بار مفهوم «آب مجازی» و «رد پای آب» را در چارچوبی علمی تعریف کرد. در زمینه تجارت آب مجازی، مطالعات بین‌المللی از جمله پژوهش کنار و همکاران (Konar et al., 2011) با به‌کارگیری الگوی شبکه‌های پیچیده نشان داد که تجارت جهانی آب مجازی ماهیتی سلسله‌مراتبی دارد و کشورهایی با حجم بالای تجارت بیشتر با یکدیگر در ارتباط هستند. تامه و همکاران (Tamea et al., 2014) با الگوی جاذبه^۶ نشان دادند که جمعیت، تولید ناخالص داخلی و فاصله جغرافیایی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تجارت آب مجازی‌اند. مکانن و هوکسترا (Mekonnen & Hoekstra, 2020) نتیجه‌گیری نمودند که ۵۷ درصد از ردپای آب آبی جهانی ناپایدار است و بیش‌تر به تولید گندم، برنج، پنبه، نیشکر و علوفه مربوط می‌شود. همچنین، کشورهای خاورمیانه بیش‌ترین

1- Support Vector Machine

2- Autoregressive Integrated Moving Average

3- Dow Jones Industrial Average

4- Water Footprint

5- Virtual Water

6- Gravity Model

بازه زمانی در یکی از چند وضعیت صادراتی (صادرات به هر مقصد) قرار دارد. تخمین این الگو، نیازمند محاسبه ماتریس احتمال انتقال بین وضعیت‌های صادراتی در طول زمان است که تنها بر پایه داده‌های خود صادرات در طول دوره مورد بررسی انجام می‌شود (Ganeshkumar et al., 2016).

الگوی تحلیل زنجیره مارکوف، با فرض ساده‌سازی شده‌ای از حافظه کوتاه‌مدت در سیستم، در تحلیل ساختار بازار و پویایی آن کاربرد دارد. با این حال، یکی از محدودیت‌های این روش، عدم در نظر گرفتن عوامل ساختاری، سیاستی و اقتصادی خارج از سیستم صادرات است که می‌تواند بر رفتار بازار اثرگذار باشد (Ganeshkumar et al., 2016).

مبانی نظری الگوی تحلیل زنجیره مارکوف

زنجیره مارکوف، یک فرآیند تصادفی گسسته در زمان است که در آن، سیستم می‌تواند در هر زمان معین در یکی از چندین حالت ممکن باشد و احتمال انتقال از حالتی به حالت دیگر به وسیله یک ماتریس احتمال انتقال^۲ تعیین می‌شود. در تکنیک زنجیره مرتبه اول مارکوف، فرض بر آن است که احتمال حضور در یک حالت خاص در زمان t تنها به حالت سیستم در زمان $t-1$ وابسته بوده و این رابطه برای تمام زمان‌ها ثابت است (Ganeshkumar et al., 1970; al., 2016). فرض اصلی تکنیک زنجیره اول مارکوف این است که میانگین صادرات در یک دوره (Ex_{jt}) فقط به صادرات دوره قبلی وابسته است و این رابطه در طول دوره‌ها ثابت باقی می‌ماند (Mahadevaiah et al., 2005).

در این روش، مقادیر احتمالات انتقال P_{ij} به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که تابع هدف خاصی (اغلب بر اساس حداقل سازی مجموع مربعات خطا) را تحت قید مشخصی، از جمله غیرمنفی بودن مقادیر و جمع واحد سطرها، به حداقل برساند. در الگوی رگرسیونی نشان داده شده در رابطه (۱) که بیانگر الگوی مارکوف از نوع گسسته است، جز خطا V_{jt} تصادفی بوده و دارای ویژگی امید ریاضی صفر است (رابطه (۳)). همچنین طبق رابطه (۴) از دیگر خصوصیات V_{jt} می‌توان به عدم ارتباط این متغیر با متغیرهای مستقل الگو (Ex_{it-1}) اشاره نمود.

$$Ex_{jt} = \sum_{i=1}^r P_{ij} \cdot Ex_{it-1} + V_{jt} \quad , \quad (1)$$

$$(j = 1, \dots, r)$$

$$\sum_{i=1}^r P_{ij} = 1 \quad \forall i \quad , \quad (0 \leq P_{ij} \leq 1) \quad (2)$$

$$E(V_{jt}) = 0 \quad \forall t, j \quad (3)$$

$$E(V_{jt} Ex_{it-1}) = 0 \quad \forall t, j \quad (4)$$

ناپایداری سهم را دارند. موهی و همکاران (Mohy et al., 2023) نیز در مصر نشان دادند که تمرکز بر صادرات محصولات پربازده می‌تواند به پایداری منابع آب کمک کند.

در مطالعات داخلی، امیری و همکاران (Amiri et al., 2014) نشان دادند که مزیت صادراتی پسته و زعفران با بهره‌وری آب هم‌راستا نیست، در حالی که کیوی و سیب کاراترند؛ نتیجه‌ای که بر لزوم بازنگری در الگوی صادرات آب مجازی کشور تأکید دارد. علیقلی‌نیا و همکاران (Aligholnia et al., 2020) پیش‌بینی کردند که تغییرات اقلیمی موجب افزایش ردپای آب آبی و کاهش ردپای آب سبز در ایران می‌شود. همچنین، رفیعی و همکاران (Rafiee et al., 2021) ضایعات آب مجازی در توزیع محصولات تره‌بار تهران را ۲۹۶،۲۷۰ متر مکعب (۱۶ درصد صادرات) برآورد کردند. همچنین، (Amini et al., 2025) در مطالعه خود بر اهمیت استفاده از شاخص‌های اقتصادی آب به جای تمرکز صرف بر مصرف آب، در مدیریت منابع آب کشاورزی تأکید نمودند.

مرور ادبیات نشان می‌دهد که الگوی زنجیره مارکوف به‌طور گسترده در تحلیل پویایی صادرات محصولات کشاورزی در کشورهای همچون هند و نیجریه به کار گرفته شده است. با این حال، بیش‌تر این مطالعات محدود به پیش‌بینی صادرات تک‌محصول یا تحلیل‌های تجمیعی با استفاده از روش‌های آماری و اقتصادسنجی سری‌های زمانی بوده و در داخل نیز تاکنون پژوهشی نظام‌مند و مبتنی بر زنجیره مارکوف در حوزه تجارت محصولات کشاورزی یافت نشد. از سوی دیگر، ادبیات مرتبط با ردپای آب و آب مجازی بیانگر افزایش توجه به این مفاهیم در مدیریت منابع و سیاست‌گذاری تجاری است؛ اما هنوز چارچوبی یکپارچه برای بهینه‌سازی سید صادراتی بر اساس بهره‌وری آب ارائه نشده است. به‌ویژه، خلأ مطالعاتی در تلفیق تحلیل پویایی بازارهای صادراتی با رویکرد ردپای آب برای طراحی الگوی بهینه صادراتی کاملاً مشهود است. نوآوری پژوهش، در ارائه چارچوبی تلفیقی برای شناسایی بازارهای پایدار، کاهش ریسک ناپایداری تجاری و ارتقای بهره‌وری اقتصادی مصرف آب در تجارت محصولات کشاورزی ایران است که می‌تواند مبنای ارزشمندی برای تدوین سیاست‌های توسعه صادرات پایدار فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

الگوی تحلیل زنجیره مارکوف (MCAM^۱)

در این پژوهش، با هدف تحلیل پویایی وضعیت صادرات محصولات کشاورزی کم‌آب بر ایران، از الگوی زنجیره مارکوف مرتبه اول استفاده شده است. در این چارچوب، هر محصول صادراتی در هر

تدوین ماتریس احتمالات انتقال

در این مطالعه، ماتریس احتمالات انتقال P (با عناصر P_{ij})، به منظور تحلیل تغییرات در سهم بازارهای صادراتی تدوین می‌شود که نشان‌دهنده احتمال جابجایی مقصد صادراتی از کشور i به کشور j است (Dent, 1967). در این پژوهش، از ماتریس احتمال انتقال برای بررسی جابجایی سهم کشور صادرکننده (مبدا) از بازار مقصد، در میان کلیه کشورهای واردکننده محصول صادراتی کشور مبدا استفاده شده است. P_{ii} ، عناصر قطری این ماتریس بوده و چنانچه $(i=j)$ باشد، بیانگر احتمال حفظ سهم بازار توسط کشور واردکننده و در واقع بیانگر وفاداری آن کشور به واردات از یک کشور صادرکننده خاص (Sunil & Singh, 2021) هستند، در حالی که عناصر غیرقطری نشان‌دهنده احتمال انتقال سهم بازار از یک کشور به دیگر کشورهای هدف می‌باشند.

ماتریس انتقال برای یک الگوی ساده با دو وضعیت (کشور)، به شرح رابطه (۵) است:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} Pr(S_t = j | S_{t-1} = i) & Pr(S_t = j | S_{t-1} = i) \\ Pr(S_t = j | S_{t-1} = i) & Pr(S_t = j | S_{t-1} = i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Pr(S_t = 1 | S_{t-1} = 1) & Pr(S_t = 2 | S_{t-1} = 1) \\ Pr(S_t = 1 | S_{t-1} = 2) & Pr(S_t = 2 | S_{t-1} = 2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

که در آن P_{ij} بیانگر انتقال از وضعیت (i) به وضعیت (j) است.

ماتریس انتقال به صورت یک ماتریس با ابعاد $(r \times c)$ نمایش داده می‌شود که ویژگی‌های زیر را دارد (Lee et al., 1970; Ganeshkumar et al., 2016; Jhade & Singh, 2020) (رابطه (۶) و (۷)):

$$0 \leq P_{ij} \leq 1 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n P_{ij} = 1, \forall i \quad (7)$$

r ، بیانگر تعداد کشورهای «انتقال دهنده» سهم (بازنده‌ها) و c ، تعداد کشورهای به‌دست آورنده سهم (برنده‌ها) در بازار صادراتی یک محصول است (Lee et al., 1970). رابطه (۷) در واقع قیدی است که به منظور نرمال‌سازی به الگو اعمال خواهد شد. چراکه در این مطالعه، کشورهای عمده به لحاظ واردات محصولات مورد بررسی از ایران به‌عنوان واردکنندگان اصلی این محصولات شناسایی شدند و سایر کشورهای واردکننده در گروه «سایر» دسته‌بندی شدند. بنابراین، مجموع مقادیر واردات کشورهای اصلی و «سایر مقصدها»، کل میزان

صادرات از یک محصول از ایران را نشان می‌دهد که چنانچه سهم هر یک از این مقصدها از میزان کل صادرات کشور محاسبه گردد، مجموع این سهم‌ها معادل با عدد یک خواهد بود.

