Original Article

Journal of Drought and Climate change Research (JDCR)

Fall 2024, Vol.2, No.3, pp 49-66

10.22077/jdcr.2024.7942.1072

Utilization of the Climate Indices and the Multi-Criteria Decision-Making Approach in Crop Yield Forecasting in line with Policy Making in Agriculture

Laleh Parviz[1*], Bita Kazemi[2], Mir Ahmad Hatef [3]

1- Associate Professor, Faculty of Agriculture, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

2- BSc. Student, Faculty of Agriculture, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

3- MSc. Remote Sensing and GIS, Expert of Department of Natural Resources and Watershed Management, Tabriz, Iran.

***Corresponding Author: lparviz@azaruniv.ac.ir**

Keywords:

Aridity, Ivanov, TOPSIS, Yield.

Received:
22 July 2024

Revised:
17 August 2024

Accepted:
17 August 2024

Abstract Extended

Introduction

Crop yield forecasting requires low-cost, high-precision technology to facilitate agricultural management. Sustainable agriculture is of great importance, as it strives to optimize crop yields. Meanwhile, increasing crop yield by reducing environmental impacts is an important and challenging task for sustainable food supply in this century. Wheat is one of the most important food products in the world and Iran. Due to its economic and nutritional value, decision-makers must monitor wheat crop growth and yield parameters during the season. Therefore, this research aims to estimate crop yield using some climatic indicators. Climate indices are different mathematical combinations of meteorological data. Each climate index has a specific trend in the simulation of the surrounding environment, so it is necessary to identify the effective index in each region. In most of the previous research, the correlation between the indices and the yield of the product was used. However, this research proposed a robust and comprehensive multi-criteria decision-making approach, which brings an innovative perspective to the crop yield issue.

Materials and Methods

The data and information of this research were related to two provinces in the northwest of the country (East and West Azerbaijan provinces). According to the De Martonne index, the provinces are located in a semi-arid climate. Climate indicators are quantities that can be used to determine droughts and weather variability. Climate indicators play a key role in weather monitoring and forecasting. In this regard, wheat yield was modeled with climate indices (De Martonne index, Koppen 1, Koppen 2, Koppen 3, Angström, Selyaninov, Ivanov, Aridity, effective precipitation index, and vegetation index). In this type of modeling, the combination of indices was used in the form of two, three, and four indices. MCDM is a general term used to describe a set of methods for structuring and evaluating options based on multiple criteria

How to cite this article:
Parviz, L., Kazemi, B., & Hatef, M.A. (2024). Utilization of the Climate Indices and the Multi-Criteria Decision-Making Approach in Crop Yield Forecasting In line with Policy Making in Agriculture. Journal of Drought and Climate change Research, 2(3), 49-66. 10.22077/jdcr.2024.7942.1072

Copyright: © 2022 by the authors. Licensee Journal of *Drought and Climate change Research* (JDCR). This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

and objectives. These methods provide targeted decisions because they can manage the inherent complexity and uncertainty of the issues, as well as the knowledge resulting from the participation of several factors. MCDM can make the quality of decisions clearer, more efficient, and more logical, which leads to justifiable and explainable choices. In addition, MCDM promotes the role of participants in the decision-making process, facilitates compromise and group decisions, and provides a suitable platform for stakeholders to share their personal preferences. To decide on the appropriate climate index selection in each climate of the modeling process, multi-criteria decision-making (TOPSIS) was used based on five evaluation criteria, and Shannon's entropy was used to determine the weight of the criteria.

Results and Discussion

The period used in this research was 22 years, and the period from 2018 to 2021 was considered the verification period. The Hurst coefficient was used to check the length of the statistical period, and the average Hurst coefficient for all indicators is 0.65, which is greater than 0.5, so the length of the statistical period of the series is acceptable. The values of the indices in West Azarbaijan province have increased compared to East Azarbaijan; for example, in the Ivanov index, the rate of increase from East Azarbaijan station to West Azarbaijan is 1.38, in the VCI index, it is equal to 51.01 and in the aridity index, it is 62.01. Using a combination of indices is highly accurate under the condition of using an index with better performance in single-index mode; for example, the rate of SIM increase from single-index to four-index mode in East Azerbaijan province is 20.94. The trend of changes in statistics is not the same in all cases, so to make a comprehensive conclusion about determining the optimal index based on the performance of all statistics, the TOPSIS method was used. In West Azarbaijan province, in the case of a single index, first, the Ivanov index and then the aridity index, and in East Azarbaijan province aridity index, VCI, and Silyaninov have a high rank. In the case of two indicators, the combination of aridity index and VCI in East Azerbaijan Province and the combination of Angströmand Ivanov in West Azerbaijan Province have a better rating. In the case of three indicators, in West Azerbaijan province, Ivanov-Silyaninov and PEI indices have better performance, and in East Azerbaijan province, aridity-VCI and PEI indices have better performance. In the case of four indicators, in East Azerbaijan province, the combination of Long-De Martonne-aridity and VCI indices, and in West Azerbaijan province, Koppen 2-3-Angströmand Ivanov has better performance.

Conclusion

Determining the effective climate index in each region for crop yield forecasting is a powerful tool for decision-making in crop management and improvement. The results showed that using a combination of indicators is more accurate than using a single indicator. The reason for this problem can be stated that in the combined mode, corrections are made in terms of the used data and terms of the mathematical structure. The effect of the type of indicator in each climate on the crop yield is different. East and West Azarbaijan Provinces are very similar in terms of climate, but indices along with the Ivanov index in West Azarbaijan Province and the aridity index in East Azarbaijan Province have a high impact on wheat yield. This problem shows that each region has its index in the simulation of climatic processes governing the crop yield. The use of other multi-criteria decision-making approaches or their integrated mode can be one of the suggestions of this research. By using a suitable and accurate index, the forecasting of the crop yield becomes closer to the actual values.

مقاله پژوهشی

مجلـه
پژوهش‌های خشکسالی و تغییر اقلیم

دوره دوم، شماره سوم، پیاپی ۷، پاییز ۱۴۰۳، صفحات ۶۶ - ۴۹

10.22077/jdcr.2024.7942.1072

بهره‌گیری از شاخص‌های اقلیمی و رویکرد تصمیم‌گیری چند معیاره در پیش‌بینی عملکرد محصول در راستای سیاست‌گذاری کشاورزی

لاله پرویز[۱*]، بیتا کاظمی [۲]، میر احمد هاتف [۳]

۱- دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.
۲- دانشجوی کارشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.
۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سنجش از دور و SIG، کارشناس اداره آبخیزداری آذربایجان شرقی. ، تبریز، ایران.

*نویسنده مسئول: lparviz@azaruniv.ac.ir

واژه‌های کلیدی:
عملکرد، TOPSIS، ایوانف، خشکی.

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۰۵/۰۱

تاریخ ویرایش:
۱۴۰۳/۰۵/۲۷

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۵/۲۷

چکیده

در پیش‌بینی عملکرد محصول فناوری با هزینه کم و دقت بالا برای تسهیل در مدیریت کشاورزی مورد نیاز است. در این راستا عملکرد گندم در استان‌های آذربایجان شرقی و غربی با شاخص‌های اقلیمی (شاخص لانگ، دومارتن، کوپن ۱، کوپن ۲، کوپن ۳، آنگستروم، سیلیان‌ین‌وف، ایوانف، خشکی، شاخص باران مؤثر و شاخص پوشش گیاهی) مدلسازی شدند. در این نوع مدلسازی از ترکیب شاخص‌ها به صورت دو، سه و چهار شاخصه استفاده شد. در راستای تصمیم‌گیری در انتخاب شاخص اقلیمی مناسب در هر اقلیم در روند مدلسازی، براساس ۵ آماره ارزیابی از تصمیم‌گیری چندمعیاره (TOPSIS) استفاده شد که روش آنتروپی شانون در تعیین میزان وزن شاخص‌ها به‌کار گرفته شد. میزان متوسط افزایش آماره تشابه (SIM) برای تمامی شاخص‌ها از استان آذربایجان شرقی به غربی برابر با ۱۳/۲ درصد است که نشان دهنده عملکرد بهتر شاخص‌های اقلیمی در استان آذربایجان غربی نسبت به شرقی است. استفاده از ترکیب شاخص‌ها به شرط استفاده از شاخصی با عملکرد بهتر در حالت تک شاخصه دقت بالایی دارد، به عنوان مثال میزان افزایش SIM از حالت تک شاخصه به چهار شاخصه در استان آذربایجان شرقی ۲۰/۹۴ است. نتایج حاصل از تصمیم‌گیری چندمعیاره نشان داد که شاخص‌هایی با شاخص ایوانف در استان آذربایجان غربی و شاخص خشکی در استان آذربایجان شرقی تأثیر بالایی بر عملکرد گندم دارند. تعیین شاخص اقلیمی مؤثر در هر منطقه در پیش‌بینی عملکرد محصول به‌عنوان ابزار قوی برای تصمیم‌گیری در مدیریت و اصلاح محصول می‌باشد.

