

Research Paper

**Calculating the Economic-Environmental Efficiency of Barley Crop
Production Based on Water Footprint**

*H. Ghiasi*¹, *A. Sheikhzeinoddin*²

Received: 28 September, 2022

Accepted: 17 October, 2023

Introduction: Due to the increase in population and the need to provide food and preserve the environment, the importance of the water crisis has increased in the years leading to the third millennium and the beginning of the 21st century. The reduction of underground and surface water resources and the destruction of the environment and water ecosystems are signs of the water crisis in Iran and the world. On the other hand, the production of agricultural products is associated with the creation of environmental effects, especially water and soil pollution (due to the use of pesticides and as a result, the loss of environmental balance). Therefore, there is a need for policy-makers to have indicators in the field of the effects of agricultural activities on natural resources and the environment, so that they can measure the economic and environmental effects. The water footprint index was first introduced by Hoekstra and Hung in 2002; and over recent years, it has been widely used by experts in different parts of the world. The water footprint is a multidimensional indicator that shows the volume of water consumed by the type of water source and the volume of polluted water by the type of pollutant. All components of the total water footprint are determined by time and place. The water footprint consists of three components, including blue water footprint, green water footprint and gray water footprint. Therefore, given the importance of sustainability of water resources, in this study, by considering the components of water footprint as inputs in the production function, the economic-environmental efficiency was estimated using the Stochastic Frontier Approach (SFA) for the production of barley in Iran; specifically, Water Footprint-Stochastic Frontier Approach (WF-SFA) framework was used to analyze the economic-environmental efficiency of barley production. Thus, in this study, in order to estimate the environmental effects, the water footprint index was used and the economic-environmental efficiency of barley production was

-
1. PhD Student in Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz University, Shiraz, Iran.
 2. Corresponding Author, Assistant Professor of Agricultural Economics, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran (azeinoddin@shirazu.ac.ir).

DOI: 10.30490/AEAD.2023.360151.1467

estimated. For this purpose, the components of barley water footprint were calculated in the provinces producing this product. Then, the economic-environmental efficiency of barley production in the provinces of Iran was calculated.

Materials and Methods: In the first step, in order to calculate the water footprint, meteorological data was collected for the cities that had the highest level of barley cultivation in each province. This information included average wind speed (m/s), maximum temperature (c), minimum temperature (c), average temperature, 24-hour precipitation (mm), maximum relative humidity (%), minimum relative humidity (%), average relative humidity (%), sunny hours and daily radiation amount. The total water footprint during crop growth (WF) is the sum of blue, green and gray water components. After calculating the components of barely water footprint in the provinces of the country following Battese and Coelli (1995), an SFA model was created for barely production. In the year t , for the i province, the basic stochastic frontier production function is in the form of the following equation:

$$\begin{aligned} y_{it} &= \exp(X_{it} \beta + v_{it} - u_{it}) \\ u_{it} &= Z_{it} \delta + W_{it} \end{aligned} \quad (1)$$

where y_{it} is the product obtainable from input X_{it} (subtraction of inputs) and β is the vector of unknown parameters; in addition, v_{it} represents random errors that are assumed to have a normal distribution with zero mean and variance σ_v^2 and is distributed independently of u_{it} .

In this study, in order to calculate the economic-environmental efficiency using the stochastic frontier production function, the appropriate production function form was first selected. The forms of the production function examined in this study are Cobb-Douglas and Translog. After choosing the appropriate production function and model type, the stochastic frontier production function was estimated by the maximum likelihood method as well as the economic-environmental efficiency of barley production was estimated.

Results and Discussion: By examining different barley producing provinces, it could be seen that the highest amount of total water footprint was related to the provinces of Ilam, Kerman, Sistan and Baluchistan and South Khorasan and the lowest amount was related to the provinces of Tehran, Golestan, Qazvin and Ardabil. The total amount of water footprint for most provinces was in the range of 3 to 4 thousand cubic meters. Also, the results showed that the barley water

footprint in Iran did not follow a very specific geographical pattern, but in tropical and low-rainfall provinces such as Sistan and Baluchistan, the water footprint was higher and the main difference between the water footprints of the provinces was due to the blue water footprint. The results of the estimation of the stochastic frontier production function of barley production using the variable efficiency model over time showed that the combined input variables, blue water footprint and green water footprint had a significant effect on the production of this product. In this regard, the positive coefficient of the combined input variable (X1) and the green water footprint (X4) indicated that assuming the constancy of other conditions, a 1% increase in the amount of each of these variables would lead to an increase of about 1% in the production of barley among the provinces. These findings indicated the low level of accumulation of combined inputs in the production of barley due to the low production rate of this product and also the low amount of precipitation in the country. The labor force variable (X2) was not statistically significant; and the coefficient of this variable in the estimated production function indicated that the labor force had a very small positive effect on the efficiency of barley production. Therefore, due to the very low contribution of labor in barley production, it is expected that the amount of barley production in Iran will increase with the increase in the degree of mechanization.

Conclusions: The final results showed that the provinces of Ilam, Qom, and Isfahan had the lowest economic-environmental efficiency, and the provinces of Kohgiluyeh and Boyer Ahmad, Kermanshah, and Kurdistan had the highest economic-environmental efficiency in barley production, respectively. The overall average economic and environmental efficiency of wheat production was estimated at 0.94. Furthermore, the results of the estimation of the inefficiency model showed that the economic and environmental efficiency of barley production was higher for regions with higher per capita GDP and more rainfall. In other words, the variables of per capita GDP and annual rainfall negatively affect the economic and environmental inefficiency of barley. So, it is suggested to evaluate the effects of human and social capital on the economic-environmental efficiency of agricultural production in future studies. It is also suggested to follow the following methods to reduce pollution and preserve the environment: changing production methods, more efficient management and the use of superior technologies by ineffective provinces (for example, new irrigation methods to reduce the water footprint), the use of green fertilizers and so-called low-risk chemical fertilizers approved by international organizations to reduce the gray water footprint as one of the factors that reduce the efficiency and biological control instead of using pesticides (to reduce the gray water footprint) to eliminate pests. On the other hand, encouraging incentives and punishments are also very

effective for farmers. The government should think of incentive measures to encourage efficient sectors; for example, it can give the priority of using resources with lower prices to farmers who produce less environmental pollution by using fewer chemical fertilizers and pesticides. Paying subsidies to efficient producers is also effective. On the other hand, environmental regulations should be set for producers. Establishing a tax on undesirable products to increase the motivation of producers and farmers to use environmentally friendly methods and techniques is also very effective.

Keywords: *Economic-Environmental Efficiency, Water Footprint, Barely, Stochastic Frontier Production Function.*

JEL Classification: B4, C8, C87, D24

اقتصاد کشاورزی و توسعه

سال ۳۱، شماره ۱۲۴، زمستان ۱۴۰۲

مقاله پژوهشی

محاسبه کارآیی اقتصادی - زیست‌محیطی تولید محصول جو بر مبنای ردپای آب

حامد قیاسی^۱، آذر شیخ‌زین‌الدین^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵

چکیده

در جریان دستیابی به اهداف اقتصادی (کارآیی اقتصادی - زیست‌محیطی)، در نظر گرفتن تأثیرات زیست‌محیطی تولید محصولات زراعی ضروری است. کارآیی اقتصادی - زیست‌محیطی می‌تواند معیاری مناسب برای ارزیابی پایداری تولید محصولات و کارآیی اقتصادی آن به‌شمار آید. از آنجا که تولید محصولات کشاورزی با ایجاد اثرات زیست‌محیطی همراه است و در مقیاس جهانی، بیشترین میزان مصرف آب برای تولید محصولات کشاورزی استفاده می‌شود. بنابراین، در مطالعه حاضر، به‌منظور بررسی اثرات زیست‌محیطی تولید محصول جو، از شاخص ردپای آب استفاده شد. بدین منظور، ابتدا ردپای آب این محصول با استفاده از اطلاعات هواشناسی روزانه نود ایستگاه در سراسر کشور در استان‌های کشور طی دوره ۱۳۷۹-۱۳۹۹ محاسبه و سپس، با استفاده از روش مرزی تصادفی، کارآیی اقتصادی - زیست‌محیطی تولید جو برآورد شد؛ بدین ترتیب، متوسط سهم اجزای ردپای آب آبی، سبز و خاکستری در ۳۱ استان کشور، در دوره زمانی ۱۳۷۹-۱۳۹۹، به‌ترتیب، ۱۲،۷۴ و ۱۴ درصد است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، در طول دوره مورد مطالعه، به‌طور متوسط، بیشترین مقدار ردپای آب سبز مربوط به دو استان کهگیلویه و بویراحمد و مازنداران و کمترین مقدار آن مربوط به استان یزد و بیشترین و کمترین

۱- دانشجوی دکتری اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

۲- نویسنده مسئول و استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

(azeinoddin@shirazu.ac.ir)

مقدار ردپای آب آبی، به ترتیب، مربوط به استان‌های ایلام و خوزستان بود؛ همچنین، کمترین مقدار ردپای آب خاکستری متعلق به استان آذربایجان غربی با ۳۰۲ و بیشترین متعلق به استان زنجان با ۱۲۳۴ متر مکعب بر تن بود. در نهایت، نتایج محاسبه کارآیی اقتصادی- زیست‌محیطی نشان داد که استان‌های ایلام، قم و اصفهان کمترین کارآیی اقتصادی- زیست‌محیطی در تولید جو و استان‌های کهگیلویه و بویراحمد، کرمانشاه و کردستان، به ترتیب، بیشترین کارآیی را دارند. نتایج برآورد تابع تولید مرزی تصادفی جو با استفاده از مدل کارآیی متغیر در طول زمان نشان داد که متغیرهای نهاده ترکیبی، ردپای آب آبی و ردپای آب سبز اثر معنی‌دار بر تولید این محصول دارند. از سوی دیگر، میانگین کل کارآیی اقتصادی- زیست‌محیطی تولید جو ۰/۹۴ برآورد شد. همچنین، نتایج برآورد مدل ناکارآیی نشان داد که کارآیی اقتصادی- زیست‌محیطی تولید جو برای مناطقی با تولید ناخالص داخلی سرانه و میزان بارندگی بالاتر بیشتر است؛ به دیگر سخن، متغیرهای تولید ناخالص داخلی سرانه و میزان بارندگی سالانه اثر منفی بر ناکارآیی اقتصادی- زیست‌محیطی تولید جو دارند. بر اساس نتایج به دست آمده، پیشنهاد می‌شود که برای کاهش آلودگی و حفظ محیط زیست، استفاده از کودهای سبز و کودهای شیمیایی کم‌خطر و کنترل بیولوژیکی به منظور کاهش ردپای آب خاکستری دنبال شود؛ همچنین، با ایجاد راهکارهایی مانند گسترش روش‌های آبیاری نوین، استفاده از ارقام مقاوم و با عملکرد بالا و مصرف صحیح کودهای شیمیایی با کاهش حجم آب در تولید جو، می‌توان وضعیت شاخص ردپای آب در ایران را بهبود بخشید.