بنابراین زنجیره مرتبه اول مارکوف در مطالعه حاضر به صورت رابطه (۸) بیان می‌شود:

$$Ex_{jt} = \sum_{i=1}^r P_{ij} \cdot Ex_{it-1} + V_{jt} \quad , \quad (j = 1, \dots, r) \quad (8)$$

که در آن Ex_{jt} صادرات ایران به کشور j در سال t ، Ex_{it-1} صادرات ایران به کشور i در سال قبل $(t-1)$ که $(i=j)$ ، P_{ij} احتمال انتقال سهم از بازار واردات محصولات ایران، از کشور i به کشور j ، جمله خطا و r تعداد کشورهای واردکننده است.

چنانچه اطلاعات دقیق از تعداد انتقال از حالت i به حالت j در دسترس باشد از تخمین زن درست‌نمایی بیشینه (ML) جهت تخمین احتمال‌های انتقال بر اساس رابطه (۹) استفاده می‌شود (Lee et al., 1965) که اولین بار توسط اندرسون و گودمن^۱ (۱۹۵۷) معرفی شد.

$$\hat{P}_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_j n_{ij}} \quad (9)$$

که در آن n_{ij} تعداد انتقال سهم از کشور i به کشور j است. در واقع در این رابطه، n_{ij} نشان می‌دهد که چند بار در طول دوره مورد بررسی، سهم مقصد i به مقصد j انتقال یافته که در کل بیانگر افزایش در سهم کشور دوم و کاهش در سهم کشور اول است. در بیش‌تر مواقع، تعداد انتقال‌ها قابل محاسبه نبوده که در این حالت، پیشنهاد می‌شود از روش حداقل مربعات^۲ برای تخمین ماتریس انتقال استفاده شود. این پیشنهاد اولین بار توسط میلر (Miller, 1952) مطرح و سپس توسط گودمن (Goodman, 1953)، کائو (Kao, 1953)، مادانسکی (Madansky, 1959) توسعه یافت.

پیش‌بینی میزان صادرات

حال، با استفاده از ماتریس در ماتریس انتقال احتمال برآورد شده، می‌توان میزان و سهم صادرات محصولات در آینده را پیش‌بینی نمود. رابطه (۱۰) برای پیش‌بینی سهم صادرات در دوره‌های آتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Jhade & Singh, 2020).

$$Ex_{jt} = \sum_{i=1}^r P_{ij} \cdot Ex_{jt-1} \quad (10)$$

که در آن Ex_{jt-1} بردار مقادیر (صادرات) به کشور j در سال $t-1$ ، P_{ij} احتمال پایدار هر وضعیت (مقصد) (قطر اصلی در ماتریس) و Ex_{jt} مقادیر (صادرات یا سهم بازاری) پیش‌بینی شده کشور j برای سال t است.

پایدار بهینه که همان قطر اصلی ماتریس احتمال انتقال است، به دست می‌آیند.

آب مجازی صادراتی

باتوجه به این که، بخش کشاورزی عمده‌ترین مصرف‌کننده آب شیرین جهان (۷۰ درصد) شناخته می‌شود (UNEP, 2007)، بنابراین تولیدات کشاورزی اغلب از ردپای آب قابل توجهی برخوردار هستند (Hoekstra, 2003). در این مطالعه نیاز خالص آبیاری محصولات منتخب در هر یک از دشت‌های استان‌های قطب (به لحاظ تولید و سطح زیرکشت) کشور از طریق نرم افزار NETWAT استخراج می‌شود. میانگین اعداد دشت‌های هر استان پس از تقسیم بر میزان میانگین راندمان آب آبیاری در ایران (۳۶ درصد) با هدف حذف تمایز روش آبیاری، به عنوان نیاز ناخالص آبیاری محصول مورد نظر در آن استان در نظر گرفته می‌شود. بنابراین به منظور محاسبه نیاز خالص آبیاری برای هر کیلوگرم محصول، طبق رابطه (۱۷)، نیاز خالص آبیاری (متر مکعب در هکتار) بر عملکرد محصولات در هکتار تقسیم می‌شود (Rafiee et al., 2021; Hoekstra, 2003):

$$NWC_{ij} = \frac{NW_{ij}}{yield_{ij}} \quad (17)$$

در این رابطه، NW_{ij} نیاز خالص آبیاری محصول (i) در استان (j) در هر هکتار (متر مکعب در هر هکتار) و $yield$ نیز عملکرد محصول (کیلوگرم در هکتار) در منطقه مورد نظر است. رابطه (۱۷) در واقع بیانگر مفهوم عکس بهره‌وری آب است که در نهایت میزان آب مورد نیاز برای تولید هر کیلوگرم محصول را نشان می‌دهد. همچنین، نیاز ناخالص آبیاری برای هر کیلوگرم محصول از تقسیم نیاز خالص آبیاری بر راندمان آبیاری در کشور و عملکرد محصول در منطقه مورد نظر، مطابق با رابطه (۱۸) حاصل می‌شود (Hoekstra, 2003; Rafiee et al., 2021):

$$GWC_{ij} = \frac{NW_{ij}}{e \times yield_{ij}} \quad (18)$$

در این رابطه، GWC_{ij} نیاز ناخالص آبیاری هر کیلوگرم محصول (i) در استان (j) و e راندمان کل آبیاری در ایران است.

باتوجه به این که، نیاز آبیاری (آب آبی) بیش‌ترین سهم (در حدود ۸۰ درصد) از ردپای آب یک محصول را در بر می‌گیرد (Balovi et al., 2022) و همچنین باتوجه به این که محصولات منتخب در پژوهش حاضر به صورت خام‌فروشی مطرح بوده و عملیات بازاریابی عمیقی در خصوص محصولات انجام نشده، بنابراین، در این مطالعه صرفاً از روش مستقیم و از آب آبی برای محاسبه ردپای آب محصولات استفاده شده است. با توجه به مفهوم رد پای آب، می‌توان محصولات منتخب در پژوهش حاضر را به لحاظ میزان مصرف آب به طور فیزیکی مقایسه و از این مقادیر به عنوان ضرایب در تابع هدف

تخمین قطر بهینه ماتریس احتمال انتقال

در طول چند دهه گذشته، پژوهشگران متعددی به توسعه روش‌هایی برای برآورد آماره‌های احتمالی در ماتریس‌های گذار (احتمال انتقال) زنجیره مارکوف پرداخته‌اند. در نتیجه، استفاده از روش‌های محاسباتی ساده‌تر از جمله روش انحراف مطلق معمولی^۱ که بر پایه MAD تحت قیود مشخص است، مورد توجه قرار گرفته است. این روش به‌ویژه در شرایطی که محدودیت‌هایی بر پارامترهای الگو (احتمالات) اعمال شده باشد، مفید واقع می‌شود (Lee et al., 1959; Ashar & Wallace, 1963; Fisher, 1961; Wagner, 1970). هدف در این روش، یافتن بردار P شامل احتمالات انتقال بین وضعیت‌ها است، به طوری که مجموع قدر مطلق انحرافات باقی‌مانده^۲ بین داده‌های مشاهده‌شده و الگوی تخمینی کمینه گردد (Lee et al., 1970). فرمول‌بندی مسئله برنامه‌ریزی خطی حل زنجیره اول مارکوف با روش LAD به صورت روابط (۱۱) تا (۱۳) است (Lee et al., 1970):

$$\text{Min } |y - Xp|'E \quad (11)$$

S.t:

$$Xp + u = Y \quad (12)$$

$$Rp = 1 \quad (12)$$

$$p \geq 0 \quad (13)$$

که در آن p بردار احتمالات انتقال (P_{ij}) در هر سطر، E بردار خطاهای مطلق، Y بردار مقادیر در سال t ، X ماتریس مقادیر در سال قبل، u بردار خطاها و R ماتریس ضرایب (احتمالات انتقال) است. جهت برآورد این الگو و بهینه‌یابی ضرایب (احتمال‌های پایداری بهینه) از معادله لاگرانژ استفاده می‌شود (Lee et al., 1970).

همچنین، فرمول‌بندی مسئله برنامه‌ریزی خطی حل زنجیره اول مارکوف با روش LAD، باتوجه به موضوع مورد بررسی در رساله، به شرح روابط (۱۴) تا (۱۶) است (Ganeshkumar et al., 2016; Jhade & Singh, 2020):

$$\text{Min } OP^* + Ie \quad (14)$$

S.t:

$$XP^* + V = Y \quad (15)$$

$$GP^* = 1 \quad (15)$$

$$P^* \geq 0 \quad (16)$$

که در آن P^* بردار احتمالات انتقال سهم بازاری P_{ij} در هر سطر، O بردار صفرها، I بردار واحد مناسب با بعد مسأله، e بردار خطاهای مطلق، Y بردار صادرات به هر کشور در هر سال، X ماتریس مقادیر صادرات در سال قبل، V بردار خطاها و G ماتریس جمع سطری عناصر هر ردیف از ماتریس احتمال انتقال است. پس از برآورد زنجیره مرتبه اول مارکوف به روش MAD و برنامه‌ریزی خطی، احتمال‌های

1- Least Absolute Deviation (LAD)

2- Residuals

به شرح رابطه (۱۹) تا (۲۳) است:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^9 GWC_i X_i \quad (19)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^9 P_i X_i \geq TR \quad (20)$$

$$(X_i - 10\%) \leq X_i \leq (X_i + 10\%), \quad \forall (i = 1, \dots, 10) \quad (21)$$

$$(X_i - 20\%) \leq X_i \leq (X_i + 20\%), \quad \forall (i = 1, \dots, 10) \quad (22)$$

$$(Min_{2013 \dots 2022}) \leq X_i \leq (Max_{2013 \dots 2022}) \quad (23)$$

که در آن X_i متغیر تصمیم (میزان صادرات بهینه محصولات منتخب)، GWC_i نیاز آبی محصول i در تولید، P_i قیمت پیش‌بینی شده صادراتی محصول i از طریق نرخ رشد مرکب سالانه^۴، TR درآمد حاصل از صادرات محصولات منتخب در سال ۲۰۲۳ که از طریق مقادیر پیش‌بینی شده مارکوف برای محصولات در این سال به‌دست آمده و $\sum_{i=1}^9 P_i X_i \geq TR$ محدودیت درآمد پیش‌بینی شده حاصل از صادرات محصولات منتخب است. همانگونه که در این الگو نشان داده شد، حد مجاز تغییر میزان صادرات محصولات، تحت سه سناریو به شرح روابط (۱۹) تا (۲۳) است. همانگونه که مشاهده می‌شود، در محدودیت مربوط به درآمد حاصل از صادرات، قیمت صادرات محصول در سال ۲۰۲۳ با استفاده از معادله نرخ رشد مرکب سالانه (برای دوره مورد بررسی) که به شرح رابطه (۲۴) است، پیش‌بینی می‌شود:

$$CAGR = (V_f / V_b)^{1/t} - 1, \quad \forall (t = 2013, \dots, 2022) \quad (24)$$

2013, ..., 2022)

که در آن V_f مقدار نهایی^۵، V_b مقدار اولیه^۶ و t تعداد سال‌های دوره مورد بررسی است.

