



Analysis of Dry Wheat Yield Trend using Drought Identification Indicators in North Khorasan Province

Mehdi Teimouri¹ | Saviz Sadeghi²

1. Corresponding Author, Department of Nature Engineering, Shirvan Faculty of Agriculture, University of Bojnord, Bojnord, Iran. M.teimouri@ub.ac.ir
2. Department of Environment Science and Engineering, Arak University, Arak, Iran. s-sadeghi@araku.ac.ir

Article Information

Research Paper

Vol: 15
No: 57
P: 122-139
Received: 2024-01-23
Revised: 2024-04-04
Accepted: 2024-04-07
Published: 2024-11-01

Keywords:

- Time Scale
- Wheat Production
- Jump
- Trend
- Food Security

Cite this Article:

Teimouri, Mehdi & Sadeghi, Saviz. (2024). Analysis of Dry Wheat Yield Trend using Drought Identification Indicators in North Khorasan Province. *Journal of Arid Regions Geographic Studies* 15(57): 122-139. doi: 10.22034/jargs.2024.437263.1087

Publisher: Hakim Sabzevari University

© The Author(s)



Abstract

Aim: Understanding the impact of drought on agricultural yields is a pivotal concern in food security. Consequently, this study utilized the drought identification index (RDI) and the effective drought identification index (eRDI), which integrates effective precipitation in its computations, to assess the output of dryland wheat in the North Khorasan province.

Material & Method: Four distinct methods were applied to incorporate effective precipitation, encompassing the approaches of the FAO and USBR, as well as two techniques adopted from the USDA. These metrics were applied using monthly rainfall and temperature data from meteorological stations within the province. A comparative analysis was conducted to evaluate the wheat production performance across various periods, and the correlation coefficient between these methods and wheat production yield was determined. Additionally, the yield trend of dryland wheat in different cities was studied using the Mann-Kendall test and Sen's estimator.

Finding: Minimal disparity is among the diverse methods for determining effective precipitation. Although the eRDI method displayed superior outcomes, the correlation coefficient analysis indicated that the production performance of each city is more sensitively affected by the precipitation values within specific time scales.

Conclusion: Similar outcomes to those of the investigated trends indicated a notable adverse trend in dryland wheat production at the Bojnord and Esfarayen stations, alongside an insignificant positive trend in other cities.

Innovation: This study's innovation lies in applying effective precipitation within the eRDI index and comparing various experimental methods to ascertain it for integration into the equations of the said index. Given its unique climatic conditions and critical role in the nation's wheat production, this province assumes significant importance. However, limited research has been conducted on agricultural drought in this region thus far, underscoring the need for further studies to bolster regional food security.

Extended Abstract

1. Introduction

Drought is a prevalent environmental hazard across diverse climates, resulting in significant economic and social consequences. Agricultural drought is influenced by various meteorological factors and plant characteristics such as plant species, growth period duration, and phenology traits. Consequently, in regions reliant on rainfed agriculture, such as arid and semi-arid areas, conducting drought risk assessments is crucial for evaluating agricultural output, public health, and food security. Given Iran's predominantly dry and semi-arid climate, monitoring and analyzing drought occurrences are imperative, prompting numerous research endeavors in this domain. Several indices have been devised to streamline trend analysis and statistical forecasting to facilitate drought analysis, with notable examples including the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Reconnaissance Drought Index (RDI). Notably, the enhanced version of the RDI index, known as the effective RDI (eRDI) index, has garnered attention for its superior performance in various sources. This study compares the RDI and eRDI indices over different periods to ascertain the yield trends of rainfed wheat in North Khorasan province, representing a novel contribution to the field. Incorporating effective precipitation in the eRDI index necessitates the evaluation of diverse methodologies to determine and inform the index equations. Given North Khorasan's unique climatic conditions and significant role in national wheat production, the province holds particular importance, yet there remains a scarcity of agricultural drought studies in the region, underscoring the critical nature of this issue in the area.

2. Materials and methods

In order to assess agricultural drought conditions, monthly rainfall and temperature data from six cities within a province were analyzed over a consistent statistical timeframe. The evaluation of index data involved utilizing information on wheat cultivation performance across various cities spanning 18 years from 1989 to 2021, sourced from governmental statistical reports specific to North Khorasan province; different methods of calculating effective precipitation in the eRDI model, including those by FAO, USDA, USBR, and USDAsim, were compared. The efficacy of RDI and eRDI indices in reflecting drought impacts was assessed by correlating wheat yield with wheat production over time. Standardized performance metrics for each city were employed to normalize the data to account for variations in crop performance due to factors such as soil type and management practices. Statistical analyses, the Kolmogorov-Smirnov test to assess normality, appropriate correlation coefficient calculations, and comparison of averages, were conducted to compare data across different stations. Trend analysis of the selected index was performed using non-parametric Mann-Kendall tests and Sen's estimator.

3. Discussion and results

Monthly temperature data were utilized to compute potential evaporation employing the Thornthwaite technique. The findings revealed that the Jajarm station, characterized by arid climatic conditions, exhibited the highest average evaporation rate within the province, while the Faruj station, experiencing semi-arid climatic conditions, displayed the lowest evaporation rate. Furthermore, the aridity index, denoting the ratio of average precipitation to average annual evaporation and transpiration, was determined for various stations. The USDAsim method was selected among four methods to estimate effective precipitation. Evaluation of the root mean square error between the two indices indicated that their disparity was minimal in the arid Jajarm station, escalating as the region's humidity increased. Pearson's correlation coefficient values every month across all stations demonstrated a strong correlation between the two indices. Additionally, a t-test was conducted to compare the monthly averages of the two indices, revealing no significant distinction at the 5% level across any of the stations. Analysis of the correlation coefficient between the indices and the annual wheat yield indicated that specific periods were influential in different stations. For instance, in Shirvan and Faruj, the period from April to June was significant, while in Mane and Samalghan, the period from November to January was crucial. In Bojnord, the period from November to May was influential, and in Jajarm, the period from October to June was significant. Trend analysis unveiled a negative slope solely for the Bojnord and Esfarayen stations, with statistical significance observed only at the Bojnord station using the Mann-Kendall test at the 5% level. Conversely, positive trends, albeit insignificant, were noted in other stations. Notably, the most pronounced decreasing and increasing trends were associated with the Bojnord and Faruj stations, respectively. Graphical

representation of the Mann-Kendall test illustrated a declining trend in Bojnord, Esfarayen, Mane, and Samalghan, no discernible trend in Shirvan, and a non-significant upward trend in Faruj.

4. Conclusion

The significance of this study lies in the unique phenology of wheat and its heightened vulnerability to moisture deficiency during specific growth stages. Therefore, it is imperative to establish a distinct reference time frame for each city based on climate conditions. The eRDI accurately incorporates the concept of usable plant precipitation in its calculations. Analysis of the eRDI method's periods reveals that each city exhibits a unique performance period based on its climatic and geographical characteristics, highlighting the necessity to reassess the utilization of specific time frames in comparative studies across different cities. Trend analysis results indicate the effectiveness of the Mann-Kendall test and sen's estimator in identifying yield trends, such as the declining trend in Bojnord and Esfarayen and the increasing trend in other locations. While a longer-term dataset is required for a more accurate trend diagnosis, these findings can inform analysis and planning efforts in food security, particularly in areas under wheat cultivation.

