Physical and Economic Water Productivity of Field and Horticultural Crops across Counties in South Khorasan Province, Iran: A Comparative Analysis of Cropping Patterns from 2020 to 2023

Mostafa Yaghoobzadeh[1], Ali Shahidi[2], Abolfazl Akbarpour[3], Malihe Falaki[4], Elham Ghochanian Haghverdi[5]

1- Associate Professor, Department of Water Engineering, Department and Research Group of Drought and Climate Change, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
2- Professor, Department of Water Science and Engineering and Research Group of Drought and Climate Change, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
3- Professor, Department of Civil Engineering and Research Group of Drought and Climate Change, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.
4- Assistant Professor, Department of Plant Production and Genetics and Research Group of Drought and Climate Change, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
5- PhD Student in Water Resources, Department of Sciences and Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.

***Corresponding Author:** m.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Growing water scarcity in arid and semi-arid regions makes accurate assessment of agricultural water productivity a policy priority. In Iran, agriculture accounts for more than 90% of water withdrawals. South Khorasan Province, with a long-term mean annual rainfall of about 113 mm, is among the driest regions in the country. Physical water productivity (kg m^{-3}) does not reflect the market value of crops. Economic water productivity accounts for prices and production costs, and the two indicators do not necessarily move together. Although many studies have optimized cropping patterns in Iran, few have compared physical and economic water productivity across field and horticultural crops, in all counties and over several years, while controlling for crop, location and time simultaneously. This study therefore calculated and compared both types of water productivity for eight crops in eight counties over three crop years. It also aimed to provide evidence-based guidance for revising cropping patterns with long-term groundwater sustainability in mind.

Materials and Methods

Eight crops (wheat, barley, cotton, pistachio, jujube, barberry, pomegranate and date palm) were analyzed in eight counties (Boshrooyeh, Birjand, Khusf, Qaen, Nehbandan, Ferdows, Tabas and Sarayan) over the 2020–21 to 2022–23 crop years, giving 135 crop–county–year observations. Cultivated area, yield, production cost, and price were taken from the provincial agricultural statistics yearbooks. Gross irrigation water requirement was obtained from the national Soil and Water Research Institute database, which is based on the FAO Penman–Monteith method. Three indicators were calculated relative to this requirement: physical water productivity (CPD), gross economic water productivity (GBPD) and net economic water productivity (NBPD). All monetary values are nominal and were not adjusted for inflation. Because NBPD departed from normality (Shapiro–Wilk, $p < 0.001$), the primary analysis was a rank-based factorial ANOVA with crop, county and crop year as factors. Supporting analyses included Spearman correlation, Dunn's post hoc test with Holm correction and the Mann–Whitney U test. Area-weighted means and a ±10% sensitivity analysis of price, cost and water requirement were also performed.

Results and Discussion

Crop ($F = 33.34$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.664$) and crop year ($F=5/97$ ،$p=0/003$, $\eta_p^2 = 0/092$) significantly affected NBPD, whereas county did not ($p = 0.231$). Crop choice therefore matters more for cropping-pattern decisions than location does. The ranking of crops reversed almost completely between the two indicators. Pomegranate had the highest CPD (1.55 kg m^{-3}) and pistachio the lowest (0.15 kg

m^{-3}). Even so, pistachio (about 220,000 Rial m^{-3}), jujube (191,000) and pomegranate (120,000) achieved the highest mean NBPD. Across the 135 observations, the Spearman correlation between CPD and NBPD was weak, negative, and significant (rho = −0.219, p = 0.011). Because both indices share the same denominator, this was not interpreted causally. Horticultural crops significantly outperformed field crops (mean NBPD of about 162,000 vs. 21,500 Rial m^{-3}; r = −0.813, p < 0.001). All 14 observations with negative NBPD (10.4% of the data) belonged to wheat (10) and barley (4), and in each case the cost-to-revenue ratio exceeded one. This points to a structural economic vulnerability of the two staple cereals. Pistachio occupied the largest cultivated area (30,057 ha), yet its NBPD varied considerably among counties and years. In Nehbandan, for example, it fell from 148,608 to 15,347 Rial m^{-3}, indicating substantial yield and price risk. The crop ranking was fully stable under the sensitivity analysis (Spearman's rho = 1 in all scenarios). The indicators are based on modeled irrigation requirements rather than actual withdrawals, and monetary values are nominal. The results therefore cannot be used directly to judge aquifer sustainability.

Conclusions

Crop type and crop year were the main determinants of differences in economic water productivity, and producing more per unit of water did not necessarily mean higher profitability. Wheat and barley were the most economically vulnerable crops, while pistachio and jujube were the most profitable. Given the strategic role of wheat and barley in food security, reducing their cultivated area is not recommended. Instead, the findings support better irrigation management, regulated deficit irrigation, lower production costs, and a review of guaranteed-price policy. Expansion of pistachio and jujube should be accompanied by controls on new well permits, smart metering, and continuous groundwater monitoring. Because the indicators rely on modeled irrigation requirements and nominal prices, extending these findings to real aquifer conditions will require independent hydrogeological data and inflation-adjusted values.

Keywords: Physical Water Productivity, Economic Water Productivity, Cropping Pattern, South Khorasan.

پیش از انتشار

بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب محصولات زراعی و باغی در شهرستان‌های استان خراسان جنوبی: تحلیل تطبیقی الگوی کشت طی سال‌های زراعی ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲

مصطفی یعقوب زاده[1*]، علی شهیدی[2]، ابوالفضل اکبرپور[3]، ملیحه فلکی[4]، الهام قوچانیان حقوردی[5]

۱- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، و عضو گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند. بیرجند، ایران.

۲- استاد، گروه علوم و مهندسی آب و عضو گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، ایران.

۳- استاد، گروه عمران و عضو گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، ایران.

۴- استادیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی و عضو گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، ایران.

۵- دانشجو دکتری مهندسی منابع آب، گروه علوم و مهندسب آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، ایران.

***نویسنده مسئول**: m.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir

چکیده

کمبود روزافزون منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ارزیابی دقیق بهره‌وری آب کشاورزی را به ضرورتی مهم تبدیل کرده است. بهره‌وری آب، شامل بهره‌وری فیزیکی و بهره‌وری اقتصادی ناخالص و خالص، معیار اصلی سنجش کارایی مصرف این منبع کمیاب به شمار می‌رود. هدف این مطالعه، تحلیل و مقایسه آماری شاخص‌های مورد بررسی برای هشت محصول زراعی و باغی شامل گندم، جو، پنبه، پسته، عناب، زرشک، انار و خرما در هشت شهرستان از شهرستان‌های استان خراسان جنوبی (بشرویه، بیرجند، خوسف، قائن، نهبندان، فردوس، طبس و سرایان) طی سه سال زراعی متوالی بود. داده‌های لازم از آمارنامه‌های سازمان جهاد کشاورزی و سامانه نیاز آبی مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور اخذ شد. با 135 مشاهده محصول-شهرستان-سال، مدل چندعاملی تحلیل واریانس مبتنی بر رتبه نشان داد محصول (p<0/001،F=34/33، $\eta_p^2 = 0/664$) و سال زراعی (p=0/003،F=5/97، $\eta_p^2 = 0/092$) تفاوت معنی‌داری در بهره‌وری اقتصادی خالص آب ایجاد می‌کنند، ولی تفاوت معنی‌داری میان شهرستان‌ها مشاهده نشد (p=0/231). همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن میان CPD و NBPD ضعیف، منفی و معنی‌دار بود(p=0/011,rho=-0/219). انار (55/1کیلوگرم بر مترمکعب) بالاترین بهره‌وری فیزیکی را داشت، درحالی‌که پسته، عناب و انار، با میانگین NBPD حدود 220، 191 و 120 هزار ریال بر مترمکعب، بیشترین بهره‌وری اقتصادی خالص را داشتند. آزمون من‌ویتنی یو نشان داد محصولات باغی به‌طور معنی‌دار(r=-0/813, p<0/001) از محصولات زراعی (گندم، جو، پنبه) برتر بودند. هر 14 مشاهده با NBPD منفی، متعلق به گندم و جو بود و تحلیل حساسیت، پایداری این رتبه‌بندی را در برابر تغییرات 10 درصدی قیمت، هزینه و نیاز آبی تأیید کرد. با توجه به اسمی و تعدیل‌نشده بودن ارقام ریالی از نظر تورم، یافته‌ها بر ضرورت بازنگری الگوی کشت تأکید دارند. به‌طور مشخص، توسعه سطح زیرکشت محصولات باغی پرسود مانند پسته و عناب بایستی با پایش هم‌زمان منابع آب زیرزمینی همراه باشد و سیاست‌های حمایتی از گندم و جو، به‌جای کاهش سطح زیرکشت این دو محصول راهبردی، باید بر بهبود مدیریت آبیاری و کاهش هزینه تولید آن‌ها متمرکز شود.

کلیدواژه‌ها: بهره‌وری فیزیکی آب، بهره‌وری اقتصادی آب، الگوی کشت، خراسان جنوبی.

مقدمه

بحران کم‌آبی یکی از چالش‌های امنیت غذایی و توسعه پایدار در سطح جهان است و بخش کشاورزی، به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب شیرین، نقش مهمی در راهبرد سازگاری با این بحران دارد (Rijsberman, 2006). بررسی‌ها نشان می‌دهد کشاورزی آبی بیش از دوسوم برداشت جهانی آب شیرین را به خود اختصاص می‌دهد و افزایش تولید غذا برای جمعیت رو به رشد جهانی، بدون بازنگری در نحوه مدیریت این منابع، ناممکن خواهد بود (Foley et al., 2011). در بسیاری از کشورهای واقع در کمربند خشک و نیمه‌خشک، از جمله ایران، سهم کشاورزی از برداشت آب به بیش از نود درصد می‌رسد و

این وابستگی شدید، بخش کشاورزی را در برابر کاهش منابع آب آسیب‌پذیر کرده است (Ashraf et al., 2021). در چنین شرایطی، افزایش بهره‌وری آب کشاورزی به رویکردی محوری در سیاست‌گذاری منابع آب تبدیل شده است (Rockström et al., 2009).

مفهوم بهره‌وری آب از دو منظر فیزیکی و اقتصادی قابل بررسی است. بهره‌وری فیزیکی آب، که ریشه در مفهوم کارایی مصرف آب در فیزیولوژی گیاهی دارد، به‌صورت نسبت عملکرد محصول به حجم آب مصرفی یا تبخیر-تعرق تعریف می‌شود و معمولاً بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب بیان می‌گردد (Molden et al., 2010). این مفهوم نخستین‌بار در قالب کارایی مصرف آب، یعنی نسبت عملکرد محصول به تعرق گیاه، در ادبیات فیزیولوژی زراعی مطرح شد (Viets, 1962) و به‌تدریج به مفهومی جامع‌تر در مقیاس مزرعه و حوضه آبریز تکامل یافت که هزینه تولید، ارزش بازاری محصول و پایداری منابع آب زیرزمینی را نیز در بر می‌گیرد (Kijne et al., 2003). بهره‌وری اقتصادی آب نیز ارزش ریالی محصول تولیدشده به ازای هر واحد آب مصرفی را اندازه می‌گیرد و معیاری واقع‌بینانه‌تر برای تصمیم‌گیری در سطح مزرعه و منطقه به شمار می‌رود، زیرا اختلاف قیمت میان محصولات مختلف را نیز در محاسبات دخالت می‌دهد (Molden et al., 2010; Wichelns, 2014). این دو شاخص، اگرچه ریشه در یک مفهوم مشترک دارند، همواره هم‌جهت نیستند و محصولی که از نظر فیزیکی بهره‌وری پایینی دارد ممکن است به دلیل قیمت بالا، از نظر اقتصادی بسیار سودآور باشد (Sepaskhah & Kamgar-Haghighi, 2009).

کاربرد عملی افزایش بهره‌وری آب مستلزم برآورد دقیق نیاز آبی محصولات است. روش استاندارد فائو برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع و نیاز آبی گیاهان، مبتنی بر معادله پنمن-مانتیث و ضرایب گیاهی اختصاصی هر محصول، مرجع اصلی اکثر مطالعات نیاز آبی در سطح جهان است (Allen et al., 1998). در کنار این رویکرد، چارچوب تابع تولید آب-محصول که رابطه میان کمبود آب و افت عملکرد را به‌صورت کمی بیان می‌کند، ابزار تکمیلی مهمی برای برنامه‌ریزی آبیاری کم‌آبیار در شرایط محدودیت منابع آب فراهم کرده است (Steduto et al., 2012). همچنین رویکرد حسابداری آب، که تلفیقی از داده‌های سنجش از دور و بیلان آب حوضه است، امکان ارزیابی بهره‌وری آب را در مقیاس‌های بزرگ‌تر از مزرعه فراهم می‌سازد (Karimi et al., 2013). در کنار چارچوب بهره‌وری آب، رویکرد ردپای آب و تجارت آب مجازی نیز ابزار مکملی برای ارزیابی جریان‌های پنهان آب در تولید و تجارت محصولات کشاورزی فراهم کرده است (Hoekstra & Hung, 2002). این چارچوب که بعدها در قالب راهنمای جامع ارزیابی ردپای آب تدوین و استاندارد شد، امکان محاسبه اجزای سبز، آبی و خاکستری ردپای آب محصولات مختلف کشاورزی را فراهم آورده است (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

کاربرد این رویکرد در سطح ملی نشان داده است که سهم قابل‌توجهی از کل مصرف آب در برخی مناطق نیمه‌خشک کشور صرف تولید محصولات صادرات‌محور، به‌ویژه میوه‌های خشک و آجیل مانند پسته، می‌شود. الگویی که پایداری بلندمدت منابع آب زیرزمینی را با چالش جدی مواجه کرده است (Karandish & Hoekstra, 2017). در استان خراسان جنوبی، مطالعات ردپای آب نشان داده‌اند که شهرستان‌هایی مانند قائن، بشرویه و خوسف صادرکننده خالص آب مجازی در قالب محصولات کشاورزی هستند، ولی بیرجند به دلیل تمرکز جمعیتی و مصرف بالا، واردکننده خالص آب مجازی محسوب می‌شود. این الگوی نامتوازن، تحلیل بهره‌وری آب در سطح هر شهرستان را برای سیاست‌گذاری منطقه‌ای ضروری می‌سازد (Karandish & Hoekstra, 2017). مطالعات داده‌های ماهواره‌ای نیز نشان می‌دهد بخش قابل‌توجهی از آبخوان‌های کشور در وضعیت بحرانی افت سطح ایستابی قرار دارند و این افت عمدتاً ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی برای بخش کشاورزی است (Ashraf et al., 2021). دشت رفسنجان در استان کرمان، که توسعه باغات پسته موجب افت میانگین سطح آب زیرزمینی طی سه دهه اخیر شده، نمونه‌ای از پیامدهای توسعه ناپایدار محصولات پرسود اما آب‌بر است و همان الگوی وابستگی به صادرات محصولات آب‌بر را بازتاب می‌دهد که در سطح ملی نیز مستند شده است.