در واقع ابتدا با استفاده از رابطه (۲۴)، قیمت پیش‌بینی شده محصولات در سال ۲۰۲۳ (باتوجه به نرخ رشد به دست‌آمده) محاسبه خواهد شد. در مرحله بعد، ارزش حاصل از صادرات هر محصول از ضرب قیمت پیش‌بینی شده و مقدار صادرات پیش‌بینی شده با بهره‌گیری از زنجیره اول مارکوف با بهره‌گیری از رابطه (۲۵) برآورد خواهد شد:

$$\sum_{i=1}^9 P_i X_i = TR \quad (25)$$

حداقل‌سازی میزان آب مجازی صادراتی این محصولات و نیز محدودیت آب در تابع حداکثرسازی درآمد حاصل از صادرات محصولات مذکور که در بخش بهینه‌سازی ترکیب صادراتی به آن پرداخته خواهد شد، استفاده نمود. همچنین، از حاصلضرب نیاز ناخالص آبیاری در میزان صادرات پیش‌بینی شده توسط زنجیره مرتبه اول مارکوف، می‌توان آب مجازی صادرات شده طی صادرات هر محصول را محاسبه نمود.

برنامه‌ریزی خطی

با توجه به اهداف مطالعه مورد نظر با تأکید بر پایداری صادرات و لزوم حفظ منابع آب، جهت تعیین ترکیب بهینه شامل محصولات مورد نظر، دو نوع الگوی بهینه‌سازی مقادیر پیش‌بینی شده صادرات در بستر برنامه‌ریزی خطی^۱ و با استفاده از بسته نرم افزاری Lingo 18، برآورد خواهد شد. در الگوی اول، تابع هدف، حداکثرسازی درآمد حاصل از صادرات این محصولات و در الگوی دوم، حداقل‌سازی میزان صادرات آب مجازی است. هریک از این دو الگو در سه سناریو که در آن‌ها بازه‌های ۱۰، ۲۰ درصد و تغییر در بازه حداقل و حداکثر صادرات در دوره مورد بررسی، به‌عنوان بازه مجاز برای تغییر مقادیر پیش‌بینی شده بهینه در سال ۲۰۲۳ در نظر گرفته می‌شود، برآورد خواهند شد. هدف از بهینه‌سازی در این بخش، پاسخ به این سوال است که «آیا می‌توان در ترکیب صادراتی محصولات کشاورزی منتخب به حالتی نزدیکتر به وضعیت بهینه یا بهتر نسبت به وضع موجود، ارتقا یافت؟». به عبارت بهتر، «آیا حالت دیگری وجود دارد که درآمد حاصل از صادرات با همان میزان مصرف آب (آب مجازی صادراتی) بیشینه و یا میزان آب مجازی صادراتی با همان میزان ارزآوری حاصل از محصولات منتخب، کمینه شود؟». ساختار مسئله به نحوی طراحی شده که امکان تحلیل راه‌حل‌های بهینه در سناریوهای مختلف و تحت شرایط واقعی بازار فراهم باشد. در نتیجه، پیوند نظریه و عمل در این پژوهش از طریق تلفیق ساختار کلاسیک برنامه‌ریزی خطی و کاربرد آن در طراحی سیاست‌های صادراتی پایدار برای محصولات کشاورزی کم‌آب‌بر ایران، به‌خوبی نمایان است.

از آن‌جاکه الگوهای با محدودیت نابرابری در اغلب موارد فاقد فرم تحلیلی بسته هستند، استفاده از الگوریتم‌های حل عددی نظیر سیمپلکس^۲، امکان دستیابی به پاسخ‌های قابل اعتماد و کاربردی را فراهم می‌سازند که در این پژوهش از آن بهره گرفته شده است.

الگوی بهینه‌سازی ترکیب صادراتی در سال ۲۰۲۳ با هدف حداقل‌سازی آب مجازی صادراتی و محدودیت‌های مرتبط با مقادیر صادرات بر پایه فرمول‌بندی نخستین^۳ (Norton & Hazell, 1986)،

4 Compound Annual Growth Rate (CAGR)

5- Final

6- Beginning

1- Linear Programming

2- Simplex

3- Primal

جهاد کشاورزی است.

نتایج و بحث

محاسبه پایداری مقاصد صادراتی

بر اساس

جدول ۳

جدول ۳ جدول ۳، احتمال پایداری بهینه صادرات اقلام عمده کشاورزی ایران با استفاده از الگوی زنجیره مارکوف (MCAM) و میانگین سهم بازاری کشورها در دوره ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۲ محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد میزان پایداری و تمرکز بازار در میان محصولات و مقاصد تجاری تفاوت قابل‌توجهی دارد. برای پسته با پوست (۰۸۰۲۵۱)، بیش‌ترین احتمال پایداری به چین و سایر مقاصد (هر دو ۲۷ درصد) و کم‌ترین به آلمان (۱۱ درصد) تعلق دارد؛ در حالی که «سایر مقاصد» بیش‌ترین میانگین سهم بازار (۶۷ درصد) و آلمان و عراق کم‌ترین (۶ درصد) را دارند. این الگو حاکی از آن است که تمرکز صادراتی ایران بر بازارهای متنوع اما کم‌ثبات بوده و چین، با سهم متوسط، از پایداری بیشتری برخوردار است. در مورد پسته بدون پوست (۰۸۰۲۵۲)، بیش‌ترین پایداری مربوط به آلمان (۳۵ درصد) و کم‌ترین به ترکیه (۱۵ درصد) است. «سایر مقاصد» با ۴۷ درصد بیش‌ترین و ترکیه با ۸ درصد کم‌ترین سهم بازار را دارند.

بیش‌ترین احتمال پایداری صادرات زعفران به ترتیب متعلق به افغانستان (۵۷ درصد)، چین، امارات، سایر مقاصد و اسپانیا (۶ درصد) است. میانگین سهم صادراتی در میان چهار مقصد اصلی، برای امارات (۳۱ درصد) بیش‌ترین و برای افغانستان (۵ درصد) کم‌ترین است. در نتیجه، افغانستان با وجود پایداری بالا سهم ناچیزی دارد، در حالی که اسپانیا با سهم بالا و پایداری پایین، مقصدی ناپایدار محسوب می‌شود. این ارقام بر ضرورت بازنگری در بازارهای هدف زعفران تأکید دارد. برای خرما، هند با ۷۳ درصد پایدارترین و قزاقستان با ۳ درصد ناپایدارترین مقصد است.

همچنین، الگوی بهینه‌سازی ترکیب صادراتی در سال ۲۰۲۳ با هدف حداکثرسازی درآمد صادراتی و محدودیت‌های مرتبط با مقادیر صادرات، به شرح رابطه (۲۶) تا (۳۰) است:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^9 P_i X_i \quad (26)$$

s. t

$$(TW - 0.1\%) \leq \sum_{i=1}^9 GWC_i X_i \leq (TW + 0.1\%) \quad (27)$$

$$(X_i - 10\%) \leq X_i \leq (X_i + 10\%), \quad \forall (i = 1, \dots, 10) \quad (28)$$

$$(X_i - 20\%) \leq X_i \leq (X_i + 20\%), \quad \forall (i = 1, \dots, 10) \quad (29)$$

$$(Min_{2013 \dots 2022}) \leq X_i \leq (Max_{2013 \dots 2022}) \quad (30)$$

که در آن X_i متغیرهای تصمیم، GWC_i نیاز آبی محصول i ، P_i قیمت پیش‌بینی شده صادراتی محصول i از طریق نرخ رشد مرکب سالانه^۱، TW کل آب مجازی صادراتی محصولات منتخب در سال ۲۰۲۳، $TW - 0.1\% \leq \sum_{i=1}^9 GWC_i X_i \leq TW + 0.1\%$ محدودیت آب مجازی صادراتی از صادرات محصولات منتخب بوده (که از طریق مقادیر پیش‌بینی شده مارکوف برای محصولات در این سال به‌دست آمده) که به میزان کم‌تر از ۰/۱ درصد جهت انعطاف الگو آزادسازی شده است. همانگونه که مشاهده شد، محدودیت درآمد در تابع هدف (۱۹)، خود به تابع هدف در الگوی حداکثرسازی (رابطه (۲۶)) تبدیل شده است. لازم به ذکر است که در الگوهای بهینه‌سازی مذکور، نیاز آبی محصولات منتخب در استان قطب به‌عنوان نماینده نیاز آبی در تمامی استان‌های تحت کشت محصولات در نظر گرفته شد. همچنین، ۹ محصول کلی و ۱۰ کد تعرفه فرعی (با احتساب پسته با پوست و بی‌پوست) در نظر گرفته شد.

داده

آمار و اطلاعات مورد نیاز برای تحلیل و بررسی در این پژوهش، به‌طور کلی داده‌های مربوط به صادرات نه قلم عمده از محصولات کشاورزی ایران بوده (پسته (هر دو کد تعرفه)، زعفران، خرما، سیب درختی، کشمش، گوجه‌فرنگی، هندوانه، انجیر و بادام درختی) که از وبسایت ITC^۲ استخراج شده است. همچنین، ماخذ دریافت آمار تولید، سطح زیرکشت و نیاز آبی این محصولات نیز آمارنامه ۱۴۰۲ وزارت

1- Compound Annual Growth Rate (CAGR)

2- www.intracen.org

جدول ۳- احتمال پایداری بهینه و میانگین سهم صادراتی اقلام عمده صادرات بخش کشاورزی ایران به تفکیک مقصدهای تجاری در دوره زمانی (۲۰۲۲-۲۰۱۳)

Table 6- Optimal stability probability and average export share of major agricultural export commodities of Iran by trading destination during the period 2013-2022