مقدمه

در حال حاضر کشاورزی پایدار از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا در تلاش است تا بازده محصول را بهینه کند و در عین حال اثرات زیست محیطی را کاهش دهد (Biswas et al., 2024). در این میان افزایش عملکرد محصول با کاهش اثرات زیست‌محیطی یک وظیفه مهم و چالش‌برانگیز برای تأمین پایدار مواد غذایی در قرن بیست و یکم است (Tanabe et al., 2023). برآورد دقیق و سریع محصول به عنوان مؤلفه حیاتی کشاورزی دقیق و شکل دهنده به امنیت غذایی و تنظیم قیمت و در نتیجه افزایش پایداری اقتصاد کشاورزی عمل می‌کند (Khodjaev et al., 2024). پیش‌بینی عملکرد محصول قبل از برداشت یکی از ابزارهای برنامه‌ریزی عرضه مواد غذایی در آینده است. پیش‌بینی عملکرد محصول برای برنامه‌ریزی پیشرفته، تدوین و اجرای سیاست‌های مربوط به تهیه، توزیع و تصمیم‌گیری واردات و صادرات مهم است. از آنجایی که عملکرد محصول نقطه اوج بسیاری از فرآیندهای موقتی گیاه است و تحت تأثیر عوامل خارجی مختلف مرتبط با خاک، آب و هوا و فناوری قرار می‌گیرد، پارامترسازی این عوامل و بررسی رابطه آنها با عملکرد برای مدلسازی عملکرد ضروری است (Bazgeer et al., 2007). مدلسازی عملکرد محصول از جهات گوناگون از جمله پیش‌بینی رشد محصول، ارزیابی اثرات زیست محیطی بر محصول، تحلیل تأثیر گزینه‌های مختلف مدیریت محصول و راهنمایی اصلاح محصول می‌تواند مفید باشد. این مدل‌ها امکان تلفیق با مدل‌های پیش‌بینی آب و هوایی را دارند که می‌تواند کمک مؤثری در پایش وضعیت محصولات باشد (Hao et al., 2021). با توجه به اهمیت پیش‌بینی و برآورد عملکرد محصول، رویکردهای زیادی در این زمینه استفاده شده است که در این تحقیق رویکردهای استفاده شده در چهار دسته قرار گرفتند. یکی از رویکردهای مدلسازی تعیین رابطه بین داده‌های هواشناسی با عملکرد محصول است. ارتباط معنی‌داری بین عملکرد گندم و دمای کمینه، بیشینه، مجموع ساعات آفتابی، اختلاف دما و تبخیر در همدان مشاهده شد. نتایج نشان دادند که مدل‌های رگرسیونی مبتنی بر پارامترهای هواشناسی ۶۹ درصد از تغییرات عملکرد را تفسیر می‌کنند (Bazgeer et al., 2007)، که این مساله می‌تواند پدیده تغییر اقلیم در دهه‌های اخیر را توجیه کند (Delghandi et al.,2023). علاوه بر خود داده‌های هواشناسی، شاخص‌های اقلیمی با ترکیب داده‌های هواشناسی نقش مهمی در پیش‌بینی عملکرد محصول دارند. با استفاده از شاخص‌های هواشناسی کشاورزی در شهرهای سنندج، قروه، بیجار، کرمانشاه و کنگاور عملکرد گندم دیم پیش‌بینی شد. شاخص‌های منتخب بر اساس مقدار ضریب هم‌بستگی معنی‌دار بین شاخص‌ها و عملکرد محصول بود. شاخص‌های منتخب شامل دمای کمینه روزانه، اختلاف تجمعی دماهای بیشینه و کمینه روزانه، مقدار تجمعی واحدهای حرارتی-نوری، ساعات آفتابی، درجه روزهای تجمعی رشد، میزان بارندگی و مقدار تجمعی واحدهای حرارتی-آفتابی بودند. در سنندج و قروه ۶۸ درصد، کرمانشاه ۹۱ درصد، کنگاور ۸۱ درصد از تغییرات عملکرد گندم دیم ناشی از تغییرات داده‌های هواشناسی و شاخص‌های منتخب بودند (Bazgeer and Kamali, 2008). با استفاده از سه رویکرد عملکرد محصولات گندم، جو، سیب‌زمینی و ذرت دانه‌ای پیش‌بینی شدند. در رویکرد اول تخمین عملکرد محصول با رویکرد اقلیمی براساس داده‌های معنی‌دار اقلیمی با تحلیل رگرسیون انجام گرفت. در رویکرد دیگر بر اساس رویکرد استوکستیکی بود. در رویکرد نهایی داده‌های هواشناسی براساس رویکرد استوکستیکی برآورد شدند و سپس با تحلیل رگرسیون، عملکرد محصولات تخمین زده شدند. روش ترکیبی زمانی که پارامترهای دخیل در آن با دقت بالایی برآورد شوند، از کارایی بالایی برخوردار است (Parviz and Paymai, 2019). جذر میانگین مربعات خطا با شاخص‌های اقلیمی نسبت به استفاده از خود داده‌های هواشناسی ۳۶/۶۶ درصد کاهش داشت. با یازده شاخص‌های اقلیمی و خوشه‌بندی سلسله مراتبی مدلسازی عملکرد گندم در استان‌های گیلان، اصفهان، کرمانشاه، آذربایجان غربی انجام گرفت. رگرسیون ساده و شبکه عصبی مصنوعی به عنوان ابزارهای مدلسازی در نظر گرفته شدند. شاخص اقلیمی با ساختار مناسب

می‌توانـد دقـت مدلسـازی را بـالا ببـرد. ورود داده‌هـا بـا رویکـرد خوشـه‌بندی منجـر بـه بهبـود عملکـرد مدلسـازی شـد (Parviz and Bonyadi, 2019). بـا اسـتفاده از داده‌های هواشناسـی و دو روش مدلسـازی شـبکه عصبـی مصنوعـی و سیسـتم اسـتنتاج فـازی عصبـی تطبیقـی (ANFIS)، عملکـرد جـو تخمیـن زده شـد. بارندگـی و عملکـرد سـال گذشـته نقـش مهمـی در افزایـش دقـت روش‌هـا داشـتند. ورودی عملکـرد سـال گذشـته و تبخیـر و تعـرق توانسـت عملکـرد ANFIS را افزایـش دهـد. بیشـترین مقـدار عملکـرد در ANFIS شـامل داده‌هـای رطوبـت نسـبی، دمـای نقطـه شـبنم و دمـای بیشـینه بـود. داده تشعشـع در ورودی‌هـا دقـت تخمیـن عملکـرد جـو را کاهـش داد (Madani et al., 2021). عملکـرد گنـدم بـا اسـتفاده از داده‌هـای هواشناسـی در همـدان تخمیـن زده شـد کـه معیارهـای ارزیابـی نشـان دادنـد کـه بهتریـن زیرمجموعـه شـاخص‌های هواشناسـی کشـاورزی شـامل دمـای کمینـه روزانـه، اختـلاف تجمعـی دمـای کمینـه و بیشـینه، درجـه-روز-رشـد، کمبـود فشـار بخـار آب، سـاعات آفتابـی و تبخیـر و تعـرق پتانسـیل بـود. نتایـج نشـان داد کـه در مدل‌هـای آمـاری نهایـی، ۸۳ درصـد از تغییـرات عملکـرد گنـدم مربـوط بـه تغییـرات شـاخص‌های هواشناسـی کشـاورزی بـود (Bazgerr et al., 2007). بـا اسـتفاده از ۵۰ شـاخص کشـاورزی اقلیمـی حساسـیت آب و هوایـی مناطق مختلـف تولیـد ذرت در آمریـکا مـورد بررسـی کـرد. دمـا و شـاخص اسـتاندارد شـده بـارش و تبخیـر و تعـرق در مـاه جـولای دارای عملکـرد خوبـی بودنـد. نشـان داده شـد کـه برخـی از شـاخص‌های کشـاورزی-اقلیمی می‌تواننـد بـه طـور قابـل توجهـی مدل‌سـازی عملکـرد محصـول را در مقایسـه بـا اطلاعـات سـاده‌تر آب و هـوای مسـتقیم بهبـود بخشـند (Mathieu and Aires 2018). مدل‌هـای بیـان شـده بـر اسـاس داده‌هـای کمـی بودنـد، ولـی در تحقیقـی سـه مـدل براسـاس متغیرهـای کمـی و کیفـی در تخمیـن عملکـرد گنـدم زمسـتانه اسـتفاده شـد. در اولیـن محـدوده پیش‌بینـی، میانگیـن دمـای هـوا از ۱ سـپتامبر تـا ۳۱ دسـامبر سـال قبـل و در دامنـه پیش‌بینـی دوم مجمـوع بارندگـی از ۱ می‌تـا ۳۱ مـی‌و سـومین میانگیـن دمـای هـوا از ۱ ژانویـه تـا ۱۵ آوریـل و در عوامـل کیفـی نـوع کشـت پیـش از آن در سـال قبـل دارای اهمیـت بـود (Niedbala et al., 2019). در تحقیقـی در مـورد عملکـرد گنـدم در هنـد از روش‌هـای رگرسـیون خطـی چندگانـه گام بـه گام، شـبکه عصبـی مصنوعـی، تجزیـه و تحلیـل مولفه‌هـای اصلـی در ترکیـب بـا رگرسـیون خطـی، شـبکه عصبـی مصنوعـی در ترکیـب بـا تحلیـل مولفه‌هـای اصلـی، رگرسـیون لاسـو و رگرسـیون لجسـتیک اسـتفاده شـد. متغیرهـای آب و هـوا ماننـد بیشـینه دمـا، کمینـه دمـا، رطوبـت نسـبی، بارندگـی، سـاعات آفتابـی و تبخیـر تأثیـر زیـادی بـر عملکـرد محصـول دارنـد. نتایـج نشـان داد کـه درصـد انحـراف عملکـرد تخمینـی بـر اسـاس عملکـرد مشـاهده شـده بـه ترتیـب بیـن ۰/۱ تـا ۲۵/۶، ۰/۹ تـا ۲۲/۸، ۰/۷ تـا ۲۲/۵ درصـد در مرحلـه پنجه‌زنـی، گل‌دهـی و پـر شـدن دانـه بـود. بـر اسـاس درصـد انحـراف و دقـت مـدل لجسـتیک و لاسـو دارای عملکـرد بهتـری بودنـد و پیشـنهاد روش ایـن بـود کـه می‌تـوان از ایـن مدل‌هـا بـرای تخمیـن عملکـرد محصـول گنـدم در سـطح منطقـه در مراحـل مختلـف رشـد اسـتفاده کـرد (Aravind et al., 2023). در رویکـرد دوم از داده‌هـای سـطح زیـر کشـت و تولیـد سـالانه در پیش‌بینـی عملکـرد گنـدم اسـتفاده شـد. در ایـن راسـتا بـا داده‌هـای ۴۰ سـاله و مدل‌هـای الگوریتـم بهتریـن همسـایگی، ماشـین بـردار پشـتیبان، برنامه‌ریـزی بیـان ژن و شـبکه بیزیـن عملکـرد گنـدم شبیه‌سـازی شـدند. روش بهتریـن همسـایگی و شـبکه بیزیـن به‌ترتیـب دارای بیشـترین و کمتریـن دقـت بودنـد (ghojghar Ansari 2023). رویکـرد سـوم مربـوط بـه اسـتفاده از اطلاعـات سـنجش از دور در پیش‌بینـی عملکـرد محصـول اسـت کـه مدلسـازی مربـوط بـه شـاخص‌های حاصـل از تصاویـر ماهـواره‌ای ماننـد شـاخص نرمـال شـده تفـاوت پوشـش گیاهـی (NDVI) بـا عملکـرد محصـول اسـت (Khosravi-rad et al., 2019). رویکـرد چهـارم رویکـرد مکانـی اسـت کـه در پیش‌بینـی عملکـرد محصـولات اسـتفاده شـد. در تحقیقـی از کریجینـگ و کـو کریجینـگ در پیش‌بینـی عملکـرد گنـدم در منطقـه گتونـد اسـتان خوزسـتان اسـتفاده شـد. نتایـج بیانگـر آن بودنـد کـه دقـت کـو کریجینـگ بیشـتر از کریجینـگ اسـت (Seyied Jalali and Sarmadian, 2016). هـدف تکنیـک تصمیم‌گیـری چنـد معیـاره (MCDM) کمـک بـه انتخـاب بهتریـن گزینـه یـا گزینه‌هـا از طیـف وسـیعی از گزینه‌هـا اسـت. ایـن

رویکرد معمولاً در بهینه‌سازی عملکرد سازمان‌های مختلف، مانند سازمان‌هایی که در حوزه‌های صنعتی، مدیریتی و اداری، هم در بخش دولتی و هم در بخش خصوصی فعالیت می‌کنند، استفاده می‌شود (Biswas et al., 2024). از این رویکرد به‌طور مستقیم در تخمین عملکرد محصول استفاده نشده است. یکی از کاربردهای تصمیم‌گیری چند معیاره در مبحث کشاورزی مربوط به استفاده از TOPSIS و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در تعیین بهترین انتخاب مدیریتی کشت است. براساس دو روش تصمیم‌گیری گزینه‌های منتخب برای جایگزین‌های مبتنی بر خاک‌ورزی ارائه شدند (Biswas et al., 2024).