استان خراسان جنوبی، واقع در شرق ایران، از مناطق خشک کشور با محدودیت شدید منابع آب به شمار می‌رود، بارش سالانه در سطح استان از حدود 89 تا 186 میلی‌متر متغیر است و مطالعات مبتنی بر شاخص SPI نشان داده‌اند که در سال‌های 2000، 2006، 2008 و 2011 خشکسالی‌های شدیدی در استان رخ داده است. در سال 2008 بیش از 66 درصد محدوده مطالعه در طبقه خشکسالی بسیار شدید قرار داشت (Nakhaee Nezhad Fard et al., 2024). با وجود این محدودیت‌های اقلیمی، کشاورزی همچنان یکی از فعالیت‌های مهم اقتصادی و معیشتی مناطق روستایی استان است. محصولات زراعی اصلی استان

شامل گندم و جو است و محصولاتی مانند زرشک، عناب، پسته و انار نیز از محصولات مهم باغی منطقه محسوب می‌شوند (Riahi et al., 2024). پژوهش‌های متعددی در نقاط مختلف ایران به بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی آرمانی پرداخته‌اند. در دشت دهگلان استان کردستان، بهینه‌سازی الگوی کشت با برنامه‌ریزی خطی تحت سناریوهای مختلف محدودیت آب توانست سود خالص کشاورزان را افزایش و همزمان مصرف آب زیرزمینی را کاهش دهد (Shariati et al., 2021). ارزیابی نظام‌های برنج هوازی در مقیاس منطقه‌ای نشان داده که تغییر روش‌های زراعی می‌تواند بدون کاهش عملکرد، بهره‌وری آب را افزایش دهد (Soltani et al., 2024) و پژوهشی جدیدتر در استان فارس نیز نشان داد بهینه‌سازی الگوی کشت آبی متناسب با محدودیت منابع آب می‌تواند راهبردی عملی برای سازگاری با کم‌آبی باشد (Mirzaei et al., 2025). این مطالعات نشان می‌دهند که تغییر الگوی کشت به سمت محصولات با بهره‌وری اقتصادی آب بالاتر، حتی تحت محدودیت شدید منابع آبی، می‌تواند به‌طور هم‌زمان درآمد کشاورزان را افزایش و فشار بر منابع آب زیرزمینی را کاهش دهد. بااین‌حال، در میان محصولات زراعی رایج در استان، گندم و جو، با وجود جایگاه مهم در امنیت غذایی کشور، معمولاً از نظر بهره‌وری آب در رده پایین قرار دارند.

اصل افزایش بهره‌وری مصرف آب در تولید غذا، که در چارچوب افزایش کارایی آبیاری و مدیریت صحیح محدودیت‌های هیدرولوژیکی مزرعه مطرح شده است (Perry et al., 2009)، بر ضرورت کاهش تلفات آب در مراحل کم‌حساس رشد محصولات زراعی پایه تأکید دارد. مطالعات گذشته در شرایط خشک و نیمه‌خشک نشان داده‌اند کم‌آبیاری هدفمند برای گندم، در مراحل کمتر حساس رشد، می‌تواند بدون کاهش عملکرد، مصرف آب را کاهش دهد (Fereres & Soriano, 2007). بااین‌حال، ارزش اقتصادی پایین این محصولات نسبت به هزینه تولید، بهره‌وری اقتصادی آب آن‌ها را در بسیاری از شهرستان‌های مورد مطالعه به سطوح بسیار پایین یا حتی منفی سوق داده است. پسته نیز در مطالعات ردپای آب و امنیت غذایی کشاورزی ایران مورد توجه قرار گرفته و ارزیابی پایداری مصرف آب آن نیازمند توجه هم‌زمان به شرایط تولید و منابع آب است (Karandish & Hoekstra, 2017). مطالعات مربوط به بهره‌برداری از منابع آب سبز و آبی نشان داده‌اند که افزایش تاب‌آوری تولید غذا در برابر تغییرات جهانی نیازمند مدیریت هم‌زمان این دو مؤلفه و بهبود بهره‌وری آب است (Rockström et al., 2009). از آنجا که بهبود بهره‌وری آب به شرایط زیست‌فیزیکی و اجتماعی-اقتصادی محلی وابسته است و راهکارهای افزایش بهره‌وری را نمی‌توان بدون توجه به مقیاس و شرایط محلی به‌صورت یکسان در مناطق مختلف به کار برد (Molden et al., 2010)، ارزیابی محلی و منطقه‌ای بهره‌وری آب با در نظر گرفتن ترکیب محصولات، شرایط اقلیمی، محدودیت منابع آب و ساختار اقتصادی برای طراحی الگوهای کشت و سیاست‌های مدیریت آب ضرورت دارد، این موضوع در استان خراسان جنوبی، که تفاوت زیادی در شرایط تولید و بهره‌وری آب میان شهرستان‌ها وجود دارد، اهمیت بیشتری می‌یابد.

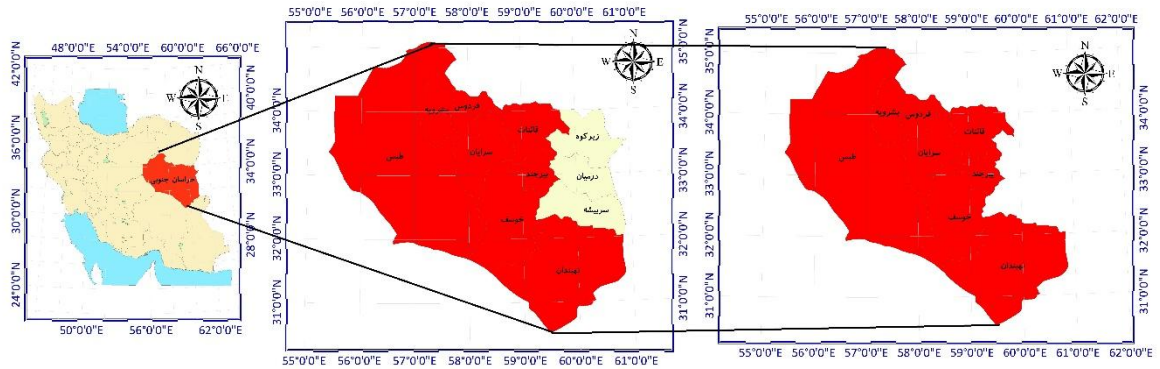
تحلیل داده‌های بهره‌وری آب کشاورزی که تحت تأثیر هم‌زمان چند عامل مانند محصول، مکان و زمان قرار دارند، می‌تواند با چالش‌هایی ناشی از انحراف داده‌ها از مفروضه‌های توزیعی روش‌های پارامتریک مواجه باشد. در چنین شرایطی، روش‌های مبتنی بر رتبه می‌توانند جایگزینی مناسب برای تحلیل‌های پارامتریک کلاسیک باشند. شایرر، ری و هر (Scheirer et al., 1976) روشی برای تحلیل داده‌های رتبه‌ای حاصل از طرح‌های فاکتوریل تصادفی ارائه کردند که امکان بررسی اثرات اصلی و برهم‌کنش عوامل را فراهم می‌کند. در این روش، داده‌های اصلی با رتبه‌های مشابه جایگزین شده و سپس تحلیل آماری بر روی مقادیر رتبه‌ای انجام می‌شود. برخلاف آزمون‌های تک‌عاملی مانند کروسکال–والیس که برای بررسی تفاوت گروه‌ها بر اساس یک عامل به کار می‌روند. روش‌های رتبه‌ای فاکتوریل امکان بررسی هم‌زمان چند عامل و در صورت تعریف در مدل، برهم‌کنش میان آن‌ها را فراهم می‌کنند. این ویژگی برای داده‌های چندعاملی پژوهش حاضر، شامل محصول، شهرستان و سال زراعی، اهمیت روش‌شناختی دارد زیرا امکان بررسی تفاوت‌های مشاهده‌شده در بهره‌وری آب را در چارچوبی واحد و با لحاظ هم‌زمان عوامل طبقه‌بندی‌کننده فراهم می‌سازد. با وجود پژوهش‌های موردی درباره بهینه‌سازی الگوی کشت در نقاط مختلف ایران، مطالعه‌ای که به‌طور هم‌زمان بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب را برای انواع محصولات زراعی و باغی استان خراسان جنوبی، در سطح همه شهرستان‌های مورد مطالعه و در بازه زمانی چندساله، به‌صورت تطبیقی و با کنترل آماری هم‌زمان اثر محصول، مکان و زمان بررسی کند، کمتر انجام شده است. این خلأ پژوهشی اهمیت ویژه‌ای دارد زیرا تصمیمات مربوط به الگوی کشت در سطح شهرستان مستقیماً بر پایداری منابع آب زیرزمینی استان و معیشت کشاورزان اثر می‌گذارد و بدون

تحلیل داده‌محور، سیاست‌گذاری تشویق یا محدودسازی کشت هر محصول ممکن است به نتایج ناخواسته اقتصادی یا زیست‌محیطی منجر شود. در این راستا، پژوهش حاضر با سه هدف به‌هم‌پیوسته دنبال می‌شود. هدف نخست، محاسبه و مقایسه بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب برای محصولات زراعی و باغی در هشت شهرستان استان خراسان جنوبی طی سه سال زراعی متوالی است. سپس، شناسایی محصولات و مناطقی که از این نظر در وضعیت مطلوب یا نامطلوب قرار دارند و تحلیل روند تغییرات آن‌ها در طول زمان و سرانجام، ارائه رهنمودهایی مبتنی بر شواهد برای بازنگری الگوی کشت با تأکید بر پایداری بلندمدت منابع آب زیرزمینی استان است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در استان خراسان جنوبی، واقع در شرق ایران انجام شده است. استان خراسان جنوبی با مساحتی حدود ۱۵۰ هزار کیلومتر مربع، ۶/۲۲ درصد از مساحت کشور را به خود اختصاص داده است. این استان بین ۵۷ درجه و ۱ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۵۷ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۳۶ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. براساس آخرین تقسیمات کشوری، این استان اکنون شامل ۱۲ شهرستان، ۳۲ شهر، ۲۸ بخش و ۶۶ دهستان است (سالنامه آماری استان خراسان جنوبی، ۱۴۰۲). با توجه به وضع قرارگیری استان در بین کویرها و ارتفاعات پراکنده، اقلیم خشک و بیابانی گرم در مناطق جنوبی و جنوب غربی و اقلیم نیمه بیابانی ملایم و سرد در مناطق کوهستانی شمال و شمال شرق حاکم است. ارتفاعات و جهت شمال غربی- جنوب شرقی آن‌ها باعث تنوع و نوسان شدید در اقلیم منطقه شده است. این استان دارای ۳۵ محدوده مطالعاتی برای مدیریت منابع آب است و بر اساس آمارهای اخیر، متوسط بارندگی سالانه درازمدت در این استان حدود ۱۱۳ میلی‌متر است که نشان‌دهنده کمبود شدید منابع آبی است (قوچانیان حقوردی و همکاران، ۱۴۰۳). از میان ۱۲ شهرستان استان، هشت شهرستان شامل بشرویه، بیرجند، خوسف، قائن، نهبندان، فردوس، طبس و سرایان به‌عنوان واحدهای تحلیل این پژوهش انتخاب شدند. انتخاب هشت شهرستان با توجه به در دسترس بودن داده‌های مورد نیاز و تفاوت‌های موجود در شرایط اقلیمی، منابع آب و الگوی تولید کشاورزی آن‌ها انجام شد. تفاوت در ترکیب محصولات زراعی و باغی میان شهرستان‌های مورد مطالعه، امکان مقایسه مکانی بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب را فراهم می‌کند. شکل (۱) منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱ .منطقه مورد مطالعه

Fig 1. Location of the study area

داده‌ها

داده‌های مربوط به سطح زیرکشت هر محصول، درصد سهم آن از مساحت کل کشت‌شده شهرستان، تاریخ کاشت و برداشت و طول دوره رشد برای هر شهرستان از آمارنامه‌های سالانه سازمان جهاد کشاورزی استان خراسان جنوبی اخذ شد. داده‌های عملکرد محصول بر حسب کیلوگرم در هکتار، هزینه کل تولید هر هکتار (شامل نهاده‌ها، سوخت، نیروی کار، ماشین‌آلات و سایر هزینه‌های جاری) بر حسب ریال، قیمت فروش هر کیلوگرم محصول و درآمد ناخالص حاصل از فروش نیز از همین منبع و بر مبنای آمارنامه‌های سالانه کشاورزی گردآوری گردید.

نیاز آبی ناخالص هر محصول بر حسب مترمکعب در هکتار، که در این پژوهش به‌عنوان مخرج شاخص‌های بهره‌وری آب در نظر گرفته شد، از سامانه نیاز آبی مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور استخراج شد. این سامانه بر مبنای روش استاندارد فائو-پنمن-مانتیث برای محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع، به‌همراه ضرایب گیاهی اختصاصی هر محصول در مراحل مختلف رشد، نیاز آبی خالص را محاسبه و با احتساب راندمان کاربرد آب در شبکه آبیاری منطقه، نیاز آبی ناخالص مدل‌شده را برآورد می‌کند. این مقدار، نیاز آبیاری مدل‌شده بر اساس شرایط اقلیمی متوسط منطقه است و حجم واقعی آب تحویل‌شده یا برداشت‌شده در مزرعه نمی باشد. به همین دلیل، در سراسر این مقاله، شاخص‌های بهره‌وری آب به‌طور دقیق‌تر بهره‌وری نسبت به نیاز ناخالص آبیاری نامیده می‌شوند و بهره‌وری نسبت به آب مصرفی واقعی مد نظر نیست.

داده‌ها برای سه سال زراعی متوالی، یعنی ۱۳۹۹-۱۴۰۰، ۰۱-۱۴۰۰و ۰۲-۱۴۰۱برای هشت محصول عمده در هر شهرستان جمع آوری شد و در مجموع ۱۳۵ داده محصول-شهرستان-سال را تشکیل داد. محصولات مورد بررسی شامل دو محصول زراعی گندم و جو و محصولات باغی پسته، عناب، زرشک، انار، خرما و پنبه بودند. انتخاب این محصولات بر مبنای سهم آن‌ها از سطح زیرکشت آبی هر شهرستان و اهمیت اقتصادی آن‌ها در اقتصاد کشاورزی محلی صورت گرفت.

قیمت فروش محصولات، هزینه کل تولید (شامل نهاده‌ها، سوخت، نیروی کار، ماشین‌آلات، هزینه آب و سایر هزینه‌های جاری) و درآمد ناخالص حاصل از فروش، برای هر مشاهده (یعنی هر ترکیب محصول-شهرستان-سال) بر مبنای آمار و قیمت‌های جاری (اسمی) همان سال زراعی که آن مشاهده به آن تعلق دارد، از آمارنامه‌های سالانه سازمان جهاد کشاورزی استخراج شدند. یعنی برای مشاهدات سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰، از قیمت‌ها و هزینه‌های همان سال و برای مشاهدات سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲، از قیمت‌ها و هزینه‌های همان سال استفاده شد و هیچ‌یک از ارقام ریالی به قیمت ثابت یک سال پایه تعدیل نشدند. این رویکرد با هدف انعکاس شرایط واقعی تصمیم‌گیری کشاورزان در هر سال زراعی اتخاذ شد، اما به این معناست که مقایسه‌های بین‌سالی شاخص‌های اقتصادی، ماهیتی اسمی دارند و بخشی از تغییرات مشاهده‌شده می‌تواند ناشی از تورم عمومی باشد. این نکته در تفسیر نتایج و در بخش محدودیت‌های روش‌شناختی به‌طور مشخص مورد توجه قرار گرفته است.

محاسبه بهره‌وری فیزیکی آب[1] (CPD):

جهت ارزیابی بهره‌وری فیزیکی آب محصولات زراعی و باغی مورد مطالعه، از شاخص عملکرد به‌ازای واحد حجم نیاز ناخالص آبیاری استفاده شد. شاخصی که در ادبیات بهره‌وری آب کشاورزی به‌طور گسترده برای مقایسه کارایی مصرف آب میان محصولات و مناطق مختلف به کار می‌رود (Molden et al., 2010). این شاخص به‌صورت رابطه زیر بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب بیان می‌شود:

$$CPD = \frac{Yield_{crop}}{Ir_{Gross}} \quad (1)$$

$Yield_{crop}$ عملکرد هر محصول بر حسب کیلوگرم در هکتار، Ir_{Gross} نیاز ناخالص آبیاری مدل‌شده بر حسب مترمکعب در هکتار (از سامانه نیاز آبی مؤسسه تحقیقات خاک و آب) و CPD بهره‌وری فیزیکی آب بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب است.