محصول Product	مقصدها Directions	چین China	امارات UAE	آلمان Germany	عراق Iraq	سایر مقصدها Other destinations
پسته (۰۸۰۲۵۱) Pistachio (080251)	احتمال پایداری بهینه Optimal stability probability	0.27	0.13	0.11	0.21	0.27
	میانگین سهم بازاری Average market share	0.12	0.08	0.06	0.06	0.67
	مقصدها Directions	امارات UAE	آلمان Germany	هند India	ترکیه Turkiye	سایر مقصدها Other Destinations
پسته (۰۸۰۲۵۲) Pistachio (080251)	احتمال پایداری بهینه	0.16	0.35	0.16	0.15	0.18
	میانگین سهم بازاری	0.14	0.15	0.15	0.08	0.47
	مقصدها Directions	امارات UAE	اسپانیا Spain	چین China	افغانستان Afghanistan	سایر مقصدها Other Destinations
زعفران Saffron	احتمال پایداری بهینه	0.13	0.06	0.16	0.57	0.08
	میانگین سهم بازاری	0.31	0.23	0.10	0.05	0.32
	مقصدها Directions	هند India	پاکستان Pakistan	قزاقستان Kazakhstan	ترکیه Turkiye	سایر مقصدها Other Destinations
خرما Date	احتمال پایداری بهینه	0.73	0.14	0.03	0.05	0.04
	میانگین سهم بازاری	0.16	0.15	0.10	0.09	0.50
	مقصدها Directions	عراق Iraq	افغانستان Afghanistan	امارات UAE	ترکمنستان Turkmenistan	سایر مقصدها Other Destinations
سیب درختی Apple	احتمال پایداری بهینه	0.24	0.24	0.19	0.12	0.21
	میانگین سهم بازاری	0.44	0.19	0.08	0.09	0.20
	مقصدها Directions	عراق Iraq	امارات UAE	ترکیه Turkiye	روسیه Russia	سایر مقصدها Other Destinations
کشمش Dried Grapes	احتمال پایداری بهینه	0.15	0.21	0.15	0.27	0.22
	میانگین سهم بازاری	0.15	0.14	0.12	0.09	0.50
	مقصدها Directions	عراق Iraq	امارات UAE	پاکستان Pakistan	افغانستان Afghanistan	سایر مقصدها Other Destinations
گوجه فرنگی Tomato	احتمال پایداری بهینه	0.12	0.29	0.20	0.23	0.16
	میانگین سهم بازاری	0.66	0.10	0.06	0.10	0.08
	مقصدها Directions	عراق Iraq	امارات UAE	ترکیه Turkiye	عمان Oman	سایر مقصدها Other Destinations
هندوانه Watermelon	احتمال پایداری بهینه	0.19	0.14	0.39	0.11	0.17
	میانگین سهم بازاری	0.60	0.22	0.07	0.03	0.09
	مقصدها Directions	ویتنام Vietnam	چین China	امارات UAE	ژاپن Japan	سایر مقصدها Other Destinations
انجیر Fig	احتمال پایداری بهینه	0.22	0.23	0.11	0.22	0.22
	میانگین سهم بازاری	0.62	0.18	0.08	0.01	0.11
	مقصدها Directions	هند India	ترکیه Turkiye	آلمان Germany	امارات UAE	سایر مقصدها Other Destinations
بادام درختی Almond	احتمال پایداری بهینه	0.28	0.19	0.15	0.11	0.27
	میانگین سهم بازاری	0.43	0.37	0.04	0.09	0.06

مأخذ: یافته‌های پژوهش
Source: Research findings

محاسبه میزان آب لازم برای صادرات پیش‌بینی شده

با استفاده از **جدول ۴** که نشان‌دهنده میانگین نیاز آبی، مقدار تولید، سطح زیرکشت و آب مورد نیاز برای تولید هر واحد محصول تولیدی است، از تقسیم میانگین نیاز آبی بر عملکرد (نسبت عکس بهره‌وری)، آب مورد نیاز برای تولید هر تن محصول به‌دست می‌آید. بر اساس این جدول، آب مورد نیاز برای تولید هر تن زعفران (۱،۷۷۴،۶۱۲ متر مکعب بر تن)، بیش‌ترین و برای گوجه‌فرنگی کم‌ترین میزان (۱۳۰ متر مکعب بر تن) است.

جدول ۵، میزان صادرات شبیه‌سازی شده با زنجیره مرتبه اول مارکوف، آب مجازی صادراتی برای سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴، به تفکیک محصولات منتخب را نشان می‌دهد. باتوجه به این جدول، میزان صادرات شبیه‌سازی شده در ۲۰۲۴ نسبت به ۲۰۲۳ برای تمام محصولات افزایش یافته و به همین ترتیب میزان آب مجازی صادراتی در سال ۲۰۲۴ حدود ۱۰ میلیارد متر مکعب بوده که نسبت به ۲۰۲۳ که برابر با ۷/۳ میلیارد متر مکعب است، بیش‌تر خواهد بود. از ضرب آب موردنیاز برای تولید هرتن از هر محصول (**جدول ۴**) در مقدار صادرات شبیه‌سازی شده برای سال ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴، کل آب مجازی صادراتی در این سال‌ها به‌دست خواهد آمد. لازم به ذکر است، به‌دلیل در دسترس بودن آمار تولید تا سال ۱۴۰۲، از مقادیر شبیه‌سازی شده ۲۰۲۳، در محاسبات الگوی بهینه استفاده شده است.

تعیین ترکیب بهینه صادرات با هدف حداقل‌سازی مصرف آب

جدول ۶ بیانگر نتایج تعیین ترکیب بهینه محصولات صادراتی با هدف حداقل‌سازی صادرات آب مجازی در سال ۲۰۲۳، با در نظرگیری سه سناریو است. باتوجه به نتایج این جدول، ترکیب فعلی صادراتی بهینه نبوده و چنانچه هر محصول اجازه ۱۰ و ۲۰ درصد تغییر را در ترکیب بهینه سید صادراتی محصولات کشاورزی مورد نظر داشته باشد، با همان درآمد حاصل از صادرات این محصولات (۲،۱۷۱،۹۴۹ هزار دلار) در ۱۰ سال گذشته می‌توان به‌ترتیب حدود ۵/۳ و ۱۰/۵ درصد میزان آب مجازی صادراتی را کاهش داد. همچنین در ترکیب جدید، چنانچه تغییرات میزان صادرات هر یک از محصولات در بازه حداقل و حداکثر این میزان در این ۱۰ سال گذشته قرار گیرد، امکان کاهش صادرات آب مجازی تا ۳۹/۸ درصد بدون تغییر درآمد وجود دارد. لازم به ذکر است که پسته به دو کد تعرفه موجود، تفکیک شده اما طبق فرمول‌ها عدد ۹ به محصولات اصلی اشاره داشته است. همچنین، اندیس اول در هر کد محصول بیانگر نام آن و اندیس دوم بیانگر مقصد صادراتی محصول مورد نظر است. به‌طور مثال، X11 به خرمای صادراتی به هند اشاره دارد.

با این حال، میانگین سهم بازار برای «سایر مقاصد» بیش‌ترین (۵۰ درصد) و برای ترکیه کم‌ترین (۹ درصد) است. این امر نشان می‌دهد تمرکز صادرات بر بازارهای پایدارتر بوده است. بازار هند از ثبات و سهم بالا برخوردار است؛ از این‌رو، صادرات خرما تقریباً در مسیر مناسبی نسبت به سایر محصولات قرار دارد. در صادرات سیب درختی، بیش‌ترین احتمال پایداری به عراق و افغانستان (۲۴ درصد) و کم‌ترین به ترکمنستان (۱۲ درصد) تعلق دارد. عراق با ۴۴ درصد بیش‌ترین و امارات با ۸ درصد کم‌ترین سهم بازار را دارد که اهمیت عراق را به‌عنوان بزرگ‌ترین و درعین‌حال پایدارترین مقصد سیب ایران تأیید می‌کند.

نتایج مربوط به کشمش نشان می‌دهد روسیه بالاترین پایداری (۲۷ درصد) و عراق و ترکیه کم‌ترین (۱۵ درصد) دارند. با وجود این، «سایر مقاصد» بیش‌ترین سهم (۵۰ درصد) و روسیه کم‌ترین (۹ درصد) را دارد؛ بنابراین تمرکز بر روسیه می‌تواند ثبات صادرات کشمش را افزایش دهد. در گوجه‌فرنگی، امارات پایدارترین مقصد (۲۹ درصد) و عراق ناپایدارترین (۱۲ درصد) است. در عین حال، عراق با ۶۶ درصد بزرگ‌ترین بازار و پاکستان با ۶ درصد کوچک‌ترین بازار است. تمرکز بر امارات به‌عنوان بازاری با پایداری بیشتر می‌تواند به بهبود ثبات صادرات این محصول کمک کند. درخصوص هندوانه، ترکیه با ۳۹ درصد بیش‌ترین و عمان با ۱۱ درصد کم‌ترین پایداری را دارد. میانگین سهم بازار برای عراق (۶۰ درصد) بیش‌ترین و عمان (۳ درصد) کم‌ترین است. توسعه بازار ترکیه می‌تواند به تنوع‌بخشی و کاهش نوسان صادرات این محصول منجر شود. در صادرات انجیر، چین با ۲۳ درصد بیش‌ترین و امارات با ۱۱ درصد کم‌ترین پایداری را دارد. ویتنام با ۶۲ درصد بیش‌ترین و ژاپن با ۱ درصد کم‌ترین سهم بازار را داراست. ویتنام بزرگ‌ترین اما ناپایدارترین مقصد در میان چهار مقصد اصلی است؛ در حالی که ژاپن با وجود سهم کمتر، بازار باثبات‌تری محسوب می‌شود که توجه به آن می‌تواند نقش مهمی در افزایش ثبات صادرات انجیر داشته باشد.

در نهایت، نتایج مربوط به بادام درختی نشان می‌دهد هند (۲۸ درصد) بیش‌ترین و امارات (۱۱ درصد) کم‌ترین پایداری را دارد. هند (۴۳ درصد) و ترکیه (۳۷ درصد) بیش‌ترین سهم بازار را به خود اختصاص داده‌اند. تمرکز بر مقاصد پایدار امری منطقی است، با این حال، تنوع‌بخشی بیشتر و توجه به بازارهای باثباتی چون آلمان می‌تواند ثبات صادرات بادام را ارتقا دهد. به‌طور کلی، بسیاری از مقاصد صادراتی ایران سهم بالایی از بازار داشته اما از پایداری کمتری برخوردارند، در حالی که برخی مقاصد با ثبات سهم ناچیزی دارند. این امر ضرورت بازنگری در سیاست‌های تجاری و تمرکز بر توسعه بازارهای پایدار را در صادرات محصولات کشاورزی ایران برجسته می‌سازد.