کلیدواژه‌ها: کارآیی اقتصادی- زیست‌محیطی، ردپای آب، جو، تابع تولید مرزی تصادفی.

طبقه‌بندی JEL : B4, C8, C87, D24

مقدمه

با توجه به افزایش جمعیت و لزوم تأمین غذا و حفظ محیط زیست، اهمیت بحران آب در سال‌های منتهی به هزاره سوم و ابتدای قرن ۲۱ بیشتر شده است. کاهش منابع آب‌های زیرزمینی و سطحی و از بین رفتن محیط زیست و زیست‌بوم‌های آبی از نشانه‌های بحران آب در ایران و جهان است (Mekonnen and Hoekstra, 2011). نتایج پژوهش‌ها حاکی از آن است که از سال ۲۰۰۰، ایران در فهرست کشورهای دارای کسری آب قرار گرفته و تا سال ۲۰۳۰، منابع آب تجدیدپذیر کشور کمتر از ۱۵۰۰ متر مکعب برای هر نفر خواهد بود (Yang et al., 2006). از سویی، تخصیص بیش از نود درصد از منابع آب کشور به بخش کشاورزی نشانگر اهمیت این بخش در مصرف آب است. بنابراین، ضروری است که مصرف آب در بخش کشاورزی تا سطحی پایدار کاهش یابد (Molden et al., 2007).

در ایران، محصول جو از محصولات راهبردی قلمداد شده و از سطح زیر کشت قابل توجهی برخوردار است، به‌گونه‌ای که در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹، سطح زیر کشت این محصول بیش از ۲۰۶۲ هزار هکتار و میزان تولید آن ۳۶۰۰ هزار تن بوده است. اما بر پایه گزارش سازمان خواربار و کشاورزی (فائو) در سال ۲۰۲۰، با توجه به نیاز داخلی، حدود ۸۱۶ هزار تن جو در سال ۱۳۹۹ وارد کشور شده و بنابراین، تولید داخلی قادر به پاسخ‌گویی نیاز داخلی نبوده است. از این‌رو، از طریق افزایش میزان استفاده از عوامل تولید و یا استفاده بهتر از عوامل تولید با اتخاذ مدیریت بهتر، می‌توان به افزایش تولید دست یافت (Emami Meybodi et al., 2011). با توجه به اصل کمیابی که در خصوص عوامل تولید وجود دارد، روش افزایش در عوامل تولید میسر نیست، یا در اولویت اول قرار نمی‌گیرد؛ به همین دلیل، یکی از راه‌های بهینه‌سازی ترکیب عوامل تولید، در راستای افزایش تولید، استفاده از مفهوم «کارایی» است. کارایی اندازه‌گیری رابطه بین مقدار خروجی تولیدشده و مقدار ورودی مورد استفاده برای تولید آن خروجی‌هاست. افزایش کارایی کشاورزی یک سیاست درازمدت در بسیاری از کشورها به‌ویژه کشورهای در حال توسعه است (Mardani and Salarpour, 2015). برای ارزیابی این موضوع که تولیدکنندگان، در صورت دستیابی به اهداف اقتصادی خود، از منابع به‌طور بهینه استفاده می‌کنند و اثرات زیست‌محیطی را به حداقل می‌رسانند، کارایی اقتصادی - زیست‌محیطی^۱ مطرح شده است (Thanawong et al., 2014). کارایی اقتصادی - زیست‌محیطی اولین ابزار است که برای تجزیه و تحلیل پایداری، توسط شالتگر و اشترم (Schaltegger and Sturm, 1990) پیشنهاد شد و به‌دنبال آن، توسط شورای جهانی تجارت برای توسعه پایدار^۲ در سال ۱۹۹۲ گسترش یافت. علاوه بر اهمیت افزایش کارایی تولید، شناخت علل ناکارآمدی نیز که خود از عوامل کاهش تولید است، اهمیت ویژه دارد (Agustina, 2016).

تولید محصولات کشاورزی با ایجاد اثرات زیست‌محیطی و به‌ویژه آلودگی آب و خاک (به‌واسطه مصرف سموم آفت‌کش‌ها و در نتیجه، از بین رفتن تعادل محیط زیست) همراه است (Thanawong et al., 2014). از این‌رو، باید سیاست‌گذاران شاخص‌هایی در زمینه اثرات فعالیت‌های کشاورزی بر منابع طبیعی و محیط زیست داشته باشند تا از این رهگذر، بتوانند اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی را اندازه‌گیری کنند (Robaina-Alves et al., 2015). شاخص ردپای آب برای اولین بار توسط هوکسترا و هانگ (Hoekstra and Hung, 2002) معرفی شده و در سال‌های اخیر، به‌گونه‌ای گسترده از سوی متخصصان در نقاط مختلف دنیا مورد استفاده قرار گرفته است (Ababaei and Etedali, 2014;)

1. Economic Environmental Efficiency (Eco-efficiency)
2. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)

Fathi et al., 2020; Hoekstra and Chapagain, 2006; Hoekstra et al., 2011; Hoekstra and Mekonnen, 2012; Jaramillo and Destouni, 2015; Lovarelli et al., 2016; (Mekonnen and Hoekstra, 2011; Zhang and Anadon, 2014; Zhang et al., 2016).

ردپای آب یک شاخص چندبعدی است که حجم آب مصرفی را به تفکیک نوع منبع آب مصرفی و حجم آب آلوده شده را به تفکیک نوع آلاینده نشان می‌دهد؛ بدین ترتیب، تمام اجزای ردپای آب کل به تفکیک زمان و مکان مشخص می‌شوند. ردپای آب از سه جزء تشکیل شده است که عبارت‌اند از ردپای آب آبی، ردپای آب سبز و ردپای آب خاکستری. ردپای آب آبی به مصرف منابع آب آبی (آب سطحی و زیرزمینی) در کل زنجیره تأمین یک محصول اشاره می‌کند. ردپای آب سبز به مصرف منابع آب سبز (یعنی، بخشی از آب باران که تبدیل به رواناب می‌شود) اشاره می‌کند. ردپای آب خاکستری به آلودگی آب توجه دارد و حجم آب شیرین مورد نیاز برای پذیرش بار آلاینده‌ها در منبع آبی است که در آن، مقادیر معین یا همان غلظت‌های طبیعی و مجاز آن آلاینده‌ها تعریف شده‌اند. ردپای آب تابع متغیرهای اقلیمی شامل دمای کمینه و بیشینه، سرعت باد، بارندگی، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی، و میزان مصرف کود شیمیایی است. بنابراین، ارزیابی ردپای آب یک ابزار تحلیلی برای کمک به درک ارتباط بین فعالیت‌ها با کمبود و آلودگی آب و اثرات مرتبط و فهم این موضوع است که چه باید انجام داد تا اطمینان حاصل شود که این فعالیت‌ها سهمی در مصرف ناپایدار آب ندارند (Hoekstra et al., 2011).

مطالعات مختلف به ارزیابی کارایی در بخش کشاورزی پرداخته‌اند که از آن میان، پژوهش‌هایی چند در پی تشریح می‌شود. لی و همکاران (Li et al., 2017) به محاسبه کارایی زیست‌محیطی محصولات کشاورزی کشور چین برای سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵ پرداختند. نتایج نشان داد که در صورت لحاظ نکردن اثرات زیست‌محیطی در بخش کشاورزی، کارایی در این بخش کاهش می‌یابد. سانگ و چن (Song and Chen, 2019)، با استفاده از شاخص ردپای آب و به‌کارگیری رهیافت مرزی تصادفی^۱، کارایی اقتصادی- زیست‌محیطی تولید غلات را در کشور چین برآورد کرده و بدین منظور، از داده‌های سرمایه، نیروی کار و ردپای آب بهره برده‌اند. کارایی برآورده در این مطالعه بین ۰/۴۲۴ و ۰/۹۸۶ بوده و به باور آنها، توان لازم برای افزایش پایداری زیست‌محیطی با افزایش تولید غلات موجود است. همچنین، مولایی و مولایی (Molaei and Molaei, 2015) به برآورد کارایی زیست‌محیطی بخش کشاورزی طی سال‌های ۱۳۷۳ تا ۱۳۹۰ پرداختند؛ بدین منظور، از روش تحلیل پوششی داده‌ها استفاده و پنج آلاینده (CO_2 , CO, CH_4 , NOx, SO_2) در نظر گرفته شد. نتایج این مطالعه نشان داد که با در نظر گرفتن آلاینده‌ها، مقدار کارایی کمتر است، به‌گونه‌ای که متوسط کارایی از ۰/۹۸ به ۰/۷۲ کاهش