گندم یکی از مهم‌ترین محصولات غذایی در جهان و ایران است. به دلیل ارزش اقتصادی و تغذیه‌ای آن، نظارت بر رشد محصول گندم و پارامترهای عملکرد در طول فصل برای تصمیم‌گیرندگان ضروری است. تخمین عملکرد محصول قبل از برداشت براساس متغیرهای آب و هوا در مورد بازاریابی، قیمت‌گذاری، واردات، صادرات و سیاست‌گذاری مفید است. بنابراین هدف این تحقیق تخمین عملکرد محصول با استفاده از برخی از شاخص‌های اقلیمی است. شاخص‌های اقلیمی در واقع ترکیبات ریاضی مختلفی از داده‌های هواشناسی هستند. هر شاخص اقلیمی دارای روند بخصوصی در شبیه‌سازی محیط پیرامون است، به همین دلیل شناسایی شاخص مؤثر در هر منطقه ضروری است که در بیشتر تحقیقات قبلی از هم‌بستگی بین شاخص‌ها و عملکرد محصول استفاده شد. ولی در این تحقیق رویکرد قوی و همه‌جانبه تصمیم‌گیری چند معیاره پیشنهاد شد که استفاده از این رویکرد در مبحث عملکرد محصول جنبه نوآوری دارد و در تحقیقات قبلی از این رویکرد در این زمینه استفاده نشده است. معیار در نظر گرفته شده براساس آماره‌های ارزیابی ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

داده و اطلاعات این تحقیق مربوط به دو استان از استان‌های شمال‌غرب کشور بود که در شکل ۱ موقعیت آنها نشان داده شده است. از نظر شاخص دومارتن، استان‌ها در اقلیم نیمه‌خشک (شاخص دومارتن استان آذربایجان غربی بیشتر از آذربایجان شرقی) قرار گرفته است. در شکل ۱-ب نمودار کلیماگراف هر دو استان از نظر شکل مشابه هم هستند، ولی در استان آذربایجان غربی تغییرات بارندگی بیشتر از استان آذربایجان شرقی است. گندم در هر دو استان از محصولات استراتژیک در زمینه تأمین مواد غذایی است، بنابراین برآورد و تخمین آن با روشی کارآمد در اتخاذ سیاست‌گذاری‌های بخش کشاورزی استان نقش مهمی دارد.

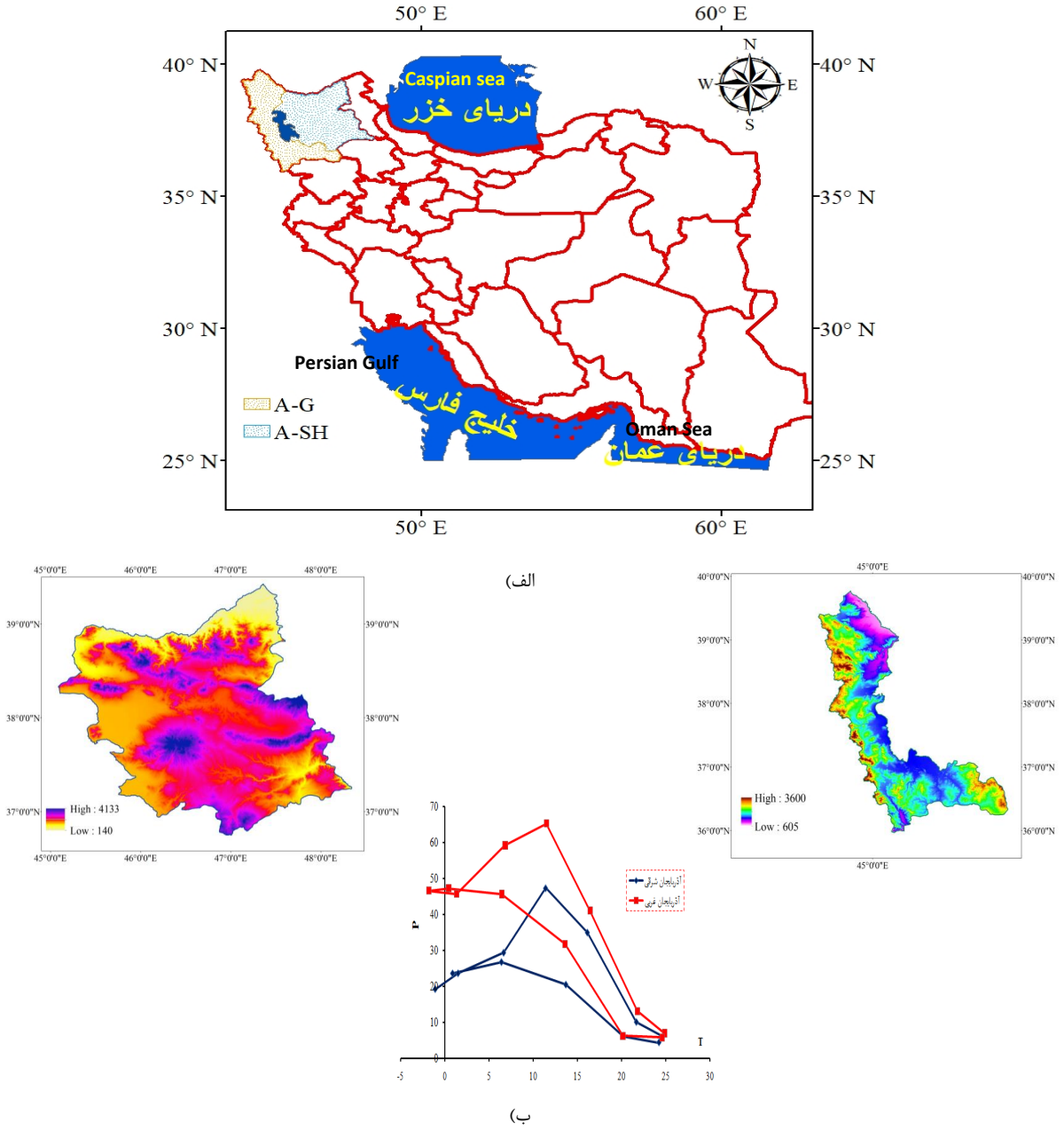
شاخص‌های اقلیمی

شاخص‌های اقلیمی کمیت‌هایی هستند که می‌توان از آنها برای مشخص کردن خشکسالی‌ها، حالت‌های تغییرپذیری آب و هوا استفاده کرد. شاخص‌های اقلیمی نقش کلیدی در پایش و پیش‌بینی آب و هوا دارند. شاخص‌های اقلیمی دارای ساختار ریاضی هستند که نوع معادله ریاضی حاکم بر آنها و داده‌های دخیل در آنها با هم متفاوت است. در سال‌های اخیر تعداد معادلات اصلاح شده افزایش داشته است. معادلات ریاضی استفاده شده در این تحقیق در جدول ۱ آورده شده است.

براساس جدول ۱، داده‌های معادلات با هم فرق دارند. حتی زمانی که داده‌ها یکسان هستند، نوع معادله ریاضی با هم متفاوت است به طوری که حتی در یک عدد ثابت از معادله با هم تفاوت دارند.

مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM)

MCDM یک اصطلاح کلی است که برای توصیف مجموعه‌ای از روش‌ها برای ساختاردهی و ارزیابی گزینه‌ها براساس معیارها و اهداف متعدد استفاده می‌شود. این روش‌ها تصمیمات هدفمندی را ارائه می‌دهند، زیرا می‌توانند پیچیدگی و عدم قطعیت ذاتی مسائل و همچنین دانش ناشی از مشارکت چندین فاکتور را مدیریت کنند. MCDM می‌تواند کیفیت تصمیم‌ها را واضح‌تر، کارآمدتر و منطقی‌تر سازد که منجر به انتخاب‌های توجیه‌پذیر و قابل توضیح می‌شود. علاوه بر این MCDM نقش شرکت‌کنندگان در فرآیند تصمیم‌گیری را ارتقا می‌دهد، مصالحه و تصمیمات گروهی را تسهیل می‌کند و بستر مناسبی



شکل ۱. الف) موقعیت مکانی استان‌های مورد مطالعه در کشور، ب) نمودار کلیماگراف دو استان.

Fig 1. a) The location of studied provinces in the country, b) the climograph of two provinces.

را برای ذی‌نفعان فراهم می‌کند تا ترجیحات شخصی خود را به اشتراک بگذارند. MCDM یک اصطلاح گسترده برای توصیف مجموعه‌ای از روش‌ها استفاده می‌شود که می‌توانند برای پیش‌بینی از فرآیند تصمیم‌گیری با در نظر گرفتن معیارهای متعدد از یک چارچوب ساختار یافته بهره گیرد. از دهه ۱۹۶۰ ده‌ها تکنیک MCDM توسعه‌یافته است. به‌طورکلی می‌توان آنها را در گروه‌هایی طبقه‌بندی کرد:

۱- توابع مطلوبیت و ارزش چند شاخصه: هدف این روش‌ها تعریف عبارتی برای ترجیحات تصمیم‌گیرنده از طریق توابع مطلوبیت است مانند MAUT، MAVT. ۲- مقایسه جفتی: این رویکرد شامل مقایسه جفت معیارها با این پرسش است که براساس مقیاس از پیش تعریف شده یکی چقدر از دیگری مهمتر است، مانند ANP، AHP. ۳-رویکردهای برتری (غیر رتبه‌ای): روش‌های رتبه‌بندی برتر بر این اصل استوارند که یک گزینه ممکن است درجه‌ای از تسلط بر دیگری داشته باشد، مانند ELECTRE، PROMETHEE، ORESTE.