جدول ۴- میانگین نیاز آبی، مقدار تولید، سطح زیرکشت و آب مورد نیاز برای تولید هر واحد محصول تولید شده

Table 4- Average water requirement, production quantity, cultivated area, and water requirement per unit of produced agricultural product

محصولات تولیدی Products Produced	میانگین نیاز آبی* (نیاز خالص) Average water requirement (net (m ³ /ha)* requirement)	مقدار تولید آبی بارور** Irrigated productive yield (ton)	سطح زیرکشت آبی بارور** Irrigated productive cultivated area (ha)	آب مورد نیاز برای تولید هر تن محصول*** Water requirement per ton of product*** (m ³ /ton)
خرما Date	15669	1710725	256269	2347
پسته Pistachio	4300	439186	599420	5869
انگور Grape	10740	799268	226185	3039
سیب Apple	5902	4006443	239871	353
گوجه‌فرنگی Tomato	7221	5385993	96977	130
هندوانه Watermelon	7180	2705930	78735	209
زعفران Saffron	4769	298	110890	1774612
انجیر Fig	5808	83990	8006	554
بادام (درختی) Almond	5902	125657	88400	4152

* منبع: NETWAT NETWAT Source:

** منبع مقدار تولید و سطح زیرکشت: آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی در سال ۱۴۰۲ (معادل با ۲۰۲۳)

Source of production and cultivated area data: Agricultural Statistics Yearbook of the Ministry of Agriculture Jihad, 2023

*** منبع: یافته‌های پژوهش Source: Research findings

جدول ۵- میزان صادرات شبیه‌سازی شده با زنجیره مرتبه اول مارکوف، آب مجازی صادراتی برای سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴

Table 5- Simulated export volumes based on the first-order Markov chain and virtual water exports for the years 2023 and 2024

محصولات صادراتی Exported products	میزان صادرات شبیه‌سازی شده برای سال ۲۰۲۳ Simulated export volume for 2023 (ton)	میزان صادرات شبیه‌سازی شده برای سال ۲۰۲۴ Simulated export volume for 2024 (ton)	آب مجازی صادراتی در سال ۲۰۲۳ Virtual water export in 2023 (m ³ /ton)	آب مجازی صادراتی در سال ۲۰۲۴ Virtual water export in 2024 (m ³ /ton)
خرما Date	497023	879810	2916647086	5162928301
پسته Pistachio	88951	108173	1305089084	1587126462
انگور Grape	112632	117797	855829404	895073373
سیب Apple	882210	993335	779311078	877474637
گوجه‌فرنگی Tomato	673971	732976	219065447	238244298
هندوانه Watermelon	863262	903526	450854648	471883645
زعفران Saffron	164	168	728955675	743560413
انجیر Fig	16805	18535	23259101	25654008
بادام (درختی) Almond	3076	3944	31926434	40941300
مجموع Total	-	-	7310937958	10042886437

* برای محاسبه آب مورد نیاز برای تولید کشمش از نسبت وزن خشک به وزن تر محصول که برابر با ۰/۲۹ است، استفاده شد.

* The estimation of water requirements for Dried Grapes was conducted using the ratio of dry weight to fresh weight of the product, which equals 0.29.

Source: Research findings مأخذ: یافته‌های پژوهش

جدول ۶- تعیین ترکیب بهینه محصولات صادراتی با هدف حداقل سازی صادرات آب مجازی (A) با در نظر گیری سه سناریو

Table 6- Determination of the optimal composition of export products aimed at minimizing virtual water exports (Case A) under three scenarios

محصول صادراتی Exported product	کد محصول Product code	میزان صادرات شبه سازی شده با زنجیره اول مارکوف (تن) ۲۰۲۳- Simulated exports based on the first- order Markov chain (ton) – 2023	مقادیر بهینه Optimal values		
			سناریو اول (A ₁) Scenario I (A1)	سناریو چهارم (B ₂) Scenario IV(B ₂)	سناریو ششم (B ₃) Scenario VI(B ₃)
			بازه ها Ranges		
			2023 ± 10 %	2023 ± 20 %	Min < 2023 < Max
			میزان بهینه صادرات		
خرمای... Date	India هند	X11	358850	322965	287080
	Pakistan پاکستان	X12	70376	63338	56301
	Kazakhstan قزاقستان	X13	8619	7757	6895
	Turkey ترکیه	X14	14065	12659	11252
	Others سایر مقصدها	X15	45113	40602	36090
پسته (۰۸۰۲۵۱) ی... Pistachio (080251)	China چین	X21	9117	8205	7294
	UAE امارات	X22	2079	1871	1663
	Germany آلمان	X23	1124	1012	899
	Iraq عراق	X24	6050	5445	4840
	Others سایر مقصدها	X25	56062	60682	66800
پسته (۰۸۰۲۵۲) Pistachio (080252)	UAE امارات	X211	1773	1950	2128
	Germany آلمان	X222	6303	6933	7564
	India هند	X233	2451	2696	2941
	Turkey ترکیه	X244	490	539	588
	Others سایر مقصدها	X255	3501	3851	4201
کشمش... Dried Grapes	Iraq عراق	X31	16824	15142	13459
	UAE امارات	X32	18665	16799	14932
	Turkey ترکیه	X33	7318	6586	5854
	Russia روسیه	X34	18518	16666	14814
	Others سایر مقصدها	X35	51308	46177	41046
سیب... Apple	Iraq عراق	X41	434048	390643	347238
	Turkey ترکیه	X42	166432	149789	133146
	UAE امارات	X43	61165	55049	48932
	Turkmenistan ترکمنستان	X44	18357	16521	14686
	Others سایر مقصدها	X45	202208	181987	161766
گوجه فرنگی... Tomato	Iraq عراق	X51	99949	109944	119939
	UAE امارات	X52	262299	288529	314759
	Pakistan پاکستان	X53	128056	140862	153667
	Afghanistan افغانستان	X54	131886	145075	158263
	Others سایر مقصدها	X55	51780	56958	62136

ادامه جدول ۶- تعیین ترکیب بهینه محصولات صادراتی با هدف حداقل سازی صادرات آب مجازی (A) با در نظرگیری سه سناریو

Table 6 continued- Determination of the optimal composition of export products aimed at minimizing virtual water exports (Case A) under three scenarios

محصول صادراتی Exported product	کد محصول Product code	میزان صادرات شبه سازی شده با زنجیره اول مارکوف (تن) ۲۰۲۳- Simulated exports based on the first- order Markov chain (ton) – 2023	مقادیر بهینه Optimal values		
			سناریو اول (A ₁) Scenario I (A1)	سناریو چهارم (B ₂) Scenario IV(B ₂)	سناریو ششم (B ₃) Scenario VI(B ₃)
			بازه ها Ranges		
			2023 ± 10%	2023 ± 20%	Min < 2023 < Max
			میزان بهینه صادرات		
هندوانه... Watermelon	Iraq عراق	X61	419622	461584	318640
	UAE امارات	X62	175037	192541	106321
	Turkey ترکیه	X63	160303	176333	26521
	Oman عمان	X64	15571	17128	184
	Others سایر مقصدها	X65	92729	102002	12367
زعفران... Saffron	UAE امارات	X71	47	42	43
	Spain اسپانیا	X72	13	12	29
	China چین	X73	56	50	1.48
	Afghanistan افغانستان	X74	25	23	0.16
	Others سایر مقصدها	X75	23	21	25
انجیر خشک... Dried Figs	Vietnam ویتنام	X81	281	309	10923
	China چین	X82	14426	15869	11753
	UAE امارات	X83	187	206	1841
	Japan ژاپن	X84	245	270	211
	Others سایر مقصدها	X85	1665	1832	1555
بادام (درختی)... Almond	India هند	X91	2572	2829	2546
	Turkey ترکیه	X92	74	81	4579
	Germany آلمان	X93	50	55	226
	UAE امارات	X94	21	23	827
	Others سایر مقصدها	X95	359	395	297
درآمد کل حاصل از صادرات محصولات (هزار دلار)		2171949	2171949	2171949	2171949
Total revenue from product exports (thousand USD)		-	-	-	-
درصد تغییرات درآمد		-	-	-	-
میزان آب مجازی صادراتی (متر مکعب)		7310937958	6917313000	6543364000	4397163000
Volume of virtual water exports (m ³)		-	-5.3	-10.5	-39.8
درصد تغییرات آب مجازی		-	-5.3	-10.5	-39.8

Source: Research findings ماخذ: یافته‌های پژوهش

هدف حداکثر سازی درآمد حاصل از صادرات در سال ۲۰۲۳، با در نظرگیری سه سناریو است. باتوجه به نتایج این جدول، در ترکیب جدید، اگر هر محصول امکان تغییر هر محصول به میزان ۱۰ و ۲۰ درصد تغییر را در ترکیب بهینه صادراتی داشته باشد، با همان مقدار صادرات آب مجازی (۷،۳۱۰،۹۳۷،۹۵۸ متر مکعب) می‌توان به ترتیب حدود ۵/۳ و ۱۰/۲ درصد میزان ارزش آوری حاصل از این سبد صادراتی

همچنین، نتایج این جدول نشان می‌دهد که هر سه سناریو در خصوص زعفران، توصیه با کاهش صادرات این محصول به مقصدهای امارات، چین و افغانستان داشته‌اند و در مقابل صادرات به اسپانیا در هر سناریو نتایج متفاوتی را گزارش می‌کند. بنابراین، در صادرات به هر مقصد، لازم است که به تقاضای آن بازار توجه نمود. **جدول ۷**، بیانگر نتایج تعیین ترکیب بهینه محصولات صادراتی با

را افزایش داد. همچنین، در صورتی که هر محصول طبق روند ۱۰ ساله خود در بازه حداقل و حداکثر میزان صادرات خود تغییر کند، با همان میزان صادرات آب، امکان افزایش درآمد حاصل از صادرات محصولات مورد بررسی تا ۵۵/۲ درصد وجود دارد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که هر سه سناریو، افزایش صادرات زعفران به اسپانیا را توصیه کرده و برای مقصدهای دیگر، توصیه‌های متفاوتی ارائه می‌کند.

جدول ۷- تعیین ترکیب بهینه محصولات صادراتی با هدف حداکثرسازی درآمد حاصل از صادرات (B) با در نظرگیری سه سناریو

Table 7- Determination of the optimal composition of export products aimed at maximizing export revenue (Case B) under three scenarios

محصول صادراتی Exported product	کد محصول Product code	میزان صادرات شبه‌سازی شده با زنجیره اول مارکوف (تن) ۲۰۲۳- Simulated exports based on the first- order Markov chain (ton) – 2023	مقادیر بهینه Optimal values		
			سناریو دوم (B ₁) Scenario II(B ₁)	سناریو چهارم (B ₂) Scenario IV(B ₂)	سناریو ششم (B ₃) Scenario VI(B ₃)
			بازه‌ها Ranges		
			2023 ± 10%	2023 ± 20%	Min < 2023 < Max
			میزان بهینه صادرات		
خرمای... Date	هند India	X11	358850	322965	9206
	پاکستان Pakistan	X12	70376	63338	12901
	قزاقستان Kazakhstan	X13	8619	7757	10805
	ترکیه Turkey	X14	14065	12659	11810
	سایر مقصدها Others	X15	45113	40602	94408
پسته (۰۸۰۲۵۱) ی... Pistachio (080251)	چین China	X21	9117	10029	83758
	امارات UAE	X22	2079	2287	12274
	آلمان Germany	X23	1124	1236	9850
	عراق Iraq	X24	6050	6655	9310
	سایر مقصدها Others	X25	56062	61668	89967
پسته (۰۸۰۲۵۲) ی... Pistachio (080252)	امارات UAE	X211	1773	1950	9731
	آلمان Germany	X222	6303	6933	4363
	هند India	X233	2451	2696	4429
	ترکیه Turkey	X244	490	539	9286
	سایر مقصدها Others	X255	3501	3851	54032
کشمش... Dried Grapes	عراق Iraq	X31	16824	15142	14040
	امارات UAE	X32	18665	16799	12583
	ترکیه Turkey	X33	7318	6586	4290
	روسیه Russia	X34	18518	16666	6604
	سایر مقصدها Others	X35	51308	50173	44971
سیب... Apple	عراق Iraq	X41	434048	477453	98623
	ترکیه Turkey	X42	166432	183075	15193
	امارات UAE	X43	61165	67282	22790
	ترکمنستان Turkmenistan	X44	18357	20193	3800
	سایر مقصدها Others	X45	202208	222429	84352
گوجه‌فرنگی... Tomato	عراق Iraq	X51	99949	109944	443261
	امارات UAE	X52	262299	288529	176207
	پاکستان Pakistan	X53	128056	140862	131677
	افغانستان Afghanistan	X54	131886	145075	137605
	سایر مقصدها Others	X55	51780	56958	88918