1. Stochastic Frontier Approach (SFA)

یافت. این موضوع نشان می‌دهد که شرایط زیست محیطی به گونه‌ای معنی‌دار بر کارایی اثرگذار است. مولایی و سانی (Molaei and Sani, 2015) نیز به برآورد کارایی فنی و زیست محیطی گاوداری‌های شیری شهرستان سراب پرداختند. نتایج نشان داد که میانگین کارایی فنی ۹۵ درصد، کارایی مقیاس ۵۵ درصد و کارایی زیست محیطی ۸۸ درصد است؛ همچنین، گاوداری‌هایی که کارایی فنی بالاتری دارند، آلاینده کمتری تولید می‌کنند و بنابراین، از کارایی زیست محیطی بالاتری برخوردارند. در پژوهشی دیگر، مولایی و همکاران (Molaei et al., 2017) به برآورد کارایی زیست محیطی محصول برنج در شهرستان بابلسر پرداختند. نتایج نشان داد که میانگین کارایی فنی و زیست محیطی، به ترتیب، برابر با ۸۷ و ۷۷ درصد است. این نتایج نشان می‌دهند که کارایی زیست محیطی به مراتب کمتر از کارایی فنی است. به دیگر سخن، به منظور برآورد نزدیک به واقعیت کارایی تولید، مضر بودن نهاده‌های شیمیایی باید در فرآیند تولید لحاظ شود. نوروزیان و همکاران (Nowruzian et al., 2019) به بررسی کارایی زیست محیطی پنبه‌کاران کشور پرداختند. در این مطالعه، انواع کارایی فنی، تخصیصی و اقتصادی با دو روش استاندارد و تلفیقی ویژه در دو سطح ثابت و متغیر نسبت به مقیاس برای تعیین کارایی مصرف آب و کارایی زیست محیطی آن در استان‌های تولیدکننده این محصول انجام گرفت. متوسط کارایی اقتصادی متغیر نسبت به مقیاس در دو روش استاندارد و زیست محیطی، به ترتیب، برابر با $0/78$ و $0/81$ درصد برآورد شد؛ همچنین، بر اساس نتایج مطالعه، استان‌هایی که با روش استاندارد، کارآ شناخته شدند، با روش کارایی زیست محیطی نیز نسبتاً کارآ بودند. دشتی و همکاران (Dashti et al., 2020) به ارزیابی ارتباط کارایی اقتصادی با کارایی زیست محیطی در بخش کشاورزی ایران پرداختند. بدین منظور، از روش تحلیل پوششی داده‌ها و آزمون علیت تودا- یاماموتو بهره گرفته شد. نتایج مطالعه نشان داد که میانگین کارایی زیست محیطی با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها ۸۸ درصد است. بررسی رابطه تعادلی بلندمدت نیز بیانگر آن بود که به ازای بهبود یک درصد در کارایی زیست محیطی، مقدار کارایی اقتصادی $0/63$ درصد افزایش می‌یابد. مهرگان و سیدبویر (Mehregan and Sidboyer, 2020) به بررسی اثر هزینه ناشی از آلودگی‌های زیست محیطی بر کارایی مناطق اقتصادی کشور چین پرداختند. نتایج نشان داد که مقادیر کارایی به دست آمده برای مدل شامل قوانین زیست محیطی کمتر از مدل بدون قوانین زیست محیطی است. گیوستی و همکاران (Giusti et al., 2022) هم به ارزیابی کارایی زیست محیطی گوشت مرغ با در نظر گرفتن ردپای آب و هزینه چرخه زندگی پرداختند. تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که کارایی زیست محیطی مرغ ممکن است با رژیم غذایی مبتنی بر ذرت و سویا به جای یک رژیم غذایی متوسط جهانی، تا ۲۸ درصد افزایش یابد. همچنین، این مطالعه نشان داد که برای

بهبود عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی مرغ، لازم است ردپای آب در تولید جیره کاهش یابد. همچنین، کوچکی پنجه و همکاران (Kouchaki-Penchah et al., 2023) به بررسی کارایی اقتصادی-زیست‌محیطی تولید برنج در ایران پرداختند. بدین منظور، از تجزیه و تحلیل اقتصادی-فنی، ارزیابی چرخه حیات و کارایی اقتصادی-زیست‌محیطی استفاده شد و نتایج نشان داد که افزایش کارایی اقتصادی-زیست‌محیطی تولید برنج در هر نظام زراعی می‌تواند با تنظیم استفاده از سوخت، کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها در مزرعه حاصل شود.

با بررسی مطالعات گذشته، آشکار می‌شود که مطالعات اندکی با استفاده از رهیافت مرزی تصادفی (SFA) به ارزیابی و بررسی کارایی تولید پرداخته‌اند؛ و این مسئله به‌ویژه برای تولید غلات (با توجه به اهمیت این محصولات و سطح زیر کشت قابل توجه آنها) در سطح منطقه‌ای و استانی بیشتر احساس می‌شود. افزون بر این، به‌کارگیری ردپای آب در برآورد تابع تولید مرزی با توجه به اهمیت آن به‌تازگی در کانون توجه قرار گرفته و در معدود مطالعات خارجی به‌کار گرفته شده است (Song and Chen, 2019). بنابراین، با توجه به اهمیت پایداری منابع آب، در مطالعه حاضر، با در نظر گرفتن اجزای ردپای آب به‌عنوان نهاده در تابع تولید، به تخمین کارایی با استفاده از روش SFA برای تولید جو در ایران پرداخته شده است. در پژوهش حاضر، برای تجزیه و تحلیل کارایی اقتصادی-زیست‌محیطی تولید جو، رهیافت مرزی تصادفی-رد پای آب^۱ به‌کار گرفته شده و بدین منظور، ابتدا اجزای ردپای آب محصول جو در استان‌های تولیدکننده این محصول و سپس، کارایی اقتصادی-زیست‌محیطی تولید جو در استان‌های ایران محاسبه شده است.

مواد و روش‌ها

بنا به تعریف سازمان همکاری و توسعه اقتصادی^۲، کارایی اقتصادی-زیست‌محیطی عبارت است از «کارایی استفاده از منابع زیست‌محیطی برای تأمین نیازهای بشر»؛ و از تقسیم «ارزش محصول یا خدمات بر تأثیرات زیست‌محیطی» محاسبه می‌شود. اما کارایی سازگار با محیط زیست، به‌طور کلی، نشان‌دهنده توانایی تولید کالاها و خدمات بیشتر ضمن مصرف کمتر منابع طبیعی و تأثیر کمتر بر محیط زیست است (Robaina-Alves et al., 2015). کارایی اقتصادی-زیست‌محیطی به معنی تولید بیشتر با ماده اولیه کمتر بوده و دربرگیرنده راهکارهایی است که نه تنها به افزایش کارایی استفاده از منابع و کاهش ضایعات توجه دارند، بلکه هزینه‌ها را نیز کاهش می‌دهند (Prasad et al., 2005). در همین راستا، استفاده از

1. Water Footprint-Stochastic Frontier Approach (WF-SFA)
2. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD)

شاخص کارآیی اقتصادی - زیست محیطی در تولید محصولات کشاورزی را می توان معیاری مناسب برای ارزیابی پایداری تولید محصولات و کارآیی اقتصادی آن دانست (Bonfiglio et al., 2017; Forleo et al., 2018; Ho et al., 2018). بررسی وضعیت کارآیی اقتصادی - زیست محیطی فعالیت های کشاورزی، با توجه به میزان مصارف مستقیم و غیرمستقیم آب، انتقال نتایج این مطالعات به کشاورزان و استفاده عملی از آنها، می تواند در مدیریت پایدار منابع طبیعی و زیست محیطی مؤثر باشد. در گام اول، به منظور محاسبه ردپای آب، داده های هواشناسی برای شهرستان های دارای بیشترین سطح زیر کشت محصول جو در هر استان جمع آوری شد. این اطلاعات عبارتند از: میانگین سرعت باد (m/s)، حداکثر دما (c)، حداقل دما (c)، میانگین دما، بارش ۲۴ ساعته (mm)، حداکثر رطوبت نسبی (درصد)، حداقل رطوبت نسبی (درصد)، میانگین رطوبت نسبی (درصد)، ساعات آفتابی و میزان تابش روزانه. کل ردپای آب در طول دوره رشد محصول (WF) از حاصل جمع اجزای آب آبی، سبز و خاکستری حاصل می شود (Ababaei and Etedali, 2014; Hoekstra and Chapagain, 2006; Hoekstra et al., 2011; Hoekstra and Mekonnen, 2012):

$$WF_{it} = WF_{it.blue} + WF_{it.green} + WF_{it.grey} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، i و t ، به ترتیب، بیانگر استان های مختلف و دوره زمانی است؛ همچنین، $WF_{it.blue}$ ردپای آب آبی، $WF_{it.green}$ ردپای آب سبز و $WF_{it.grey}$ ردپای آب خاکستری برای استان i ام در زمان t بر حسب متر مکعب (m^3) است. به منظور محاسبه میزان آب مصرفی محصول l_{gp} (m^3/ha)، از محاسبه تبخیر و تعرق روزانه ET (میلی متر در روز) در طول دوره رشد در قالب رابطه (۲) استفاده شده است (Ababaei and Etedali, 2014; Hoekstra and Chapagain, 2006; Hoekstra et al., 2011; Hoekstra and Mekonnen, 2012). در این رابطه، $ET_{it.blue}$ تبخیر و تعرق آب آبی (mm) استان i در دوره t است. عدد ۱۰ عامل تبدیل واحد mm به m^3/ha است. به منظور محاسبه ردپای آب آبی ($WF_{it.blue}$)، از رابطه (۳) استفاده شد:

$$CWU_{it.blue} = 10 \times \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{it.blue} \quad (2)$$

1. Crop Water Use (CWU)
2. daily evapotranspiration

$$WF_{it.blue} = (CWU_{it.blue})/Y \quad (۳)$$

در رابطه (۳) به منظور محاسبه آب آبی بر حسب متر مکعب بر تن، میزان آب مصرفی محصول (CWU) بر عملکرد محصول تقسیم شده است (Ababaei and Etedali, 2014; Hoekstra and Chapagain, 2006; Hoekstra et al., 2011; Hoekstra and Mekonnen, 2012).

به منظور محاسبه آب سبز، ابتدا بارندگی مؤثر محاسبه شد. بدین منظور، از روش وزارت کشاورزی ایالات متحده^۱ استفاده شد. طبق این روش، مقداری از آب باران که طی دوره رشد یک گیاه دریافت شده و برای مصارف آن در دسترس قرار گیرد، بارش مؤثر نامیده می‌شود (Song and Chen, 2019). در این روش، میزان بارندگی مؤثر در طول دوره رشد گیاه طبق رابطه (۴) محاسبه شد (Döll and Siebert, 2002)؛ و سپس، محاسبه آب سبز در قالب رابطه (۵) صورت گرفت:

$$\text{If: } P < 250 \text{ mm. } P_{eff} = (P/125) \times (125 - 0.2P) \quad (۴)$$

$$\text{If: } P > 250 \text{ mm. } P_{eff} = 125 + 0.1P$$

$$WF_{it.green} = (P_{eff} \times 10)/Y \quad (۵)$$

در روابط بالا، P_{eff} بارش مؤثر در طول دوره رشد (mm)، P بارندگی در طول دوره رشد (mm)، $WF_{it.green}$ ردپای آب سبز محصول در استان i ام در سال t (m^3)، عدد ۱۰ عامل تبدیل واحد mm به m^3 و Y عملکرد محصول (تن در هکتار) است. ردپای آب سبز به سهم آب حاصل از بارندگی مؤثر مرتبط است. جزء خاکستری $WF_{it.grey}$ در ردپای آب (متر مکعب بر تن) با استفاده از رابطه (۶) محاسبه شد:

$$WF_{it.grey} = \left(\frac{\alpha \times ar_{it}}{c_{max} - c_{nat}} \right) / Y \quad (۶)$$

که در آن، ar_{it} نرخ کاربرد کود شیمیایی در استان i در دوره t (kg/ha)، α درصد نیتروژن آبشویی شده (درصد)، c_{max} حداکثر غلظت قابل قبول (kg/m^3) و c_{nat} غلظت طبیعی برای آلاینده بررسی شده (kg/m^3) است (Ababaei and Etedali, 2014; Hoekstra and Chapagain, 2006; Hoekstra et al., 2011; Hoekstra and Mekonnen, 2012). در مطالعه حاضر، مقدار α ده درصد در نظر گرفته شد (Chapagain et al., 2006). همچنین، حداکثر غلظت نیتروژن در منابع آب

1. United States Department of Agriculture (USDA)

دریافت کننده بر اساس استاندارد US-EPA برابر با ده میلی گرم بر لیتر در نظر گرفته شد و از آنجا که اطلاعات دقیق از غلظت واقعی نیتروژن در منابع آب دریافت کننده در دسترس نبوده، این مقدار برابر با صفر در نظر گرفته شده است (Mekonnen and Hoekstra, 2011). مقدار کود نیتروژنه مصرفی در تولید محصولات جو از آمارنامه کشاورزی برای دوره زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۹ جمع آوری شد^۱.