جدول ۱. شاخص‌های بکار رفته در تحقیق همراه با معادلات و داده‌های مورد نیاز

Table 1. The used indices in the research along with the required equations and data

نام شاخص **Name of index**	داده های مورد نیاز (ماهانه) Required data(monthly)	ساختار ریاضی Mathematical structure
شاخص لانگ (Lang index)	بارندگی دما Precipitation Temperature	$I=\frac{P}{\frac{1}{12}\sum T>0}$
شاخص دومارتن (De Martonne index)	بارندگی دما Precipitation Temperature	$I=\frac{P}{T+10}$
شاخص کوپن ۱ (Köppen1 index)	بارندگی دما Precipitation Temperature	$I=\frac{8P}{5T+120}$
شاخص کوپن ۲(Köppen2 index)	بارندگی دما Precipitation Temperature	$I=\frac{2P}{T+33}$
شاخص کوپن ۳(Köppen3 index)	بارندگی دما Precipitation Temperature	$I=\frac{P}{T+7}$
شاخص آنگستروم(Angstrom index)	بارندگی دما Precipitation Temperature	$I=\frac{P}{1.07^T}$
شاخص سیلیانینوف (Selyaninov index)	بارندگی و درجه حرارت تجمعی Precipitation sum of average daily temperatures	$I=\frac{\sum P}{0.1\sum H}$
شاخص ایوانف (Ivanov index)	بارندگی دما Precipitation Temperature رطو بت نسبی Relative humidity	$I=\frac{P}{\sum E}$-$E=0.0018(2.5+T^2)(100-RH)$
شاخص خشکی (Aridity index)	بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل Precipitation and Potential evapotranspiration	$I=\frac{P}{ET_P}$
شاخص باران موثر(PEI effective precipitation) (index	بارندگی و دما Precipitation Temperature	$I=115(\frac{P}{T-10})^{1.11}$
شاخص پوشش گیاهی (VCI) (vegetation cover index)	بارندگی دما رطوبت نسبی Precipitation Temperature- Relative humidity	$I=\frac{P+RH}{T+7}$

۴-روش‌های فاصله تا نقطه ایده‌ال: گزینه‌ها براساس فاصله آنها از نقطه ایده‌ال ارزیابی و مرتب می‌شوند که نشان دهنده یک جایگزین فرضی است که به بهترین وجه با اهداف تصمیم‌گیرندگان مطابقت دارد، مانند TOPSIS، CP و VIKOR (De Brito and Evers 2016).

روش TOPSIS

یکی از مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است و اساس این روش به این صورت می‌باشد که گزینه انتخابی باید به بهترین حالت ممکن یا راه‌حل ایده‌ال مثبت نزدیک (کمینه فاصله) باشد و نسبت به راه‌حل ایده‌ال منفی (بدترین حالت) دور باشد. گام‌های حل این رویکرد تصمیم‌گیری در ادامه بیان می‌شود: بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم با استفاده از روش نرم (تقسیم هر عنصر به مجذور مربعات هر ستون).

۲-محاسبه ماتریس مربوط به وزن معیارها (W): در این تحقیق از روش آنتروپی شانون استفاده شد. ۳- تعیین حاصل‌ضرب ماتریس بی مقیاس‌شده و ماتریس وزن‌ها ۴- مقایسه فاصله از راه‌حل ایده‌ال مثبت V_j^+ و منفی V_{-j} است. راه‌حل ایده‌ال مثبت برای شاخص‌های مثبت بزرگ‌ترین مقدار و برای شاخص‌های منفی کوچک‌ترین مقدار است. راه‌حل ایده‌ال منفی برای شاخص‌های منفی بزرگ‌ترین مقدار و برای شاخص‌های مثبت کوچک‌ترین مقدار در نظر گرفته می‌شود. اصل روش براساس محاسبه فاصله اقلیدسی هر گزینه تا ایده‌آل‌های مثبت و منفی ۵- محاسبه نزدیکی نسبی یک گزینه به راه حل ایده‌ال و در نهایت رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس مقادیر بزرگ‌تر نزدیکی نسبی (Wang et al., 2018-Seyedmohammadi et al., 2019)

آنتروپی شانون: پایه این روش به این صورت است که هر چه پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر باشد، آن شاخص دارای اهمیت بالایی است. اگر در این روش m تعداد گزینه‌ها در نظر گرفته شود، ابتدا باید شاخص‌ها بی‌مقیاس شوند (رابطه ۱) و سپس ضریب ثابتی مانند k محاسبه می‌شود.

$$P_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} a_{ij}} \quad (۱)$$

$$k = \frac{1}{\ln(m)} \quad (۲)$$

$$E_j = -k \sum_{i=1}^{m} p_{ij} \ln p_{ij} \quad (۳)$$

$$d_j = 1 - E_j \quad (۴)$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^{n} d_j} \quad (۵)$$

a: اجزا ماتریس وزن داده شده. مقدار آنتروپی شاخص jام از رابطه ۳ به‌دست می‌آید و در نهایت مقدار عدم اطمینان یا درجه انحراف برای شاخص jام به‌دست می‌آید. روش آنتروپی بیشترین وزن را به شاخص با بیشتری درجه انحراف می‌دهد، بنابراین وزن شاخص‌ها از رابطه ۵ به‌دست می‌آید.

آماره‌های ارزیابی

در این تحقیق ورودی‌ها با ترکیبات مختلف وارد روند مدلسازی می‌شوند، بنابراین براساس آماره‌های جدول ۲، ورودی مناسب و کارآمد تعیین خواهد شد.

نتایج و بحث

طول دوره آماری مورد استفاده در این تحقیق ۲۲ سال بود که به‌صورت ۲۰:۸۰ برای واسنجی و صحت‌سنجی استفاده شد و دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ به عنوان دوره صحت‌سنجی در نظر گرفته شدند. از ضریب هرست برای بررسی طول دوره آماری استفاده شد که متوسط ضریب هرست برای تمامی شاخص‌ها ۰/۶۵ است که چون از ۰/۵ بزرگ‌تر است، طول دوره آماری سری قابل قبول است. به طور کلی ضریب هرست تمامی شاخص‌ها از ۰/۵ بزرگ‌تر هستند، کمترین مقدار مربوط به ضریب لانگ و برابر با ۰/۵۳ می‌باشد. بعد از اخذ داده‌های هواشناسی اقدام به تعیین شاخص‌های اقلیمی براساس ساختار ریاضی و داده‌های هواشناسی مورد لزوم شد که نتایج در شکل ۲ آورده شده است.

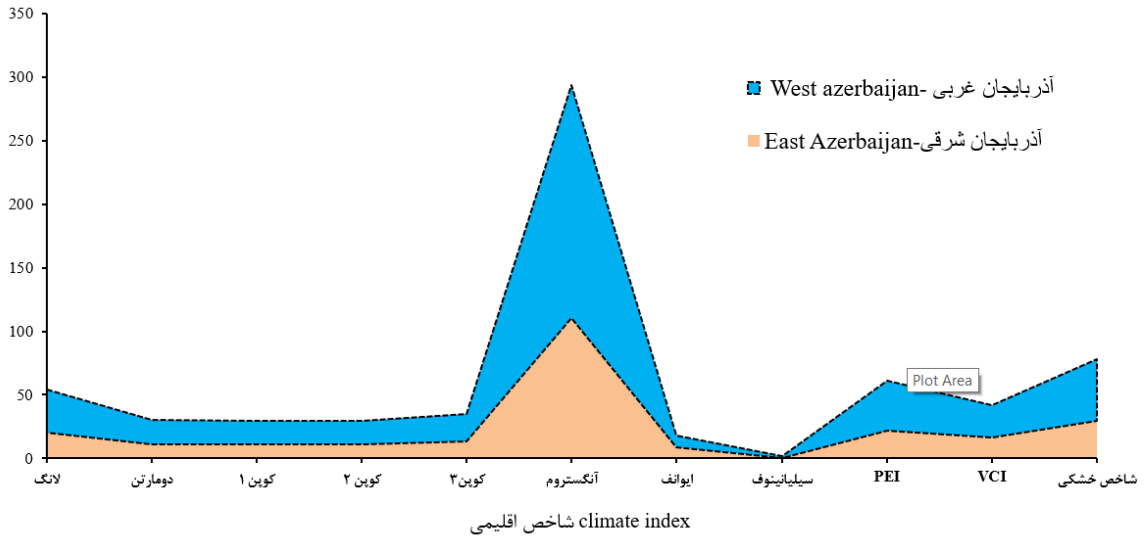
با توجه به شکل ۲، مقادیر شاخص‌ها در استان آذربایجان غربی نسبت به آذربایجان شرقی افزایش داشته است، به‌عنوان نمونه در شاخص ایوانف میزان افزایش از ایستگاه آذربایجان شرقی به غربی ۱/۳۸ و در شاخص VCI برابر با ۵۱/۰۱ و در شاخص خشکی ۶۲/۰۱ درصد بود. در ادامه براساس شاخص‌های بیان شده در جدول ۱ اقدام به تعیین عملکرد گندم براساس مدل رگرسیون بردار پشتیبان شد. در این مدل تحلیل حساسیت بر روی ضریب پنالتی و توابع کرنل انجام گرفت. البته در مورد شاخص‌های اقلیمی تنها از یک شاخص استفاده نشد، بلکه دسته‌بندی به این صورت بود که ابتدا شاخص‌ها به‌صورت تکی (جدول ۱) استفاده شدند و بعد دسته‌های دوتایی (لانگ- دومارتن (۱)، دومارتن- کوپن ۱ (۲) ، کوپن ۱-۲(۳)، کوپن ۲-۳ (۴)، کوپن ۳ -آنگستروم (۵)، آنگستروم- ایوانف (۶)، ایوانف-سلیانینوف (۷)، سیلیانینوف-PEI (۸) ، VCI– PEI (۹) و شاخص خشکی- VCI (۱۰)) و بعد دسته‌های سه‌تایی (کوپن ۱-لانگ – دومارتن (۱)، کوپن ۱-۲-۳ (۲)،کوپن ۳ -آنگستروم- ایوانف (۳)، ایوانف-سیلیانینوف-PEI (۴)،VCI– PEI- شاخص خشکی (۵)) و سپس دسته‌های چهارتایی (کوپن ۱-۲- دومارتن- لانگ (۱) ، کوپن ۲-۳- آنگستروم ایوانف (۲)، VCI-PEI سیلیانینوف-ایوانف (۳)، لانگ- دومارتن- VCI و شاخص خشکی (۴)) انتخاب و وارد مدلسازی شدند. نتایج عملکرد شاخص‌ها در پیش‌بینی عملکرد محصول در قالب آماره‌های ارزیابی در شکل ۳ آورده شده است.