5. Acknowledgment & Funding

- The authors would like to thank the anonymous reviewers for their valuable comments.
- The manuscript did not receive a grant from any organization

6. Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.





دانشگاه حکیم سبزواری

مطالعات جغرافیایی مناطق خشک



تحلیل روند عملکرد گندم با استفاده از شاخص‌های شناسایی خشک‌سالی

در استان خراسان شمالی

مهدی تیموری^۱، ساویز صادقی^۲

۱- نویسنده مسئول، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی شیروان، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران. M.teimouri@ub.ac.ir

۲- گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران. s-sadeghi@araku.ac.ir

چکیده:

هدف: درک اثرات خشکی بر محصولات کشاورزی یکی از مسائل مهم در امنیت غذایی است. لذا در این تحقیق از شاخص شناسایی خشکی (RDI) و شاخص شناسایی خشکی مؤثر (eRDI) که بارش مؤثر را در محاسبات لحاظ می‌کند، به منظور تعیین عملکرد گندم در استان خراسان شمالی استفاده شده است.

روش و داده: به منظور اعمال بارش مؤثر از ۴ روش شامل روش‌های فائو، اداره عمران و آبادانی آمریکا و دو روش سرویس حفاظت خاک آمریکا و مقایسه بین آن‌ها استفاده شد. شاخص‌ها با استفاده از داده‌های ماهانه بارش و دمای ماهانه ایستگاه‌های هواشناسی استان اجرا و با عملکرد تولید گندم در دوره‌های مختلف زمانی مقایسه و ضریب همبستگی بین دو روش و عملکرد تولید گندم تعیین شد. در نهایت با استفاده از آزمون من کندال و تخمین گر سن به بررسی روند عملکرد گندم در شهرستان‌های مختلف پرداخته شد.

یافته‌ها: نتایج تحقیق نشان داد که بین روش‌های مختلف تعیین بارش مؤثر تفاوت چندانی وجود ندارد. همچنین آماره آزمون نیز تفاوت معنی‌داری بین ۲ شاخص مورد بررسی نشان نداد. لیکن نتایج تحلیل ضریب همبستگی شاخص‌ها با عملکرد گندم در مقیاس‌های زمانی مختلف نشان داد که علیرغم نتایج بهتر روش eRDI، عملکرد تولید هر شهرستان به مقادیر بارش دوره زمانی خاصی حساس‌تر است.

نتیجه‌گیری: نتایج مشابه روند دو آزمون مورد بررسی نشان داد که روند منفی معنی‌دار در تولید گندم در ایستگاه‌های بجنورد و اسفراین و روند مثبت غیرمعنی‌دار در سایر شهرستان‌ها وجود دارد.

نوآوری، کاربرد نتایج: نوآوری این تحقیق اعمال بارش مؤثر در شاخص eRDI و مقایسه روش‌های تجربی مختلف تعیین آن جهت ورود به معادلات شاخص مزبور است. این استان به دلیل شرایط خاص اقلیمی و نقش مهم آن در تولید گندم کشور دارای اهمیت خاصی است که تاکنون مطالعات خشک‌سالی کشاورزی چندانی در آن صورت نگرفته است و اهمیت موضوع را در امنیت غذایی منطقه مشخص می‌سازد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

شماره: ۱۵

دوره: ۵۷

صفحه: ۱۳۹-۱۲۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۳

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۱۱

کلیدواژه‌ها:

- مقیاس زمانی
- تولید گندم
- جهش
- روند
- امنیت غذایی

نحوه ارجاع به این مقاله:

تیموری، مهدی و صادقی، ساویز. (۱۴۰۳). تحلیل روند عملکرد گندم با استفاده از شاخص‌های شناسایی خشک‌سالی در استان خراسان شمالی. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۱۵ (۵۷): ۱۳۹-۱۲۲.

doi: 10.22034/jargs.2024.437263.1087

ناشر: دانشگاه حکیم سبزواری



© نویسنده(گان).



10.22034/jargs.2024.437263.1087

۱- مقدمه

اگرچه با توجه به دیدگاه‌های مختلف، تعاریف متعددی برای خشک‌سالی وجود دارد، عمده‌ترین متغیر مشترک در تمام آن‌ها، متغیر بارش است. این پدیده یک دوره ممتد و غیرطبیعی بارش در منطقه است که منجر به صدمه محصولات زراعی و غیر زراعی، کاهش عملکرد آن‌ها و همچنین کاهش جریان‌های آب سطحی و زیرزمینی می‌شود. خشک‌سالی به عنوان یک مخاطره محیطی تقریباً در انواع مختلف اقلیم رخ می‌دهد و منجر به تأثیرات اقتصادی و اجتماعی شدیدی می‌گردد. به خصوص خشکی کشاورزی که با عوامل مختلف خشکی هواشناسی و سایر عوامل گیاهی مانند نوع گیاه، طول دوره رشد و سایر خصوصیات فنولوژی گیاهی مرتبط است. در نتیجه خصوصیات رطوبتی خاک و در دسترس بودن سطحی از رطوبت در زمان‌های مختلف از عوامل تأثیرگذار در رشد گیاه است (Altieri, 2018). در نتیجه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که به کشاورزی دیم وابسته هستند، مطالعات خطر خشکی ابزار مهمی برای ارزیابی خطر محصولات کشاورزی، سلامت و امنیت غذایی است؛ زیرا در این مناطق تغییرات میزان بارش در مقیاس زمانی فصلی و سالانه بالا است که در صورت وابستگی شدید گیاه به تغییرات رطوبت، کمیت و کیفیت محصول زراعی به شدت تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. پایش و تحلیل این پدیده به خصوص در کشور ایران با اقلیم خشک و نیمه‌خشک بسیار ضروری بوده و بدین لحاظ تحقیقات متعددی از جنبه‌های گوناگون در این زمینه انجام شده است. تحقیقات مزبور در قالب بررسی و پیش‌بینی در دو مقیاس کوتاه‌مدت و بلندمدت (تغییر اقلیم) از دیدگاه‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و انسانی انجام شده است.