بعد از محاسبه اجزای رد پای آب جو در استان های کشور، به پیروی از پژوهش باتسه و کولی (Battese and Coelli, 1995)، یک مدل SFA برای تولید جو ایجاد شد. در سال t ، برای استان λ ، تابع تولید مرزی تصادفی پایه به صورت رابطه (۷) است:

$$\begin{aligned} y_{it} &= \exp(X_{it} \beta + v_{it} - u_{it}) \\ u_{it} &= Z_{it} \delta + W_{it} \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن، y_{it} محصول قابل حصول از نهاده X_{it} (برداری از نهاده ها) و β بردار پارامترهای مجهول است؛ همچنین، v_{it} ها بیانگر خطاهای تصادفی با فرض توزیع نرمال آنها با میانگین صفر و واریانس σ_v^2 است که به طور مستقل از u_{it} توزیع شده است و u_{it} ها متغیرهای تصادفی غیرمنفی هستند که مربوط به عدم کارایی فنی تولید هستند و فرض را بر این قرار می دهیم که به طور مستقل توزیع شده اند، بدین ترتیب که u_{it} دارای توزیع نرمال با میانگین صفر $(Z_{it} \delta)$ و واریانس σ_u^2 است و Z_{it} بردار متغیرهای توضیحی مربوط به ناکارایی فنی و δ بردار ضرایب ناشناخته است. متغیر تصادفی (W_{it}) نیز با توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس σ_u^2 تعریف شده است (Aigner et al., 1977). بنابراین، کارایی اقتصادی - زیست محیطی برای استان λ در سال t به صورت نسبت خروجی واقعی به خروجی مرزی مطابق رابطه (۸) تعریف می شود:

$$E_{it} = \frac{\exp(X_{it} \beta + v_{it} - u_{it})}{\exp(X_{it} \beta + v_{it})} = \exp(-u_{it}) \quad (8)$$

در پژوهش حاضر، به منظور برآورد کارایی اقتصادی - زیست محیطی تولید جو در ایران، از دو دسته مدل کارایی ثابت در زمان و مدل کارایی متغیر در طول زمان بهره گرفته شد که از بین این دو، مدل کارایی متغیر در طول زمان به عنوان مدل برتر انتخاب و میزان کارایی اقتصادی - زیست محیطی با استفاده از این روش برآورد شد. فرم های تابعی مدل مرزی تصادفی مورد استفاده در پژوهش حاضر

۱- قابل دسترس در نشانی: <https://amar.maj.ir/page-amar/FA/65/form/pId29748>

کاب- داگلاس و ترانسلوگ است. برای انتخاب فرم تابعی مناسب، مدل لگاریتم راست‌نمایی هر دو تابع استخراج و آماره نسبت راست‌نمایی تعمیم‌یافته محاسبه شد (مقدار آماره محاسباتی ۷۴/۳۴). بنابراین، مقدار آماره محاسباتی از آماره جدول (۲۰/۵۱) بزرگ‌تر بوده و فرضیه صفر رد و تابع تولید ترانسلوگ پذیرفته شده است. پس از انتخاب تابع تولید مناسب و نوع مدل تابع تولید مرزی تصادفی به روش حداکثر درست‌نمایی برآورد شده و کارایی اقتصادی- زیست‌محیطی تولید جو تخمین زده شد. در تابع تولید، ستانده، ارزش جو بر حسب میلیون تومان در هکتار^۱ (Y) و نهاده‌ها نیز شامل سرمایه (نهاده ترکیبی) بر حسب میلیون تومان در هکتار^۲ (X_1)، نیروی کار بر حسب نفر در روز در هکتار^۳ (X_2)، ردپای آب آبی جو بر حسب متر مکعب در هکتار (X_3)، ردپای آب سبز جو بر حسب متر مکعب در هکتار (X_4)، ردپای آب خاکستری جو بر حسب متر مکعب در هکتار (X_5) و t متغیر روند زمانی است. مدل اثرات ناکارآمدی در قالب رابطه (۹) تعریف شده است (Song and Chen, 2019):

$$u_{it} = \delta_0 + \delta_1 PG_{it} + \delta_2 AR_{it} + \delta_3 IS_{it} + \delta_4 T_{it} + \delta_5 t + W_{it} \quad (9)$$

که در آن، PG تولید ناخالص داخلی سرانه (که از حاصل تقسیم تولید ناخالص داخلی استان به کل جمعیت استان به دست می‌آید و بر حسب میلیون تومان برای هر نفر استفاده می‌شود)، AR میزان بارندگی سالانه، IS نسبت سطح زیر کشت اراضی آبی به کل سطح زیر کشت استان (از نسبت سطح زیر کشت آبی به کل منطقه کشت‌شده محاسبه و بر حسب درصد عنوان می‌شود)، T میانگین دمای سالانه (میانگین دمای سالانه هر منطقه بر حسب درجه سانتی‌گراد) است. از روش حداکثر راست‌نمایی برای تخمین هم‌زمان پارامترهای تابع مرزی تصادفی و مدل اثرات ناکارآمدی استفاده شده است.

لازم به ذکر است که اطلاعات هواشناسی نود ایستگاه در سراسر کشور به صورت روزانه و طی دوره زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۹ از سازمان هواشناسی کل کشور جمع‌آوری شدند. همچنین، اطلاعات مربوط به روابط (۸) و (۹) از آمارنامه کشاورزی و مرکز آمار ایران و برای بازه زمانی ۱۳۸۵-۱۳۹۹ به دست آمد و در نهایت، کارایی برای بازه زمانی ۱۳۸۵-۱۳۹۹ محاسبه شد. همچنین، به دلیل یکسان بودن نهاده‌هایی مثل کود، بذر و زمین در استان‌ها و در کل پایین بودن سطح فناوری تولید غلات و از جمله محصول جو

۱- ارزش ناخالص تولید یک هکتار محصول جو از آمارنامه کشاورزی استخراج و نسبت به سال پایه (۱۳۷۹) تورم‌زدایی شد.

۲- هزینه تولید سایر نهاده‌ها به جز آب، کود و نیروی انسانی در این جزء دیده شده و البته، این اطلاعات از وبگاه وزارت جهاد کشاورزی به دست آمده است.

۳- قابل دسترس در نشانی: <https://amar.maj.ir/page-amar/FA/65/form/pId29748>

۳- قابل دسترس در نشانی:

در کشور، فناوری تولید جو در بین استان‌های مختلف ثابت فرض شده (Yadollahi, 2020) و از نرم‌افزار تحلیل مرز تصادفی (Frontier) جهت برآورد کارآیی اقتصادی - زیست محیطی استفاده شده است.

نتایج و بحث

در پژوهش حاضر، ردپای آب جو در ۳۱ استان کشور طی دوره زمانی ۱۳۷۹-۱۳۹۹ محاسبه شد. در جدول ۱، میانگین اجزای ردپای آب این محصول (ردپای آب آبی، ردپای آب سبز، ردپای آب خاکستری و ردپای آب کل) طی دوره زمانی مورد بررسی آمده است. متوسط سهم اجزای ردپای آب آبی، سبز و خاکستری در تولید جو آبی کشور در دوره زمانی ۱۳۷۹-۱۳۹۹، به ترتیب، ۱۲،۷۴ و ۱۴ درصد است. با بررسی استان‌های مختلف تولیدکننده جو، مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار ردپای آب سبز مربوط به دو استان کهگیلویه و بویراحمد و مازندران، به ترتیب، با مقادیر ۸۵۴ و ۸۵۳ متر مکعب بر تن و کمترین مقدار آن مربوط به استان یزد با ۱۳۴/۹۰ متر مکعب بر تن است؛ همچنین، بیشترین مقدار ردپای آب آبی با ۴۴۷۶ متر مکعب بر تن در استان ایلام به دست آمده و کمترین مقدار ردپای آب آبی محصول جو نیز همانند محصول گندم مربوط به استان خوزستان (۱۹۳۱ متر مکعب بر تن) است که دلیل آن بودن مقدار رطوبت و همچنین، بالا بودن عملکرد محصول در این استان نسبت به سایر استان‌هاست. برای محصول جو، ردپای آب آبی در تمامی استان‌ها بالاتر از ردپای آب سبز است. بنابراین، انتظار می‌رود که برای افزایش بهره‌وری محصول، در هر استان، ارقام مقاوم‌تر و سازگار با شرایط آب و هوایی آن منطقه کشت شوند. نتایج حاصل از محاسبه ردپای آب خاکستری نشان داد که کمترین مقدار آن مربوط به استان آذربایجان غربی با ۳۰۲ و بیشترین مقدار مربوط به استان زنجان با ۱۲۳۴ متر مکعب بر تن است. ردپای آب خاکستری استان زنجان رقمی بسیار بالاتر از میانگین کشوری (شش صد متر مکعب بر تن) به دست آمده، که علت این اختلاف استفاده بیش از حد کودهای شیمیایی به دلیل عملکرد پایین محصول جو و همین‌طور، طولانی بودن دوره کشت در این استان است.