بر اساس شکل ۳، میزان شاخص‌های آماری در استان آذربایجان غربی نسبت به آذربایجان شرقی در وضعیت بهتری هستند، به عنوان نمونه میزان متوسط کاهش RRMSE برای تمامی شاخص‌ها از استان آذربایجان شرقی به غربی برابر با ۷۲/۵۳ درصد و میزان متوسط افزایش SIM برای برای تمامی شاخص‌ها از استان آذربایجان شرقی به غربی برابر با ۱۳/۲ درصد است. در استان آذربایجان شرقی در

جدول ۲. آماره‌های ارزیابی مورد استفاده در تحقیق

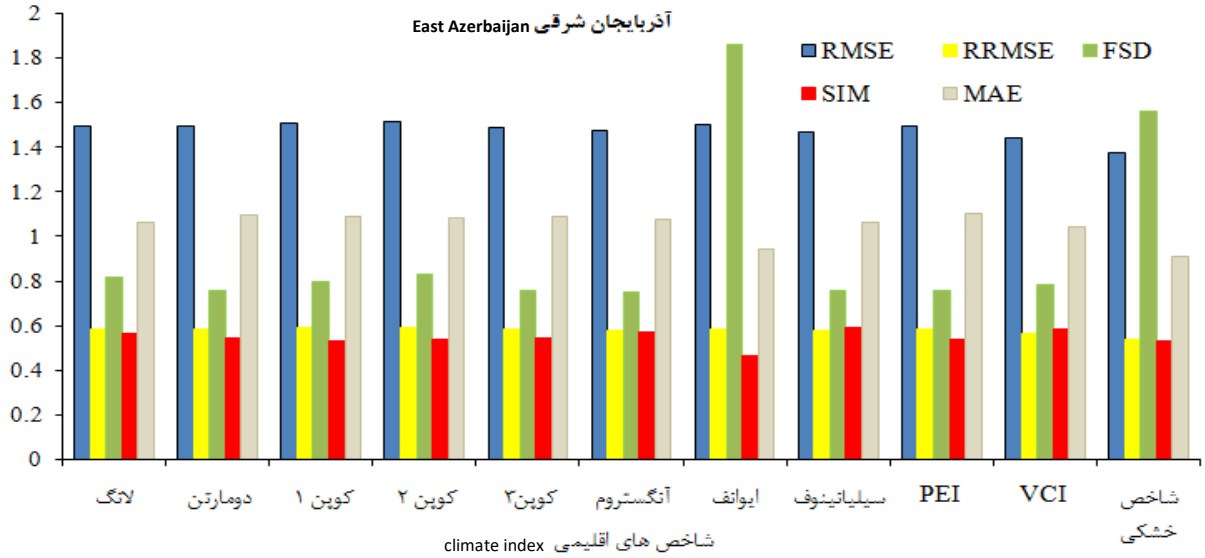
Table 2. Evaluation criteria used in the study

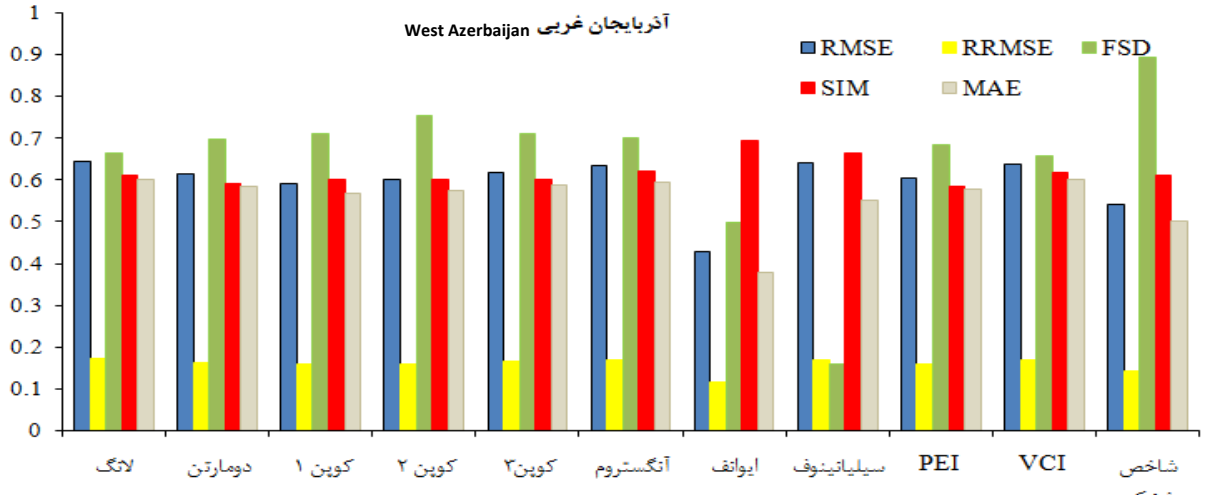
نام شاخص		وضعیت بهینه	معادله	پارامترها
جذر میانگین مربعات خطا root-mean-square deviation	RMSE	کمینه minimize	$RMSE=\sqrt{\frac{1}{N}\sum(P_i-O_i)^2}$	P: مقادیر پیش بینی شده Forecasted values، O: مقادیر مشاهداتی observed values، N: تعداد داده ها number of data
جذر میانگین مربعات خطا نسبی relative root-mean-square deviation	RRMSE	کمینه minimize	$RRMSE=\frac{RMSE}{\overline{O}}$	$\overline{O}$ میانگین داده‌های مشاهداتی mean of observed values
تشابه similarity	SIM	نزدیک یک Near one	$SIM(O,P)=\frac{1}{N}\sum\frac{1}{1+\frac{\lvert O_i-P_i\rvert}{\max(O)-\min(O)}}$	max: مقادیر بیشینه maximum value، min: مقادیر کمینه minimum value
کسر از انحراف استاندارد fraction of standard deviation	FSD	کمینه minimize	$FSD=2\frac{\lvert SD(P)-SD(O)\rvert}{SD(P)+SD(O)}$	SD: انحراف معیار Standard deviation
میانگین خطای قدرمطلق mean absolute error	MAE	کمینه minimize	$MAE=\frac{1}{N}\sum\lvert P_i-O_i\rvert$	P: مقادیر پیش بینی شده Forecasted values، O: مقادیر مشاهداتی observed values

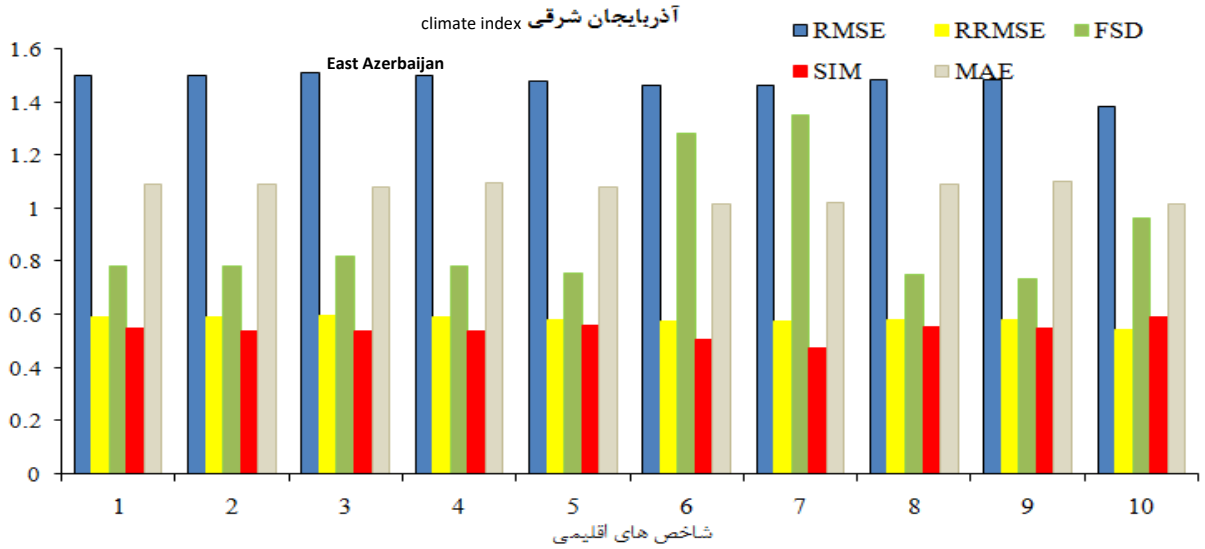


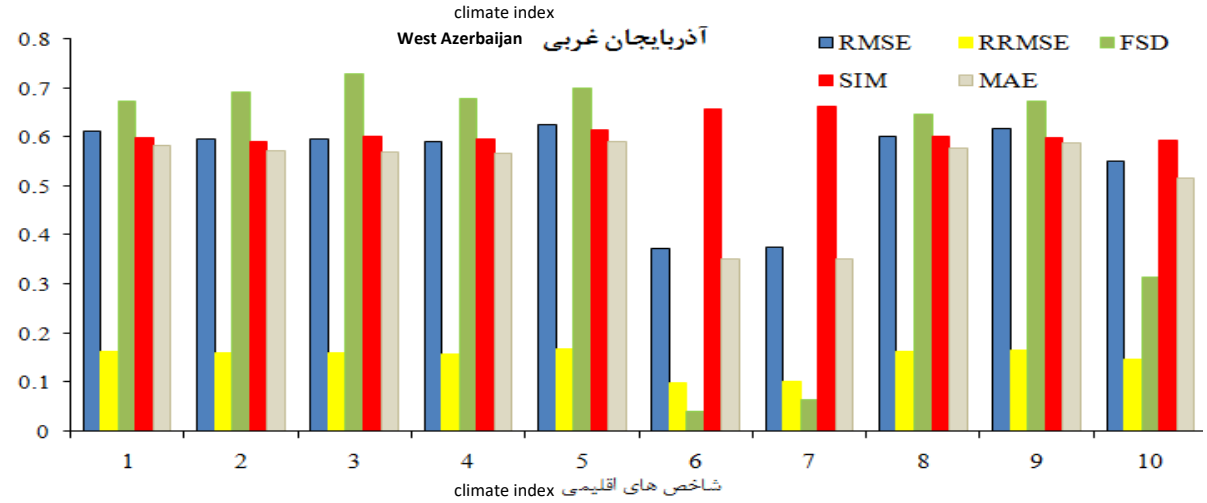
شکل ۲. متوسط شاخص‌های اقلیمی در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱