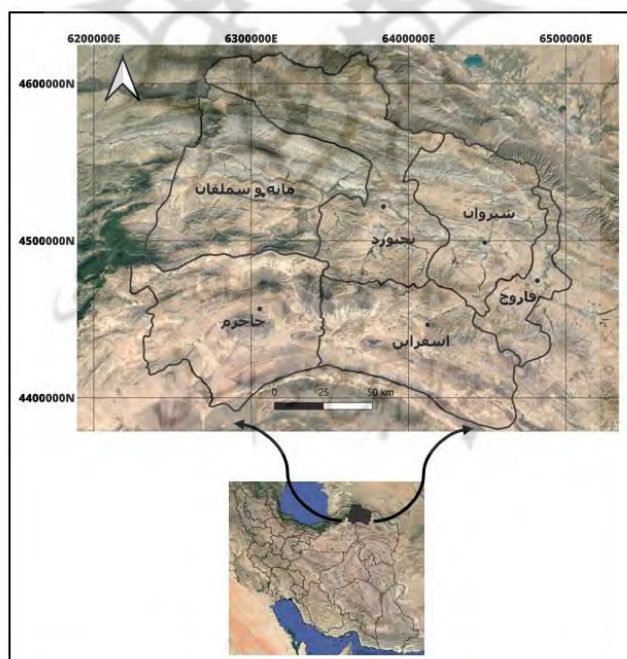
از آنجایی که در شرایط معمول، غالب تصمیمات مدیریتی به صورت نگاه مقطعی انجام می‌شود، تحلیل کوتاه‌مدت به لحاظ عملی و کاربردی ارزش ویژه‌ای دارد. به این دلیل، شاخص‌های متعددی به منظور تحلیل خشک‌سالی توسعه یافته که انجام تحلیل روند و پیش‌بینی‌های آماری را ساده‌تر می‌سازد. از آن جمله می‌توان به شاخص SPI اشاره نمود که صرفاً با دارا بودن متغیر بارش به شناسایی خشک‌سالی اقلیمی می‌پردازد. هرچند برخی تحقیقات از جمله علی‌زاده و همکاران (Alizadeh et al., 2019) به پایش خشک‌سالی کشاورزی غرب استان گلستان با استفاده از این شاخص پرداخته و عملکرد گندم را در برخی شهرهای مورد مطالعه به صورت همبستگی مثبت و معنی‌دار با SPI سه ماهه منتهی به اردیبهشت ارزیابی نمودند. به تدریج با لحاظ نمودن متغیر دما در مدل‌ها، شاخص‌هایی مانند شاخص شناسایی خشک‌سالی (RDI) (Tsakiris et al., 2007) و شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010) توسعه داده شدند که مطالعات متعدد به بررسی کارایی آن‌ها در خشک‌سالی هواشناسی پرداخته‌اند (مانند Ghaznavi et al., 2021, Nikbakht & Hadeli, 2021, Ahmadi et al., 2023, Teimouri et al., 2023, Merabti et al., 2018, Zarei et al., 2021, Moghimi et al., 2019, Javan, 2021, Nassajian et al., 2021, al., 2021, Tigkas et al., 2019, Dabanli, 2018, Tigkas et al., 2022). که برخی از این شاخص‌ها به واسطه تأثیر متغیر دما و تبخیر و تعرق در تحلیل عملکرد محصولات زراعی و پیش‌بینی خشک‌سالی کشاورزی نتایج خوبی نشان داده‌اند. مثلاً شکوهی (Shokoohi, 2012) در مقایسه دو شاخص SPI و RDI برای تحلیل خشک‌سالی کشاورزی در قزوین و تارکستان به حساسیت بیشتر شاخص RDI در خشک‌سالی‌های بسیار شدید و نتایج بهتر آن اشاره نمود. خلیلی و همکاران (Khalili et al., 2011) نیز در تحقیق مشابهی در مناطق اقلیمی مختلف ایران نتیجه مشابهی به دست آوردند. همچنین گزارشات مختلف علمی الگوهای متعدد نوسانی متغیرهای بارش و دما را گزارش کرده‌اند (IPCC 2013, 2014) و به استناد آن‌ها برخی محققین در شرایط تغییر اقلیم به مزایای شاخص RDI اشاره نموده‌اند (مانند Sidiqi et al., 2023, Shokoohi & Morovvati, 2015, Asadi et al., 2015). این شاخص از برآزش تابع توزیع لوگ‌نرمال دو پارامتری به نسبت بارش به تبخیر و تعرق استاندارد شده به دست می‌آید. ولی برخی محققین به نتایج بهتر تابع توزیع گاما اشاره نموده‌اند (مانند Tsakiris et al., 2008). زارعی و همکارانش (Zarei et al., 2019) نیز به مقایسه دو شاخص RDI و eRDI برای ارزیابی شدت خشکی در شهرهای مختلف ایران پرداخته و نتیجه گرفتند که اختلاف دو شاخص در سطح ۵ درصد در شهرهای با اقلیم خشک و نیمه‌خشک معنی‌دار و در شهرهای با اقلیم مرطوب و نیمه‌مرطوب معنی‌دار نیست. در خارج از کشور نیز تیگ کاس (Tigkas, 2016) شاخص RDI را با جایگذاری مفهوم بارش مؤثر در کشاورزی اصلاح نمود و شاخص eRDI را ارائه داده و در تحقیق دیگری به نتایج بهتر شاخص اصلاح شده اشاره نمودند (Tigkas et al., 2017). آن‌ها شاخص اصلاح شده را برای تعیین خشک‌سالی کشاورزی در اقلیم‌های مختلف نسبت به شاخص RDI توصیه نمودند. محامد و همکاران (Mohammed et al., 2022) به ارزیابی اثرات خشکی کشاورزی با شاخص SPI/SPEI در تولید گندم و ذرت کشور مجارستان در بازه زمانی سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۰ پرداخته و عملکرد آن‌ها را در بخش مرکزی و غربی کشور نامطلوب دانستند. الکسیاک و همکاران (Oleksiak et al., 2022) نیز به بررسی اثر خشک‌سالی بر تولید گندم در شش منطقه آب و هوایی لهستان با استفاده از شاخص

SPI و ضریب هیدروترمال پرداخته و مناطقی که بیشترین تلفات عملکرد ناشی از خشک‌سالی داشتند را مشخص نمودند. باتی و همکاران (Bhatti et al., 2023) نیز با به‌کارگیری شاخص‌های مختلف مانند SPI، eSPI، RDI و eRDI به اثر مخاطرات اقلیمی بر کشاورزی پاکستان پرداخته و به تحلیل مزایای روش eRDI و اهمیت استفاده از مقیاس‌های زمانی صحیح پرداختند. هدف اصلی این تحقیق مقایسه دو شاخص RDI و eRDI در دوره‌های زمانی مختلف برای تعیین روند عملکرد گندم در استان خراسان شمالی است که نوآوری این تحقیق نیز محسوب می‌شود. به دلیل اعمال بارش مؤثر در شاخص eRDI به مقایسه روش‌های تجربی مختلف تعیین آن جهت ورود به معادلات شاخص مزبور پرداخته خواهد شد. این استان به دلیل شرایط خاص اقلیمی و نقش مهم آن در تولید گندم کشور دارای اهمیت خاصی است که تاکنون مطالعات خشک‌سالی کشاورزی چندانی در آن صورت نگرفته است و اهمیت موضوع را در منطقه مشخص می‌سازد. در این مطالعه، از داده‌های ماهانه بارش و دمای متوسط ۶ ایستگاه/شهرستان استان خراسان شمالی در طول دوره آماری ۳۳ ساله (۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰) به همراه مقادیر سالانه عملکرد گندم شهرستان‌های مختلف استان استفاده شده است.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

استان خراسان شمالی (شکل ۱) با وسعت بالغ بر ۲۸ هزار کیلومترمربع با دارا بودن اقلیم‌های متفاوت و توپوگرافی خاص یکی از قطب‌های مهم کشاورزی در کشور بوده که خشک‌سالی‌های متعدد باعث افت شدید آب‌های زیرزمینی و خسارت به کشت محصولات دیم شده است (Maleki & Torkamani, 2015). حدود نیمی از اراضی زراعی استان را زراعت دیم تشکیل می‌دهد که رودخانه اترک و سرشاخه‌های متعدد آن اهمیت ویژه‌ای در تأمین منابع آب استان دارد. میزان بارش سالانه از ۱۳۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر متغیر بوده و میانگین آن ۲۲۰ میلی‌متر است. بیشینه آن در شهرستان مانه و سملقان (ایستگاه درکش) با مقدار ۴۶۸ میلی‌متر و کمینه آن با مقدار ۱۲۰ میلی‌متر در ایستگاه جاجرم گزارش شده است. متوسط دمای استان نیز حدود ۱۴/۵ درجه است (جدول ۱).