جدول ۱- میانگین اجزای ردپای آب جو طی دوره زمانی ۱۳۷۹-۱۳۹۹
(واحد ردپای آب: متر مکعب بر تن)

استان / محصول جو	ردپای آب آبی	ردپای آب سبز	ردپای آب خاکستری	کل ردپای آب
آذربایجان شرقی	۲۵۱۷/۹۴	۶۴۴/۲	۳۷۹/۹۱	۳۵۴۲/۰۵
آذربایجان غربی	۲۹۸۹/۵۵	۶۰۳/۲۸	۳۰۲/۰۲	۳۸۹۴/۸۶
اردبیل	۲۲۹۳/۹	۵۶۲/۸۸	۴۴۸/۴۹	۳۳۰۵/۲۶
اصفهان	۲۸۳۳/۴۹	۳۰۰/۶۹	۶۵۳/۰۸	۳۷۸۷/۲۵
ایلام	۴۴۷۶/۱۱	۷۹۰/۲۱	۴۶۶/۳۱	۵۷۳۲/۶۲
البرز	۲۸۳۳/۱۷	۳۵۱/۳۱	۵۱۹/۰۱	۳۷۰۳/۴۸
بوشهر	۳۷۰۸/۸۷	۷۴۴/۹۴	۶۰۵/۶۸	۵۰۵۹/۴۸
تهران	۱۹۵۶/۸۳	۴۰۲/۲۸	۵۱۶/۴۷	۲۸۷۵/۵۸
چهارمحال و بختیاری	۲۵۵۵/۱۵	۶۰۵/۵۴	۶۰۶/۹۹	۳۷۶۷/۶۸
خراسان جنوبی	۴۰۳۱/۲۶	۳۷۲/۶۱	۸۰۹/۷۷	۵۲۱۳/۶۴
خراسان رضوی	۳۴۴۱/۸۷	۴۹۱/۶۴	۷۱۴/۳۵	۴۶۴۷/۸۶
خراسان شمالی	۲۸۰۹/۸	۷۴۴/۹۴	۵۵۹/۲۳	۴۲۲۳/۲۴
خوزستان	۱۹۳۱/۱۴	۸۳۱/۷۳	۵۵۷/۲۹	۳۳۲۰/۱۶
زنجان	۳۱۳۹/۲۹	۵۵۳/۲۷	۱۲۳۳/۷	۴۹۲۶/۲۶
سمنان	۳۷۸۳/۶۹	۲۶۶/۶۳	۶۳۶/۰۴	۴۶۸۶/۳۶
سیستان و بلوچستان	۴۳۹۴/۸۸	۳۲۴/۳۹	۷۵۱/۴۵	۵۴۷۰/۷۳
فارس	۳۶۵۳/۶۴	۵۱۷/۴۸	۶۴۸/۵۸	۴۸۱۹/۷
قزوین	۲۲۵۲/۲۶	۴۴۸/۸۵	۵۹۶/۵۵	۳۲۹۷/۶۶
قم	۳۶۴۳/۳۵	۲۹۳/۱۵	۷۲۸/۷۷	۴۶۶۵/۲۷
کردستان	۲۶۲۲/۶۱	۵۸۶/۳۱	۳۹۳/۳۲	۳۶۰۲/۲۴
کرمان	۴۴۳۹/۰۱	۴۳۷/۴۲	۷۸۲/۲۵	۵۶۵۸/۶۸
کرمانشاه	۲۷۰۶/۸	۴۴۴/۲۵	۴۳۷/۵۸	۲۵۸۸/۶۳
کهگیلویه و بویر احمد	۳۵۳۱/۳۸	۸۵۳/۹۹	۶۵۷/۷۴	۵۰۴۳/۱۲
گلستان	۲۲۹۱/۵	۵۶۷/۴۳	۳۷۲/۷۵	۳۲۳۱/۶۹
گیلان	۳۵۵۷/۳۳	۵۸۶/۵۲	۸۵۷/۲۲	۵۰۰۱/۰۸
لرستان	۳۹۵۵/۲۷	۷۰۳/۵	۴۵۶/۰۸	۵۱۱۴/۸۵
مازندران	۲۳۶۰/۷	۸۵۳/۴۸	۴۶۹/۵۶	۳۶۸۳/۷۴
مرکزی	۲۶۹۲/۹۸	۴۶۸/۷۳	۴۸۷/۶۵	۳۶۴۹/۳۵
هرمزگان	۲۷۵۷/۶۵	۳۹۰/۱۳	۵۹۲/۵۴	۳۷۴۰/۳۲
همدان	۲۸۵۵/۸۱	۴۴۵/۸۷	۴۹۰/۸۴	۳۷۹۲/۵۲
یزد	۳۱۴۲/۵	۱۳۴/۹	۷۶۲/۹۳	۴۰۴۰/۳۳
میانگین	۳۱۰۱/۹	۵۱۹/۷	۶۰۰/۱۳	۴۲۲۸/۵۷
کمینه	۱۹۳۱/۱۴	۱۳۴/۹	۳۰۲/۰۲	۲۸۷۵/۵۸
بیشینه	۴۴۷۶/۱۱	۸۵۳/۹۹	۱۲۳۳/۷	۵۷۳۲/۶۲

مأخذ: یافته‌های پژوهش

نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که مقدار کل ردپای آب برای اغلب استان‌ها در دامنه سه تا چهار هزار متر مکعب قرار دارد. همچنین، نتایج بیانگر آن است که ردپای آب جو در ایران از یک الگوی جغرافیایی خیلی خاص پیروی نمی‌کند؛ اما مقدار آن در استان‌های گرمسیری و کم‌بارشی مانند سیستان و بلوچستان بالاتر بوده و عمده تفاوت میان میزان ردپای آب استان‌ها ناشی از ردپای آب آبی است. برای تخمین تابع تولید مرزی تصادفی در مدل کارآیی متغیر در زمان، فرم ترانسلوگ انتخاب شد. همچنین، نتایج تعیین آزمون حداکثر راست‌نمایی و روش حداقل مربعات معمولی (فرضیه $Z_i = \gamma = 0$) نشان داد که فرضیه صفر رد می‌شود. رد این فرضیه نشان‌دهنده این نکته است که متغیرهای مؤثر بر ناکارایی در مدل ناکارایی فنی بر کارآیی اقتصادی - زیست محیطی تولید جو تأثیرگذار است و روش تخمین حداکثر راست‌نمایی به روش حداقل مربعات معمولی ترجیح داده می‌شود. از این رو، می‌توان کارآیی اقتصادی - زیست محیطی تولید جو را در هر کدام از استان‌ها به دست آورد. بنابراین، با توجه به نتایج آزمون فرضیه‌ها، تابع تولید مرزی تصادفی تولید جو با استفاده از روش حداکثر راست‌نمایی هم‌زمان با مدل ناکارایی برآورد شد تا اثرات این عوامل بر کارآیی اقتصادی - زیست محیطی استان‌ها مشخص شود. نتایج برآورد تابع تولید مرزی تصادفی تولید محصول جو با استفاده از مدل کارآیی متغیر در طول زمان در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- نتایج برآورد کارآیی اقتصادی - زیست محیطی تولید جو با مدل کارآیی متغیر در طول زمان

متغیرها
تابع تولید مرزی تصادفی
C
X_1
X_2
X_3
X_4
X_5

*، **، *** به ترتیب، معنی‌داری در سطح ده، پنج و یک درصد
 مأخذ: یافته‌های پژوهش

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که در طول زمان، متغیرهای نهاده سرمایه (نهاده ترکیبی) (X_1)، ردپای آب آبی (X_3) و ردپای آب سبز (X_4) اثرات معنی‌دار بر تولید این محصول دارند. در این راستا، ضریب مثبت متغیر نهاده سرمایه (X_1) و ردپای آب سبز (X_4) بیانگر این است که با فرض ثبات سایر شرایط، افزایش یک درصدی در میزان هر کدام از این متغیرها منجر به افزایش حدود یک درصدی تولید جو در بین استان‌های کشور خواهد داشت. بدین ترتیب، در بین نهاده‌های مورد بررسی، نهاده سرمایه و ردپای آب سبز در تولید جو، بیشترین تأثیر مثبت را بر بهبود ارزش تولیدات دارا است. این یافته‌ها حاکی از سطح پایین انباشت نهاده سرمایه در تولید جو که به دلیل پایین بودن میزان تولید این محصول و همین‌طور کم بودن میزان بارش در سطح کشور است. متغیر نیروی کار (X_2) از لحاظ آماری معنی‌دار نیست، ضریب این متغیر در تابع تولید تخمین زده شده بیان‌گر این است که نیروی کار اثر مثبت بسیار ناچیزی بر میزان کارایی تولید جو دارد. بنابراین، با توجه به مساعدت بسیار کم نیروی کار در تولید جو، انتظار می‌رود که با افزایش درجه مکانیزاسیون، میزان تولید جو در ایران افزایش یابد. افزون بر این، اثر متغیر ردپای آب آبی (X_3) بر میزان تولید جو در سطح یک درصد معنی‌دار است؛ به دیگر سخن، میان مقدار نیاز آبی و تولید جو در ایران یک رابطه مثبت وجود دارد. بدین ترتیب، با افزایش ده درصدی در میزان نیاز آبی محصول، میزان تولید جو تنها به میزان $0/6$ درصد افزایش خواهد یافت. پایین بودن اثرگذاری ردپای آب آبی از پایین بودن بهره‌وری آب آبیاری در ایران حکایت دارد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که اثر متغیر ردپای آب خاکستری (X_5) بر میزان تولید جو منفی است که البته، این متغیر از لحاظ آماری معنی‌دار نیست. از آنجا که ردپای آب خاکستری مقدار آبی است که برای رقیق‌سازی آلودگی‌ها و جذب کودهای شیمیایی (نیترژن) مورد استفاده قرار می‌گیرد، منفی بودن ضریب این متغیر مؤید این نکته است که کنترل هزینه‌های زیست‌محیطی برای رشد تولید جو ضروری است. به دیگر سخن، مصرف بیشتر آب دو اثر شامل افزایش جذب عناصر و شست‌وشوی آنها از خاک را در پی دارد. تأثیر منفی آب خاکستری نشان می‌دهد که افزایش مقدار مصرف آب باعث شست‌وشو و از دسترس خارج شدن عناصر غذایی و بنابراین، کاهش عملکرد محصول شده است. این مسئله نشان می‌دهد که برای کاهش اثرات زیست‌محیطی منفی و افزایش بهره‌وری مصرف نهاده کود، تنها نمی‌توان با افزایش میزان مصرف آب خاکستری به هدف رسید، بلکه نیاز است تا با ایجاد محدودیت‌های قانونی و به‌کارگیری فناوری‌های افزایش بهره‌وری مصرف کود، به سمت کارایی اقتصادی بالاتر و کاهش اثرات زیست‌محیطی منفی حرکت کرد.