این شاخص برای مقایسه محصولات با عملکرد وزنی بالا معیار مناسبی به شمار می‌رود، هرچند به‌تنهایی ارزش اقتصادی متفاوت محصولات را نشان نمی‌دهد (Wichelns, 2014).

محاسبه بهره‌وری اقتصادی ناخالص آب[2] (GBPD):

[1] Crop per Drop (CPD)

برای محاسبه بهره‌وری اقتصادی ناخالص آب، از شاخص ارزش فروش به‌ازای واحد حجم نیاز ناخالص آبیاری استفاده شد. شاخصی که برای رفع محدودیت شاخص فیزیکی در انعکاس ارزش بازاری محصولات متفاوت توسعه یافته است (Molden et al., 2010). این شاخص به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$GBPD = \frac{TR}{Ir_{Gross}} = \frac{Yield_{crop} * C_{crop}}{Ir_{Gross}} \quad (2)$$

TR درآمد یا ارزش ناخالص فروش محصول (ریال بر هکتار)، C_{crop} قیمت هر کیلوگرم محصول (ریال بر کیلوگرم) بر مبنای میانگین قیمت فروش گزارش‌شده در آمارنامه جهاد کشاورزی برای هر سال زراعی و GBPD بهره‌وری اقتصادی ناخالص آب بر حسب ریال بر مترمکعب است. از آنجا که این شاخص تنها بر مبنای درآمد فروش محاسبه می‌شود، همیشه مقداری مثبت دارد. علاوه بر این شاخص، درآمد خالص هر محصول در هر هکتار نیز از تفاضل درآمد حاصل از فروش و هزینه کل تولید محاسبه شد.

محاسبه سود خالص به ازای واحد آب[1] (NBPD): علاوه بر دو شاخص فوق، برای ارزیابی دقیق‌تر سودآوری واقعی هر محصول پس از کسر هزینه‌های تولید، شاخص سود خالص به ازای واحد آب نیز محاسبه شد. این شاخص، که در ادبیات بهره‌وری اقتصادی آب به‌عنوان معیار مکمل شاخص ارزش ناخالص مطرح است (Molden et al., 2010)، به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$NBPD = \frac{Net\ Income}{Ir_{Gross}} = \frac{TR - TC}{Ir_{Gross}} \quad (3)$$

Net Income درآمد خالص هر هکتار (ریال بر هکتار)، برابر با تفاضل درآمد ناخالص فروش (TR) و هزینه کل تولید (TC) و Ir_{Gross} همان نیاز ناخالص آبیاری مدل‌شده است. برخلاف GBPD که تنها ارزش فروش محصول را در نظر می‌گیرد، NBPD هزینه‌های تولید را نیز از محاسبه کسر می‌کند و معیار واقع‌بینانه‌تری برای سودآوری خالص محصولات به ازای هر واحد آب به دست می‌دهد. مقادیر منفی این شاخص بیانگر آن است که هزینه تولید محصول از درآمد حاصل از فروش آن بیشتر شده و کشت آن محصول در آن سال و شهرستان، بر مبنای قیمت‌های اسمی همان سال، از نظر اقتصادی زیان‌ده بوده است.

میانگین وزنی و تحلیل حساسیت

میانگین وزنی هر شاخص بر مبنای سطح زیرکشت هر ترکیب محصول-شهرستان در سال پایانی محاسبه شد:

$$Weighted\ Index = \frac{\sum(Index_i * Area_i)}{\sum Area_i} \quad (4)$$

برای بررسی پایداری رتبه‌بندی محصولات، میانگین NBPD هر محصول با تغییر ۱۰±درصدی قیمت، هزینه و نیاز آبی (به‌طور جداگانه) بازمحاسبه و رتبه جدید با رتبه پایه با ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن مقایسه شد.

تحلیل آماری

پیش از انجام تحلیل‌های استنباطی، الگوی توزیع شاخص NBPD با استفاده از آزمون شاپیرو–ویلک و بررسی الگوی توزیع داده‌ها ارزیابی شد. نتیجه آزمون شاپیرو–ویلک نشان داد که توزیع NBPD از نرمالیت فاصله دارد($w=0/786$, $p<0/001$) ، این نتیجه با دامنه نسبتاً گسترده و چولگی مشاهده‌شده در مقادیر NBPD در میان محصولات و شهرستان‌های مختلف سازگار بود. با توجه به این ویژگی‌های توزیعی و همچنین نامتوازن بودن تعداد مشاهدات میان گروه‌ها، در تحلیل‌های مقایسه‌ای از روش‌های مبتنی بر رتبه به‌عنوان رویکرد اصلی استفاده شد. رابطه بین بهره‌وری فیزیکی آب و سود خالص به ازای واحد آب با استفاده از ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن بررسی شد و ضریب همبستگی پیرسون نیز صرفاً به‌عنوان تحلیل مقایسه‌ای و برای بررسی حساسیت نتایج نسبت به نوع ضریب همبستگی محاسبه گردید. این رابطه در دو سطح، نخست، بر اساس میانگین شاخص برای هر یک از محصولات مورد مطالعه در کل مشاهدات مربوط به آن محصول و دوم، بر اساس مجموعه

---

[2] Gross Benefit per Drop (GBPD)
[1] Net Benefit per Drop (NBPD)

۱۳۵ مشاهده محصول–شهرستان–سال بررسی شد. ضرایب همبستگی صرفاً به‌عنوان شاخصی از شدت و جهت هم‌تغییری آماری دو شاخص تفسیر شدند و از آن‌ها برای استنباط رابطه علّی یا نقش پیش‌بینی‌کننده استفاده نشد. همچنین، تفسیر رابطه CPD و NBPD با احتیاط انجام شد، زیرا CPD مستقیماً در ساختار محاسباتی NBPD حضور دارد و هر دو شاخص از نیاز ناخالص آبیاری به‌عنوان مخرج استفاده می‌کنند. بنابراین، همبستگی مشاهده‌شده میان دو شاخص لزوماً بیانگر یک رابطه اقتصادی مستقل نیست و می‌تواند تا حدی ناشی از وابستگی جبری و ساختار نسبتی شاخص‌ها باشد.

مدل چندعاملی تحلیل واریانس مبتنی بر رتبه

در این رویکرد، مقادیر NBPD در کل مجموعه داده به رتبه تبدیل و سپس مدل عاملی بر روی رتبه‌های حاصل برازش شد. این روش امکان بررسی هم‌زمان اثرات اصلی عوامل مورد مطالعه را بدون اتکا به فرض نرمال بودن توزیع متغیر پاسخ فراهم می‌کند. ابتدا مقادیر NBPD در کل مجموعه داده به رتبه تبدیل شدند.

داده‌های این پژوهش ساختار متقاطع چندعاملی دارند، زیرا هر مشاهده ترکیبی از محصول، شهرستان و سال زراعی است و اثر هر یک از این سه عامل می‌تواند هم‌زمان بر NBPD اثر بگذارد. تحلیل جداگانه هر عامل با آزمون تک‌عاملی کروسکال-والیس، که در گزارش‌های اولیه این پژوهش به کار رفته بود، سهم مستقل هر عامل را پس از کنترل اثر دو عامل دیگر نشان نمی‌دهد و می‌تواند به برآورد نادرست معنی‌داری عوامل شهرستان و سال منجر شود. برای رفع این محدودیت، تحلیل اصلی این پژوهش بر مبنای رویکرد تبدیل به رتبه برای تحلیل واریانس چندعاملی انجام شد. این روش نخستین بار برای طرح‌های کاملاً تصادفی فاکتوریل توسط شیرر، ری و هیر معرفی شد (Scheirer, Ray, & Hare, 1976) و بعدها توسط کانوور و ایمان به‌عنوان پلی میان روش‌های پارامتریک و ناپارامتریک برای داده‌های فاقد توزیع نرمال تعمیم داده شد (Conover & Iman, 1981). در این روش، پاسخ اصلی (NBPD) در کل مجموعه داده به رتبه تبدیل می‌شود:

$$R(NBPD)_i = rank(NBPD_i) \quad , \quad i=1,\ldots,N \qquad (5)$$

که در آن R_i رتبه مشاهده iام و N=135 تعداد کل مشاهدات است. سپس یک مدل تحلیل واریانس سه‌عاملی بر روی رتبه‌های به‌دست‌آمده برازش می‌شود:

$$R(NBPD) = \mu + Product_i + County_j + Year_k + \varepsilon_{ijk} \qquad (6)$$

در این رابطه Product،County و Year عامل محصول، شهرستان و سال زراعی، μ میانگین کلی رتبه‌ها و ε جمله خطای مدل است. با توجه به وجود سلول‌های خالی ساختاری در ترکیب محصول× شهرستان، ناشی از تفاوت الگوی کشت و تناسب اقلیمی محصولات در شهرستان‌های مختلف، برخی جمله‌های برهم‌کنشی قابل برآورد پایدار نبودند ازاین‌رو، مدل به بررسی اثرات اصلی سه عامل محدود شد. بنابراین، نتایج این مدل به‌عنوان تفاوت‌های آماری تعدیل‌شده در چارچوب عوامل واردشده به مدل تفسیر شدند. برای هر عامل، آماره F و مقدار p از جدول تحلیل واریانس رتبه‌ها گزارش شد و اندازه اثر با ضریب اتا-مجذور جزئی محاسبه گردید.

$$\eta_p^2 = \frac{SS_{ettect}}{SS_{efect} + SS_{residual}} \qquad (7)$$

SS_{efect}: مجموع مربعات مربوط به عامل موردنظر و $SS_{residual}$: مجموع مربعات خطای مدل

این شاخص، اندازه نسبی تفاوت‌های مرتبط با هر عامل را در چارچوب مدل رتبه‌محور نشان می‌دهد. از آنجا که تحلیل بر روی رتبه‌های NBPD انجام شده است، اندازه اثر نیز به‌عنوان اندازه اثر مربوط به پاسخ رتبه‌ای و نه به‌عنوان سهم مستقیم تغییرپذیری مقادیر NBPD در واحد ریال بر مترمکعب تفسیر شد. آزمون کروسکال–والیس برای مقایسه تک‌عاملی محصولات نیز به‌عنوان تحلیل مکمل انجام شد تا وجود تفاوت کلی در توزیع NBPD میان محصولات بررسی شود. نتایج تحلیل چندعاملی رتبه‌محور و آزمون‌های تک‌عاملی به‌صورت مکمل تفسیر شدند، زیرا آزمون تک‌عاملی اثر هم‌زمان شهرستان و سال زراعی را در نظر نمی‌گیرد در حالی که مدل چندعاملی این عوامل را به‌طور هم‌زمان در ساختار مدل وارد می‌کند.

مقایسه‌های زوجی، اندازه‌های اثر و میانگین وزنی:

آزمون کروسکال–والیس تنها وجود تفاوت کلی میان حداقل دو گروه را مشخص می‌کند و مشخص نمی‌کند که تفاوت میان کدام گروه‌ها وجود دارد. در صورت معنی‌دار شدن اثر محصول، مقایسه‌های زوجی بین محصولات با استفاده از آزمون Dunn انجام شد. به‌منظور کنترل افزایش احتمال خطای نوع اول ناشی از مقایسه‌های چندگانه، مقادیر p حاصل از مقایسه‌های زوجی با روش Holm اصلاح شدند (Dunn, 1964; Holm, 1979). برای بیان اندازه اثر آزمون کروسکال–والیس، از ضریب اپسیلون-مجذور استفاده شد:

$$\varepsilon^2 = \frac{H}{N-1} \quad (8)$$

که در آن (H) آماره آزمون کروسکال–والیس و (N) تعداد کل مشاهدات مورد استفاده در آزمون است. این ضریب به‌عنوان شاخصی از اندازه تفاوت میان گروه‌ها در چارچوب آزمون رتبه‌ای است. برای مقایسه توزیع NBPD میان دو گروه کلی محصولات زراعی و باغی نیز از آزمون من–ویتنی یو استفاده شد. اندازه اثر این مقایسه با استفاده از ضریب همبستگی رتبه‌ای دوجمله‌ای[1] گزارش شد تا علاوه بر معنی‌داری آماری، بزرگی تفاوت میان دو گروه ارزیابی شود.

از آنجا که میانگین ساده هر شاخص به مشاهدات وزن یکسان می‌دهد، در حالی که سطح زیرکشت محصولات و شهرستان‌ها با هم تفاوت دارد، میانگین وزنی شاخص‌ها بر مبنای سطح زیرکشت نیز محاسبه شد. برای سال زراعی پایانی، میانگین وزنی هر شاخص برای ترکیب‌های محصول–شهرستان از رابطه زیر به دست آمد:

$$Weighted\ Index = \frac{\sum_{i-1}^{n}(Index_i * Area_i)}{\sum_{i=1}^{n} Area_i} \quad (9)$$

که در آن $Index_i$ مقدار شاخص موردنظر و $Area_i$ سطح زیرکشت متناظر با همان ترکیب محصول–شهرستان است. این میانگین وزنی به‌عنوان یک شاخص تجمیعی توصیفی استفاده شد و جایگزین تحلیل‌های استنباطی نشد.

تحلیل حساسیت

به دلیل حساسیت ذاتی NBPD به قیمت فروش، هزینه تولید و حجم آب، یک تحلیل حساسیت تک‌متغیره برای بررسی پایداری رتبه‌بندی محصولات انجام شد. میانگین NBPD هر محصول با تغییر ۱۰±درصدی هر یک از سه مؤلفه قیمت، هزینه و آب (به‌طور جداگانه و با ثابت نگه‌داشتن دو مؤلفه دیگر) بازمحاسبه و رتبه جدید محصولات با رتبه پایه با ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن مقایسه شد.

محدودیت‌های روش‌شناختی: این پژوهش با چند محدودیت مهم روبه‌رو است. نخست، آب مورد استفاده در محاسبه شاخص‌های GBPD،CPD و NBPD، نیاز ناخالص آبیاری مدل‌شده است و حجم واقعی آب تحویل‌شده، برداشت‌شده یا مصرف‌شده در مزرعه نمی‌باشد. بنابراین، شاخص‌های محاسبه‌شده بیانگر بهره‌وری نسبت به نیاز ناخالص آبیاری مدل‌شده هستند و نمی‌توان از آن‌ها به‌تنهایی برای استنباط میزان واقعی برداشت یا مصرف آب استفاده کرد. ارزیابی اثرات این الگو بر منابع آب زیرزمینی نیازمند داده‌های مستقل درباره برداشت واقعی، تغذیه آبخوان، کسری مخزن و روند تغییرات سطح آب زیرزمینی است که در این پژوهش در دسترس نبود. دوم، قیمت فروش و هزینه تولید در هر سال زراعی به قیمت جاری همان سال گزارش شده و به قیمت ثابت یک سال پایه تعدیل نشده‌اند. بنابراین، مقایسه‌های اقتصادی بین سال‌ها ماهیتی اسمی دارند و تغییرات مشاهده‌شده در NBPD و GBPD ممکن است علاوه بر تغییر در عملکرد، هزینه یا قیمت نسبی محصولات، تحت تأثیر تورم و تغییرات سطح عمومی قیمت‌ها نیز قرار گرفته باشند. ازاین‌رو، در تفسیر تغییرات بین‌سالی، شاخص‌های اقتصادی به‌عنوان مقادیر اسمی تفسیر شدند و افزایش یا کاهش آن‌ها لزوماً به معنای تغییر در سودآوری واقعی نیست. سوم، مشاهدات این پژوهش ممکن است کاملاً مستقل از یکدیگر نباشند، زیرا مشاهدات مربوط به یک شهرستان یا یک محصول در سال‌های مختلف می‌توانند همبستگی درونی داشته باشند. مدل چندعاملی رتبه‌محور بخشی از این ساختار را با کنترل هم‌زمان سه عامل در نظر می‌گیرد، اما نبود جمله‌های برهم‌کنشی کامل و عدم امکان برازش مدل اثرات آمیخته با جزء تصادفی، به دلیل محدودیت حجم و توازن داده‌ها، همچنان یک محدودیت باقی می‌ماند. چهارم، حجم نمونه محدود برخی

[1] - rank-biserial correlation

محصولات، به‌ویژه محصولاتی که تنها در یک یا دو شهرستان کشت می‌شوند مانند انار و خرما، توان آماری آزمون‌های مقایسه‌ای مربوط به آن محصولات را کاهش می‌دهد. با وجود این محدودیت‌ها، از آنجا که هدف اصلی این پژوهش مقایسه نسبی محصولات و شهرستان‌ها و شناسایی الگوهای کلی الگوی کشت است، بنابراین، نتایج پژوهش در محدوده داده‌های مورد استفاده و با توجه به محدودیت‌های فوق تفسیر می‌شوند.