شکل ۱. موقعیت استان خراسان شمالی در کشور و شهرستان‌های مورد مطالعه

در این پژوهش به منظور بررسی پایش خشک‌سالی کشاورزی از داده‌های بارش و دمای ماهانه ۶ شهر استان (جدول ۱) با طول دوره آماری مشترک از ۱۳۶۸ تا ۱۴۰۰ استفاده شده است. برای تکمیل داده‌های برخی ایستگاه‌های جدیدتر از روش همبستگی در تکمیل و تصحیح و روش آزمون ران برای صحت و همگنی داده‌ها استفاده شد. جهت ارزیابی داده‌های شاخص نیز اطلاعات عملکرد

کشت گندم شهرستان‌های مختلف در طی ۱۸ سال و دوره آماری ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۰ از سال‌نامه‌های آماری استان (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی) و نیز آمارنامه‌های جهاد کشاورزی استان استفاده شد.

جدول ۱. برخی از مشخصات آماری اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه طی دوره آماری مورد مطالعه

عملکرد تولید گندم (کیلوگرم در هکتار در سال)	نوع اقلیم		متوسط دمای سالانه (درجه سلسیوس)	متوسط بارندگی (میلی‌متر)	نام ایستگاه/شهرستان		
	روش دکنتر کریبی						
	انحراف معیار	میانگین				ضریب خشکی	نوع
۲۸۳/۱	۸۹۹/۲	نیمه مرطوب با تابستان معتدل و زمستان سرد	۱۰/۹	نیمه- خشک	۱۳/۵	۲۵۱/۶	بجنورد
۳۱۸/۷	۷۵۷/۳	نیمه مرطوب با تابستان معتدل و زمستان بسیار سرد	۹/۷	خشک	۱۳/۲	۲۲۹/۸	شیروان
۲۵۶/۸	۵۲۲/۳	نیمه خشک با تابستان گرم و زمستان سرد	۷/۴	خشک	۱۴/۹	۱۸۸/۴	اسفراین
۲۶۴/۴	۸۹۱/۸	نیمه خشک با تابستان گرم و زمستان سرد	۱۱	نیمه- خشک	۱۵/۹	۲۸۶/۵	مانه و سملقان
۳۴۰/۷	۷۵۴/۸	نیمه مرطوب با تابستان معتدل و زمستان سرد	۱۰/۵	نیمه- خشک	۱۳/۱	۲۴۵/۳	فاروج
۳۷۵/۳	۶۵۲/۴	خشک با تابستان گرم و زمستان سرد	۷/۰۷	خشک	۱۶/۲	۱۲۲/۴	جاجرم

۲-۲- روش پژوهش

➤ مفهوم بارش مؤثر

بارش مؤثر از دیدگاه‌های متفاوتی تعریف شده است. از دیدگاه کشاورزی، بخشی از بارش (رواناب سطحی) است که پاسخگوی نیاز آبی گیاه بوده یا برای رشد گیاه قابل دسترس باشد و مقدار آن معادل تفاوت بارش نازل یافته و رواناب و تبخیر است (Khaleghi, 2016). مقدار واقعی آن از طریق اندازه‌گیری مستقیم با لایسیمتر (دقیق‌ترین)، معادله بیلان آب منطقه و یا روش‌های تجربی به دست می‌آید. ولی مقدار برآوردی آن به دلیل تأثیرپذیری توسط عوامل مختلفی از جمله توپوگرافی، خصوصیات خاک، دما، رطوبت و سرعت باد، مشکل است (Roudier & Mahe, 2010). هرچند که برخی تحقیقات قبلی، روش سرویس حفاظت خاک ایالات متحده (USDA) (Smith, 1992) را مناسب‌ترین روش جهت برآورد بارش مؤثر در مناطق خشک و نیمه‌خشک معرفی نموده‌اند (مانند Rahimi et al., 2013, khaleghi, 2016) در ادامه به معرفی اجمالی ۴ روش که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند پرداخته می‌شود.

الف. روش وزارت کشاورزی آمریکا که در مدل CROPWAT هم از آن استفاده می‌شود (معادله ۱):

$$P_e = P * (125 - 0.2P) / 125 \quad \text{for } P < 250 \text{ mm} \quad (1)$$

$$P_e = 0.1P + 125 \quad \text{for } P > 250 \text{ mm}$$

که P_e بارش مؤثر و P بارش ماهانه است.

ب. روش FAO (Brouwer & Heibloem, 1986) که در شیب‌های حداکثر ۵ درصد مورد استفاده قرار می‌گیرد (معادله ۲):

$$P_e = 0.6P - 10 \quad \text{for } P < 70 \text{ mm} \quad (2)$$

$$P_e = 0.8P - 25 \quad \text{for } P \geq 70 \text{ mm}$$

ج. روش اداره عمران و آبادانی آمریکا (USBR) (Stamm, 1967) که بر اساس کلاس‌های طبقات بارش ماهانه انجام می‌شود و صرفاً برای مناطق خشک و نیمه‌خشک توصیه می‌شود (Tigkas et al., 2018). برای دسترسی به جدول کلاس طبقات به منبع ذکر شده مراجعه شود.

د. روش وزارت کشاورزی آمریکا USDA sim که اصل معادله روش فوق بر اساس عوامل تبخیر و تعرق (ET_C) و ذخیره آب خاک (SF) استوار است (Hess, 2010) (معادله ۳):

$$P_e = 25.4 SF(0.04931P^{0.82416} - 0.11565)10^{0.000955ET_C} \quad (3)$$

$$SF = 0.531747 + 0.011621D - 8.94310^{-5}D^2 + 2.32110^{-7}D^3$$

D ذخیره آب خاک قابل استفاده است. حالت ساده شده معادله فوق بر اساس یک‌سری مفروضات و ساده‌سازی قابل برآورد است. برای توضیحات بیشتر به منبع تیگ کاس و همکاران (Tigkas et al., 2018) مراجعه شود.

➤ شاخص شناسایی خشکی (RDI) و خشکی مؤثر (eRDI)

شاخص شناسایی خشکی توسط تساکیریس و همکاران (Tsakiris et al., 2007) با این استدلال که متغیر بارش به تنهایی قادر به توصیف خشک‌سالی نیست، ابداع شد. آن‌ها تأثیر دما و متعاقباً تبخیر و تعرق در رطوبت در دسترس گیاهان را در شاخص خود گنجانده و معادله‌های (۱) تا (۳) را در سه شکل مقدار اولیه (معادله ۴)، مقدار نرمال شده شاخص (معادله ۵) و مقدار استاندارد شده (معادله ۶) ارائه نمودند (Tigkas et al., 2017).