همچنین، نتایج برآورد مدل ناکارایی (جدول ۲) نشان می‌دهد که کارآیی اقتصادی - زیست محیطی تولید جو برای مناطقی با تولید ناخالص داخلی سرانه و میزان بارندگی بالاتر، بیشتر است. به دیگر سخن، متغیرهای تولید ناخالص داخلی سرانه و میزان بارندگی سالانه اثر منفی بر ناکارایی اقتصادی - زیست محیطی تولید جو دارند؛ یعنی، انتظار می‌رود که با افزایش میزان این دو متغیر، کارآیی اقتصادی - زیست محیطی تولید جو افزایش یابد. این در حالی است که با افزایش دما، کارآیی اقتصادی - زیست محیطی تولید جو کاهش خواهد یافت. بر حسب ادبیات موجود، افزایش دما می‌تواند از طریق فرسایش نهاده ترکیبی و همچنین، اثر مستقیم بر تولید موجب ایجاد نوسان منفی در تولید و بنابراین، ناکارایی شود (Fankhauser and Tol, 2005; Tsigaris and Wood, 2019). همچنین، ضریب نسبت سطح اراضی آبی نسبت به کل سطح زیر کشت از لحاظ آماری در سطح یک درصد معنی‌دار بوده، که نشان‌دهنده افزایش ناکارایی اقتصادی - زیست محیطی تولید جو با افزایش میزان اراضی آبی است. بنابراین، افزایش کشت دیم جو در استان‌های کشور به جای کشت آبی از این نتیجه برداشت می‌شود. همچنین، ضرایب مثبت برای متغیر روند یا زمان نشان می‌دهد که ناکارایی‌های اقتصادی - زیست محیطی تولید جو در طول دوره زمانی مورد مطالعه که سایر متغیرها کنترل می‌شوند، افزایش می‌یابد.

پس از برآورد عوامل مؤثر بر میزان تولید جو، کارآیی اقتصادی - زیست محیطی به تفکیک هر استان در سال‌های مورد مطالعه به دست آمد. نتایج حاصل از کارآیی اقتصادی - زیست محیطی تولید جو در طی دوره زمانی ۱۳۸۵-۱۳۹۹ در جدول ۳ گزارش شده است. با توجه به نتایج این جدول، بالاترین کارآیی برابر با یک است که در استان‌های زیادی و در سال‌های متعدد، این میزان قابل مشاهده است. همچنین، کمترین کارآیی در سال‌های ۱۳۹۵، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ و مربوط به استان‌های ایلام و یزد با مقدار ۰/۸۳ به دست آمد. این دو استان میانگین کارآیی اقتصادی - زیست محیطی کمتری در تولید محصول جو نسبت به بیشتر استان‌های کشور دارند.

جدول ۳- کارایی اقتصادی - زیست‌محیطی جو طی دوره ۱۳۸۵-۱۳۹۹

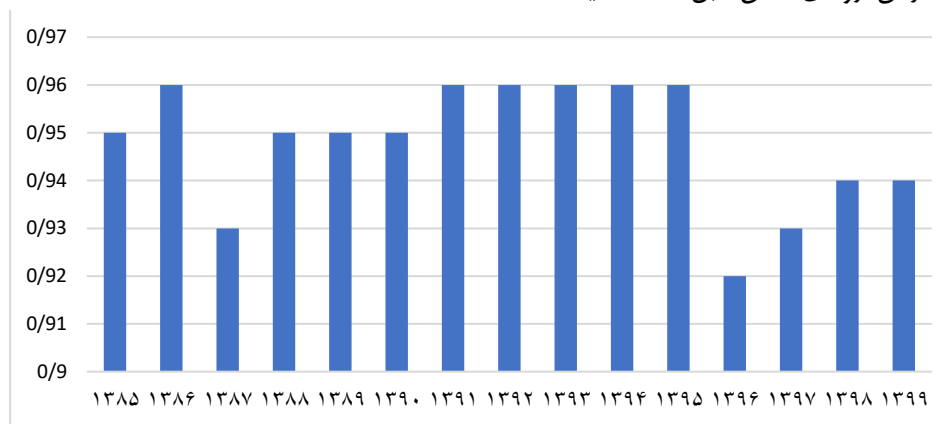
استان/سال	۱۳۸۵	۱۳۸۶	۱۳۸۷	۱۳۸۸	۱۳۸۹	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲
آذربایجان شرقی	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۷
آذربایجان غربی	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۲	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۶
اردبیل	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۷
اصفهان	۰/۸۹	۰/۹۱	۰/۹۰	۰/۸۸	۰/۹۳	۰/۸۹	۰/۸۸	۰/۹۰
ایلام	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۸۷	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۹	۰/۸۸	۰/۸۷
البرز	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹
بوشهر	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۶	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۹
تهران	۰/۹۹	۰/۹۳	۰/۸۹	۰/۹۱	۰/۹۳	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۹
چهارمحال و بختیاری	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۲	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۵
خوزستان	۰/۸۶	۰/۸۸	۰/۹۱	۰/۹۵	۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۹۵	۰/۹۴
خراسان جنوبی	۰/۹۲	۰/۹۶	۰/۸۸	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۹۱	۰/۹۵	۰/۹۶
خراسان رضوی	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۷
خراسان شمالی	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۸۶	۰/۸۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹۲	۰/۹۲
زنجان	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
سمنان	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۹	۰/۹۱	۰/۹۳
سیستان و بلوچستان	۰/۸۷	۰/۹۶	۰/۸۸	۰/۸۹	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹	۰/۸۸
فارس	۰/۹۰	۰/۹۶	۰/۹۱	۰/۹۵	۰/۸۹	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۹۳
قزوین	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۱	۰/۹۴
قم	۰/۸۹	۰/۸۷	۰/۸۵	۰/۹	۰/۸۴	۰/۸۴	۰/۹	۰/۸۹
کردستان	۱/۰۰	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۱/۰۰	۱/۰۰
کرمان	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۹
کرمانشاه	۱/۰۰	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
کهگیلویه و بویر احمد	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۸	۱/۰۰	۰/۹۹	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۸
گلستان	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۷
گیلان	۱/۰۰	۰/۹۹	۱/۰۰	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۱/۰۰	۱/۰۰
لرستان	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
مازندران	۱/۰۰	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۹
مرکزی	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۶
هرمزگان	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۲	۰/۹۴	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۴
همدان	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷
یزد	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۹۴

ادامه جدول ۳-

استان/سال	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۵	۱۳۹۶	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹
آذربایجان شرقی	-/۹۸	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
آذربایجان غربی	-/۹۷	-/۹۷	-/۹۷	-/۹۵	-/۹۸	-/۹۷	-/۹۷
اردبیل	-/۹۷	-/۹۸	-/۹۷	-/۹۶	-/۹۶	-/۹۶	-/۹۷
اصفهان	-/۹۱	-/۹۰	-/۸۹	-/۸۵	-/۸۶	-/۸۶	-/۸۶
ایلام	-/۸۹	-/۸۴	-/۸۳	-/۸۳	-/۸۶	-/۸۷	-/۸۸
البرز	-/۹۹	-/۹۹	-/۹۹	-/۹۸	-/۹۹	-/۹۹	-/۹۹
بوشهر	-/۹۹	-/۹۶	-/۹۹	-/۹۲	-/۹۹	-/۹۹	-/۹۹
تهران	-/۹۹	-/۹۹	-/۹۹	-/۸۴	-/۸۶	-/۸۶	-/۸۸
چهارمحال و بختیاری	-/۹۵	-/۹۶	-/۹۶	-/۹۲	-/۹۴	-/۹۵	-/۹۴
خوزستان	-/۹۲	-/۹۳	-/۹۳	-/۸۳	-/۸۳	-/۸۴	-/۸۴
خراسان جنوبی	-/۹۳	-/۹۴	-/۹۶	-/۸۷	-/۹۲	-/۹۳	-/۹۲
خراسان رضوی	-/۹۷	-/۹۷	-/۹۷	-/۹۳	-/۹۵	-/۹۷	-/۹۶
خراسان شمالی	-/۹۳	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
زنجان	-/۹۹	-/۹۹	-/۹۹	-/۹۸	-/۹۹	-/۹۹	-/۹۹
سمنان	-/۹۱	-/۹۱	-/۹۲	-/۸۷	-/۸۸	-/۸۸	-/۸۸
سیستان و بلوچستان	-/۹۲	-/۹۱	-/۹۶	-/۸۶	-/۸۸	-/۸۷	-/۸۸
فارس	-/۹۴	-/۹۵	-/۹۴	-/۸۹	-/۸۸	-/۹۰	-/۹۱
قزوین	-/۹۱	-/۹۳	-/۹۳	-/۹۰	-/۹۰	-/۹۱	-/۹۱
قم	-/۸۸	-/۸۸	-/۸۹	-/۸۳	-/۸۴	-/۸۴	-/۸۵
کردستان	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	-/۹۹	-/۹۹	-/۹۹	-/۹۹
کرمان	-/۹۸	-/۹۹	-/۹۹	-/۸۵	-/۹۶	-/۹۷	-/۹۷
کرمانشاه	-/۹۹	-/۹۹	-/۹۹	-/۹۹	۱/۰۰	-/۹۹	-/۹۹
کهگیلویه و بویر احمد	۱/۰۰	-/۹۹	-/۹۹	-/۹۸	-/۹۹	-/۹۹	۱/۰۰
گلستان	-/۹۵	-/۹۶	-/۹۸	-/۹۵	-/۹۳	-/۹۶	-/۹۴
گیلان	-/۹۹	-/۹۹	۱/۰۰	-/۹۶	-/۹۷	-/۹۹	-/۹۹
لرستان	-/۹۹	-/۹۹	-/۹۹	-/۹۹	-/۹۹	۱/۰۰	-/۹۹
مازندران	۱/۰۰	۱/۰۰	-/۹۹	-/۹۵	-/۹۷	-/۹۹	-/۹۷
مرکزی	-/۹۶	-/۹۵	-/۹۶	-/۹۴	-/۹۷	-/۹۸	-/۹۷
هرمزگان	-/۹۴	-/۹۶	-/۹۴	-/۸۶	-/۸۴	-/۸۷	-/۸۷
همدان	-/۹۹	-/۹۸	-/۹۹	-/۹۸	-/۹۹	-/۹۹	-/۹۹
یزد	-/۹۵	-/۹۶	-/۹۶	-/۸۳	-/۸۳	-/۸۳	-/۸۴

مأخذ: یافته‌های پژوهش

میانگین کارایی تولید محصول جو در کشور برای دوره زمانی ۱۳۸۵-۱۳۹۹ در شکل ۱ نشان می‌دهد که کمترین و بیشترین مقادیر کارایی تولید جو کشور، به ترتیب، متعلق به سال‌های ۱۳۹۶ (۰/۹۲) و ۱۳۸۶، ۱۳۹۱، ۱۳۹۲، ۱۳۹۳، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ (۰/۹۶) بوده و البته، نکته حائز اهمیت این است که در آن، روندی خاص قابل مشاهده نیست.