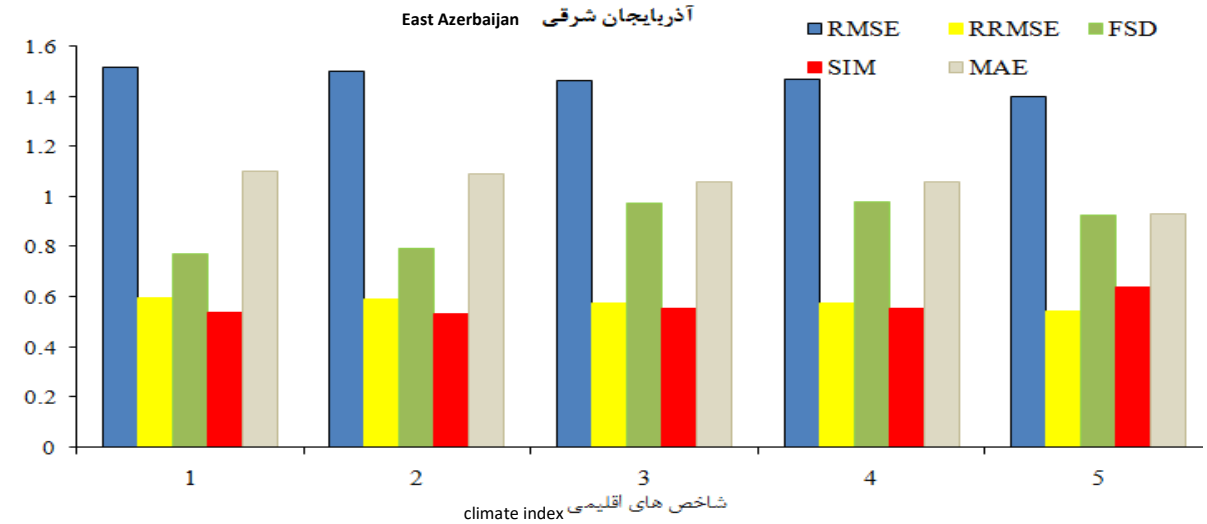
Fig 2. Average climate indices in the time period of 2000-2021

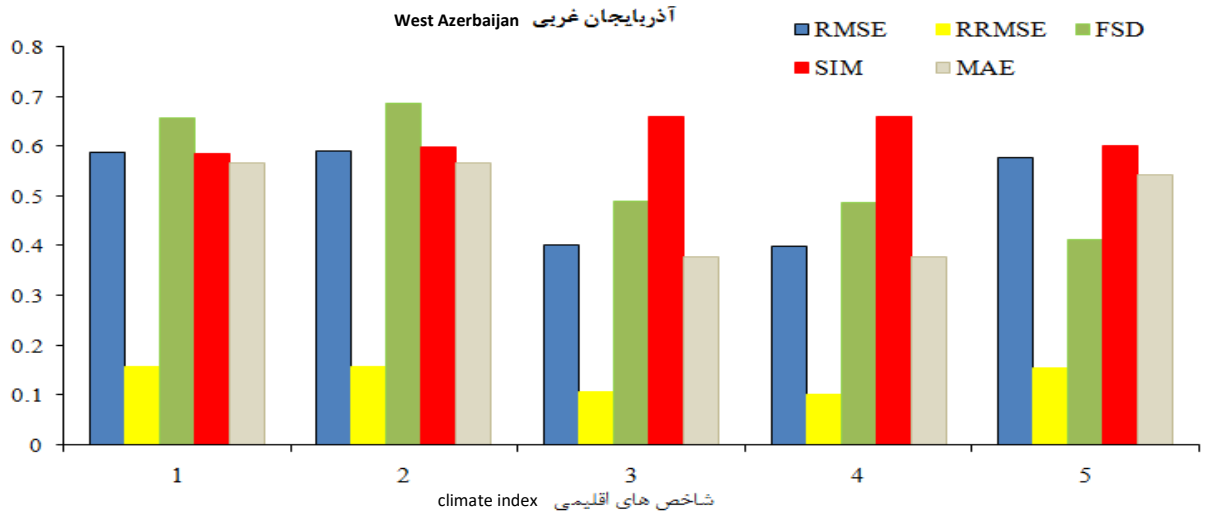

East Azerbaijan آذربایجان شرقی
RMSE
RRMSE
FSD
SIM
MAE
2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
لانگ
دومارتن
کوپن ۱
کوپن ۲
کوپن۳
آنگستروم
ایوانف
سیلیانینوف
PEI
VCI
شاخص خشکی
climate index شاخص های اقلیمی

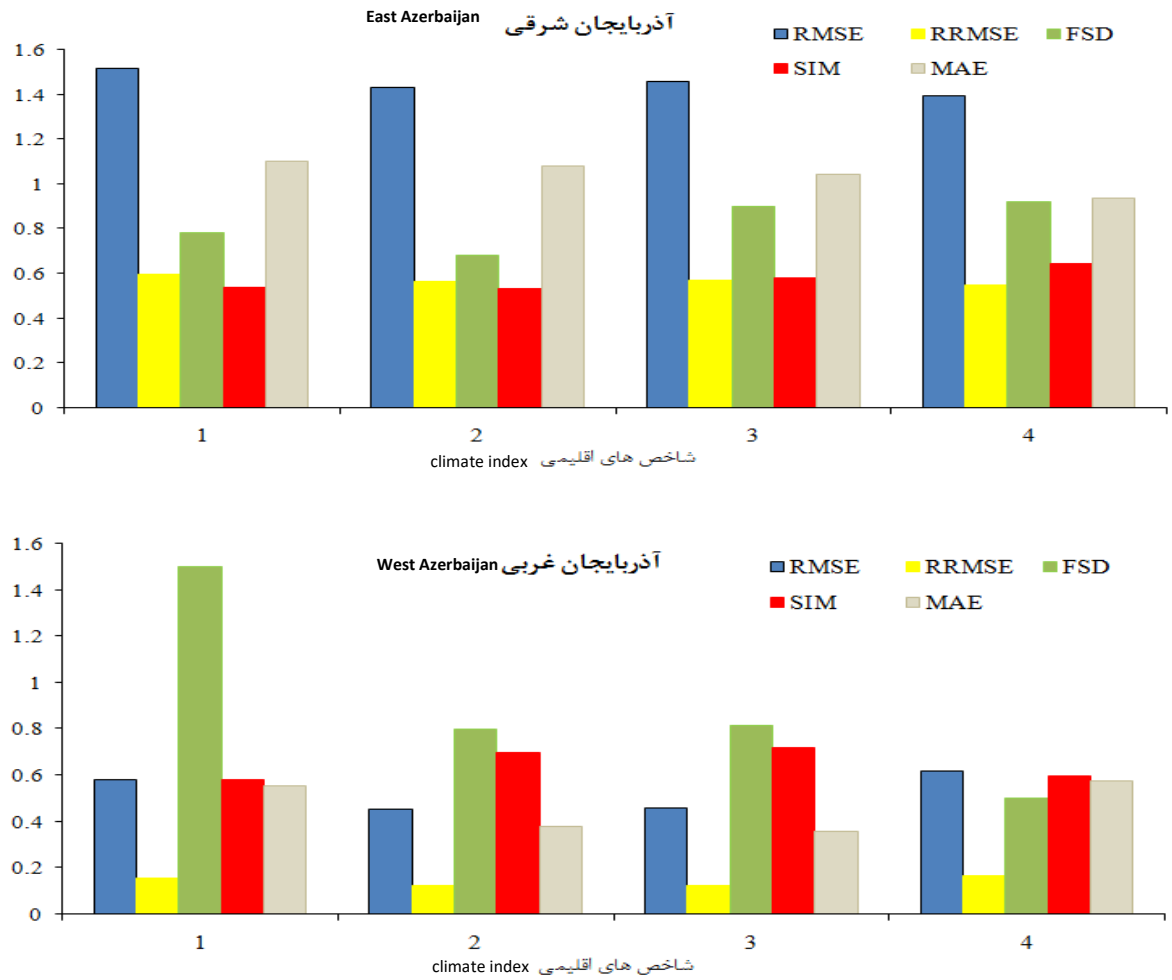

West Azerbaijan آذربایجان غربی
RMSE
RRMSE
FSD
SIM
MAE
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
لانگ
دومارتن
کوپن ۱
کوپن ۲
کوپن۳
آنگستروم
ایوانف
سیلیانینوف
PEI
VCI
شاخص


climate index آذربایجان شرقی
East Azerbaijan
RMSE
RRMSE
FSD
SIM
MAE
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
شاخص های اقلیمی


climate index
West Azerbaijan آذربایجان غربی
RMSE
RRMSE
FSD
SIM
MAE
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
climate index شاخص های اقلیمی


East Azerbaijan آذربایجان شرقی
RMSE
RRMSE
FSD
SIM
MAE
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
1
2
3
4
5
climate index شاخص های اقلیمی


West Azerbaijan آذربایجان غربی
RMSE
RRMSE
FSD
SIM
MAE
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
1
2
3
4
5
climate index شاخص های اقلیمی



شکل ۳. آماره‌های ارزیابی پیش‌بینی عملکرد محصول با شاخص‌های اقلیمی (یک، دو، سه و چهار شاخص)