$$a_k = \frac{\sum_{j=1}^k P_j}{\sum_{j=1}^k PET_j} \quad (4)$$

$$RDI_n(k) = \frac{a_k}{\bar{a}_k} - 1 \quad (5)$$

$$RDI_{st}(k) = \frac{y_k - \bar{y}_k}{\sigma_k^k} \quad (6)$$

که در معادلات فوق P و PET به ترتیب بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل در ماه z هستند. k نیز شماره ماه، y_k معادل $\ln a_k$ و σ انحراف معیار است. هرچند ارائه‌دهندگان مدل فرض کردند که a_k از توزیع لوگ نرمال تبعیت می‌کند، برخی محققان به برتری تابع گاما نسبت به لوگ نرمال اشاره نمودند (Tsakiris et al., 2008). برای توضیحات بیشتر و دسترسی به جدول طبقه‌بندی شاخص RDI به منابع تیگ کاس و همکاران (Tigkas et al., 2017) و زارعی و همکاران (Zarei et al., 2019) مراجعه شود. در شاخص شناسایی خشکی مؤثر، بارش مؤثر (P_e) جانشین بارش کل می‌شود و به صورت معادله (۷) درمی‌آید.

$$a_{e(k)} = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ej}}{\sum_{j=1}^k PET_j} \quad (7)$$

سایر معادلات نیز مشابه معادلات شاخص RDI است. همچنین طبقات شاخص اصلاح شده نیز مشابه شاخص اصلی است. با توجه به اینکه هدف از شاخص اصلاح شده، کاربرد در زمینه بررسی خشک‌سالی کشاورزی است، انتخاب دوره‌های مرجع زمانی و دوره‌های زمانی مؤثر در رشد گیاه حائز اهمیت است. در مورد گیاهان زراعی، انتخاب دوره مرجع مناسب بر اساس مراحل توسعه و رشد گیاه بوده و شامل کل دوره توسعه گیاه یا بخش خاصی از مراحل رشد است. شروع این دوره مصادف با کشت محصول است که در مناطق مختلف متغیر است. مثلاً ممکن است وقتی یک گونه زراعی خاص در منطقه‌ای برداشت می‌شود، در منطقه دیگری با اقلیم متفاوت کشت شود. در چارچوب این تحقیق، اثربخشی شاخص RDI و eRDI در نمایش آثار خشک‌سالی عملکرد گندم از طریق همبستگی آن‌ها با تولید در یک سری زمانی ارزیابی می‌شود. در محاسبات مربوط به شاخص‌ها از نرم‌افزار DrinC (Tigkas et al., 2015) استفاده شده است. از آنجایی که عملکرد گیاهان زراعی هر منطقه به دلیل نوع خاک، مدیریت و ... قابل مقایسه با یکدیگر نیستند، جهت روند زدایی از داده‌های مزبور از عملکرد استاندارد شده هر شهرستان مطابق رابطه (۸) استفاده شد (Lington et al., 2013).

$$S_t Y = Y_j - \bar{Y} / \sigma \quad (8)$$

که Y_j و \bar{Y} عملکرد محصول سالانه و میانگین هر شهر و σ انحراف معیار عملکرد در طی دوره آماری ۱۳۸۳-۱۴۰۰ است.

➤ مقایسه داده‌ها و تحلیل روند

برای مقایسه داده‌ها از جمله دو شاخص در ایستگاه‌های مختلف، ابتدا آزمون کولموگروف اسمیرنوف جهت بررسی نرمال بودن آن‌ها انجام شده و با توجه به آماره آن در مورد استفاده از ضریب همبستگی مناسب و همچنین مقایسه میانگین اقدام می‌شود. به منظور

تعیین روند شاخص منتخب نیز از دو آزمون ناپارامتری من-کندال و تخمین گر سن استفاده شد. با آزمون من-کندال وجود روند شیب روند خطی با تخمین گر ناپارامتری سن انجام می‌شود.

آماره S در سری زمانی m_1, m_2, \dots, m_n با استفاده از معادله (۹) به دست می‌آید.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(m_j - m_k) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{sign}(m_j - m_k) &= +1 \text{ if } m_j - m_k > 0 \\ &= 0 \text{ if } m_j - m_k = 0 \\ &= -1 \text{ if } m_j - m_k < 0 \end{aligned}$$

که n طول داده‌ها و m_j و m_k مقادیر مشاهداتی در زمان‌های j و k هستند. مقادیر مثبت روند افزایشی و مقادیر منفی روند کاهش‌ی در سری داده‌ها هستند. واریانس آماره $VAR(S)$ از معادله (۱۰) به دست می‌آید.

$$VAR(S) = \frac{1}{18} \{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^p \tau_i(\tau_i-1)(2\tau_i+5)\} \quad (10)$$

که τ_i تعداد گره با ظرفیت i است. آماره Z آزمون نیز از رابطه (۱۱) به دست می‌آید.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}}, & \text{If } S > 0 \\ 0, & \text{If } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}}, & \text{If } S < 0 \end{cases} \quad (11)$$

که مقادیر مثبت و منفی آماره Z یانگر روند صعودی یا نزولی داده‌ها هستند.

روش تخمین گر سن مانند روش من-کندال بر اساس تفاضل‌های بین سری داده‌ها استوار است. بدین صورت که ابتدا شیب بین هر جفت داده محاسبه شده و با محاسبه میانه سری زمانی شیب‌های به دست آمده، شیب خط روند به دست می‌آید.

۳- یافته‌ها

به منظور استفاده از شاخص مناسب در تطابق با عملکرد محصول گندم در استان خراسان شمالی، شاخص‌های RDI و eRDI در شهرستان‌های مختلف استان که دارای آمار هواشناسی میان مدت ۳۳ ساله (۱۳۶۸ تا ۱۴۰۰) بارش ماهانه بودند، در مقیاس‌های زمانی مختلف به کار گرفته شد. از داده‌های دمای متوسط ماهانه برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل از روش تورنت‌وایت استفاده شد. نتایج تبخیر و تعرق پتانسیل محاسباتی نشان داد که ایستگاه جاجرم با شرایط اقلیمی خشک دارای بالاترین میزان میانگین تبخیر در استان (۱۰۷۰/۴ میلی‌متر در سال) و ایستگاه فاروج با شرایط اقلیمی نیمه‌خشک کمترین میزان تبخیر در استان (۷۳۲ میلی‌متر) را دارد (جدول ۲). همچنین شاخص خشکی که معرف مقدار متوسط بارش به متوسط تبخیر و تعرق سالانه است برای ایستگاه‌های مختلف تعیین گردید که با توجه به اینکه مقدار عددی شاخص ایستگاه جاجرم ۰/۱۳۵ است بیانگر طبقه اقلیمی خشک و ایستگاه مانه و سملقان با مقدار عددی شاخص خشکی ۰/۳۸۵ کمترین میزان خشکی را نسبت به بقیه ایستگاه‌های مورد مطالعه دارد.