شکل ۱- میانگین سالانه کارایی تولید جو در کشور ۱۳۸۵-۱۳۹۹

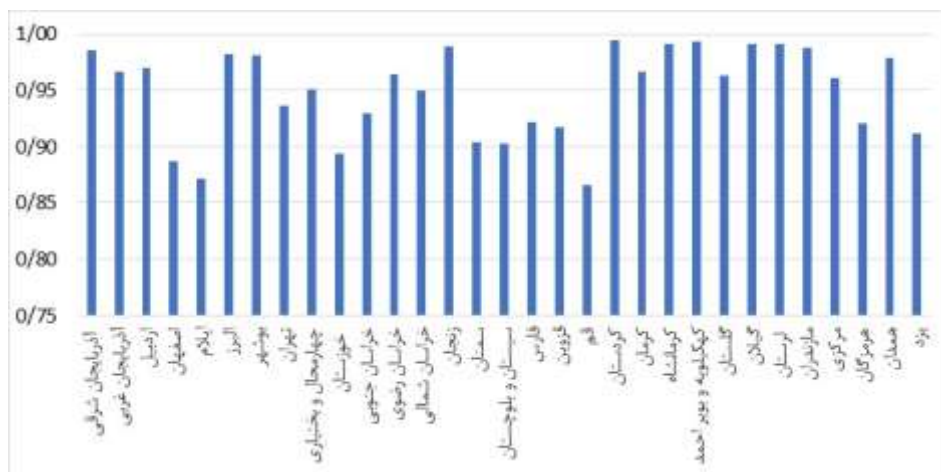
نتایج توزیع فراوانی و درصد کارایی اقتصادی- زیست‌محیطی تولید جو در استان‌های ایران با تخمین مدل مرزی تصادفی در جدول ۴ آمده است. هرچه مقدار کارایی اقتصادی- زیست‌محیطی منطقه‌ای به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده کارا بودن آن منطقه است، بدین معنی که بهترین استفاده از منابع برای بیشینه‌سازی مقدار تولید و هم‌زمان کاهش تأثیرات زیست‌محیطی انتشار آلاینده‌ها صورت پذیرفته است (Robaina-Alves et al., 2015).

جدول ۴- توزیع فراوانی و درصد کارایی اقتصادی- زیست‌محیطی تولید گندم در ایران

درصد	فراوانی	دامنه کارایی
۰	۰	$0/5 \leq TE < 0/7$
۱۶/۳۴	۷۶	$0/7 \leq TE < 0/9$
۷۴/۶۲	۳۴۷	$0/9 < TE$
۹/۰۴	۴۲	$TE = 1$
	۰/۹۴	میانگین Mean
	۱	حداکثر Max
	۰/۸۳	حداقل Min

مأخذ: یافته‌های پژوهش

بر اساس نتایج جدول ۴، میانگین کارآیی اقتصادی - زیست محیطی تولید جو ۳۱ استان در طی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۹ با استفاده از مدل مرزی تصادفی ۰/۹۴ به دست آمده است. بنابراین، در صورت پر کردن شکاف فنی کشاورزان استان‌های مختلف با بهترین استان از حیث کارآیی هم‌زمان اقتصادی و زیست محیطی تولید جو می‌توان میزان کارآیی اقتصادی - زیست محیطی را به‌طور میانگین تا شش درصد افزایش داد. همچنین، حداقل کارآیی اقتصادی - زیست محیطی در بین استان‌های مورد بررسی ۰/۸۳ و حداکثر آن یک است. به دیگر سخن، اختلاف کارآیی اقتصادی - زیست محیطی میان کارآمدترین و ناکارآمدترین استان در زمینه تولید جو ۰/۱۷ درصد است و نشان از قابلیت افزایش کارآیی اقتصادی - زیست محیطی تولید جو در ایران دارد. افزون بر این، مطابق جدول ۴، کارآیی اقتصادی - زیست محیطی بیش از شانزده درصد استان‌ها بین ۰/۷ تا ۰/۹ و کارآیی بیش از ۷۴ درصد استان‌ها بیش از ۰/۹ درصد است. در واقع، بیشترین فراوانی کارآیی اقتصادی - زیست محیطی در دامنه ۰/۹ تا یک است. اختلاف میان کارآمدترین و ناکارآمدترین استان در زمینه تولید جو زیاد نیست و بالا بودن میزان میانگین کارآیی جو نشانگر وجود ظرفیت لازم برای کشت و تولید این محصول مهم در کشور است. میانگین کارآیی اقتصادی - زیست محیطی تولید جو استان‌های کشور در بین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۹ در شکل ۲ ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، استان‌های ایلام، قم و اصفهان کمترین کارآیی اقتصادی - زیست محیطی و استان‌های کهگیلویه و بویراحمد، کرمانشاه و کردستان، به ترتیب، بیشترین کارآیی اقتصادی - زیست محیطی تولید جو را به خود اختصاص داده‌اند. از آنجا که میانگین کل کارآیی اقتصادی - زیست محیطی تولید جو در کشور در حدود ۰/۹۴ درصد به دست آمده است، میزان کارآیی برای بیست استان شامل آذربایجان غربی، اردبیل، البرز، تهران، کردستان، کرمان، کهگیلویه و بویراحمد، گیلان، مازندران، همدان، گلستان، کرمانشاه، زنجان، چهارمحال و بختیاری، خراسان رضوی، بوشهر، مرکزی، لرستان، آذربایجان شرقی و خراسان شمالی بالاتر از میانگین کشوری و برای یازده استان شامل اصفهان، ایلام، خوزستان، خراسان جنوبی، سمنان، سیستان و بلوچستان، فارس، قزوین، قم، هرمزگان و یزد کمتر از میانگین کشوری است.



مأخذ: یافته‌های پژوهش

شکل ۲- میانگین کارآیی اقتصادی- زیست‌محیطی تولید جو به تفکیک استان‌های ایران طی دوره ۱۳۸۵-۱۳۹۹

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در مطالعه حاضر، ابتدا به محاسبه اجزای ردپای آب محصول جو در بین استان‌های مختلف کشور پرداخته شد. از آنجا که ایران دارای اقلیم‌های مختلف و مناطقی با آب‌وهوای متفاوت در فصول چهارگانه است، با بررسی نتایج به‌دست‌آمده در استان‌های مختلف تولیدکننده جو، مشاهده می‌شود که تفاوت قابل‌توجهی بین استان‌های مختلف از نظر ردپای آب وجود دارد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در طول دوره مورد مطالعه، به‌طور متوسط، بیشترین مقدار ردپای آب سبز مربوط به دو استان کهگیلویه و بویراحمد و مازندران، به‌ترتیب، با مقادیر ۸۵۴ و ۸۵۳ متر مکعب بر تن و کمترین مقدار آن مربوط به استان یزد با مقدار ۱۳۴/۹۰ متر مکعب بر تن است؛ همچنین، بیشترین مقدار ردپای آب آبی با ۴۴۷۶ متر مکعب بر تن در استان ایلام به‌دست آمد. از آنجا که استان ایلام از نظر اقلیمی شرایطی نسبتاً مناسب دارد و با توجه به عملکرد بالای محصول در این استان، محتمل‌ترین دلیل بالا بودن ردپای آب آبی در این استان بالا بودن میزان تبخیر و تعرق و بالا بودن نیاز آبی این محصول است. کمترین مقدار ردپای آب آبی نیز مربوط به استان خوزستان بوده، که دلیل آن بالا بودن مقدار رطوبت و همچنین، بالا بودن عملکرد محصول در این استان نسبت به سایر استان‌هاست. نکته قابل توجه در بررسی بین هر دو جزء ردپای آب آبی و سبز در تمامی استان‌ها بالا بودن مقدار ردپای آب آبی نسبت

به ردپای آب سبز بوده، که خود نشان دهنده کم بودن بارش ها و حاکی از پایداری اقلیم خشک و نیمه خشک در تمامی استان های کشور است.

بنابراین، انتظار می رود که برای افزایش عملکرد محصول و همچنین، کاهش اثرات اقلیمی بر عملکرد محصول، استفاده بیشتر از کودهای شیمیایی در بین کشاورزان رواج یابد. نتایج حاصل از برآورد ردپای آب خاکستری نشان داد که تغییرات ردپای آب در تمامی استان ها تقریباً در یک طیف بوده، کمترین مقدار آن مربوط به استان آذربایجان غربی با ۳۰۲ و بیشترین مقدار آن مربوط به استان زنجان با ۱۲۳۴ متر مکعب بر تن است. ردپای آب خاکستری استان زنجان رقمی بسیار بالاتر از میانگین کشوری (شش صد متر مکعب بر تن) به دست آمده، که علت این اختلاف استفاده بیش از حد کودهای شیمیایی به دلیل عملکرد پایین محصول جو و همین طور، طولانی بودن دوره کشت در این استان است. شایان یادآوری است که مقادیر حاصل از برآورد ردپای آب خاکستری، به طور کلی، در استان های جنوبی کشور بیشتر بوده، که ناشی از استفاده از کودهای شیمیایی بیشتر برای افزایش عملکرد است. بنابراین، پیشنهاد می شود که با ایجاد راهکارهایی مانند گسترش روش های آبیاری نوین، استفاده از ارقام مقاوم و با عملکرد بالا و مصرف صحیح کودهای شیمیایی با کاهش حجم آب در تولید جو، وضعیت شاخص ردپای آب در ایران را بهبود بخشید. سپس، کارایی اقتصادی - زیست محیطی تولید جو بر مبنای ردپای آب با استفاده از روش SFA برآورد شد و نتایج نشان داد که به ترتیب، استان های ایلام، قم و اصفهان کمترین و استان های کهگیلویه و بویراحمد، کرمانشاه و کردستان بیشترین کارایی اقتصادی - زیست محیطی تولید جو را به خود اختصاص داده اند. با اندازه گیری کارایی اقتصادی - زیست محیطی تولید جو در استان های مختلف، می توان برای هر استان به ارائه اهداف جداگانه پرداخت، به گونه ای که برای استان های با کارایی کمتر و استان های با کارایی بیشتر اهدافی جداگانه طرح شود. از این رو، استفاده از مدیریت بهتر و دانش محور و یا استفاده از فناوری های نوین در کشت جو می تواند وضعیت کارایی را در استان هایی با میانگین کشوری پایین تر بهبود بخشد. به نظر می رسد که بیشتر تولید جو در ایران با تجمع سرمایه های فیزیکی صورت می گیرد؛ بنابراین، افزایش تولید باعث افزایش خسارت به محیط زیست نیز می شود. از سوی دیگر، در اقتصادهایی با سطح فعالیت اقتصادی پایین، قوانین و الزامات زیست محیطی که از سوی دولت مقرر شده ناکارآمدند، زیرا کاهش آلودگی نیازمند صرف هزینه است. بر این اساس، پیشنهاد می شود که در مطالعات آتی، اثرات سرمایه انسانی و اجتماعی بر کارایی اقتصادی - زیست محیطی تولید محصولات کشاورزی ارزیابی شود. همچنین، پیشنهاد می شود که برای کاهش آلودگی و حفظ محیط زیست، روش هایی بدین شرح دنبال شود: تغییر شیوه تولید، مدیریت