نتایج و بحث

محصول زعفران، به دلیل ماهیت متفاوت عملکرد و ارزش اقتصادی بالای آن نسبت به سایر محصولات مورد بررسی، در این مطالعه مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین یافته‌های این بخش به هشت محصول گندم، جو، پنبه، پسته، عناب، زرشک، انار و خرما در هشت شهرستان مورد مطالعه (۱۳۵ مشاهده محصول-شهرستان-سال) محدود است. در این بخش، نتایج و تفسیر آن‌ها به‌صورت یکپارچه ارائه می‌شود: ابتدا الگوی بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی خالص آب در سطح استان (جدول ۱ و شکل‌های ۲ تا ۵)، سپس جزئیات هر شهرستان (جدول‌های ۲ تا ۹)، پس از آن رابطه میان دو شاخص و آزمون‌های آماری (جدول‌های ۱۰ و ۱۱)، و در نهایت میانگین‌های وزنی، تحلیل حساسیت و مشاهدات زیان‌ده (جدول‌های ۱۲ و ۱۳) آورده می‌شود و هر یافته با پژوهش‌های پیشین مقایسه می‌گردد. تمامی مقادیر ریالی بر مبنای قیمت‌ها و هزینه‌های جاری همان سال گزارش شده‌اند و برای تورم عمومی تعدیل نشده‌اند. از این رو مقایسه ارقام ریالی میان سال‌ها بیش از آنکه بیانگر تغییر واقعی بهره‌وری باشد، بازتاب تغییر قیمت‌ها و هزینه‌ها است.

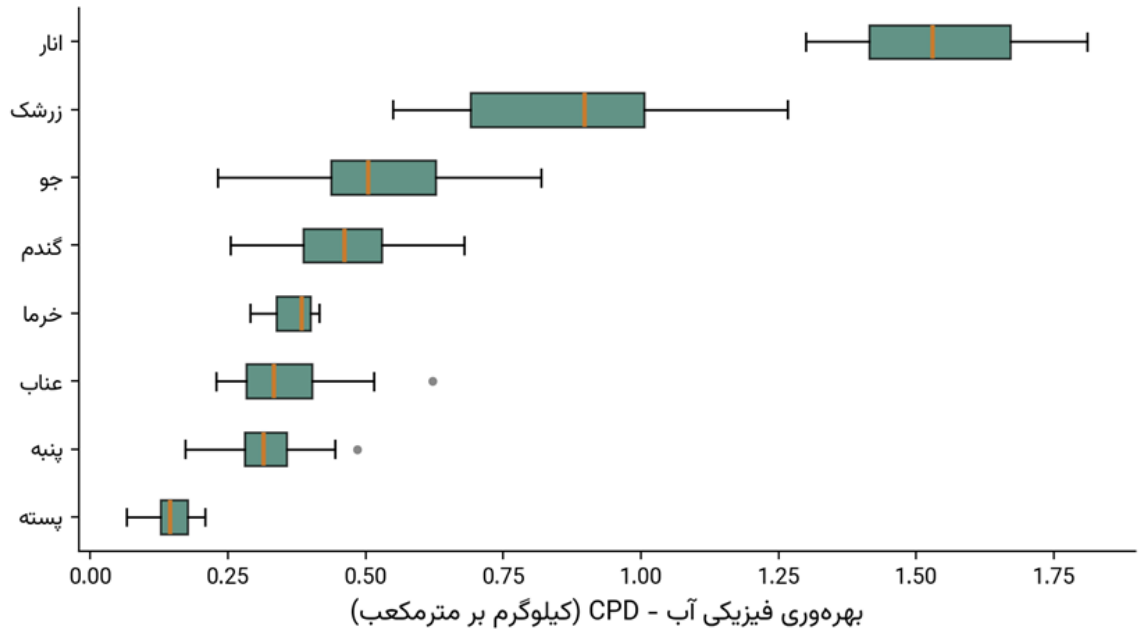
الگوی مکانی بهره‌وری فیزیکی آب

جدول ۱ بهره‌وری فیزیکی آب محصولات عمده را به تفکیک شهرستان در سال زراعی پایانی (۱۴۰۲-۱۴۰۱) نشان می‌دهد. محصولات باغی زرشک و انار بیشترین مقدار این شاخص را دارند. میانگین استانی زرشک ۰/۹۱۲ کیلوگرم بر مترمکعب است و بالاترین مقدار آن، ۱/۲۶۶ کیلوگرم بر مترمکعب، متعلق به قائن است. انار در فردوس با ۱/۳کیلوگرم بر مترمکعب بالاترین مقدار این جدول را دارد، هرچند در همین شهرستان طی سه سال از ۱/۸۱۱ به ۱/۳ کاهش یافته است (جدول ۷). در مقابل، پسته با میانگین استانی ۰/۱۴۲ کیلوگرم بر مترمکعب پایین‌ترین بهره‌وری فیزیکی را دارد و کمینه آن در نهبندان به ۰/۰۶۶می‌رسد. محصولات زراعی در حد فاصل این دو گروه قرار دارند. میانگین استانی جو ۰/۵۳۹، گندم ۰/۴۸۴ و پنبه ۰/۲۹۸ کیلوگرم بر مترمکعب است. به عبارت دیگر، ارزش مطلق CPD عمدتاً تابع نوع محصول است، نه اینکه تابع شهرستان باشد. برای نمونه بهره‌وری فیزیکی آب در گندم بین شهرستان‌ها از ۰/۳۱۶ (نهبندان) تا ۰/۶۳۱(خوسف) نوسان دارد، اما حتی بالاترین CPD پسته (۰/۲۰۶ در قائن) از پایین‌ترین CPD گندم کمتر است. این الگو با نتایج جهانی ردپای آب محصولات همخوان است که در آن محصولات درختی و آجیلی به ازای واحد وزن محصول، آب بیشتری مصرف می‌کنند (Mekonnen & Hoekstra, 2011) و نشان می‌دهد شاخص فیزیکی به‌تنهایی برای مقایسه محصولاتی با ارزش و وزن بسیار متفاوت کافی نیست (Molden et al., 2010). توزیع کامل CPD به تفکیک محصول، شامل میانه، دامنه بین‌چارکی و مقادیر پرت، در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. بهره‌وری فیزیکی آب (کیلوگرم بر مترمکعب) محصولات عمده به تفکیک شهرستان، سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱

Table 1. Physical water productivity (kg/m³) of major crops by county in the 2022–2023 crop year

سایر	پنبه Cotton	عناب Jujube	پسته Pistachio	زرشک Barberry	جو Barley	گندم wheat	شهرستان city
—	0.419	0.239	0.094	—	0.530	0.441	بشرویه Boshrooyeh
—	0.197	0.621	0.187	0.996	0.474	0.481	بیرجند Birjand
—	0.313	0.366	0.173	0.549	0.619	0.631	خوسف Khosf
—	0.350	0.323	0.206	1.266	0.503	0.449	قائن Qaen
—	0.279	0.284	0.066	0.895	0.332	0.316	نهبندان Nehbandan
انار: 1.300	—	0.283	0.145	0.902	0.660	0.473	فردوس Ferdoos
خرما: 0.291	—	—	0.117	—	0.506	0.490	طبس Tabas
—	0.232	0.283	0.145	0.865	0.691	0.593	سرایان Sarayan
—	0.298	0.343	0.142	0.912	0.539	0.484	میانگین استان Provincial Average



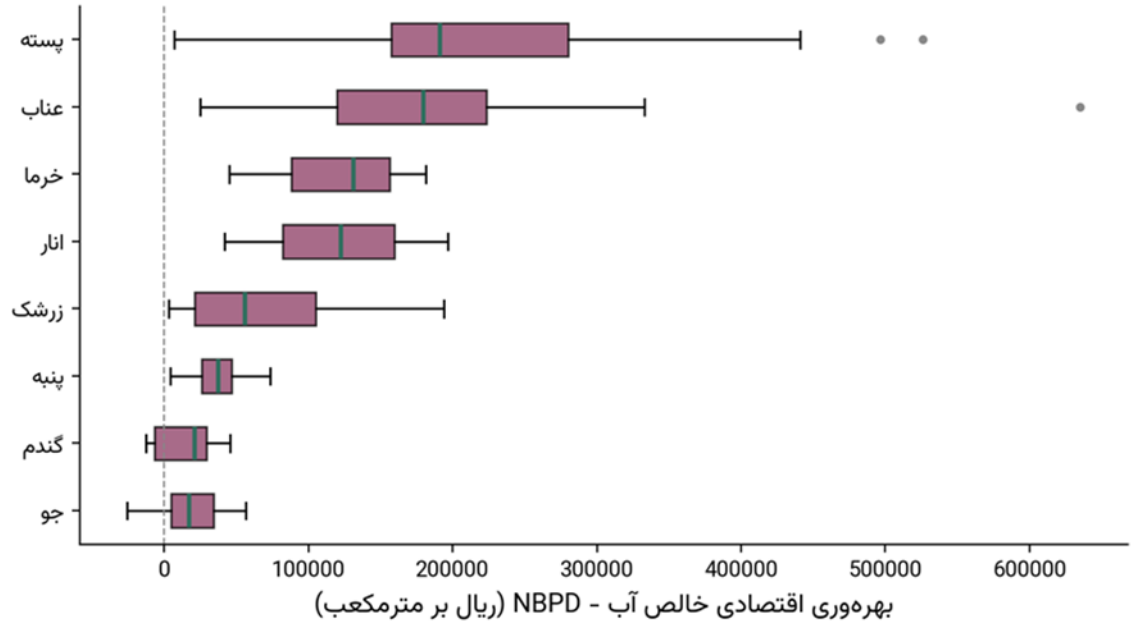
شکل ۲. توزیع بهره‌وری فیزیکی آب (CPD) به تفکیک محصول (135 مشاهده)

Fig 2. Distribution of physical water productivity (CPD) by crop (135 observations).

الگوی مکانی بهره‌وری اقتصادی خالص آب

شکل 3 نشان می‌دهد که با گذر از شاخص فیزیکی به شاخص اقتصادی خالص (NBPD)، ترتیب محصولات تقریباً وارونه می‌شود. میانه NBPD پسته و عناب در بالاترین سطح قرار دارد، در حالی که میانه گندم و جو به کمتر از ۳۰ هزار ریال بر مترمکعب می‌رسد. میانگین NBPD در کل ۱۳۵ مشاهده نیز همین ترتیب را تأیید می‌کند. پسته ۲۱۹۷۲۷، عناب ۱۹۱۴۶۲ و

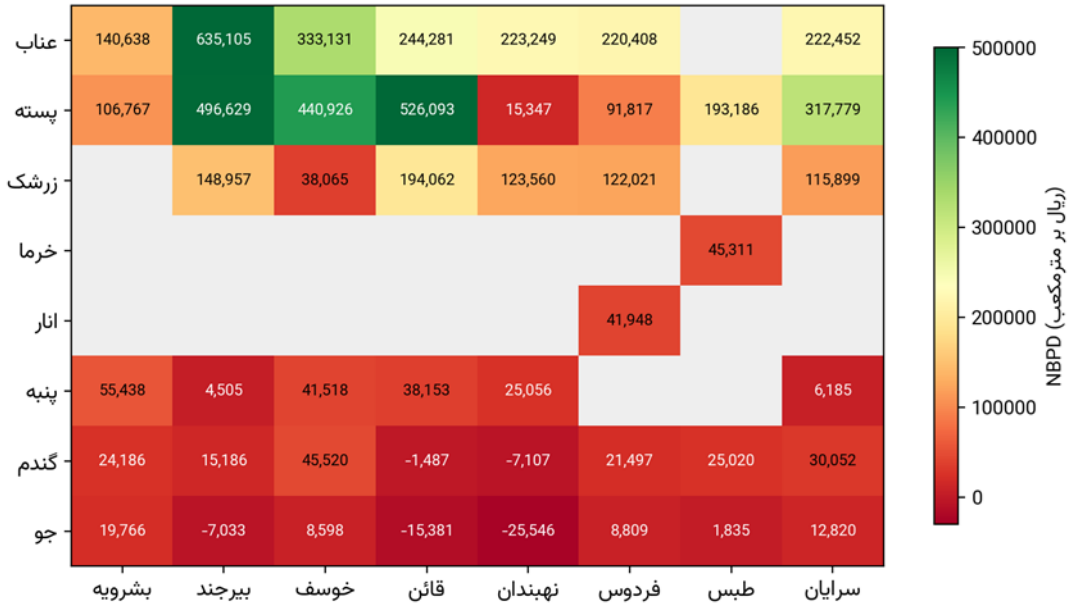
در مقابل جو ۱۸۲۹۳ و گندم ۱۳۴۹۳ ریال بر مترمکعب (جدول ۱۰)، یعنی NBPD پسته حدود شانزده برابر گندم است. این برتری اقتصادی پسته و عناب با وجود CPD پایین آن‌ها، گویای آن است که ارزش بازار محصول و نه وزن آن، عامل تعیین‌کننده بازده اقتصادی آب است.



شکل ۳. توزیع بهره‌وری اقتصادی خالص آب به تفکیک محصول، در کل مجموعه داده (۱۳۵ مشاهده)

Fig 3. Distribution of net economic water productivity by crop across the entire dataset (135 observations)

شکل ۴ الگوی مکانی NBPD را برای هر ترکیب محصول-شهرستان در سال زراعی پایانی (۱۴۰۲-۱۴۰۱) نشان می‌دهد. سلول‌های سبز (NBPD بالا) عمدتاً به پسته و عناب در شهرستان‌های بیرجند، قائن و خوسف تعلق دارند، در حالی که سلول‌های قرمز (NBPD پایین یا منفی) تقریباً به‌طور کامل به گندم و جو محدود شده‌اند. این الگو با یافته آزمون‌های آماری، مبنی بر برتری چشمگیر سهم عامل محصول نسبت به عامل شهرستان (جدول ۱۱)، همخوانی دارد. به بیان دیگر، با تغییر محصول در یک شهرستان تغییر بسیار بیشتری در NBPD نسبت به جابه‌جایی یک محصول مشخص میان شهرستان‌ها ایجاد می‌شود.