ادامه جدول ۷- تعیین ترکیب بهینه محصولات صادراتی با هدف حداکثرسازی درآمد حاصل از صادرات (B) با در نظرگیری سه سناریو
Table 7 continued- Determination of the optimal composition of export products aimed at maximizing export revenue (Case B) under three scenarios

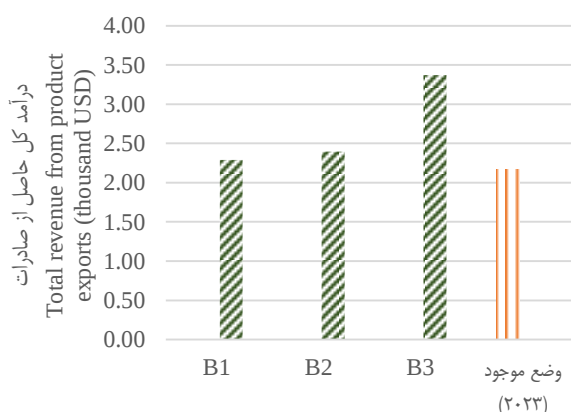
محصول صادراتی Exported Product	کد محصول Product code	میزان صادرات شبیه سازی شده با زنجیره اول مارکوف (تن) - ۲۰۲۳ Simulated exports based on the first- order Markov chain (ton) - 2023	مقادیر بهینه Optimal values		
			سناریو دوم (B ₁) Scenario II(B ₁)	سناریو چهارم (B ₂) Scenario IV(B ₂)	سناریو ششم (B ₃) Scenario VI(B ₃)
			بازه ها Ranges		
			2023 ± 10 %	2023 ± 20 %	Min < 2023 < Max
			میزان بهینه صادرات		
هندوانه... Watermelon	Iraq عراق	X61	419622	461584	607676
	UAE امارات	X62	175037	192541	267098
	Turkey ترکیه	X63	160303	176333	79703
	Oman عمان	X64	15571	17128	53771
	Others سایر مقصدها	X65	92729	102002	114468
زعفران... Saffron	UAE امارات	X71	47	52	43
	Spain اسپانیا	X72	13	14	29
	China چین	X73	56	62	1
	Afghanistan افغانستان	X74	25	28	0.2
	Others سایر مقصدها	X75	23	25	25
انجیر خشک... Dried Figs	Vietnam ویتنام	X81	281	309	10923
	China چین	X82	14426	15869	11753
	UAE امارات	X83	187	206	1841
	Japan ژاپن	X84	245	270	211
	Others سایر مقصدها	X85	1665	1832	1555
بادام (درختی)... Almond	India هند	X91	2572	2829	2546
	Turkey ترکیه	X92	74	81	4579
	Germany آلمان	X93	50	55	226
	UAE امارات	X94	21	23	827
	Others سایر مقصدها	X95	359	395	297
درآمد کل حاصل از صادرات محصولات (هزار دلار)		2171949	2288137	2394418	3370634
Total revenue from product exports (thousand USD)		-	5.3	10.2	55.2
درصد تغییرات درآمد					
میزان آب مجازی صادراتی (متر مکعب)		7310937958	7310937958	7310937958	7310937958
Volume of virtual water exports (m ³)					
درصد تغییرات آب مجازی		-	-	-	-
Percentage change in virtual water					

Source: Research findings مأخذ: یافته‌های پژوهش

باشد، با حفظ سطح فعلی درآمد صادراتی (۲،۱۷۱،۹۴۹ هزار دلار)، می‌توان در سناریوهای تغییر ۱۰ و ۲۰ درصدی در مقادیر صادرات، به ترتیب حدود ۵ و ۱۰ درصد از حجم آب مجازی صادر شده را کاهش داد. در حالت سوم، با اجازه تغییرات در محدوده حداقل و حداکثر ۱۰

نتایج به دست آمده از مدل سازی ترکیب بهینه صادرات محصولات کشاورزی در سال ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که ترکیب فعلی صادراتی ایران از منظر کارایی مصرف آب و درآمدزایی چندان بهینه نیست. بر اساس یافته‌ها، در حالتی که هدف حداقل سازی مصرف آب مجازی

نمودار ۳-الف، نتایج الگوی حداقل‌سازی صادرات آب مجازی برای کل مقصدها را نشان می‌دهد. باتوجه به این نمودار، در تمامی سناریوها باتوجه به کم‌تر بودن مقدار صادراتی آب مجازی نسبت به وضع موجود (آب مجازی صادراتی پیش‌بینی‌شده در سال ۲۰۲۳)، کاهش میزان صادرات آب مجازی پیشنهاد می‌شود. همچنین **نمودار ۳-ب**، نتایج الگوی حداکثر‌سازی صادرات آب مجازی برای کل مقصدهای صادراتی را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج این نمودار، میزان درآمد صادراتی قابل دسترس در هر سه سناریو بیش از وضع موجود (درآمد صادراتی پیش‌بینی‌شده برای سال ۲۰۲۳) است.



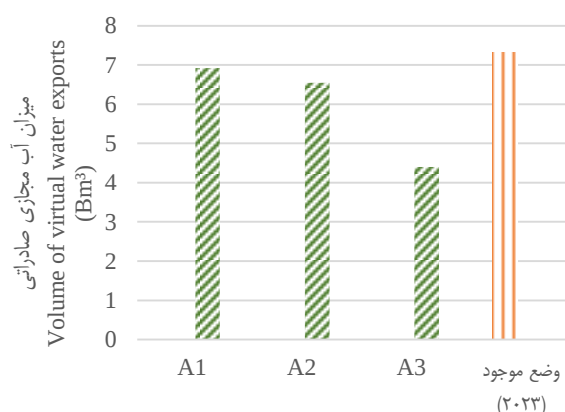
نمودار ۳-ب - نتایج حداکثر‌سازی درآمد صادراتی
Figure 3-b- Results of Maximizing Income Export

Source: Research findings مأخذ: یافته‌های پژوهش

تصمیم‌گیری در تجارت کشاورزی پایدار ارائه می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که ساختار فعلی صادرات کشاورزی ایران از جهت تمرکز صادرات بر کشورهایی با سهم زیاد ولی احتمال پایداری کم (مانند اسپانیا در زعفران) که سبب نوسان درآمد و کاهش ثبات تجاری شده، دچار چالش است.

بر این اساس، تنوع‌بخشی و بازآرایی بازارهای هدف با تمرکز بر مقاصد پایدارتر و کاهش وابستگی به بازارهای ناپایدار، تمرکز سیاست‌های حمایتی بر محصولات کم‌آب‌بر و با ارزش افزوده بالا به‌منظور افزایش بهره‌وری آب در صادرات، ایجاد مشوق‌های صادراتی مبتنی بر شاخص آب مجازی جهت هدایت تولیدکنندگان به سمت محصولات پایدارتر، توسعه دیپلماسی تجاری و توافقاتی بلندمدت با بازارهای پایدار برای تثبیت روابط صادراتی و تقویت زنجیره ارزش و بازآرایی بین‌المللی محصولات کم‌آب‌بر به‌جای تمرکز صرف بر حجم صادرات، توصیه می‌شوند.

ساله میزان صادرات هر محصول، امکان کاهش مصرف آب مجازی تا ۴۰ درصد بدون کاهش درآمد وجود دارد. در مقابل، زمانی که هدف حداکثر‌سازی درآمد صادراتی تعیین شود، با حفظ میزان فعلی صادرات آب مجازی (حدود ۷/۳۱ میلیارد متر مکعب)، می‌توان درآمد را در سناریوهای مشابه به‌ترتیب ۵ و ۱۰ درصد افزایش داد و در حالتی که مقادیر صادرات در بازه تاریخی نوسان داشته باشند، افزایش درآمد تا حدود ۶۰ درصد نیز امکان‌پذیر است. بنابراین، نتایج حاکی از آن است که بازنگری در ترکیب سبد صادراتی محصولات کشاورزی، می‌تواند ضمن کاهش چشمگیر مصرف آب مجازی، بهبود قابل توجهی در درآمد ارزی کشور ایجاد کند.



نمودار ۳-الف - نتایج حداقل‌سازی آب مجازی صادراتی
Figure 3-a- Results of Minimizing Exported Virtual Water

جدول ۸، نتایج تحلیل حساسیت نیاز آبی محصولات صادراتی با هدف حداقل‌سازی میزان آب مجازی صادراتی به تفکیک مقصدهای اصلی را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول، باتوجه به کران‌های بالا الگو از پایداری مناسبی در ضرایب برخوردار است.

باتوجه به نتایج کران‌های **جدول ۹**، برای برخی محصولات که کران بالا بی‌نهایت گزارش شده است؛ افزایش قیمت سبب تمایل حداکثری الگو به افزایش صادرات آن محصولات (در محدوده محدودیت آب) تا جایی که درآمد افزایش یابد؛ اما میزان آب مجازی صادراتی تغییری نکند، می‌شود. این امر نشان‌دهنده قدرت الگو برای تحمل افزایش قیمت محصولات ارزآوری چون زعفران است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر با ترکیب دو رهیافت مکمل، تحلیل زنجیره مارکوف برای بررسی پایداری بازارهای صادراتی و الگوی برنامه‌ریزی ریاضی برای تعیین ترکیب بهینه صادرات، چارچوبی جامع برای

جدول ۸- تحلیل حساسیت نیاز آبی محصولات صادراتی به تفکیک مقصدهای اصلی (هدف: حداقل سازی میزان آب مجازی صادراتی)

Table 8- Sensitivity analysis of exported crops' water requirements by major destination markets (Objective: minimization of virtual water exports)