جدول ۲. مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل برآورد شده طی دوره زمانی مورد مطالعه در ایستگاه‌های مورد مطالعه

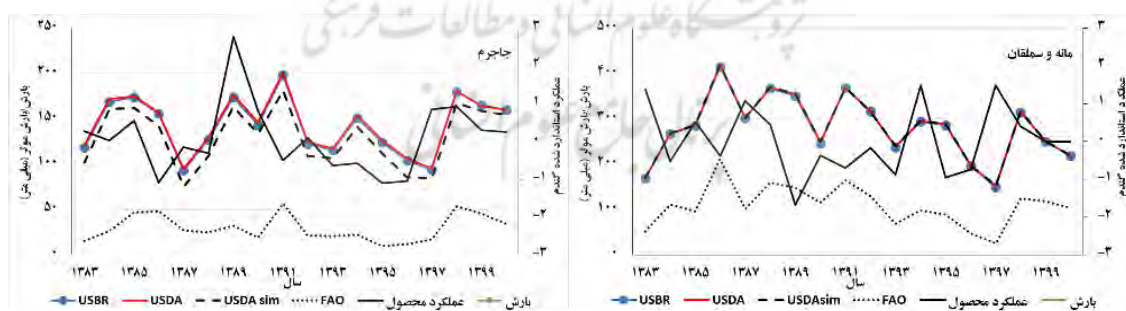
نام ایستگاه/شهرستان	میانگین تبخیر سالانه (میلی‌متر)	حداقل	حداکثر	ضریب تغییرات	شاخص خشکی	طبقه اقلیمی UNEP (۱۹۹۲)
بجنورد	۷۷۱/۵	۶۷۸/۷	۸۸۲/۵	۵/۲۷	۰/۳۲	نیمه خشک
شبروان	۷۸۶/۸	۶۵۷/۴	۸۳۹/۱	۶/۷۴	۰/۳۶۶	نیمه خشک
اسفراین	۸۴۴/۴	۷۷۸/۵	۹۴۳/۸	۶/۷۱	۰/۳	نیمه خشک
مانه و سملقان	۸۰۹/۱	۷۳۸	۹۴۹/۳	۵/۷۶	۰/۳۸۵	نیمه خشک
فاروج	۷۳۲	۶۷۲/۴	۷۷۶/۵	۳/۴۹	۰/۳۷	نیمه خشک
جاجرم	۱۰۷۰/۴	۸۸۰/۹	۱۱۹۴	۹/۰۷	۰/۱۳۵	خشک

جهت برآورد بارش مؤثر از چهار روش USDA, USBR, USDAim و FAO استفاده شد تا با هم مقایسه شوند. نتایج مقادیر خطای جذر میانگین مربعات بین بارش ماهانه و بارش مؤثر ماهانه ایستگاه‌های مختلف در جدول (۳) ملاحظه می‌شود. هرچند برای انتخاب بهترین روش بایستی از معادلات بیلان آب استفاده نمود ولی با توجه به اینکه روش FAO نسبت به بقیه روش‌ها مقادیر بسیار متفاوت‌تری نشان می‌دهد و از طرفی این روش برای شیب‌های بین ۶-۵ درصد توصیه شده و بین سایر روش‌ها نیز تفاوت چندانی مشاهده نمی‌شود، لذا از روش USDAim که توسط محققین مختلف توصیه شده جهت ادامه تحقیق استفاده شده است. نکته قابل توجه در جدول مزبور این است که با خشک‌تر شدن اقلیم، میزان خطای مورد بررسی کمتر شده و هرچه اقلیم مرطوب‌تر شود، تفاوت بین مقادیر بارش و بارش مؤثر بیشتر می‌شود که موید این مطلب است که در مناطق خشک، به دلیل بارش کم، قسمت بیشتر آن به صورت بارش مؤثر در آمده و قسمت بسیار کمتری به صورت بارش مازاد وجود دارد. تیگ کاس و همکاران (Tigkas et al., 2018) نیز در بخش‌هایی از کشور یونان بررسی و مقایسه بین ۴ روش مزبور تا بارش ماهانه ۱۲۰ میلی‌متر تفاوت چندانی بین روش‌های مختلف نیافتند و فقط مقادیر روش FAO را کمتر مشاهده نمودند. زارعی و همکارانش (Zarei et al., 2019) نیز در بررسی روش USBR مقادیر خطا را در یزد کمترین مقدار (۰/۵۷۴) و در بندر انزلی بیشترین مقدار (۱۱/۹۴۱) گزارش کردند.

جدول ۳. خطای جذر میانگین مربعات بین بارش ماهانه و بارش مؤثر ماهانه با روش‌های مختلف در ایستگاه‌های مورد مطالعه

FAO	USDAim	USDA	USBR	
۱۸/۵۱	۴	۳/۰۶	۳/۲	بجنورد
۱۹/۰۳	۴/۵۸	۳/۶	۳/۷۲	اسفراین
۱۹/۶۸	۴/۳۵	۳/۳۴	۳/۴	فاروج
۱۳/۴۴	۲/۵	۱/۵	۱/۵۱	جاجرم
۲۱/۲۶	۵/۲۶	۴/۳۶	۴/۷۴	مانه و سملقان
۱۹/۵۹	۳/۹۲	۲/۸۵	۲/۷۹	شیروان

در شکل (۲) مطابقت مقادیر بارش، بارش مؤثر و عملکرد گندم استاندارد شده به عنوان نمونه در ایستگاه جاجرم و مانه و سملقان آورده شده است. انتظار می‌رود که در شهرستانی با اقلیم خشک مثل جاجرم تفاوت زیادی در مقیاس سالانه بین بارش و بارش مؤثر وجود نداشته باشد، لذا نتایج روش FAO به شدت با این موضوع مغایرت دارد. نتایج روش USBR و USDAim نیز تا حدود زیادی با هم منطبق هستند. در مرطوب‌ترین شهرستان استان (مانه و سملقان) هم غیر از روش FAO، سایر روش‌ها در مقیاس سالانه تفاوت چندانی ندارند و تقریباً منطبق هستند. لذا همان‌طور که در سطور بالا اشاره شد با توجه به نتایج مشابه در سایر ایستگاه‌ها و توصیه منابع متعدد در ادامه از نتایج اعمال بارش مؤثر به روش USDAim استفاده شده است.



شکل ۲. مقایسه بین بارش، روش‌های مختلف بارش مؤثر و عملکرد استاندارد گندم سالانه در ایستگاه جاجرم (خشک‌ترین شهر استان) و مانه و سملقان (مرطوب‌ترین شهر استان)

بعد از اعمال بارش، بارش مؤثر و تبخیر و تعرق در دو شاخص مورد بررسی، خروجی ماهانه دو شاخص به دست آمد. نتایج خطای جذر میانگین مربعات بین دو شاخص (جدول ۴) نشان داد در ایستگاه خشک جاجرم اختلاف بین دو شاخص کمترین (۰/۱۴) و با مرطوب‌تر شدن منطقه میزان این اختلاف بیشتر می‌شود (مانه و سملقان با مقدار خطای ۰/۰۲۵). زارعی و همکارانش

(Zarei et al., 2019) نیز خطای مزبور را در کمترین مقدار عددی خود در یزد (۰/۰۰۳۶) و بیشترین مقدار اختلاف را در بندر انزلی (۰/۱) مشاهده نمودند.

جدول ۴. خطای جذر میانگین مربعات بین دو شاخص RDI و eRDI در ایستگاه‌های مورد مطالعه

RMSE			RMSE	
۰/۰۱۴	جاجرم		۰/۰۲۵	بجنورد
۰/۰۲۵	مانه و سملقان		۰/۰۲۳	اسفراین
۰/۰۱۹	شیروان		۰/۰۲۳	فاروج

برای مقایسه آماری نتایج دو شاخص در مقیاس ماهانه، آزمون آماری کولموگروف اسمیرنوف انجام شد (جدول ۵). همان‌گونه که در جدول مزبور مشاهده می‌شود آماره آزمون کولموگروف اسمیرنوف برای مقادیر شاخص‌ها در هیچ‌یک از ایستگاه‌ها معنادار نیست (در سطح یک درصد) و بنابراین مقادیر شاخص‌ها دارای توزیع نرمالی است و می‌توان از تحلیل‌های پارامتریک برای بررسی آماری آن‌ها استفاده کرد. به همین دلیل در ستون بعد جدول (۵) مقادیر ضریب همبستگی پیرسون بین دو شاخص نیز آمده است. همان‌طور که در ستون آخر مشخص است ضریب همبستگی بین دو شاخص بسیار بالا و در سطح یک درصد معنی‌دار است.