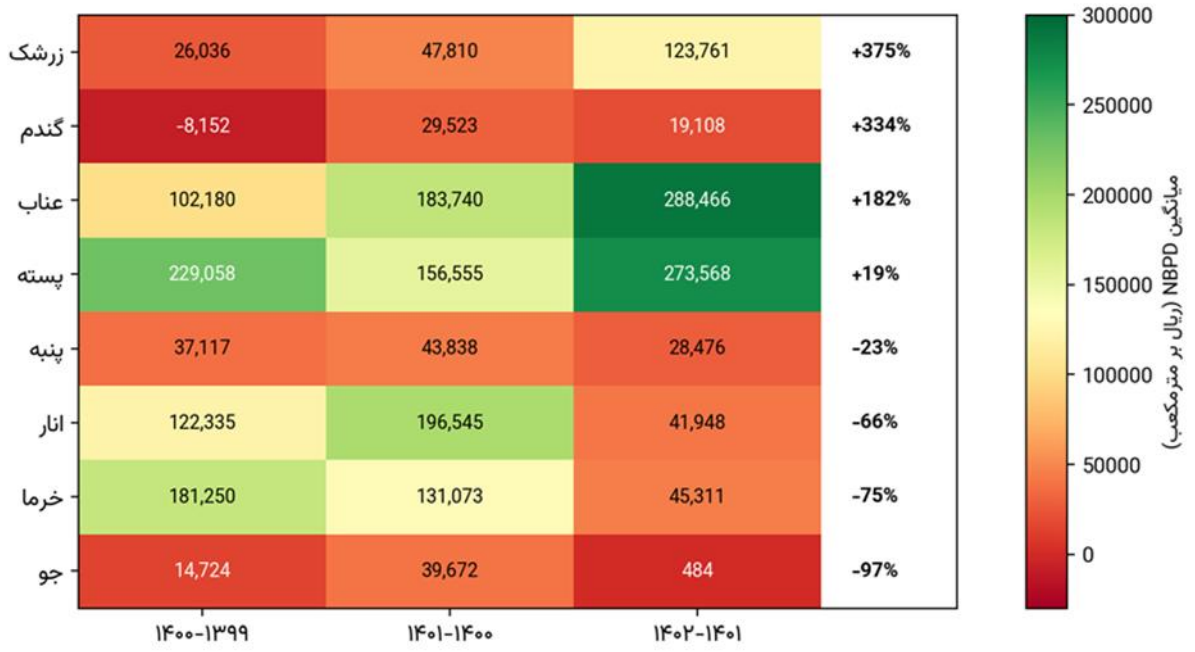


شکل ۴. نقشه حرارتی NBPD به تفکیک محصول و شهرستان، سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱

Fig 4. Heatmap of net benefit per unit of irrigation water (NBPD) by crop and county in the 2022–2023 crop year

روند زمانی بهره‌وری اقتصادی خالص آب

شکل ۵ میانگین استانی NBPD را برای هر محصول در سه سال زراعی نشان می‌دهد. عناب و پسته روند افزایشی نسبتاً پایدار داشته‌اند (به‌ترتیب ۱۸۲ و ۱۹ درصد افزایش در کل دوره)، در حالی که جو، خرما و انار روند نزولی نشان می‌دهند. درصدهای تغییر بسیار بزرگ محاسبه‌شده برای زرشک (۳۷۵ درصد افزایش) و گندم (۳۳۴ درصد افزایش) عمدتاً بازتاب نزدیکی مقدار پایه (سال ۱۴۰۰-۱۳۹۹) به صفر است و نباید به‌عنوان جهش واقعی بهره‌وری تفسیر شود. برای نمونه NBPD گندم در سال اول در هر هشت شهرستان منفی بود (جدول‌های ۲ تا ۹). این ارقام بر مبنای قیمت‌های اسمی هر سال محاسبه شده‌اند و روند واقعی (تعدیل‌شده با تورم) را نشان نمی‌دهند. افزایش GBPD میانگین گندم از حدود ۲۰ هزار به ۸۵ هزار ریال بر مترمکعب در سه سال (بیش از چهار برابر) افزایش داشته است، در حالی که CPD گندم تنها حدود ۲۳درصد افزایش یافت (از حدود ۰/۳۹به ۰/۴۸ کیلوگرم بر مترمکعب)، عمدتاً بازتاب تغییر قیمت‌هاست و ناشی از افزایش تولید نیست، نکته‌ای که تأکید Wichelns (2014) بر لزوم تفسیر دقیق برآوردهای بهره‌وری آب را یادآوری می‌کند.



شکل ۵. روند سه‌ساله میانگین NBPD به تفکیک محصول (قیمت‌های اسمی هر سال)

Fig 5. Three-year trends in mean NBPD by crop (using nominal prices for each year).

بهره‌وری آب در سطح شهرستان‌ها

برای نشان دادن تفاوت‌های درون‌استانی، جدول‌های ۲ تا ۹ بهره‌وری فیزیکی (CPD)، اقتصادی ناخالص (GBPD)، اقتصادی خالص (NBPD) و درآمد خالص هر محصول را در هر یک از هشت شهرستان و در هر سه سال زراعی ارائه می‌کنند. تفسیر هر جدول پیش از خود جدول آورده شده و در پایان، الگوهای مشترک میان شهرستان‌ها جمع‌بندی شده است.

در شهرستان بشرویه (جدول ۲)، پنج محصول گندم، جو، پسته، عناب و پنبه بررسی شده‌اند. در سال پایانی، عناب با NBPD برابر ۱۴۰٬۶۳۸ ریال بر مترمکعب بالاترین سود خالص به ازای واحد آب را داشته و پسته با ۱۰۶٬۷۶۷ در رتبه بعد قرار گرفته است، در حالی که جو با ۰/۵۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب بالاترین CPD و پسته با GBPD برابر ۴۰۲٬۶۷۷ ریال بر مترمکعب بالاترین بهره‌وری اقتصادی ناخالص را دارد. نوسان پسته در این شهرستان چشمگیر است. NBPD آن از ۲۹۵٬۴۸۶ در سال اول به ۷٬۱۵۰ در سال دوم کاهش یافت و سپس به ۱۰۶٬۷۶۷ بازگشت، که با کاهش CPD از ۰/۲۰۹ به ۰/۱۰۲ همراه بوده و به دلیل کاهش عملکرد باغات مربوط می‌باشد. در مقابل، NBPD عناب در هر سه سال افزایش یافت (۲۴٬۹۳۲، ۶۴٬۶۵۷ و ۱۴۰٬۶۳۸) و NBPD پنبه به‌تدریج از ۷۳٬۶۱۳ به ۵۵٬۴۳۸ کاهش یافت. گندم در سال اول با NBPD منفی (۶٬۳۴۴ ریال) همراه بود، اما در دو سال بعد به حدود ۲۴٬۳۰۷ رسید.

جدول ۲. بهره‌وری فیزیکی (CPD)، اقتصادی ناخالص (GBPD)، اقتصادی خالص (NBPD) و درآمد خالص محصولات شهرستان بشرویه طی سال‌های زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲-۱۴۰۱

Table 2. Physical (CPD), gross economic (GBPD) and net economic (NBPD) water productivity and net income of crops in Boshrooyeh County, 2020–2023 crop years.

محصول Crop	سال زراعی Crop Year	بهره‌وری فیزیکی (kg/m³) Physical Water Productivity (kg/m³)	بهره وری اقتصادی ناخالص (Rial/m³) (GBPD) (Rial/m³)	بهره وری اقتصادی خالص (Rial/m³) (NBPD) (Rial/m³)	درآمد خالص (Rial/ha) Net Income (Rial/ha)
گندم wheat	1399-1400	0.294	14,706	-6,344	-43,140,018
	1400-1401	0.430	49,407	24,307	164,068,813
	1401-1402	0.441	77,154	24,186	164,464,917

36,153,477	5,562	25,385	0.231	1399-1400	جو Barley
233,961,103	35,994	59,077	0.492	1400-1401	
130,454,050	19,766	68,921	0.530	1401-1402	
1,338,848,857	295,486	417,126	0.209	1399-1400	پسته Pistachio
33,695,625	7,150	305,538	0.102	1400-1401	
638,464,750	106,767	402,677	0.094	1401-1402	
101,307,972	24,922	123,001	0.246	1399-1400	عناب Jujube
274,988,116	64,657	183,400	0.229	1400-1401	
586,039,875	140,638	286,824	0.239	1401-1402	
425,853,302	73,613	135,523	0.484	1399-1400	پنبه Cotton
405,687,000	64,425	146,736	0.445	1400-1401	
370,270,000	55,438	138,196	0.419	1401-1402	

جدول ۳ نتایج شهرستان بیرجند را نشان می‌دهد که برجسته‌ترین مقادیر کل پژوهش در آن ثبت شده است .عناب با مقدار NBPDبرابر با ۶۳۵،۱۰۵ ریال بر مترمکعب در سال پایانی، بالاترین مقدار را در میان کل ۱۳۵ مشاهده به خود اختصاص داده است .این مقدار در مقایسه با سال اول (۱۵۷،۲۶۱) حدود چهار برابر افزایش یافته و هم‌زمان، CPD آن نیز از ۰،۴۶۹ به ۰،۶۲۱رسیده است. پسته نیز در سال پایانی با مقدار ۴۹۶،۶۲۹ و زرشک با مقدار ۱۴۸،۹۵۷ و بالاترین CPDشهرستان، معادل ۰،۹۹۶ در رتبه‌های بعدی قرار دارند .در مقابل، جو در سال پایانی NBPD(۷،۰۳۳ -) ریال داشته است و گندم نیز با مقدار ۱۵،۱۸۶ ریال بر مترمکعب، پس از ثبت اوج ۲۹،۷۹۳ در سال دوم، روند کاهشی را تجربه کرده است .پنبه نیز مقدار ناچیز ۴،۵۰۵ را ثبت کرده است .بنابراین، بیرجند نمونه روشنی از شهرستانی است که در آن اختلاف بازده اقتصادی میان محصولات باغی و زراعی بسیار چشمگیر است.

جدول ۳. بهره‌وری فیزیکی (CPD)، اقتصادی ناخالص (GBPD)، اقتصادی خالص (NBPD) و درآمد خالص محصولات شهرستان بیرجند طی سال‌های زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲-۱۴۰۱

Table 3. Physical (CPD), gross economic (GBPD) and net economic (NBPD) water productivity and net income of crops in Birjand County, 2020–2023 crop years.

درآمد خالص (Rial/ha) Net Income (Rial/ha)	بهره وری اقتصادی خالص (Rial/m³) (NBPD) (Rial/m³)	بهره وری اقتصادی ناخالص (Rial/m³) (GBPD) (Rial/m³)	بهره‌وری فیزیکی (kg/m³) Physical Water Productivity (kg/m³)	سال زراعی Crop Year	محصول Crop
-43,140,018	-8,346	19,346	0.387	1399-1400	گندم wheat
152,568,813	29,793	62,878	0.547	1400-1401	
79,239,917	15,186	84,213	0.481	1401-1402	
4,826,523	1,020	36,962	0.336	1399-1400	جو Barley
173,961,103	36,895	68,717	0.573	1400-1401	
-33,215,950	-7,033	61,656	0.474	1401-1402	
69,081,288	11,717	92,608	0.712	1399-1400	زرشک Barberry
119,716,366	18,967	97,434	0.650	1400-1401	
940,663,750	148,957	249,089	0.996	1401-1402	
1,208,848,857	199,184	289,998	0.145	1399-1400	پسته Pistachio
1,233,695,625	189,799	406,154	0.135	1400-1401	
2,848,664,750	496,629	805,125	0.187	1401-1402	
811,307,972	157,261	234,542	0.469	1399-1400	عناب Jujube
1,430,988,116	259,472	351,043	0.439	1400-1401	
3,503,239,875	635,105	745,540	0.621	1401-1402	
33,853,302	4,185	48,460	0.173	1399-1400	پنبه Cotton
347,607,000	41,800	104,127	0.316	1400-1401	
41,260,000	4,505	64,855	0.197	1401-1402	

در شهرستان خوسف (جدول ۴)، پسته در سال پایانی بالاترین مقادیر GBPD (۷۴۶،۰۹۰) و NBPD (۴۴۰،۹۲۶ ریال بر مترمکعب) را به خود اختصاص داده و پس از آن، عناب با مقدار ۳۳۳،۱۳۱ قرار می‌گیرد NBPD .پسته از ۱۷۵،۶۷۸ در سال

اول به ۲۰۳٬۱۸۲ و سپس ۴۴۰٬۹۲۶ افزایش یافته است .خوسف از معدود شهرستان‌هایی است که گندم در آن عملکرد نسبتاً مطلوبی دارد CPD .گندم از ۰٬۲۵۴ به ۰٬۶۳۱ کیلوگرم بر مترمکعب افزایش یافته که بالاترین مقدار گندم در سال پایانی در میان شهرستان‌های مورد بررسی است .همچنین، NBPDآن از منفی ۱۱٬۵۱۸ ریال به ۴۵٬۵۲۰ رسیده است .بااین‌حال، این مقدار نیز تنها حدود یک‌دهم NBPDپسته است .جو در سال پایانی به ۸٬۵۹۸ کاهش یافته و NBPDپنبه نیز طی سه سال به‌تدریج از ۵۴٬۳۸۷ به ۴۱٬۵۱۸ رسیده است .زرشک با مقدار ۳۸٬۰۶۵ در سال پایانی، با وجود CPDمعادل ۰٬۵۴۹، از نظر NBPDحتی مقداری کمتر از پنبه (۴۱٬۵۱۸) دارد.

جدول ۴. بهره‌وری فیزیکی (CPD)، اقتصادی ناخالص (GBPD)، اقتصادی خالص (NBPD) و درآمد خالص محصولات شهرستان خوسف طی سال‌های زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲-۱۴۰۱

Table 4. Physical (CPD), gross economic (GBPD) and net economic (NBPD) water productivity and net income of crops in Khosf County, 2020–2023 crop years.

درآمد خالص (Rial/ha) Net Income (Rial/ha)	بهره وری اقتصادی خالص (Rial/m³) (NBPD) (Rial/m³)	بهره وری اقتصادی ناخالص (Rial/m³) (GBPD) (Rial/m³)	بهره‌وری فیزیکی (kg/m³) Physical Water Productivity (kg/m³)	سال زراعی Crop Year	محصول Crop
-68,140,018	-11,518	12,677	0.254	1399-1400	گندم wheat
175,568,813	29,150	57,280	0.498	1400-1401	
252,314,917	45,520	110,501	0.631	1401-1402	
63,653,477	14,674	44,375	0.403	1399-1400	جو Barley
149,961,103	33,676	67,370	0.561	1400-1401	
38,804,050	8,598	80,480	0.619	1401-1402	
43,081,288	7,258	87,601	0.674	1399-1400	زرشک Barberry
74,716,366	11,665	88,993	0.593	1400-1401	
242,663,750	38,065	137,255	0.549	1401-1402	
1,088,848,857	175,678	264,602	0.132	1399-1400	پسته Pistachio
1,359,695,625	203,182	413,329	0.138	1400-1401	
2,564,864,750	440,926	746,090	0.173	1401-1402	
926,307,972	180,005	257,481	0.515	1399-1400	عناب Jujube
1,174,988,116	222,536	318,182	0.398	1400-1401	
1,910,839,875	333,131	439,330	0.366	1401-1402	
425,853,302	54,387	100,128	0.358	1399-1400	پنبه Cotton
405,687,000	47,195	107,492	0.326	1400-1401	
371,590,000	41,518	103,276	0.313	1401-1402	

جدول ۵ مربوط به شهرستان قائن است .زرشک با مقدار ۱،۲۶۶ کیلوگرم بر مترمکعب، بالاترین CPD این شهرستان را دارد و NBPD آن طی سه سال از ۴۷،۸۰۸ به ۱۹۴،۰۶۲ رسیده است؛ بااین‌حال، پسته با GBPD برابر با ۸۸۶،۶۳۴ و NBPDمعادل ۵۲۶،۰۹۳ ریال بر مترمکعب، همچنان از نظر اقتصادی برترین محصول این شهرستان محسوب می‌شود .NBPD عناب پس از جهش از ۹۶،۶۳۱ به ۲۵۰،۵۳۲ در سال دوم، در سال پایانی اندکی کاهش یافته و به ۲۴۴،۲۸۱ رسیده است .در سال پایانی، هر دو محصول گندم و جو به‌طور هم‌زمان NBPD منفی داشته‌اند (به‌ترتیب ۱،۴۸۷- و ۱۵،۳۸۱- ریال بر مترمکعب)، وضعیتی که در شهرستان نهبندان نیز تکرار شده است. این در حالی است که هر دو محصول در سال دوم سودآور بوده‌اند و NBPDآن‌ها به‌ترتیب به ۳۳،۹۷۲ و ۵۴،۳۴۳ رسیده است .این الگو نشان می‌دهد که سودآوری غلات در این شهرستان، با وجود CPDنسبتاً مطلوب (۰/۸۱۸ برای جو در سال دوم)، بسیار شکننده و وابسته به نسبت قیمت به هزینه در هر سال است.