کد محصول Product code	آب مورد نیاز برای تولید هر تن محصول GWC per ton (m ³)	سناریو اول (A ₁) Scenario I (A1)		سناریو سوم (A ₂) Scenario III (A2)		سناریو پنجم (A ₃) Scenario V (A3)	
		کران بالا Upper Bound	کران پایین Lower Bound	کران بالا Upper Bound	کران پایین Lower Bound	کران بالا Upper Bound	کران پایین Lower Bound
X11	5868	+∞	3839	∞+	3839	+∞	4743
X12		+∞	3839	∞+	3839	+∞	4743
X13		+∞	3839	∞+	3839	+∞	4743
X14		+∞	3839	∞+	3839	+∞	4743
X15		+∞	3839	∞+	3839	+∞	4743
X21	14672	+∞	0	∞+	0	+∞	6533
X22		+∞	0	∞+	0	+∞	6533
X23		+∞	0	∞+	0	+∞	6533
X24		+∞	0	∞+	0	+∞	6533
X25		0	602	0	602	+∞	6533
X211	14672	11777	-∞	11777	-∞	0	-∞
X222		11777	-∞	11777	-∞	0	-∞
X233		11777	-∞	11777	-∞	0	-∞
X244		11777	-∞	11777	-∞	0	-∞
X255		11777	-∞	11777	-∞	10692	0
X31	7598	+∞	3763	+∞	3763	+∞	5471
X32		+∞	3763	+∞	3763	+∞	5471
X33		+∞	3763	+∞	3763	+∞	5471
X34		+∞	3763	+∞	3763	+∞	5471
X35		+∞	3763	+∞	3763	+∞	5471
X41	883	+∞	240	+∞	240	+∞	526
X42		+∞	240	+∞	240	+∞	526
X43		+∞	240	+∞	240	+∞	526
X44		+∞	240	+∞	240	+∞	526
X45		+∞	240	+∞	240	+∞	526
X51	325	863	-∞	526	-∞	334	-∞
X52		863	-∞	526	-∞	334	-∞
X53		863	-∞	526	-∞	334	-∞
X54		863	-∞	526	-∞	334	-∞
X55		863	-∞	526	-∞	334	-∞
X61	522	22	-∞	22	-∞	+∞	220
X62		22	-∞	22	-∞	+∞	220
X63		22	-∞	22	-∞	+∞	220
X64		22	-∞	22	-∞	+∞	220
X65		22	-∞	22	-∞	+∞	220

ادامه جدول ۸- تحلیل حساسیت نیاز آبی محصولات صادراتی به تفکیک مقصدهای اصلی (هدف: حداقل سازی میزان آب مجازی صادراتی)
Table 8 continued- Sensitivity analysis of exported crops' water requirements by major destination markets (Objective: minimization of virtual water exports)

کد محصول Product code	آب مورد نیاز برای تولید هر تن محصول GWC per ton (m ³)	سناریو اول (A ₁) Scenario I (A1)		سناریو سوم (A ₂) Scenario III (A2)		سناریو پنجم (A ₃) Scenario V (A3)	
		کران بالا Upper bound	کران پایین Lower bound	کران بالا Upper bound	کران پایین Lower bound	کران بالا Upper bound	کران پایین Lower bound
X71	4436530	+∞	1701031	+∞	1701031	+∞	2919083
X72		+∞	1701031	+∞	1701031	+∞	2919083
X73		+∞	1701031	+∞	1701031	+∞	2919083
X74		+∞	1701031	+∞	1701031	+∞	2919083
X75		+∞	1701031	+∞	1701031	+∞	2919083
X81	1384	5841	-∞	5841	-∞	2624	-∞
X82		5841	-∞	5841	-∞	2624	-∞
X83		5841	-∞	5841	-∞	2624	-∞
X84		5841	-∞	5841	-∞	2624	-∞
X85		5841	-∞	5841	-∞	2624	-∞
X91	10380	12012	-∞	12012	-∞	2041	-∞
X92		12012	-∞	12012	-∞	2041	-∞
X93		12012	-∞	12012	-∞	2041	-∞
X94		12012	-∞	12012	-∞	2041	-∞
X95		12012	-∞	12012	-∞	2041	-∞
X71	4436530	+∞	1701031	+∞	1701031	+∞	2919083
X72		+∞	1701031	+∞	1701031	+∞	2919083
X73		+∞	1701031	+∞	1701031	+∞	2919083
X74		+∞	1701031	+∞	1701031	+∞	2919083
X75		+∞	1701031	+∞	1701031	+∞	2919083
X81	1384	5841	-∞	5841	-∞	2624	-∞
X82		5841	-∞	5841	-∞	2624	-∞
X83		5841	-∞	5841	-∞	2624	-∞
X84		5841	-∞	5841	-∞	2624	-∞
X85		5841	-∞	5841	-∞	2624	-∞
X91	10380	12012	-∞	12012	-∞	2041	-∞
X92		12012	-∞	12012	-∞	2041	-∞
X93		12012	-∞	12012	-∞	2041	-∞
X94		12012	-∞	12012	-∞	2041	-∞
X95		12012	-∞	12012	-∞	2041	-∞
محدودیت درآمد Income Constraint	2171949	5847	60640	2809	130166	41069	494136

مأخذ: یافته‌های پژوهش Source: Research findings

جدول ۹- تحلیل حساسیت قیمت صادراتی به تفکیک مقصدهای اصلی (هدف: حداکثرسازی درآمد حاصل از صادرات)

Table 9- Sensitivity analysis of export prices by major destination markets (Objective: maximization of export revenue)

کد محصول Product code	قیمت صادراتی پیش‌بینی شده محصولات در ۲۰۲۳ Export Price (USD per Kg)	سناریو دوم (B ₁) Scenario II (B1)		سناریو چهارم (B ₂) Scenario IV		سناریو ششم (B ₃) Scenario VI	
		کران بالا Upper bound	کران پایین Lower bound	کران بالا Upper bound	کران پایین Lower bound	کران بالا Upper bound	کران پایین Lower bound
X11	0.82	0.38	-∞	0.38	-∞	0.91	-∞
X12		0.38	-∞	0.38	-∞	0.91	-∞
X13		0.38	-∞	0.38	-∞	0.91	-∞
X14		0.38	-∞	0.38	-∞	0.91	-∞
X15		0.38	-∞	0.38	-∞	0.91	-∞
X21	5.93	+∞	2.94	+∞	2.94	+∞	1.61
X22		+∞	2.94	+∞	2.94	+∞	1.61
X23		+∞	2.94	+∞	2.94	+∞	1.61
X24		+∞	2.94	+∞	2.94	+∞	1.61
X25		+∞	2.94	+∞	2.94	+∞	1.61
X211	10.69	+∞	7.70	+∞	7.70	+∞	6.37
X222		+∞	7.70	+∞	7.70	+∞	6.37
X233		+∞	7.70	+∞	7.70	+∞	6.37
X244		+∞	7.70	+∞	7.70	+∞	6.37
X255		+∞	7.70	+∞	7.70	+∞	6.37
X31	1.55	0	-∞	0	-∞	0.69	-∞
X32		0	-∞	0	-∞	0.69	-∞
X33		0	-∞	0	-∞	0.69	-∞
X34		0	-∞	0	-∞	0.69	-∞
X35		0.34	0	0.34	0	0.69	-∞
X41	0.26	+∞	0.08	+∞	0.08	0	-∞
X42		+∞	0.08	+∞	0.08	0	-∞
X43		+∞	0.08	+∞	0.08	0	-∞
X44		+∞	0.08	+∞	0.08	0	-∞
X45		+∞	0.08	+∞	0.08	0.10	0
X51	0.48	+∞	0.41	+∞	0.41	+∞	0.38
X52		+∞	0.41	+∞	0.41	+∞	0.38
X53		+∞	0.41	+∞	0.41	+∞	0.38
X54		+∞	0.41	+∞	0.41	+∞	0.38
X55		+∞	0.41	+∞	0.41	+∞	0.38
X61	0.22	+∞	0.11	+∞	0.11	+∞	0.07
X62		+∞	0.11	+∞	0.11	+∞	0.07
X63		+∞	0.11	+∞	0.11	+∞	0.07
X64		+∞	0.11	+∞	0.11	+∞	0.07
X65		+∞	0.11	+∞	0.11	+∞	0.07
X71	1105.61	+∞	200.55	+∞	200.55	200.73	-∞
X72		+∞	200.55	+∞	200.55	200.73	-∞
X73		+∞	200.55	+∞	200.55	200.73	-∞
X74		+∞	200.55	+∞	200.55	200.73	-∞
X75		+∞	200.55	+∞	200.55	200.73	-∞

ادامه جدول ۹- تحلیل حساسیت قیمت صادراتی به تفکیک مقصدهای اصلی (هدف: حداکثرسازی درآمد حاصل از صادرات)

Table 9 continued- Sensitivity analysis of export prices by major destination markets (Objective: maximization of export revenue)

کد محصول Product code	قیمت صادراتی پیش‌بینی شده محصولات در ۲۰۲۳ Export Price (USD per Kg)	سناریو دوم (B ₁) Scenario II (B1)		سناریو چهارم (B ₂) Scenario IV		سناریو ششم (B ₃) Scenario VI	
		کران بالا Upper bound	کران پایین Lower bound	کران بالا Upper bound	کران پایین Lower bound	کران بالا Upper bound	کران پایین Lower bound
X81	2.92	+∞	2.64	+∞	2.64	+∞	2.51
X82		+∞	2.64	+∞	2.64	+∞	2.51
X83		+∞	2.64	+∞	2.64	+∞	2.51
X84		+∞	2.64	+∞	2.64	+∞	2.51
X85		+∞	2.64	+∞	2.64	+∞	2.51
X91	9.05	+∞	6.93	+∞	6.93	+∞	5.99
X92		+∞	6.93	+∞	6.93	+∞	5.99
X93		+∞	6.93	+∞	6.93	+∞	5.99
X94		+∞	6.93	+∞	6.93	+∞	5.99
X95		+∞	6.93	+∞	6.93	+∞	5.99
محدودیت آب Water Constraint	7310937958	14621880	-∞	14621880	-∞	14621880	-∞

مأخذ: یافته‌های پژوهش Source: Research findings

نمود. بر این اساس و باتوجه به نتایج قبلی، پیشنهاد می‌شود سیاست‌های صادرات کشاورزی به‌صورت مقصدمحور طراحی شده و تصمیم‌گیری درباره محدودیت یا تشویق صادرات هر محصول، بر پایه شاخص‌های اقتصادی آب، اهمیت بازار مقصد، تقاضای بازار هدف و نقش راهبردی هر بازار و محصول در درآمد ارزی کشور صورت گیرد. این نتیجه با نتیجه مطالعه (Amini et al., 2025) همخوانی دارد و تأییدکننده آن است.

در نهایت، برای تحقیقات آتی، پیشنهاد می‌شود عوامل اقلیمی، محدودیت‌های تولید، نوسانات قیمتی جهانی و سیاست‌های تجاری کشور مقصد نیز در الگوی بهینه‌سازی وارد شوند. بدین ترتیب، یافته‌های تحقیق حاضر نشان می‌دهد که ارائه سیاست‌های تجاری و سیاست‌های مدیریت منابع آب با نگاه اقتصادی، می‌تواند نه تنها موجب حفظ پایداری زیست‌محیطی، بلکه زمینه‌ساز افزایش ثبات درآمد ارزی در بخش کشاورزی ایران گردد.