جدول ۵. مقادیر آزمون نرمال بودن داده‌های ماهانه شاخص‌ها بر اساس آزمون کولموگروف اسمیرنوف و همبستگی بین آن‌ها

RDI-eRDI	eRDI		RDI		
	Pvalue	Z	Pvalue	Z	
ضریب همبستگی					
۰/۹۹۹۶	۰/۲۴۵	۱/۰۲۵	۰/۲۰۵	۱/۰۶۷	بجنورد
۰/۹۹۹۶	۰/۱۰۳	۱/۳۱۸	۰/۱۰۷	۱/۳۱۱	اسفراین
۰/۹۹۹۷	۰/۰۸۲	۱/۲۶۴	۰/۰۵۲	۱/۲۳۷	فاروج
۰/۹۹۹۸	۰/۱۰۹	۱/۲۰۵	۰/۱۱۳	۱/۱۹۹	جاجرم
۰/۹۹۹۶	۰/۳۶۹	۰/۹۱۸	۰/۳۲۴	۰/۹۵۳	مانه و سملقان
۰/۹۹۹۷	۰/۴۴۵	۰/۸۶۴	۰/۴۳۸	۰/۸۶۸	شیروان

با توجه به مقادیر ضریب همبستگی بالا بین دو شاخص، از آزمون t نیز برای تحلیل مقایسه میانگین دو شاخص استفاده شد (جدول ۶). نتایج آزمون نشان داد که در مقیاس ماهانه در هیچ‌کدام از ایستگاه‌ها بین دو شاخص اختلاف معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) وجود ندارد. زارعی و همکاران (Zarei et al., 2019) نیز در مقایسه دو شاخص به این نتیجه رسیدند که در ایستگاه‌های با اقلیم خشک (مانند یزد) اختلاف معنی‌دار (در سطح ۵ درصد) وجود دارد و در ایستگاه‌های با اقلیم مرطوب و نیمه مرطوب (مانند بندر انزلی، گرگان، همدان و سقز) اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. نتایج کسب شده تا این مرحله نشان داد که در مقیاس ماهانه تفاوت آماری چندانی بین دو شاخص در ایستگاه‌های مورد مطالعه وجود ندارد.

جدول ۶. آزمون مقایسه میانگین داده‌های ماهانه شاخص‌ها

RDI- eRDI		شهر	RDI- eRDI		شهر
Pvalue	t		Pvalue	t	
۰/۱۴۷	-۱/۴۵۳	جاجرم	۰/۰۹۰	-۱/۷۰۳	بجنورد
۰/۱۶۲	-۱/۴	مانه و سملقان	۰/۲۹۷	-۱/۰۴۵	اسفراین
۰/۳۰۶	-۱/۰۲۵	شیروان	۰/۳۴	-۰/۹۵۶	فاروج

در مرحله بعد به صورت خاص به مقایسه نتایج دو شاخص در مقیاس طول دوره‌های زمانی رشد گندم پرداخته شده است. دوره‌های مورد استفاده شامل دوره‌های ۹، ۸، ۷، ۴ و ۳ ماهه است. دوره ۹ ماهه مهر تا خرداد معادل بازه زمانی کمی قبل از کشت تا اواخر برداشت، دوره‌های ۸ ماهه آبان تا خرداد و ۷ ماهه آبان تا اردیبهشت معادل کل دوره توسعه گندم، دوره ۴ ماهه اسفند تا خرداد معادل دوره بحرانی رشد گندم، دوره ۳ ماهه آبان تا دی معادل ابتدای مرحله توسعه و دوره ۳ ماهه فروردین تا خرداد معادل نیمه دوم دوره رشد، دوره‌های زمانی مرجعی هستند که ضریب همبستگی بین آن‌ها و عملکرد سالانه رشد گندم در شهرهای مختلف با استفاده

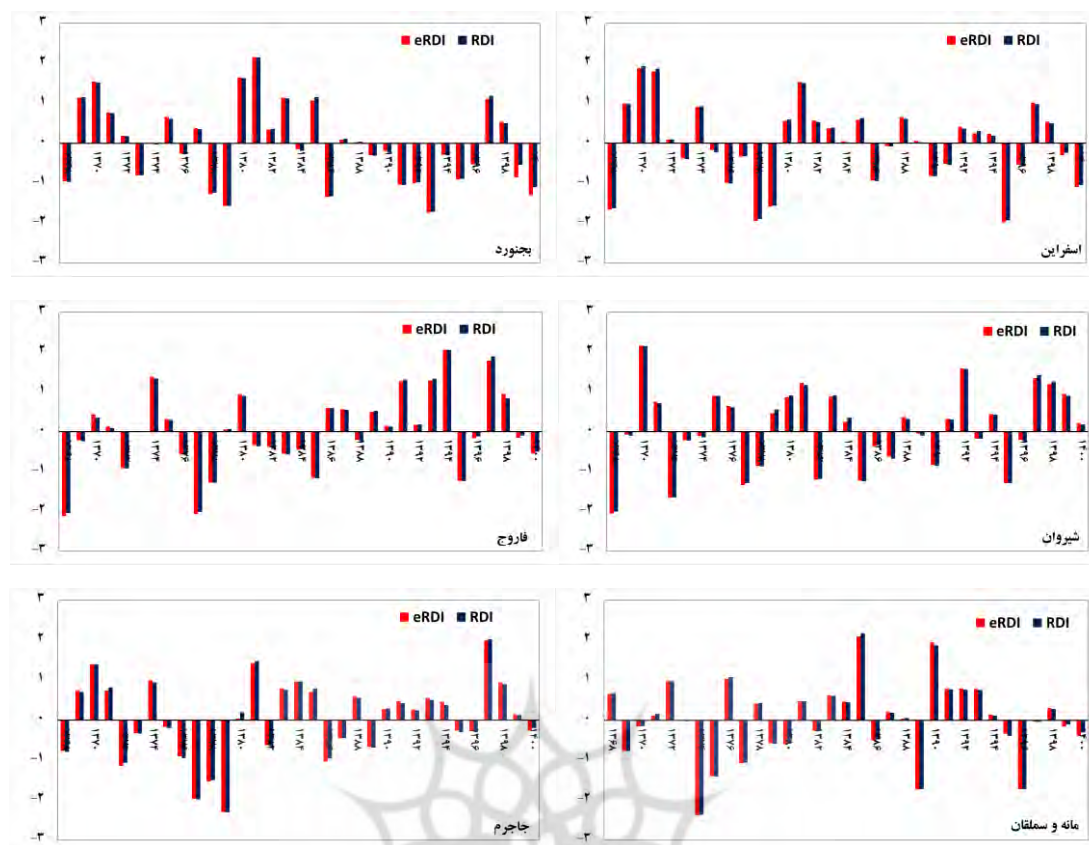
از دو شاخص (جدول ۷) انجام شد تا بهترین شاخص و متعاقباً مؤثرترین دوره زمانی رطوبتی در عملکرد رویشی گندم در استان مشخص شود.