جدول ۵. بهره‌وری فیزیکی (CPD)، اقتصادی ناخالص (GBPD)، اقتصادی خالص (NBPD) و درآمد خالص محصولات شهرستان قائن طی سال‌های زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲-۱۴۰۱

Table 5. Physical (CPD), gross economic (GBPD) and net economic (NBPD) water productivity and net income of crops in Qaen County, 2020–2023 crop years.

درآمد خالص (Rial/ha) Net Income (Rial/ha)	بهره وری اقتصادی خالص (Rial/m³) (NBPD) (Rial/m³)	بهره وری اقتصادی ناخالص (Rial/m³) (GBPD) (Rial/m³)	بهره‌وری فیزیکی (kg/m³) Physical Water Productivity (kg/m³)	سال زراعی Crop Year	محصول Crop
-58,140,018	-12,514	18,295	0.366	1399-1400	گندم wheat
152,568,813	33,972	71,699	0.623	1400-1401	
-6,685,083	-1,487	78,642	0.449	1401-1402	
47,153,477	13,208	49,300	0.448	1399-1400	جو Barley
185,961,103	54,343	98,188	0.818	1400-1401	
-61,815,950	-15,381	65,340	0.503	1401-1402	
225,081,288	47,808	149,108	1.147	1399-1400	زرشک Barberry
374,716,366	72,620	168,605	1.124	1400-1401	
1,002,913,750	194,062	316,418	1.266	1401-1402	
1,248,848,857	274,774	396,040	0.198	1399-1400	پسته Pistachio
798,695,625	162,800	449,450	0.150	1400-1401	
2,582,064,750	526,093	886,634	0.206	1401-1402	
401,307,972	96,631	192,632	0.385	1399-1400	عناب Jujube
1,054,988,116	250,532	370,458	0.463	1400-1401	
1,038,439,875	244,281	387,579	0.323	1401-1402	
218,653,302	34,575	91,208	0.326	1399-1400	پنبه Cotton
306,687,000	45,987	123,707	0.375	1400-1401	
272,260,000	38,153	115,611	0.350	1401-1402	

در شهرستان نهبندان (جدول ۶)، الگوی متفاوتی مشاهده می‌شود. عناب با NBPDبرابر با ۲۲۳،۲۴۹ در سال پایانی و GBPD معادل ۳۴۰،۶۴۳، بالاترین بهره‌وری اقتصادی را به خود اختصاص داده است. این الگو مشابه شهرستان‌های بشرویه، بیرجند و فردوس و در مقابل، متفاوت از خوسف، قائن، طبس و سرایان است که در آن‌ها پسته محصول برتر محسوب می‌شود NBPD . عناب نیز طی سه سال روندی کاملاً افزایشی داشته و از ۵۷،۶۸۴ به ۱۱۹،۸۸۱ و سپس ۲۲۳،۲۴۹ رسیده است .زرشک نیز با CPD برابر با ۰،۸۹۵ و NBPD معادل ۱۲۳،۵۶۰ در جایگاه دوم قرار دارد.

در مقابل، پسته روندی کاهشی و پیوسته را تجربه کرده است، به‌طوری‌که NBPD آن از ۱۴۸،۶۰۸ به ۱۰۹،۷۹۲ و در نهایت به ۱۵،۳۴۷ریال بر مترمکعب رسیده است .همچنین، CPDپسته (۰/۰۶۶) پایین‌ترین مقدار را در کل مجموعه داده به خود اختصاص داده است .نهبندان از نظر NBPD نیز پایین‌ترین مقدار کل پژوهش را ثبت کرده است .در این شهرستان، جو با NBPD= -25,546 و گندم با NBPD=-7,107 در سال پایانی، هر دو با زیان اقتصادی مواجه شده‌اند. بنابراین، نهبندان الگویی

از هم‌زمانی زیان‌دهی گندم و جو و افت مستمر عملکرد اقتصادی پسته را در کنار افزایش پیوسته بازده اقتصادی عناب نشان می‌دهد.

جدول 6. بهره‌وری فیزیکی (CPD)، اقتصادی ناخالص (GBPD)، اقتصادی خالص (NBPD) و درآمد خالص محصولات شهرستان نهبندان طی سال‌های زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲-۱۴۰۱

Table 6. Physical (CPD), gross economic (GBPD) and net economic (NBPD) water productivity and net income of crops in Nehbandan County, 2020–2023 crop years.

درآمد خالص (Rial/ha) Net Income (Rial/ha)	بهره وری اقتصادی خالص (Rial/m³) (NBPD) (Rial/m³)	بهره وری اقتصادی ناخالص (Rial/m³) (GBPD) (Rial/m³)	بهره‌وری فیزیکی (kg/m³) Physical Water Productivity (kg/m³)	سال زراعی Crop Year	محصول Crop
-43,140,018	-8,320	19,286	0.386	1399-1400	گندم wheat
118,068,813	20,717	50,446	0.439	1400-1401	
-40,985,083	-7,107	55,351	0.316	1401-1402	
102,153,477	23,127	52,297	0.475	1399-1400	جو Barley
113,961,103	24,392	56,506	0.471	1400-1401	
-120,705,950	-25,546	43,113	0.332	1401-1402	
153,581,288	27,767	113,902	0.877	1399-1400	زرشک Barberry
314,716,366	53,964	138,890	0.926	1400-1401	
779,913,750	123,560	223,740	0.895	1401-1402	
848,848,857	148,608	245,098	0.123	1399-1400	پسته Pistachio
663,695,625	109,792	342,430	0.114	1400-1401	
100,964,750	15,347	284,323	0.066	1401-1402	
276,307,972	57,684	140,918	0.282	1399-1400	عناب Jujube
614,988,116	119,881	218,324	0.273	1400-1401	
1,158,439,875	223,249	340,643	0.284	1401-1402	
285,573,302	36,777	92,724	0.296	1399-1400	پنبه Cotton
240,687,000	29,417	92,766	0.281	1400-1401	
206,260,000	25,056	92,202	0.279	1401-1402	

جدول ۷ نتایج شهرستان فردوس را نشان می‌دهد که تنها شهرستان دارای انار است. انار در سال اول بالاترین CPD کل پژوهش (۱/۸۱۱ کیلوگرم بر مترمکعب) را داشت، اما این مقدار در سه سال به ۱/۳ کاهش یافت و NBPD آن نیز از ۱۲۲،۳۳۵ به ۱۹۶،۵۴۵ (سال دوم) و سپس ۴۱،۹۴۸ ریال بر مترمکعب رسید. بنابراین بالاترین بهره‌وری فیزیکی لزوماً به NBPD بالا نینجامیده است. در سال پایانی، عناب با NBPD برابر ۲۲۰،۴۰۸ و زرشک با ۱۲۲،۰۲۱ در رتبه‌های اول و دوم قرار دارند و پسته، با وجود بالاترین GBPD (۴۰۰،۳۱۴)، با ۹۱،۸۱۷ در جایگاه سوم است. NBPD پسته از ۲۷۲،۴۳۵ در سال اول به ۹۱،۸۱۷کاهش یافته است. در گندم و جو نیز، پس از زیان جو در سال اول (۱۴۷۶-) و گندم (۱۰۸۴۹-)، مقادیر سال پایانی ۲۱،۴۹۷ و ۸،۸۰۹ بوده است.

جدول ۷. بهره‌وری فیزیکی (CPD)، اقتصادی ناخالص (GBPD)، اقتصادی خالص (NBPD) و درآمد خالص محصولات شهرستان فردوس طی سال‌های زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲-۱۴۰۱

Table 7. Physical (CPD), gross economic (GBPD) and net economic (NBPD) water productivity and net income of crops in Ferdows County, 2020–2023 crop years.

محصول Crop	سال زراعی Crop Year	بهره‌وری فیزیکی (kg/m³) Physical Water Productivity (kg/m³)	بهره وری اقتصادی ناخالص (Rial/m³) (GBPD) (Rial/m³)	بهره وری اقتصادی خالص (Rial/m³) (NBPD) (Rial/m³)	درآمد خالص (Rial/ha) Net Income (Rial/ha)
گندم wheat	1399-1400	0.367	18,375	-10,849	-53,140,018
	1400-1401	0.502	57,784	27,912	158,318,813
	1401-1402	0.473	82,795	21,497	126,314,917
جو Barley	1399-1400	0.326	35,849	-1,476	-5,096,523
	1400-1401	0.681	81,695	45,358	187,281,103
	1401-1402	0.660	85,813	8,809	37,114,050
پسته Pistachio	1399-1400	0.186	372,881	272,435	1,494,848,857
	1400-1401	0.161	484,453	242,861	1,413,695,625
	1401-1402	0.145	400,314	91,817	526,664,750
عناب Jujube	1399-1400	0.333	166,593	78,034	351,307,972
	1400-1401	0.322	257,494	155,902	774,988,116
	1401-1402	0.283	339,898	220,408	1,123,639,875
انار Pomegranate	1399-1400	1.811	181,085	122,335	895,125,800
	1400-1401	1.530	306,044	196,545	1,541,304,540
	1401-1402	1.300	233,988	41,948	329,081,550
زرشک Barberry	1399-1400	0.683	88,786	3,070	17,081,288
	1400-1401	0.947	142,108	58,318	344,716,366
	1401-1402	0.902	225,462	122,021	745,913,750

طبس (جدول ۸) کمترین تنوع محصول را دارد و تنها گندم، جو، پسته و خرما در آن بررسی شده‌اند. پسته با NBPD برابر ۱۹۳٬۱۸۷ در سال پایانی در رتبه اول است و NBPD آن در سه سال به‌آرامی و پیوسته افزایش یافته است (۱۶۲٬۸۵۹، ۱۷۶٬۲۴۶ و ۱۹۳٬۱۸۷). الگویی که با نوسان شدید پسته در برخی شهرستان‌های دیگر (مانند بشرویه و نهبندان) تفاوت دارد. خرما روند معکوس دارد: NBPD آن از ۱۸۱٬۲۵۱ به ۱۳۱٬۰۷۳ و سپس ۴۵٬۳۱۱ کاهش یافته و CPD آن نیز از ۰/۴۱۵ به ۰/۲۹۱ رسیده است. جو با ۰/۵۰۶ کیلوگرم بر مترمکعب بالاترین CPD را میان محصولات اصلی شهرستان دارد، اما NBPD آن در سال پایانی تنها ۱٬۸۳۵ ریال بر مترمکعب است، که عملاً به معنای نبود سود خالص است. گندم با ۲۵٬۰۲۰ در جایگاه سوم قرار دارد.

جدول ۸. بهره‌وری فیزیکی (CPD)، اقتصادی ناخالص (GBPD)، اقتصادی خالص (NBPD) و درآمد خالص محصولات شهرستان طبس طی سال‌های زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲-۱۴۰۱

Table 8. Physical (CPD), gross economic (GBPD) and net economic (NBPD) water productivity and net income of crops in Tabas County, 2020–2023 crop years.

محصول Crop	سال زراعی Crop Year	بهره‌وری فیزیکی (kg/m³) Physical Water Productivity (kg/m³)	بهره وری اقتصادی ناخالص (Rial/m³) (GBPD) (Rial/m³)	بهره وری اقتصادی خالص (Rial/m³) (NBPD) (Rial/m³)	درآمد خالص (Rial/ha) Net Income (Rial/ha)
گندم wheat	1399-1400	0.442	26,932	-6,590	-28,140,018
	1400-1401	0.523	60,094	30,582	175,568,813
	1401-1402	0.490	87,759	25,020	143,639,917
جو Barley	1399-1400	0.406	59,962	24,844	91,153,477
	1400-1401	0.506	60,695	30,218	148,761,103
	1401-1402	0.506	67,734	1,835	9,034,050

پسته Pistachio	1399-1400	0.149	255,505	162,859	968,848,857
	1400-1401	0.143	429,498	176,246	978,695,625
	1401-1402	0.117	511,849	193,187	1,072,764,750
خرما Date	1399-1400	0.415	238,388	181,251	1,104,359,585
	1400-1401	0.384	172,642	131,073	1,407,593,497
	1401-1402	0.291	138,197	45,311	486,595,460

در شهرستان سرایان (جدول ۹)، پسته در سال پایانی با NBPD برابر ۳۱۷٫۷۷۹ و GBPD برابر ۶۲۱٫۵۶۲ ریال بر مترمکعب بهترین عملکرد اقتصادی را دارد، هرچند مقدار آن در سال دوم به ۱۶۰٫۶۱۰ کاهش یافته و در سال سوم بازگشته است. عناب با ۲۲۲٫۴۵۲ و زرشک با ۱۱۵٫۸۹۹ در رتبه‌های بعدی قرار دارند و NBPD زرشک در هر سه سال افزایش یافته است، در حالی که CPD آن از ۱/۰۶۷ به ۰/۸۶۵ کاهش یافته است. این تفاوت روند نشان می‌دهد افزایش بازده اقتصادی زرشک بیش از آنکه از افزایش بهره‌وری فیزیکی ناشی شود، تابع قیمت بوده است. گندم و جو در این شهرستان نسبتاً بهتر از میانگین استان عمل کرده‌اند (CPD به‌ترتیب ۰/۵۹۳ و ۰/۶۹۱و NBPD برابر ۳۰٫۰۵۳ و ۱۲٫۸۲۰)، ولی NBPD پنبه به ۶٫۱۸۵ رسیده است.

جدول ۹. بهره‌وری فیزیکی (CPD)، اقتصادی ناخالص (GBPD)، اقتصادی خالص (NBPD) و درآمد خالص محصولات شهرستان سرایان طی سال‌های زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲-۱۴۰۱

Table 9. Physical (CPD), gross economic (GBPD) and net economic (NBPD) water productivity and net income of crops in Sarayan County, 2020–2023 crop years.