همچنین، نتایج سنجش پایداری با مطالعه (Ganeshkumar et al., 2016) همخوانی دارد. همچنین، طبق نتایج الگوهای بهینه در الگوی صادراتی ایران، بدون کاهش درآمدهای ارزی می‌توان در حدود ۵ تا ۴۰ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی نمود. از طرفی، نتایج بر امکان افزایش درآمد حاصل از صادرات در بازه ۵ تا ۵۵ درصدی با الزام تثبیت مصرف آب در الگو دلالت دارد. بنابراین، باتوجه به نتایج و با استناد بر جز دوم ماده ۱۱ قانون برنامه هفتم توسعه، در نظرگیری مشوق‌های صادراتی برای محصولاتی که الگو توصیه به کاهش آن‌ها می‌کند، راهگشا خواهد بود.

یافته‌ها همچنین بر ضرورت تغییر معیار طبقه‌بندی محصولات از «آب‌بری فیزیکی» به «بهره‌وری اقتصادی آب» تأکید دارند؛ به‌گونه‌ای که حتی در چارچوب حداقل‌سازی آب مجازی صادراتی، صادرات برخی محصولات آب‌بر از نظر فیزیکی می‌تواند در صورت برخورداری از بازده اقتصادی بالا، توجیه‌پذیر و مطلوب باشد. همچنین، در صادرات به هر مقصد، لازم است که به تقاضای آن بازار توجه

References

- Adelman, I.G. (1958). A stochastic analysis of the size distribution of firms. *Journal of the American Statistical Association*, 53(284), 893-904. <https://doi.org/10.1080/01621459.1958.10501486>
- Aligholinia, T., Ghorbani, K., Rezaie, H., & Gorbani Nasrabad, G. (2020). Evaluation and simulation of water footprints of agricultural crops in different climates of Iran considering of climate change scenarios. *Iran-Water Resources Research*, 16(3), 80-97.
- Allan, J.A. (1997). 'Virtual water': a long-term solution for water short Middle Eastern economies? (Vol. 5145). London, UK: School of Oriental and African Studies, University of London.

4. Amini, A., Othman, K., Abassi, F., & Booi, M.J. (2025). Determining virtual water, physical and economic indices to optimize agricultural water consumption in three different climates. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(5), 2941-2954. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05967-0>
5. Amiri, F., Rafiee, H., & Mahmoodi, A. (2021). Investigating the conformity of virtual water export pattern with Iran's competitive advantages. *Irrigation and Water Engineering*, 12(1), 382-397. (In Persian). <https://doi.org/10.22125/iwe.2021.138352>
6. Amiri, M., & Biglari Kami, M. (2014). Prediction of stock market behavior using Markov chain model. *Financial Engineering and Securities Management* (Portfolio Management), 5(20), 79-94. SID. (In Persian). <https://sid.ir/paper/197742/en>
7. Ashar, V.G., & Wallace, T.D. (1963). A sampling study of minimum absolute deviations estimators. *Operations Research*, 11(5), 747-758. <https://doi.org/10.1287/opre.11.5.747>
8. Babaeian, I., Javanshiri, Z., Modirian, R., Khazanedari, L., Falamarzi, Y., Malbusi, S., Karimian, M., Pakdaman, M., & Kouhi, M. (2024). Multi-annual prediction of precipitation and temperature over Iran and neighboring countries during 2022-2026 using DCP models. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(1), 199-215. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.356693.1007510>
9. Balovi, F., Liaghat, A., & Ebrahimian, H. (2022). Estimation of water footprint in current cropping patterns and its reduction capacity in optimal patterns under multiple goals conditions (Case study; Varamin region). *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 53(4), 987-999. <https://doi.org/10.22059/ijaedr.2022.338478.669130>
10. Dent, W.T. (1967). Application of Markov analysis to international wool flows. *The Review of Economics and Statistics*, 613-616. <https://doi.org/10.2307/1928354>
11. Falusi, B. (1976). Application of Markov chain analysis in short-term demand forecasting for agricultural inputs.
12. Fisher, W.D. (1961). A note on curve fitting with minimum deviations by linear programming. *Journal of the American Statistical Association*, 56(294), 359-362. <https://doi.org/10.1080/01621459.1961.10482119>
13. Ganeshkumar, V., Narayan, S., & Thomas, S. (2016). Analysis of pomegranate export performance from India using Markov chains. *Agricultural Policy and Trade Journal*, 13(1), 77-89. <https://doi.org/10.5958/0976-4666.2016.00071.1>
14. Goodman, L.A. (1953). A further note on "Finite Markov Processes in Psychology". *Psychometrika*, 18(3), 245-248. <https://doi.org/10.1007/bf02289062>
15. Hoekstra, A.Y., & Hung, P.Q. (2003). Virtual water trade. In Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade, 12, 1-244.
16. <https://intracen.org/>
17. <https://irica.ir/> (In Persian)
18. <https://www.maj.ir/> (In Persian)
19. <https://www.unep.org/>
20. <https://www.worldbank.org/>
21. Jarrett, F.G., & Dent, W. (1966). Fiber substitution – A Markov Process Analysis. *Australian Economic Papers*, 5
22. Javaheri, B., Azizi, V., & Shahveisi, H. (2024). Political freedom, human development and environmental sustainability in Iran. *Stable Economy Journal*, 5(1), 116-149. (In Persian). <https://doi.org/10.22111/sedj.2024.47601.1430>
23. Jhade, S., & Singh, A. (2020). Structural change analysis of groundnut export markets of India: Markov Chain Approach. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(2), 1806-1812. <https://doi.org/10.17485/IJED/v9.2021.5>
24. Kao, R.C. (1953). Note on Miller's "Finite Markov Processes in Psychology". *Psychometrika*, 18(3), 241-243. <https://doi.org/10.1007/bf02289061>
25. Khalilian, S., & Farhadi, A. (2002). Study of factors affecting Iran's agricultural exports. *Agricultural Economics and Development*, 10(3), 71-84. (In Persian)
26. Konar, M., Dalin, C., Suweis, S., Hanasaki, N., Rinaldo, A., & Rodriguez-Iturbe, I. (2011). Water for food: The global virtual water trade network. *Water Resources Research*, 47(5). <https://doi.org/10.1029/2010WR010307>
27. Lee, L.F., Judge, G.G., & Takayama, T. (1965). On Estimating the Transition Probabilities of a Markov Process.
28. Lee, T.C., Judge, G.G., & Takayama, T. (1970). On Estimating the Transition Probabilities of a Markov Process. *Journal of Farm Economics*, 52(3), 742-744. <https://doi.org/10.2307/1236285>
29. Madansky, A. (1959). The fitting of straight lines when both variables are subject to error. *Journal of the American Statistical Association*, 54(285), 173-205. <https://doi.org/10.1080/01621459.1959.10501505>
30. Mahadevaiah, G.S., Ravi, P.C., & Chengappa, P.G. (2005). Stability analysis of raw cotton export markets of India-Markov chain approach. *Agricultural Economics Research Review*, 18(2), 253-259. <https://doi.org/10.1177/0971344120050208>
31. Mekonnen, M.M., & Hoekstra, A.Y. (2020). Sustainability of the blue water footprint of crops. *Advances in Water Resources*, 143, 103679. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103679>

32. Miller, G.A. (1952). Finite Markov processes in psychology. *Psychometrika*, 17(2), 149-167. <https://doi.org/10.1007/BF02288779>
33. Ministry of Agricultural Jihad. (2024). Volume 1 and 3 of the Statistical Bulletin. < www.maj.ir >.
34. Mohy, S., El Aasar, K., & Sakr, Y. (2023). Decomposition analysis of virtual water outflows for major Egyptian exporting crops to the European Union. *Sustainability*, 15(6), 4943. <https://doi.org/10.3390/su15064943>
35. Murthy, D.S., & Subrahmanyam, K.V. (1999). Onion exports markets and their stability for increasing India's exports Markov chain approach. *Agricultural Economics Research Review*, 12(2), 118-128.
36. Norton, R.D., & Hazell, P.B. (1986). Mathematical programming for economic analysis in agriculture. New York, NY, USA: Macmillan. <https://doi.org/10.2307/2531573>
37. Pishbahar, E., Shahbazi, P., & Hosseinzad, J. (2021). Prediction of production, export and import of Iran's agricultural sector: The combination of econometrics and system dynamics methods. *Agricultural Economics*, 15(1), 1-28. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/iaes.2021.526889.1829>
38. Prais, S.J. (1955). Measuring social mobility. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, 118(1), 56-66. <https://doi.org/10.2307/2342522>
39. Rafiee, H., Shahnabati, N., & Kiani Feyzabad, Z. (2021). Estimation of virtual water waste due to wasted products in wholesale fruit and vegetable markets; case study of Tehran city. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 52(2), 229-246. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijaedr.2020.301216.668901>
40. Rasheed, A., M, A., M, R., Albaqami, M., Sher, A., Sattar, A., & Wu, Z. (2022). Key insights to develop drought-resilient soybean: A review. *Journal of King Saud University-Science*, 34(5), <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102089>.
41. Sahu, P. K., Das, M., Sarkar, B., VS, A., Dey, S., Narasimhaiah, L., & Raghav, Y. S. (2024). Potato production in India: a critical appraisal on sustainability, forecasting, price and export behaviour. *Potato Research*, 67(4), 1209-1245. <https://doi.org/10.1007/s11540-023-09682-0>
42. Solow, R. (1951). Some Long-Run Aspects of the Distribution of Wage Incomes. *Econometrica*, 19.
43. Sunil, J., & Singh, A. (2021). Structural change analysis of groundnut export markets of India: Markov Chain Approach. *Indian Journal of Economics and Development*, 9(1), 1-6. <https://doi.org/10.17485/IJED/v9.2021.5>
44. Tamea, S., Carr, J.A., Laio, F., & Ridolfi, L. (2014). Drivers of the virtual water trade. *Water Resources Research*, 50(1), 17-28. <https://doi.org/10.1002/2013WR014707>
45. Telser, L.G. (1962). The demand for branded goods as estimated from consumer panel data. *The Review of Economics and Statistics*, 44(3). <https://doi.org/10.2307/1926401>
46. Theil, H. (1961). *Economic Forecasts and Policy*. North-Holland Publishing Company.
47. Veena, U.M., Suryaprakash, S., & Achoth, L. (1994). Changing direction of Indian coffee exports. *Indian Journal of Agricultural Economics*, 49(3), 426-431.
48. Wagner, H.M. (1959). Linear programming techniques for regression analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 54(285), 206-212. <https://doi.org/10.1080/01621459.1959.10501506>
49. Xu, H., Chaiboonsri, C., & Chokethaworn, K. (2023, February). Research on export prediction model based on machine learning: Application of China's agricultural products export. In Proceedings of the 2023 3rd International Conference on Bioinformatics and Intelligent Computing (pp. 259-263). <https://doi.org/10.1145/3592686.3592733>