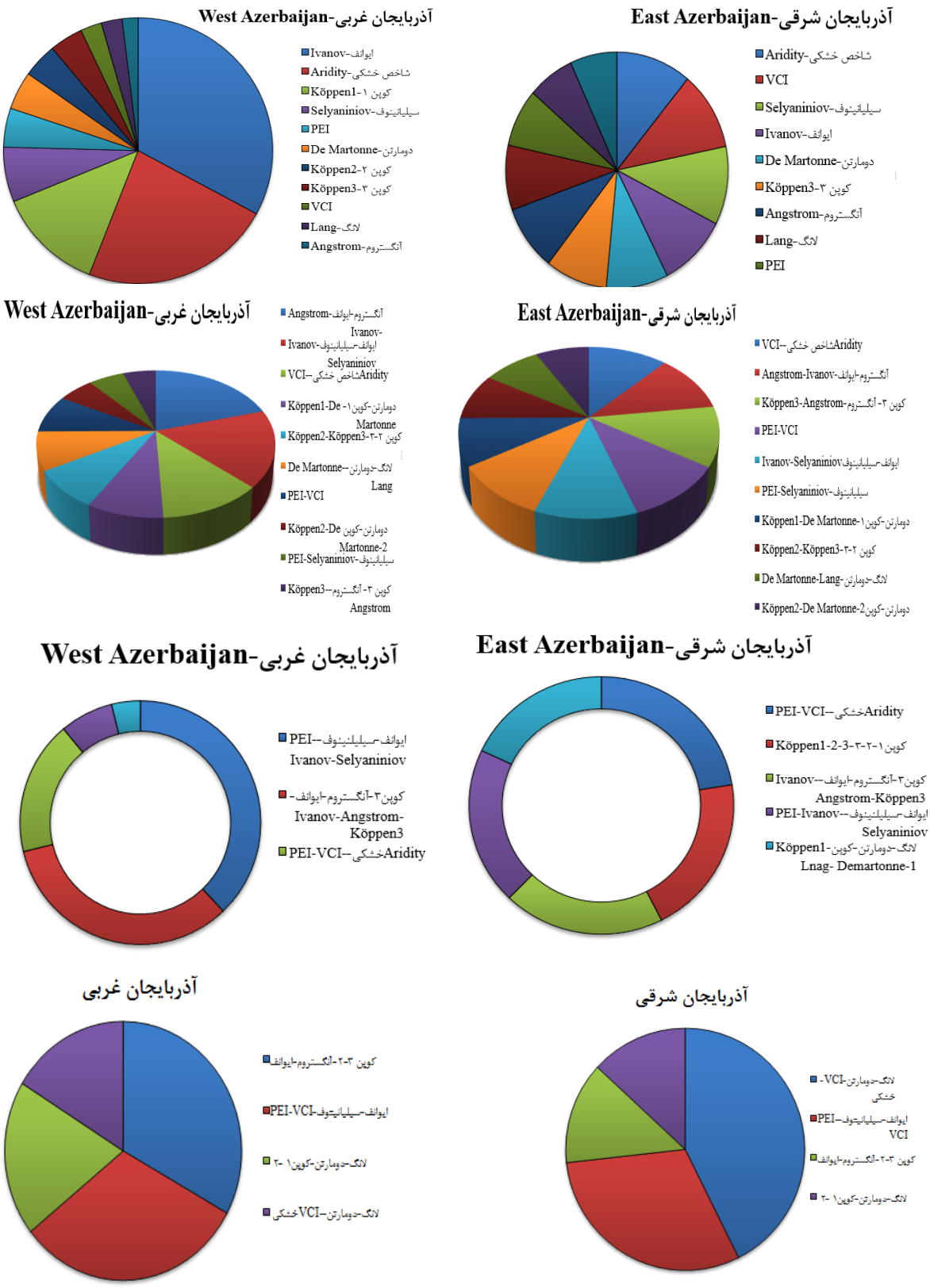
Fig 3. Evaluation criteria of crop yield prediction with climatic indices (one, two, three, and four indices)

حالت تک شاخصه براساس RRMSE، RMSE، MAE شاخص خشکی و بر اساس VAF شاخص آنگستروم و براساس SIM شاخص‌های سیلیانینوف و VCI دارای وضعیت بهتری نسبت به سایر شاخص‌ها هستند. براساس RMSE، RRMSE شاخص کوپن ۲، براساس MAE شاخص‌های کوپن ۱ و ۲ و براساس SIM و VAF شاخص ایوانف عملکرد پایینی دارند. در حالت دو شاخصه براساس RRMSE، RMSE، MAE، SIM ترکیب VCI و شاخص خشکی و براساس VAF ترکیب PCI، VCI دارای وضعیت بهتری هستند. میزان افزایش SIM از حالت بهینه تک شاخصی (شاخص خشکی) به حالت دو شاخصه (ترکیب VCI و شاخص خشکی) برابر با ۱۱/۳۲ درصد است. میزان کاهش VAF از حالت تک شاخصه (VCI) به دو شاخصه (VCI-PCI) برابر با ۶/۲۵ درصد شده است. در حالت سه ترکیبی ترکیب شاخص‌های PEI- شاخص خشکی و VCI براساس RMSE، RRMSE، SIM، MAE و ترکیب شاخص لانگ، دومارتن و کوپن ۱ براساس VAF در وضعیت بهتری هستند. میزان افزایش SIM بهترین حالت‌های تک و دو شاخصه یعنی شاخص خشکی و دو شاخصه (شاخص خشکی-VCI) به سه شاخصه (PEI-شاخص خشکی و VCI) برابر با ۲۰/۷۵ و ۸/۴۷ درصد بود. در حالت چهار شاخصه ترکیب شاخص‌های لانگ- دومارتن- VCI و شاخص خشکی براساس RMSE، RRMSE، SIM، MAE، ترکیب لانگ- دومارتن-VCIو خشکی و براساس VAF ترکیب کوپن ۲-۳-آنگستروم و ایوانف

در وضعیت بهتری قرار داشتند. میزان کاهش VAF از حالت تک شاخصه (شاخص خشکی)، دو شاخصه (VCI-شاخص خشکی)، سه شاخصه (PEI-شاخص خشکی و VCI) به چهار شاخصه (لانگ- دومارتن- VCI و شاخص خشکی) به‌ترتیب برابر با ۴/۶۷،۶۷/۲۱، ۲ درصد است. در استان آذربایجان غربی در حالت تک شاخصه براساس RRMSE، RMSE، MAE، SIM و VAF شاخص ایوانف دارای عملکرد بهتری است.RRMSE، RMSE، MAE شاخص لانگ و براساس VAF شاخص خشکی و براساس SIM شاخص PEI عملکرد ضعیفی دارند. در حالت دو شاخصه شاخص آنگستروم-ایوانف براساس RMSE، RRMSE، VAF و MAE و براساس SIM شاخص ترکیبی ایوانف و سیلیانینوف دارای وضعیت بهتری هستند. به‌طور کلی شاخص‌های ترکیبی حاوی ایوانف دارای عملکرد بهتری هستند. میزان کاهش RMSE،RRMSE از شاخص ایوانف به حالت ترکیبی (ایوانف و آنگستروم) به‌ترتیب برابر با ۱۳/۹۵، ۴۱/۷۶ درصد است. در حالت سه شاخصه براساس تمام آماره‌ها ترکیب ایوانف-PEI -سیلیانینوف دارای عملکرد بهتری می‌باشد. در حالت چهار شاخصه براساس RMSE، RRMSE، MAE و VAF ترکیب کوپن ۳-۲-آنگستروم و ایوانف و براساس SIM ترکیب ایوانف-سلیانینوف-PEI و VCI دارای عملکرد بهتری هستند. باز در این حالت ترکیب‌های حاوی شاخص ایوانف دارای عملکرد بهتری هستند. تغییرات آماره‌های ارزیابی در هر دو استان در برابر تعداد زیادی از شاخص‌های اقلیمی و ترکیبات آنها کاملاً مشاهده می‌شود و این مسئله نشان‌دهنده اهمیت شاخص‌های اقلیمی در پیش‌بینی عملکرد محصول است. تأثیر شاخص‌های اقلیمی بر عملکرد محصول در تحقیقات بازگیر و کمالی (۱۳۸۷) هم مشاهده شد. در تحقیق فرجزاده و همکاران (Farajzadeh et al.,2013) مدل‌های ترکیبی مشتمل بر ترکیب عناصر اقلیمی و شاخص‌های اقلیمی کشاورزی دارای دقت بالایی بودند. در تحقیق Bazgerr et al., (2007) در تعیین عملکرد گندم ۸۳ درصد از تغییرات توسط شاخص‌های هواشناسی بیان شد. بررسی اثرات خشک‌سالی هواشناسی- کشاورزی بر عملکرد گندم دیم با استفاده از شاخص استاندارد شده بارش در تحقیق دهقانی سرگزی و همکاران (Dehghani Sargazi et al., 2021) بررسی شد. نتایج این تحقیق توانست کاربرد مفیدی در مدیریت و برنامه‌ریزی توسعه کشت گندم دیم داشته باشد. ترکیبات مختلفی از داده‌های هواشناسی در مطالعه خادم‌پور و همکاران (Khadem-pour et al., 2020) در تخمین عملکرد محصول زعفران نشان دادند که دمای بیشینه، بارندگی، تبخیر و تعرق و رطوبت نسبی ارتباط نزدیکی با عملکرد زعفران دارند (خادم پور و همکاران ۱۳۹۹). همان‌طور که در تحلیل نمودارهای شکل ۳ مشاهده شد، روند تغییرات آماره‌ها در تمام حالت‌ها در یک سوء نیست، بنابراین برای اینکه نتیجه‌گیری جامعی در مورد تعیین شاخص بهینه براساس عملکرد تمامی آماره‌ها انجام شود، از روش TOPSIS استفاده شد. در این روش شاخص‌های اقلیمی و ترکیبات آنها به‌عنوان گزینه و آماره‌های ارزیابی به‌عنوان شاخص‌های تصمیم‌گیری در نظر گرفته شدند. نتایج اجرای TOPSIS و رتبه‌بندی شاخص‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.