محصول Crop	سال زراعی Crop Year	بهره‌وری فیزیکی (kg/m³) Physical Water Productivity (kg/m³)	بهره وری اقتصادی ناخالص (Rial/m³) (GBPD) (Rial/m³)	بهره وری اقتصادی خالص (Rial/m³) (NBPD) (Rial/m³)	درآمد خالص (Rial/ha) Net Income (Rial/ha)
گندم wheat	1399-1400	0.656	32,788	-735	-3,140,018
	1400-1401	0.679	78,107	39,748	175,568,813
	1401-1402	0.593	103,816	30,053	146,746,167
جو Barley	1399-1400	0.654	71,954	36,837	135,153,477
	1400-1401	0.807	96,878	56,502	209,961,103
	1401-1402	0.691	89,823	12,820	54,008,850
زرشک Barberry	1399-1400	1.067	138,763	58,595	348,581,288
	1400-1401	1.008	151,210	71,325	442,216,366
	1401-1402	0.865	216,270	115,899	730,163,750
پسته Pistachio	1399-1400	0.197	393,895	303,438	1,848,848,857
	1400-1401	0.129	387,910	160,610	993,695,625
	1401-1402	0.145	621,562	317,779	1,851,064,750
عناب Jujube	1399-1400	0.402	200,763	120,720	601,307,972
	1400-1401	0.389	311,526	213,199	1,094,988,116
	1401-1402	0.283	339,306	222,452	1,159,639,875
پنبه Cotton	1399-1400	0.230	64,308	19,162	152,013,302
	1400-1401	0.300	98,988	34,207	273,687,000
	1401-1402	0.232	76,642	6,185	48,520,000

با نگاه تجمیعی به جدول‌های ۲ تا ۹، چند الگوی تکرارشونده دیده می‌شود. نخست، در هر هشت شهرستان NBPD گندم در سال اول (۱۴۰۰-۱۳۹۹) منفی بود، ولی در سال دوم در همه شهرستان‌ها مثبت و به‌طور میانگین حدود ۲۹ هزار ریال بر مترمکعب شد، این جهش با افزایش GBPD گندم همراه بود. دوم، در سال پایانی NBPD جو در هر هشت شهرستان نسبت به سال دوم کاهش یافت و NBPD گندم نیز در هفت شهرستان کاهش نشان داد، که نشان‌دهنده حساسیت شدید سودآوری غلات به تغییر نسبت قیمت به هزینه است. سوم، در میان محصولات باغی، NBPD زرشک در هر شش شهرستانی که این محصول در آن کشت می‌شود و NBPD عناب در شش از هفت شهرستان تولیدکننده آن در هر سه سال افزایش یافت. چهارم، رفتار پسته ناهمگن است. در بیرجند، خوسف، قائن، سرایان و طبس در سال پایانی از سال اول بالاتر بود ولی در بشرویه، فردوس و به‌ویژه نهبندان (از ۱۴۸٫۶۰۸ به ۱۵٫۳۴۷) کاهش یافت. این ناهمگنی شهرستانی، همراه با نوسان بین‌سالی پسته

نشان می‌دهد پسته با وجود بالاترین میانگین NBPD، از نظر ثبات درآمد در معرض ریسک عملکرد و قیمت قرار دارد. یافته‌هایی از این دست با مطالعات مدیریت الگوی کشت در مناطق کم‌آب ایران که بر لزوم تکیه بر ویژگی‌های محلی محصول و شهرستان تأکید دارند همسو است (Shariati et al., 2021 ;Mirzaei et al., 2025).

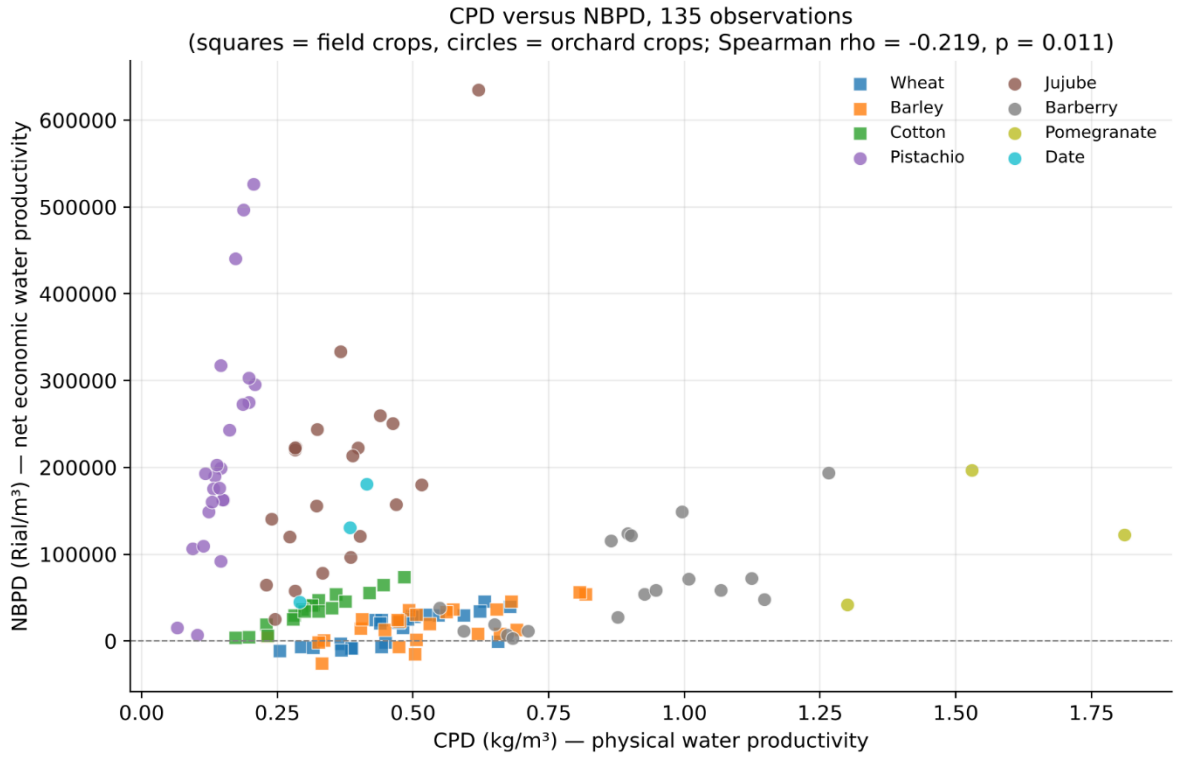
رابطه بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی خالص آب

جدول ۱۰ میانگین و رتبه‌بندی محصولات را بر مبنای CPD و NBPD در کل ۱۳۵ مشاهده مقایسه می‌کند. رتبه‌بندی دو شاخص کاملاً واگرا است. پسته با پایین‌ترین CPD (۰/۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب، رتبه هشتم) بالاترین NBPD (۲۱۹٬۷۲۷ ریال بر مترمکعب، رتبه اول) را دارد و یعنی هفت رتبه بهبود، در حالی که انار با بالاترین CPD (۱/۵۵) تنها رتبه سوم NBPD را دارد (دو رتبه افت). عناب با CPD معادل ۰/۳۶ (رتبه ششم) به رتبه دوم NBPD می‌رسد (چهار رتبه بهبود)، و زرشک با رتبه دوم CPD (۰/۸۸) در رتبه پنجم NBPD قرار می‌گیرد (سه رتبه افت). گندم و جو، که در CPD به‌ترتیب رتبه‌های چهارم (۰/۴۷) و سوم (۰/۵۲) را دارند، در NBPD به رتبه‌های هشتم (۱۳٬۴۹۳) و هفتم (۱۸٬۲۹۳) سقوط می‌کنند (هر کدام چهار رتبه افت). ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن میان میانگین CPD و NBPD در سطح محصول (۸ محصول) برابر Spearman rho = -0.333 ($p = 0.420$) بود و به دلیل تعداد کم محصولات معنی‌دار نیست. در سطح تک‌تک ۱۳۵ مشاهده، همبستگی اسپیرمن Spearman rho = -0/219 ($p = 0/011$) و همبستگی پیرسون Pearson r = -0/162 ($p = 0/061$)، نزدیک به مرز معنی‌داری) به دست آمد. شکل ۶ این رابطه را به تفکیک محصولات زراعی و باغی نشان می‌دهد. این ضرایب بیانگر هم‌تغییری ضعیف و معکوس میان بهره‌وری فیزیکی و بهره‌وری اقتصادی خالص آب در سطح مشاهدات هستند. این رابطه ماهیتی توصیفی دارد و به‌عنوان رابطه علّی تفسیر نمی‌شود، زیرا بخشی از آن می‌تواند ناشی از مخرج مشترک دو شاخص (نیاز ناخالص آبیاری) باشد. نتیجه حاضر با استدلال Wichelns (2014) و Molden et al. (2010) همسو است که نشان می‌دهند شاخص‌های صرفاً فیزیکی برای ارزیابی اقتصادی محصولات و تصمیم‌گیری درباره الگوی کشت کافی نیستند و باید با شاخص‌های ارزش‌محور تکمیل شوند.

جدول ۱۰. میانگین و رتبه بهره‌وری فیزیکی (CPD) و اقتصادی خالص (NBPD) به تفکیک محصول (۱۳۵ مشاهده)

Table 10. Mean values and rankings of physical water productivity (CPD) and net economic water productivity (NBPD) by crop (135 observations).

محصول Crop	میانگین CPD (kg/m³) Mean CPD (kg/m³)	رتبه CPD CPD Rank	میانگین NBPD (Rial/m³) Mean NBPD (Rial/m³)	رتبه NBPD	اختلاف رتبه Rank Difference
پسته Pistachio	0.15	8	219,727	1	+7
عناب Jujube	0.36	6	191,462	2	+4
انار Pomegranate	1.55	1	120,276	3	-2
خرما Date	0.36	5	119,212	4	+1
زرشک Barberry	0.88	2	65,869	5	-3
پنبه Cotton	0.32	7	36,477	6	+1
جو Barley	0.52	3	18,293	7	-4
گندم wheat	0.47	4	13,493	8	-4



شکل ۶. پراکنش CPD در برابر NBPD، ۱۳۵ مشاهده، به تفکیک محصولات زراعی و باغی

Figure 6. Scatter plot of CPD versus NBPD for 135 observations, differentiated by field and horticultural crops

آزمون‌های معنی‌داری آماری

نتیجه قابل‌توجه این تحلیل آن است که، در این مجموعه داده عامل شهرستان حتی در مدل چندعاملی نیز معنی‌دار نیست. در مقابل، سال زراعی در این مجموعه داده معنی‌دار شد (p=۰٫۰۰۳)، عاملی که در آزمون تک‌عاملی جداگانه (p=۰٫۱۱۸) غیرمعنی‌دار به نظر می‌رسید. عامل محصول نیز مسلط است.

آزمون تعقیبی دان با تصحیح هولم، از ۲۸ مقایسه زوجی ممکن میان ۸ محصول، ۸ مورد را معنی‌دار نشان داد. تمامی این موارد، مقایسه یکی از دو محصول پسته یا عناب با یکی از محصولات گندم، جو یا پنبه بود (برای نمونه: عناب در برابر گندم، p<۰.۰۰۱ و پسته در برابر گندم، p<۰.۰۰۱). تفاوت میان پسته و عناب با یکدیگر و نیز تفاوت میان گندم و جو، معنی‌دار نبود. زرشک، با وجود CPD بالا، از نظر NBPD با پسته و عناب تفاوت معنی‌دار داشت (p<۰.۰۵) و در میانه طیف قرار گرفت. محصولات با فراوانی محدود (انار، خرما) در هیچ مقایسه‌ای معنی‌دار نشدند که بیشتر بازتاب توان آماری پایین است. مقایسه گروهی محصولات زراعی (گندم، جو، پنبه؛ n=۶۶) در برابر محصولات باغی (پسته، عناب، زرشک، انار، خرما؛ n=۶۹) با آزمون من‌ویتنی یو تفاوت معنی‌داری نشان داد. میانگین NBPD محصولات باغی (۱۶۲٬۲۹۳ ریال بر مترمکعب) بیش از هفت برابر محصولات زراعی (۲۱٬۵۰۷ ریال بر مترمکعب) بود (U=۴۱۲۹، p<۰.۰۰۱)، ضریب همبستگی رتبه‌ای دوجمله‌ای r=۰/۸۱۳- اندازه اثر بزرگ).

جدول ۱۱. نتایج مدل چندعاملی تحلیل واریانس مبتنی بر رتبه (اصلی) و آزمون تک‌عاملی کروسکال–والیس (مکمل) برای NBPD (α=0.05)

Table 11. Results of the rank-based factorial analysis of variance (primary analysis) and the Kruskal–Wallis one-way test (supplementary analysis) for NBPD (α = 0.05).

عامل Factor	مدل چندعاملی F (df) Multifactorial Model F (df)	p-value	Partial η²	کروسکال–والیس H	p-value تک‌عاملی One-way p-value
محصول Crop	(118 ,7) 33.34	0.001>	0.664	83.99	0.001>
شهرستان City	(118 ,7) 1.36	0.231	0.074	3.66	0.818
سال زراعی Crop Year	(118 ,2) 5.97	0.003	0.092	4.28	0.118

آزمون تعقیبی دان با تصحیح هولم، از ۲۸ مقایسه زوجی ممکن میان ۸ محصول، ۸ مورد را معنی‌دار نشان داد. تمامی این موارد، مقایسه یکی از دو محصول پسته یا عناب با یکی از محصولات گندم، جو یا پنبه بود (برای نمونه: عناب در برابر گندم و پسته در برابر گندم، هر دو $p < 0/001$). تفاوت میان پسته و عناب با یکدیگر و نیز تفاوت میان گندم و جو معنی‌دار نبود. زرشک با وجود CPD بالا، از نظر NBPD در میانه طیف قرار گرفت و تفاوت آن با پسته و عناب معنی‌دار بود ($p < 0/05$). محصولات با فراوانی محدود (انار، خرما) در هیچ مقایسه‌ای معنی‌دار نشدند که بیشتر بازتاب توان آماری پایین است. مقایسه گروهی محصولات زراعی (گندم، جو، پنبه؛ $n = 66$) در برابر محصولات باغی (پسته، عناب، زرشک، انار، خرما؛ $n = 69$) با آزمون من‌ویتنی یو نیز تفاوت معنی‌داری نشان داد. میانگین NBPD محصولات باغی (۱۶۲٬۲۹۳ ریال بر مترمکعب) بیش از هفت برابر محصولات زراعی (۲۱٬۵۰۷ ریال بر مترمکعب) بود ($U = 4129$، $p < 0/001$، ضریب همبستگی رتبه‌ای دوجمله‌ای $r = -0/813$؛ اندازه اثر بزرگ). غلبه عامل محصول بر شهرستان نشان می‌دهد که تصمیم‌گیری درباره الگوی کشت در این منطقه باید بیش از آنکه بر تفاوت‌های مکانی بنا شود، بر انتخاب محصول و مدیریت آن تکیه کند. نتیجه‌ای که با اصل تمرکز بر افزایش بهره‌وری ارزش‌محور در مدیریت آب کشاورزی (Perry et al., 2009) همخوان است.

میانگین وزنی بر مبنای سطح زیرکشت و تحلیل حساسیت

از آنجا که میانگین ساده، همه مشاهدات را هم‌وزن می‌گیرد، جدول ۱۲ سطح زیرکشت هر محصول در سال زراعی پایانی را به همراه میانگین ساده و وزنی CPD و NBPD ارائه می‌کند. پسته با ۳۰٬۰۵۷ هکتار بزرگ‌ترین سطح زیرکشت را در میان همه محصولات مورد مطالعه دارد و حتی از جو (۲۰٬۷۴۶ هکتار) و گندم (۱۵٬۴۱۳ هکتار) نیز بیشتر است. یافته‌ای که اهمیت ملاحظات پایداری منابع آب زیرزمینی مرتبط با این محصول را دوچندان می‌کند. میانگین وزنی NBPD عناب (۴۰۲۷۰۸ ریال بر مترمکعب) به‌طور محسوسی بالاتر از میانگین ساده آن (۲۸۸٬۴۶۶) است، زیرا بیشترین سطح زیرکشت عناب در بیرجند، شهرستان با بالاترین NBPD این محصول، متمرکز شده است. برعکس، میانگین وزنی پسته (۲۳۷٬۳۹۴) کمتر از میانگین ساده آن (۲۷۳٬۵۶۸) است. تحلیل حساسیت رتبه‌بندی محصولات نسبت به تغییرات ±۱۰ درصدی قیمت، هزینه و نیاز آبی نشان داد رتبه‌بندی ۸ محصول بر مبنای میانگین NBPD کاملاً پایدار است. در تمامی شش سناریوی آزمون‌شده، ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن میان رتبه پایه و رتبه پس از تغییر برابر ۱ بود. بنابراین ترتیب کلی محصولات نسبت به عدم‌قطعیت متعارف در داده‌های ورودی استوار است.

نسخه پیش از انتشار

جدول ۱۲. سطح زیرکشت (سال ۱۴۰۲-۱۴۰۱) و مقایسه میانگین ساده با میانگین وزنی CPD و NBPD به تفکیک محصول

Table 12. Cultivated area in the 2022–2023 crop year and comparison of unweighted and area-weighted mean CPD and NBPD by crop.