کارآمدتر و استفاده از فناوری‌های برتر توسط استان‌های ناکارآ (برای نمونه، شیوه‌های نوین آبیاری در راستای کاهش ردپای آب آبی)، استفاده از کودهای سبز و کودهای شیمیایی کم‌خطر و مورد تأیید ارگان‌های جهانی برای کاهش ردپای آب خاکستری به‌عنوان یکی از عوامل کاهنده میزان کارآیی و کنترل زیست‌شناختی به‌جای استفاده از سموم (برای کاهش ردپای آب خاکستری) به‌منظور از بین بردن آفات. از طرف دیگر، انگیزه‌های تشویقی و تنبیه برای کشاورزان نیز بسیار کارساز است. دولت باید برای تشویق بخش‌های کارآ تدابیر تشویقی بیندیشد؛ مثلاً می‌تواند اولویت مصرف منابع با قیمت‌های کمتر را در اختیار کشاورزانی که با مصرف کودهای شیمیایی و سموم کمتر، آلودگی زیست‌محیطی کمتری تولید می‌کنند، قرار دهد. پرداخت یارانه به تولیدکنندگان کارآ نیز مؤثر است. از سوی دیگر، باید مقررات زیست‌محیطی برای تولیدکنندگان تنظیم شود. برقراری مالیات بر محصول نامطلوب در راستای افزایش انگیزه تولیدکنندگان و کشاورزان در به‌کارگیری روش‌ها و فنون سازگار با محیط زیست نیز بسیار کارساز خواهد بود.

منابع

- Ababaei, B., & Etedali, H. R. (2014). Estimation of water footprint components of Iran's wheat production: comparison of global and national scale estimates. *Environmental Processes*, 1(3), 193-205. DOI: 10.1007/s40710-014-0017-7.
- Agustina, S. (2016). The influence of technical inefficiency level that involve farmer's behaviour on risk towards profit in rice production of Indonesia. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 58(10), 3-12. DOI: 10.18551/rjoas.2016-10.01.
- Aigner, D., Lovell, C. K., & Schmidt, P. (1977). Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. *Journal of Econometrics*, 6(1), 21-37. DOI: 10.1016/0304-4076(77)90052-5.
- Battese, G. E., & Coelli, T. J. (1995). A model for technical inefficiency effects in a stochastic frontier production function for panel data. *Empirical economics*, 20, 325-332. DOI: 10.1007/BF01205442.
- Bonfiglio, A., Arzeni, A., & Bodini, A. (2017). Assessing eco-efficiency of arable farms in rural areas. *Agricultural Systems*, 151, 114-125. DOI: 10.1016/j.agsy.2016.11.008.

- Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., & Savenije, H. H. (2006). Water saving through international trade of agricultural products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(3), 455-468. DOI: 10.5194/hess-10-455-2006.
- Dashti, Q., Mohammadpour, Z., & Ghahramanzadeh, M. (2020). Evaluating the relationship between economic efficiency and environmental efficiency in Iran's agricultural sector. *Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, 30, 12. DOI: 20.1001.1.24764310.1399.30.4.13.0.
- Döll, P., & Siebert, S. (2002). Global modeling of irrigation water requirements. *Water Resources Research*, 38(4). DOI: 10.1029/2001WR000355.
- Emami Meybodi, A., Karimian, Z., & Rahmani Sefati, M. (2011). Measuring technical efficiency and productivity of Iranian petrochemical complexes (2001-2007). *Journal of Energy Economics Studies*, 29, 11. [In Persian]
- Fankhauser, S., & Tol, R. S. (2005). On climate change and economic growth. *Resource and Energy Economics*, 27(1), 1-17. Doi: 10.1016/j.reseneeco.2004.03.003.
- Fathi, F., Sheikhzeinoddin, A., & Talebnejad, R. (2020). Environmental and economic risk management of seed maize production in Iran. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120772. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120772.
- Forleo, M. B., Palmieri, N., Suardi, A., Coaloa, D., & Pari, L. (2018). The eco-efficiency of rapeseed and sunflower cultivation in Italy: joining environmental and economic assessment. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3138-3153. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.11.094.
- Giusti, G., Marques, T. L., de Figueirêdo, M. C. B., & Silva, D. A. L. (2022). Integrating water footprint in the eco-efficiency assessment of Brazilian chilled chicken. *Sustainable Production and Consumption*, 33, 331-342. DOI: 10.1016/j.spc.2022.07.009.
- Ho, T. Q., Hoang, V.-N., Wilson, C., & Nguyen, T.-T. (2018). Eco-efficiency analysis of sustainability-certified coffee production in Vietnam. *Journal of Cleaner Production*, 183, 251-260. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.147.

- Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2006). Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. In: Integrated assessment of water resources and global change (pp. 35-48). Springer. DOI: 10.1007/978-1-4020-5591-1_3.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Routledge. DOI: 10.4324/9781849775526.
- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(9), 3232-3237. DOI: 10.1073/pnas.1109936109.
- Hoekstra, P.Q., & Hung, A. (2002). Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. *Water Science & Technology*, 49(11): 203-209.
- Jaramillo, F., & Destouni, G. (2015). Local flow regulation and irrigation raise global human water consumption and footprint. *Science*, 350(6265), 1248-1251. DOI: 10.1126/science.aad1010.
- Kouchaki-Penchah, H., Alizadeh, M. R., & Aghamolki, M. T. K. (2023). Measuring eco-efficiency of rice cropping systems in Iran: an integrated economic and environmental approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 57, 103281. DOI: 10.2139/ssrn.4220146.
- Li, N., Xiao, X., Cao, G., & He, B. (2017). Agricultural eco-environment efficiency and shadow price measurement in Three Gorges Reservoir area under non-point source pollution constraints. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33(11), 203-210. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.11.026.
- Lovarelli, D., Bacenetti, J., & Fiala, M. (2016). Water footprint of crop productions: a review. *Science of the Total Environment*, 548, 236-251. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.022.
- Mardani, M., & Salarpour, M. (2015). Measuring technical efficiency of potato production in Iran using robust data envelopment analysis. *Information Processing in Agriculture*, 2(1), 6-14. DOI: 10.1016/j.inpa.2015.01.002.

- Mehregan, F., & Sidboyer, S. (2020). Investigating the cost effect of environmental pollution on efficiency (case study: economic zones of China). *Journal of Environmental Science and Technology*, 22, 14. DOI: 10.22034/jest.2019.29384.3870. [In Persian]
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577-1600. DOI: 10.5194/hess-15-1577-2011.
- Molaei, M., Hesari, N., & Javan-Bakht, A. (2017). Estimating the environmental efficiency of input-oriented agricultural products (case study: environmental efficiency of rice production). *Agricultural Economics (Economics and Agriculture)*, 11, 15. [In Persian]
- Molaei, M., & Molaei, F. (2015). Estimation of environmental efficiency of agriculture. *Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, 25, 10. [In Persian]
- Molaei, M., & Sani, F. (2015). Estimation of technical efficiency and environmental efficiency of Sarab dairy farms (data envelopment analysis approach). *Animal Sciences Research, Scientific Research Journal of the Faculty of Agriculture*, 25, 14. [In Persian]
- Molden, D., Oweis, T. Y., Pasquale, S., Kijne, J. W., Hanjra, M. A., Bindraban, P. S., Bouman, B. A., Mahoo, H. F., Silva, P., & Upadhyaya, A. (2007). Pathways for increasing agricultural water productivity. DOI: 10.22004/ag.econ.158005.
- Nowruzian, M., Esfandiari, M., Hosseini, M., & Musapur, S. (2019). Investigation of environmental efficiency of cotton growers in Iran. *Journal of Natural Environment*, 72, 13. [In Persian]
- Prasad, P., Pagan, R. J., Kauter, M. D., & Price, N. (2005). Eco-efficiency for the dairy processing industry. *The Proceedings of Environmental Science, Business*. Corpus ID: 107629267.
- Robaina-Alves, M., Moutinho, V., & Macedo, P. (2015). A new frontier approach to model the eco-efficiency in European countries. *Journal of Cleaner Production*, 103, 562-573. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.01.038.

- Schaltegger, S., & Sturm, A. (1990). Ökologische rationalität: ansatzpunkte zur ausgestaltung von ökologieorientierten managementinstrumenten. *die Unternehmung*, 273-290. Available at <https://www.jstor.org/stable/24180467>.
- Song, J., & Chen, X. (2019). Eco-efficiency of grain production in China based on water footprints: a stochastic frontier approach. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117685. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117685.
- Thanawong, K., Perret, S., & Basset-Mens, C. (2014). Eco-efficiency of paddy rice production in Northeastern Thailand: a comparison of rain-fed and irrigated cropping systems. *Journal of Cleaner Production*, 73, 204-217. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.12.067.
- Tsigaris, P., & Wood, J. (2019). The potential impacts of climate change on capital in the 21st century. *Ecological Economics*, 162, 74-86. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2019.04.009.
- Yadollahi, A. (2020). Analysis of grain technology in Iran. Third International Conference on Interdisciplinary Studies in Food Industry and Nutrition Sciences. [In Persian]
- Yang, R.-Y., Chang, L.-C., Hsu, J.-C., Weng, B. B., Palada, M. C., Chadha, M., & Levasseur, V. (2006). Nutritional and functional properties of Moringa leaves: from germplasm, to plant, to food, to health. In: Moringa leaves: strategies, standards and markets for a better impact on nutrition in Africa. Moringanews, CDE, CTA, GFU. Paris, pp. 1-9.
- Zhang, C., & Anadon, L. D. (2014). A multi-regional input-output analysis of domestic virtual water trade and provincial water footprint in China. *Ecological Economics*, 100, 159-172. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2014.02.006.
- Zhang, J., Terrones, M., Park, C. R., Mukherjee, R., Monthieux, M., Koratkar, N., Kim, Y. S., Hurt, R., Frackowiak, E., & Enoki, T. (2016). Carbon science in 2016: status, challenges and perspectives. *Carbon*, 98(70), 708-732. DOI: 10.1016/j.carbon.2015.11.060.