اساس شکل ۴، در استان آذربایجان غربی در حالت تک شاخصه ابتدا شاخص ایوانف و سپس شاخص خشکی و در استان آذربایجان شرقی شاخص خشکی و VCI و سیلیانینوف دارای رتبه بالایی هستند. در حالت دو شاخصه در استان آذربایجان شرقی

ترکیب شاخص خشکی و VCI و در استان آذربایجان غربی ترکیب آنگستروم و ایوانف دارای رتبه بهتری هستند. در حالت سه شاخصه در استان آذربایجان غربی شاخص‌های ایوانف-سیلیلنینوف و PEI و در استان آذربایجان شرقی شاخص‌های خشکی-VCI و PEI دارای عملکرد بهتری هستند. در حالت چهار شاخصه در استان آذربایجان شرقی ترکیب شاخص‌های لانگ- دومارتن- خشکی و VCI و در استان آذربایجان غربی کوپن ۲ - ۳ - آنگستروم و ایوانف دارای عملکرد بهتری هستند. براساس ترکیبات مختلف در استان آذربایجان شرقی، شاخص خشکی و ترکیبی چهار شاخصه (لانگ- دومارتن- خشکی و VCI) دارای عملکرد بهتری هستند. بنابراین در ادامه سعی در مقایسه آنها شد، به‌عنوان نمونه میزان کاهش RMSE و MAE از ترکیب چهار شاخصه به تک شاخصه به‌ترتیب برابر با ۱/۱۴ و



شکل ۴. رتبه‌بندی شاخص‌های اقلیمی در دسته‌های مختلف براساس روش TOPSIS

Fig 4. Ranking of climate indices in different categories based on the TOPSIS method

۲/۰۴ درصد است و میزان کاهش VAF از تک شاخصه به چهار شاخصه برابر با ۴۱/۲۱ و میزان افزایش SIM از تک شاخصه به چهار شاخصه برابر با ۲۰/۷۵ درصد است. بنابراین ترکیب چهارم بهتر عمل می‌کند. در استان آذربایجان غربی بر اساس آماره‌های RMSE، RRMSE، MAE و VAF ترکیب دو شاخصه (ایوانف و آنگستروم) دارای عملکرد بهتری است، به‌طوری که میزان کاهش RMSE از تک شاخصه (ایوانف)، سه شاخصه (ایوانف-PEI و سیلیانینوف)، چهار شاخصه (کوپن ۳-۲-آنگستروم و ایوانف) به دو شاخصه (ایوانف و آنگستروم) به ترتیب برابر با ۱۳/۹۵، ۱۸/۳۲ و ۷/۲۶ درصد است. براساس SIM حالت چهار شاخصی عملکرد بهتری دارد. میزان افزایش SIM از تک شاخصه (ایوانف)، دو شاخصه (ایوانف و آنگستروم)، سه شاخصه (ایوانف-PEI و سیلیانینوف) به چهار شاخصه (کوپن ۳-۲-آنگستروم و ایوانف) به ترتیب برابر با ۳/۳، ۴/۹، ۸/۹۳ درصد است. نوع شاخص‌های اقلیمی استفاده شده توانستند میزان برآورد عملکرد محصول را تحت تأثیر قرار دهند. در استان آذربایجان شرقی میزان کاهش عملکرد محصول از شاخص کوپن ۳ به مقادیر مشاهداتی ۲۸/۸۵ درصد و از ترکیب (لانگ-دومارتن-خشکی و VCI) به مقادیر مشاهداتی ۲۳/۴۹ درصد است. در استان آذربایجان غربی میزان افزایش عملکرد محصول از شاخص لانگ به مقادیر مشاهداتی ۴۶/۹۲ درصد و از ترکیب (ایوانف-سیلیانینوف-PEI و VCI) به مقادیر مشاهداتی ۳۲/۸۷ درصد می‌باشد. اختلاف بین عملکرد محصول مشاهداتی و ترکیبی در هر دو استان کاهش داشته است.

نتیجه‌گیری

پیش‌بینی به موقع عملکرد محصول می‌تواند مدیریت تولید کشاورزی و سیاست‌گذاری مواد غذایی را که از الزامات مهم توسعه کشاورزی دقیق هستند، تسریع بخشد. در این راستا پیش‌بینی عملکرد محصول با استفاده از شاخص‌های اقلیمی دارای اهمیت بالایی است. در این تحقیق یازده شاخص اقلیمی همراه با ترکیبات آنها (دو، سه و چهار شاخصه) با رگرسیون بردار پشتیبان مدلسازی شدند. نتایج نشان دادند که استفاده از ترکیب شاخص‌ها نسبت به استفاده از تک شاخصه دارای دقت بالایی است. دلیل این مسئله را می‌توان به این صورت بیان کرد که در حالت ترکیبی از نظر داده‌های به کار رفته و هم از نظر ساختار ریاضی اصلاحاتی انجام می‌گیرد. تأثیر نوع شاخص در هر اقلیم بر عملکرد محصول متفاوت است. استان آذربایجان شرقی و غربی از نظر اقلیمی مشابهت بالایی دارند، ولی شاخص‌هایی همراه با شاخص ایوانف در استان آذربایجان غربی و شاخص خشکی در استان آذربایجان شرقی تأثیر بالایی بر عملکرد گندم دارند. این مسئله نشان می‌دهد که هر منطقه شاخص مخصوص به خود را در شبیه‌سازی فرآیندهای اقلیمی حاکم بر عملکرد محصول دارد. استفاده از سایر رویکردهای تصمیم‌گیری چند معیاره و یا حالت ادغامی آنها می‌تواند یکی از پیشنهادات این تحقیق است. همچنین تأثیر تغییر معیارها نیز بهتر است مورد بررسی قرار گیرد. با به‌کارگیری شاخص مناسب و دقیق، پیش‌بینی عملکرد محصول به مقادیر واقعی نزدیک‌تر می‌شود. عملکرد محصول ناشی از فرآیندهای گیاهی است و این فرآیندها از عوامل اقلیمی متأثر هستند که کمی‌سازی رابطه بین عوامل اقلیمی و عملکرد محصول با شاخص اقلیمی مؤثر در اتخاذ تصمیمات مربوط به برنامه‌ریزی و مدیریت کشاورزی می‌تواند تأثیر قابل توجهی داشته باشد.

منابع

Ansari ghojghar, M. (2023). Development of strategic wheat crop prediction toolkit using machine learning algorithms to reduce food security risks (case study: alborz province), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(10), 2277-2294. [In Persian]. doi: 10.22059/ijswr.2022.342638.669260.

Bazgeer, S. & Kamali, GH.A. (2008). Wheat yield prediction using agro meteorological indices For some regions of the Western of the country, *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources,* 15(2), 113, 121. [In Persian]. DOI: 10.22059/jdesert.2008.31063

Bazgeer, S., Kamali, G. & Mortazavi, A. (2007). Wheat yield prediction through agrometeo-

Khodjaev, S., Kuhn, L., Bobojonov, I. & Glauben, T. (2024). Combining multiple UAV-Based indicators for wheat yield estimation, a case study from Germany, *European Journal of Remote Sensing*, *57*(1), 2294121. doi: 10.1080/22797254.2023.2294121.

Khosravirad, M., Omid, M., Sarmadian, F. & Hosseinpor, S. (2019). Sugarcane yield estimation using LANDSAT time series imagery (Case Study-MianAB region in Khouzestan Province), *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 50 (2), 399-414. [In Persian]. doi: 10.22059/IJBSE.2019.268449.665108.

Madani, A., Khasheyi, A., & Khakzad, S. (2021). Predictingrain fed barley crop yield using artificial neural network and fuzzy neural systems in Khorasan province –Iran, *Journal of Plant Production*, 11(2), 75-92. [In Persian]. doi: 10.2./jpps.2022.691244.

Mathieu, J. A., & Aires, F. (2018). Assessment of the agro-climatic indices to improve crop yield forecasting, *Agricultural and forest meteorology*, *253*, 15-30. doi: 10.1016/j.agrformet.2018.01.031.

Niedbała, G., Nowakowski, K., Rudowicz-Nawrocka, J., Piekutowska, M., Weres, J., Tomczak, R.J., Tyksiński, T. & Álvarez Pinto, A. (2019). Multicriteria prediction and simulation of winter wheat yield using extended qualitative and quantitative data based on artificial neural networks, *Applied Sciences*, *9*(14), 2773. doi: 10.3390/app9142773. doi: 10.3390/app9142773.

Parviz, L. & Bonyadi, H. 2019. Wheat yield modeling using climate indices and hierarchical, *Ecohydrology,* 6(2), 479-491. [In Persian]. doi: 10.22059/ije.2019.272286.1013.

Parviz, L.& Paymai. M. (2019). Stochastic climatological yield forecasting of four crops wheat, barley, potato and maize in East and West Azerrological indices for Hamedan, Iran, *Biaban (Desert Journal),* 12, 33-38. doi: 10.22059/jdesert.2008.31063.

Biswas, T., Majumder, A., Dey, S., Mandal, A., Ray, S., Kapoor, P., Emam, W., Kanthal, S., Ishizaka, A. & Matuka A. (2021). Evaluation of management practices in rice–wheat cropping system using multicriteria decision-making methods in conservation agriculture, *Scientific Reports*, 13, 14(1), 8600. doi: 10.1038/s41598-024-58022-w.

De Brito, M. M. & Evers, M. (2016). Multi-criteria decision-making for flood risk management: a survey of the current state of the art, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(4), 1019-1033. doi: 10.5194/nhess-16-1019-2016.

Dehghani Sargazi, H., Bazrafshan, O. & Zamani, H. (2021). Investigation of the effect of meteorological-agricultural drought on rainfed wheat yield in Iran using SPEI, *Nivar*, 45(114), 16-28. [In Persian]. doi: 10.30467/nivar.2021.295544.1198.

Delghandi, M., Joorablou, S. & Ganji Nowroozi, Z. (2023). The impact of climate change on severity, duration, and magnitude of drought using SPI and RDI in the Semnan region, *Journal of Drought and Climate change Research*, 1(1), 1-18. [In Persian]. doi:10.22077/jdcr.2023.5909.1004.

Farajzadeh, M. & Khorani, A., Bazgir, S. & Zeaiean, P. (2013). Estimation of rainfed wheat yield using climatic-agricultural indicators and remote sensing in Kurdistan province, *Iranian Remote Sensing and GIS Journal*, 5(2), 35-52. [In Persian].

Khadempour, F., Khashei Siuki, A. & Behdani, M. A. (2020). Evaluation of the efficiency of Lazy Algorithm in Estimating Yield of Saffron Based on Climatic Parameters, *Saffron Agronomy and Technology*, 8(2), 295-304. doi: 10.22048/jsat.2020.174803.1338

baijan Provinces in the development of agricultural planning, *Crop production,* 11(4), 11-26. [In Persian]. doi: 10.22069/ejcp.2019.14153.2077.

Seyed Jalali, S.A., Sarmadian, F., Shorafa, M. & Mohammad Ismail, Z. (2016). Application of kriging and cokriging in predicting wheat yield using principal component analysis, *Crop production Journal*, 9(2), 213-224. [In Persian]. doi: 10.22069/ejcp.2016.3124.

Seyedmohammadi, J., Sarmadian, F., Jafarzadeh, A. A., Ghorbani, M. A. & Shahbazi, F. (2018). Application of SAW, TOPSIS and fuzzy TOPSIS models in cultivation priority planning for maize, rapeseed and soybean crops, *Geoderma*, *310*, 178-190. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.09.012.

Tanabe, R., Matsui, T. & Tanaka, T.S. (2023). Winter wheat yield prediction using convolution neural networks and UAV-based multispectral imagery, *Field Crops Research*, 291, 1087. doi: 10.1016/j.fcr.2022.108786.

Wang, H., Wang, X., Bi, L., Wang, Y., Fan, J., Zhang, F. & Xiang, Y. (2019). Multi-objective optimization of water and fertilizer management for potato production in sandy areas of northern China based on TOPSIS, *Field Crops Research*, *240*, 55-68. doi: 10.1016/j.fcr.2019.06.005.