محصول Crop	سطح زیرکشت (هکتار) Cultivated Area (ha)	CPD ساده	CPD وزنی	NBPD ساده (Rial/m³)	NBPD وزنی (Rial/m³)
پسته Pistachio	30,057	0.14	0.14	273,568	237,394
جو Barley	20,746	0.54	0.51	484	1,967
گندم Wheat	15,413	0.48	0.47	19,108	13,492
زرشک Barberry	15,167	0.91	1.15	123,761	173,696
پنبه Cotton	6,328	0.30	0.36	28,476	40,171
عناب Jujube	4,265	0.34	0.43	288,466	402,708
انار Pomegranate	1,891	1.30	1.30	41,948	41,948
خرما Date	844	0.29	0.29	45,311	45,311

مشاهدات با بهره‌وری اقتصادی خالص منفی

از میان ۱۳۵ مشاهده، در ۱۴ مورد (۱۰/۴ درصد) NBPD منفی بود. تمامی این موارد منحصراً به گندم (۱۰مورد) و جو (۴ مورد) تعلق داشت و هیچ محصول باغی در هیچ شهرستان یا سالی NBPD منفی ثبت نکرد. جدول ۱۳ ده مورد برتر (از نظر شدت زیان) از این ۱۴ مشاهده را به همراه نسبت هزینه به درآمد نشان می‌دهد. شدیدترین زیان‌ها متعلق به جو نهبندان (NBPD=-25,546 ریال بر مترمکعب با نسبت هزینه به درآمد ۱/۵۹) و جو قائن (منفی ۱۵٬۳۸۱ با نسبت ۱/۲۴) در سال ۱۴۰۲-۱۴۰۱ و گندم قائن، خوسف و فردوس در سال ۱۴۰۰-۱۳۹۹ (به‌ترتیب ۱۲٬۵۱۴-، ۱۱٬۵۱۸-، ۱۰٬۸۴۹-) است. در تمامی ۱۴ مورد، نسبت هزینه به درآمد بزرگ‌تر از یک بود. میانگین این نسبت برای گندم در کل مجموعه داده (شامل سال‌های سودده) برابر ۰/۹۲۹ و برای جو ۰/۷۴۳ است. به این ترتیب ساختار هزینه-درآمد گندم و جو، حتی در سال‌های عادی، به‌طور ذاتی به مرز سودآوری نزدیک است و هرگونه افزایش نسبی هزینه تولید یا کاهش عملکرد و قیمت نسبت به هزینه، این دو محصول را به‌سادگی به زیان می‌رساند.

نسخه پیش از انتشار

جدول ۱۳. ده مورد برتر از ۱۴ مشاهده با NBPD منفی، به همراه نسبت هزینه به درآمد

Table 13. Top 10 cases among the 14 observations with negative NBPD, along with their cost-to-revenue ratios.

شهرستان City	محصول Crop	سال زراعی Crop Year	نسبت هزینه/درآمد Cost-to-Revenue Ratio	میانگین محصول Crop Mean	NBPD
نهبندان Nehbandan	جو	1401-1402	1.59	0.74	-25,546
قائن Qaen	جو	1401-1402	1.24	0.74	-15,381
قائن Qaen	گندم	1399-1400	1.68	0.93	-12,514
خوسف Khosf	گندم	1399-1400	1.91	0.93	-11,518
فردوس Ferdos	گندم	1399-1400	1.59	0.93	-10,849
بیرجند Birjand	گندم	1399-1400	1.43	0.93	-8,346
نهبندان Nehbandan	گندم	1399-1400	1.43	0.93	-8,320
نهبندان Nehbandan	گندم	1401-1402	1.13	0.93	-7,107
بیرجند Birjand	جو	1401-1402	1.11	0.74	-7,033
طبس Tabas	گندم	1399-1400	1.24	0.93	-6,590

پیامدهای مدیریتی، محدودیت‌ها و پژوهش‌های آتی

مجموع یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که آسیب‌پذیری اقتصادی گندم و جو در شرایط مورد مطالعه ساختاری است و یک رویداد تصادفی یک‌ساله نیست، زیرا تمام ۱۴ مشاهده منفی به این دو محصول مربوط است و همچنین آزمون‌های زوجی دان آن‌ها را به‌طور معنی‌دار از پسته و عناب متمایز می‌کند. این نتیجه با یافته‌های مطالعات بهینه‌سازی الگوی کشت در مناطق خشک ایران همسو است (Shariati et al., 2021) و با شواهد منطقه‌ای درباره آسیب‌پذیری اقتصادی کشاورزی استان در برابر شرایط کم‌آبی و خشکسالی نیز هم‌خوانی دارد (Nakhaee Nezhad Fard et al., 2024). با این حال، از نظر امنیت غذایی ملی، کنار گذاشتن کامل کشت گندم و جو پیشنهاد این پژوهش نیست. بلکه، راهکارهایی مانند بهبود مدیریت آبیاری و کم‌آبیاری تنظیم‌شده (Soriano, 2007 & Fereres) و بازنگری در سیاست قیمت‌گذاری تضمینی می‌تواند بهره‌وری اقتصادی این محصولات راهبردی را بدون کاهش سطح زیرکشت بهبود بخشد.

از سوی دیگر، سودآوری بالای پسته در بیرجند، خوسف، قائن و سرایان (NBPD سال پایانی بین ۳۱۷٫۷۷۹ تا ۵۲۶٫۰۹۳ ریال بر مترمکعب)، همراه با بیش از ۳۰ هزار هکتار سطح زیرکشت آبی آن (جدول ۱۲)، اهمیت ویژه‌ای دارد. شواهد ملی نشان می‌دهد تولید محصولات صادرات‌محوری مانند پسته در برخی مناطق نیمه‌خشک ایران سهم قابل‌توجهی از مصرف آب را به خود اختصاص داده و در کنار تداوم برداشت‌های غیرمجاز، می‌تواند پایداری منابع آب زیرزمینی را با چالش مواجه کند (Ashraf et al., 2021 ;Hoekstra, 2017 & Karandish). بااین‌حال، از آنجا که شاخص‌های این پژوهش بر اساس نیاز آبیاری مدل‌شده، نه برداشت واقعی یا افت سطح آبخوان محاسبه شده‌اند، نمی‌توان مستقیماً درباره پایداری کمی آبخوان‌ها قضاوت کرد و این امر به داده‌های مستقل هیدروژئولوژیک نیاز دارد. توجه به این نکته نیز ضروری است که صرفه‌جویی در سطح مزرعه لزوماً به صرفه‌جویی واقعی در سطح حوضه تبدیل نمی‌شود (Perry et al., 2009). بنابراین، توصیه پژوهش توسعه بی‌ضابطه پسته نیست، بلکه استفاده هدفمند از ظرفیت اقتصادی آن در باغات موجود، هم‌زمان با محدودسازی مجوز حفر چاه جدید، نصب کنتورهای هوشمند و توسعه سامانه‌های آبیاری تحت فشار است.

نسخه پیش از انتشار

این پژوهش با محدودیت‌های مهمی روبه‌رو است. آب مبنای محاسبات، نیاز آبیاری است و لزوماً مصرف واقعی آب توسط محصول را نشان نمی‌دهد. همچنین، مقادیر ریالی مورد استفاده اسمی و تعدیل‌نشده بر اساس تورم هستند. مدل چندعاملی فاقد جمله‌های برهم‌کنشی است و در مورد محصولاتی با فراوانی مشاهده پایین، مانند انار و خرما، توان آماری محدودتری دارد. بااین‌حال، تحلیل حساسیت نشان داد که رتبه‌بندی کلی محصولات بر مبنای NBPD نسبت به تغییرات ۱۰ درصدی در قیمت، هزینه و نیاز آبی پایدار باقی می‌ماند. در پژوهش‌های آتی، می‌توان با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور و چارچوب‌های حسابداری آب (Karimi et al., 2013)، اطلاعات مربوط به مصرف واقعی آب و بهره‌وری آب را با شاخص‌های اقتصادی تلفیق کرد. همچنین، تعدیل مقادیر ریالی بر مبنای قیمت‌های ثابت و لحاظ تغییرات زمانی ارزش اقتصادی محصولات می‌تواند تصویر کامل‌تری از بهره‌وری اقتصادی آب کشاورزی در استان ارائه دهد.

نتیجه‌گیری

در مجموع، بهره‌وری آب محصولات زراعی و باغی استان خراسان جنوبی، صرف‌نظر از تفاوت فیزیکی تولید به ازای واحد آب، از نظر بازده اقتصادی نیز تفاوت معناداری میان محصولات نشان داد، نوع محصول و سال زراعی تعیین‌کننده اصلی این تفاوت‌ها بودند، درحالی‌که اثر شهرستان، پس از کنترل این عوامل، معنادار نبود. همبستگی ضعیف و معکوس میان بهره‌وری فیزیکی و بهره‌وری اقتصادی خالص آب نشان داد تولید بیشتر به ازای واحد آب لزوماً به سودآوری بالاتر نمی‌انجامد. گندم و جو، با وجود جایگاه راهبردی در امنیت غذایی، در شرایط مورد مطالعه از نظر اقتصادی آسیب‌پذیرترین محصولات بودند، درحالی‌که پسته و عناب بالاترین بهره‌وری اقتصادی خالص را داشتند. به‌عنوان توصیه کاربردی، پیشنهاد این پژوهش کنار گذاشتن کاشت گندم و جو نیست، بلکه بهبود هدفمند مدیریت آبیاری و بازنگری سیاست قیمت‌گذاری تضمینی برای این دو محصول راهبردی، همراه با کنترل مجوز چاه‌های جدید و پایش منابع آب زیرزمینی در مناطق با سطح زیرکشت رو به گسترش پسته و عناب است. ازآنجاکه ارقام ریالی این پژوهش اسمی و شاخص‌های آن بر مبنای نیاز آبیاری مدل‌شده‌اند، تعمیم مستقیم نتایج به وضعیت واقعی آبخوان‌ها نیازمند داده‌های مستقل هیدروژئولوژیک و قیمت‌های تعدیل‌شده با تورم در پژوهش‌های آینده است.

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت مالی شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان جنوبی تحت قرارداد شماره ۱۰/۱۴۰۰/۴۴۳۸۲/۱ باکد ۲۱۶۶۱۸-۱۳۸۱۹ به انجام رسیده است که در اینجا لازم است از شرکت آب منطقه ای خراسان جنوبی تشکر و قدردانی شود.

منابع

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Ashraf, S., Nazemi, A., & AghaKouchak, A. (2021). Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. Scientific Reports, 11, 9135. https://doi.org/10.1038/s41598-021-88522-y

Azizi-Zohan, A., Kamgar-Haghighi, A. A., & Sepaskhah, A. R. (2008). Crop and pan coefficients for saffron in a semi-arid region of Iran. Journal of Arid Environments, 72(3), 270–278. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.06.001

Conover, W. J., & Iman, R. L. (1981). Rank transformations as a bridge between parametric and nonparametric statistics. The American Statistician, 35(3), 124–129. https://doi.org/10.1080/00031305.1981.10479327

Dunn, O. J. (1964). Multiple comparisons using rank sums. Technometrics, 6(3), 241–252. https://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490181

Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. Journal of Experimental Botany, 58(2), 147–159. https://doi.org/10.1093/jxb/erl165

Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J. (2011). Solutions for a cultivated planet. Nature, 478, 337–342. https://doi.org/10.1038/nature10452

Ghouchanian Haghverdi, E., Yaghoobzadeh, M., Moghri Friz, A., Javadi, H., & Khorashadizadeh, O. (2024). Investigation of vapor pressure deficit on saffron yield and yield prediction using artificial intelligence algorithms. Journal of Saffron Research, 12(2), 227–240. https://doi.org/10.22077/jsr.2025.8540.1255

Hoekstra, A. Y., & Hung, P. Q. (2002). Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade (Value of Water Research Report Series No. 11). IHE Delft.
Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Earthscan.
Holm, S. (1979). A simple sequentially rejective multiple test procedure. Scandinavian Journal of Statistics, 6(2), 65–70.
Karandish, F., & Hoekstra, A. Y. (2017). Informing national food and water security policy through water footprint assessment: The case study of Iran. Water, 9(11), 831. https://doi.org/10.3390/w9110831
Karimi, P., Bastiaanssen, W. G. M., & Molden, D. (2013). Water accounting plus (WA+) – a water accounting procedure for complex river basins based on satellite measurements. Hydrology and Earth System Sciences, 17(7), 2459–2472 . https://doi.org/10.5194/hess-17-2013-2459
Kijne, J. W., Barker, R., & Molden, D. (Eds.). (2004). Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement. CABI Publishing, in association with the International Water Management Institute. https://doi.org/10.1079/9780851996691.0000
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. https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011
Mirzaei, A., Soltani, A., Abbasi, F., Zeinali, E., & Mirkarimi, S. (2025). Optimization of the irrigated cropping pattern in Fars Province to adapt to water scarcity. Journal of Water and Soil Science, 29(1), 131–152. https://doi.org/10.47176/jwss.29.1.65821
Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Bindraban, P., Hanjra, M. A., & Kijne, J. (2010). Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. Agricultural Water Management, 97(4), 528–535. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.023
Nakhaee Nezhad Fard, S., Karimi, K., & Khosravi, H. (2024). Assessment of climatic drought and its economic effects (case study: South Khorasan Province). Journal of Rangeland Science.4(1). https://doi.org/20.1001.1.20089996.2014.4.1.7.0
Perry, C., Steduto, P., Allen, R. G., & Burt, C. M. (2009). Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. Agricultural Water Management, 96(11), 1517–1524. 10.1016/j.agwat.2009.05.005
Riahi, R., Mirdamadi, S. M., Hoseini, S. J. F., & Najafabadi, M. O. (2024). How to develop saffron business clusters in Iran. Brazilian Journal of Biology, 84, e279525 https://doi.org/10.1590/1519-6984.279525
Rijsberman, F. R. (2006). Water scarcity: Fact or fiction? Agricultural Water Management, 80(1–3), 5–22.
Rockstrom, J., Falkenmark, M., Karlberg, L., Hoff, H., Rost, S., & Gerten, D. (2009). Future water availability for global food production: The potential of green water for increasing resilience to global change. Water Resources Research, 45, W00A12. https://doi.org/10.1029/2007WR006767
Scheirer, C. J., Ray, W. S., & Hare, N. (1976). The analysis of ranked data derived from completely randomized factorial designs. Biometrics, 32(2), 429–434.
Sepaskhah, A. R., & Kamgar-Haghighi, A. A. (2009). Saffron irrigation regime. International Journal of Plant Production, 3(1), 1–16. https://doi.org/10.22069/ijpp.2012.627
Shariati, H., Motamed Vaziri, B., Goudarzi, M., & Ahmadi, H. (2021). Optimization of cropping pattern using linear programming and LINGO software in Dehgolan Plain, Kurdistan Province, Iran. Geography and Environmental Sustainability, 11(3), 81–96. https://doi.org/10.22126/ges.2021.6601.2409
Soltani, A., Jafarnode, S., Zeinali, E., Gherekhloo, J., & Torabi, B. (2024). Assessing aerobic rice systems for saving irrigation water and paddy yield at regional scale. Paddy and Water Environment, 22(2), 271–284. https://doi.org/10.1007/s10333-023-00966-2
South Khorasan Province Management and Planning Organization. (2023). Statistical Yearbook of South Khorasan Province 1402.
Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Crop yield response to water (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
Viets, F. G. (1962). Fertilizers and the efficient use of water. Advances in Agronomy, 14, 223–264. https://doi.org/10.1016/S65-2113(08)60439-3
Wichelns, D. (2014). Do estimates of water productivity enhance understanding of farm-level water management? Water, 6(4), 778–795. https://doi.org/10.3390/w6040778