جدول ۷. ضریب همبستگی بین شاخص‌های RDI و eRDI و عملکرد محصول گندم در شهرهای مختلف استان خراسان شمالی در دوره زمانی مورد مطالعه

دوره زمانی	بجنورد		شیروان		فاروج		اسفراین		مانه و سملقان		جاجرم	
	eRDI	RDI	eRDI	RDI	eRDI	RDI	eRDI	RDI	eRDI	RDI	eRDI	RDI
ماه ۳ مهر- خرداد	۰/۴۳۵	۰/۴۳۹	۰/۳۷۴	۰/۳۷۸	۰/۱۱۸	۰/۱۳۷	۰/۴۷	۰/۴۶۶	۰/۳۱۳	۰/۳۱۹	۰/۴۳۷	۰/۴۵۱
ماه ۸ آبان- خرداد	۰/۴۷۴	۰/۴۷۵	۰/۳۶۱	۰/۳۶۶	۰/۱۰۴	۰/۱۲۵	۰/۴۹۳	۰/۴۸۸	۰/۳۷	۰/۳۶	۰/۳۸۷	۰/۳۹۲
ماه ۷ آبان- اردیبهشت	۰/۵۶*	۰/۵۶۳*	۰/۲۶۱	۰/۲۶۵	۰/۰۵۶	۰/۰۲۷	۰/۴۷۸	۰/۴۷۵	۰/۳۱۲	۰/۳۰۵	۰/۳۲۴	۰/۳۳
ماه ۴ اسفند- خرداد	۰/۳۷۶	۰/۳۸۵	۰/۴۷	۰/۴۷۸	۰/۲۱۶	۰/۲۲۵	۰/۶۸۹**	۰/۶۸۸**	۰/۳۲۲	۰/۳۳۱	۰/۳۳۴	۰/۳۳۴
ماه ۶ آبان- دی	۰/۳۰۶	۰/۳۱۹	۰/۰۸۶	۰/۰۸۴	۰/۳۷۴	۰/۳۷۳	۰/۱۹	۰/۱۸۶	۰/۴۰۸	۰/۴۲۱	۰/۲۶۲	۰/۲۵۱
ماه ۴ فروردین- خرداد	۰/۱۳۹	۰/۵۶*	۰/۴۹۷	۰/۵۰۵	۰/۵۱	۰/۵۱۴*	۰/۶۵۲**	۰/۶۵۹**	۰/۴۳	۰/۲۵	۰/۴۲۵	۰/۴۲۶

* و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و یک درصد

آنچه که از نتایج دو شاخص مورد بررسی در جداول بررسی شده قابل دریافت است عدم تفاوت قابل ملاحظه بین آن‌ها بود که در جدول ۷ هم تا حدودی مقادیر ضریب همبستگی مشابه هم، نتایج مزبور را تأیید می‌کند. همچنین مشخص است که غیر از دو دوره زمانی در ایستگاه اسفراین (دوره‌های ۴ ماهه و ۳ ماهه فروردین-خرداد)، در سایر ایستگاه‌ها همبستگی معنی‌دار در سطح یک درصد وجود ندارد. در سطح معنی‌داری یک درصد هم فقط در ایستگاه بجنورد در دو دوره ۷ ماهه و ۳ ماهه فروردین-خرداد (شاخص eRDI) و دوره ۳ ماهه فروردین-خرداد (شاخص eRDI) ایستگاه فاروج، این معنی‌داری ملاحظه می‌گردد. در سایر ایستگاه‌ها علیرغم برتری نسبی (و نه مطلق)، شاخص eRDI نتایج همبستگی بهتری را نسبت به شاخص RDI نشان می‌دهد. در ایستگاه بجنورد بیشترین همبستگی‌ها در دوره‌های ۷ ماهه آبان-اردیبهشت و ۳ ماهه فروردین-خرداد مشاهده می‌شود که ضمن مزیت نسبی روش eRDI اهمیت بارش‌های کل دوره توسعه گندم بخصوص فصل بهار را مشخص می‌سازد. در ایستگاه شیروان بیشترین عملکرد گندم منطقه ناشی از دوره ۳ ماهه فروردین-خرداد است که علیرغم همبستگی غیر معنی‌دار، تأثیرپذیری بیشتر عملکرد محصول از بارش-های بهاره و مزیت نسبی شاخص eRDI را مشخص می‌کند. در ایستگاه فاروج نیز مشابه ایستگاه شیروان به دلیل شباهت اقلیمی با شیروان نتایج مشابهی ملاحظه می‌شود و اهمیت بارش‌های بهاره که در انتهای دوره رشد مؤثرترند، بارز است. در ایستگاه اسفراین، با گرم‌تر شدن منطقه و بارش کم نسبت به سه منطقه قبلی مورد بررسی، تأثیر بارش ماه اسفند کمی بیشتر جلوه می‌کند و دوره ۴ ماهه اسفند-خرداد ضریب همبستگی بالاتری (۰/۶۸۸) نشان می‌دهد. در ایستگاه مانه و سملقان به‌عنوان مرطوب‌ترین ایستگاه نسبت به سایر ایستگاه‌ها و ضریب تغییرات کمتر بارش، بارش ۳ ماهه دوره آبان-دی متضمن افزایش عملکرد گندم در منطقه است و ظاهراً به دلیل بارش منظم بهاره، بارش دوره ابتدای رشد گندم اهمیت خود را بیشتر نمایان می‌سازد. در ایستگاه جاجرم به‌عنوان خشک‌ترین و کم‌بارش‌ترین شهر استان، بارش بخش کمی از دوره رشد باعث کاهش عملکرد شده و صرفاً با نزول بارش در کل دوره رشد (حتی مقداری قبل از شروع کشت) است که عملکرد بهتری از گندم را مشاهده خواهد شد. به همین دلیل بیشترین همبستگی با عملکرد در دوره ۹ ماهه مهر-خرداد وجود دارد که اهمیت رطوبت خاک قبل از شروع کشت در منطقه به دلیل استقرار سریع بذر را نشان می‌دهد. در شکل ۳ تغییرات مقدار شاخص در دوره‌های زمانی منتخب در ایستگاه‌های مختلف در دوره مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۳. تغییرات مقادیر شاخص‌ها (محور عمودی) در دوره‌های زمانی منتخب در سال‌های مختلف (محور افقی) در ایستگاه‌های مورد مطالعه

در ادامه تحلیل روند با استفاده از دو روش من-کندال و شیب سن برای شاخص eRDI و در دوره‌های زمانی منتخب انجام شد که مقادیر آماره Z من-کندال و آماره Q تخمین‌گر سن در ایستگاه‌های مختلف در جدول (۸) قابل مشاهده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌گردد هر دو آزمون، برای ایستگاه‌های بجنورد و اسفراین شیب منفی را متصور شده‌اند که تنها در ایستگاه بجنورد و با آماره من-کندال معنی‌داری در سطح ۵ درصد قابل مشاهده است. در سایر ایستگاه‌ها روند مثبت - ولی غیر معنی‌دار- ملاحظه می‌گردد. همچنین پرشیب‌ترین روند کاهشی و افزایشی به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های بجنورد و فاروج است.

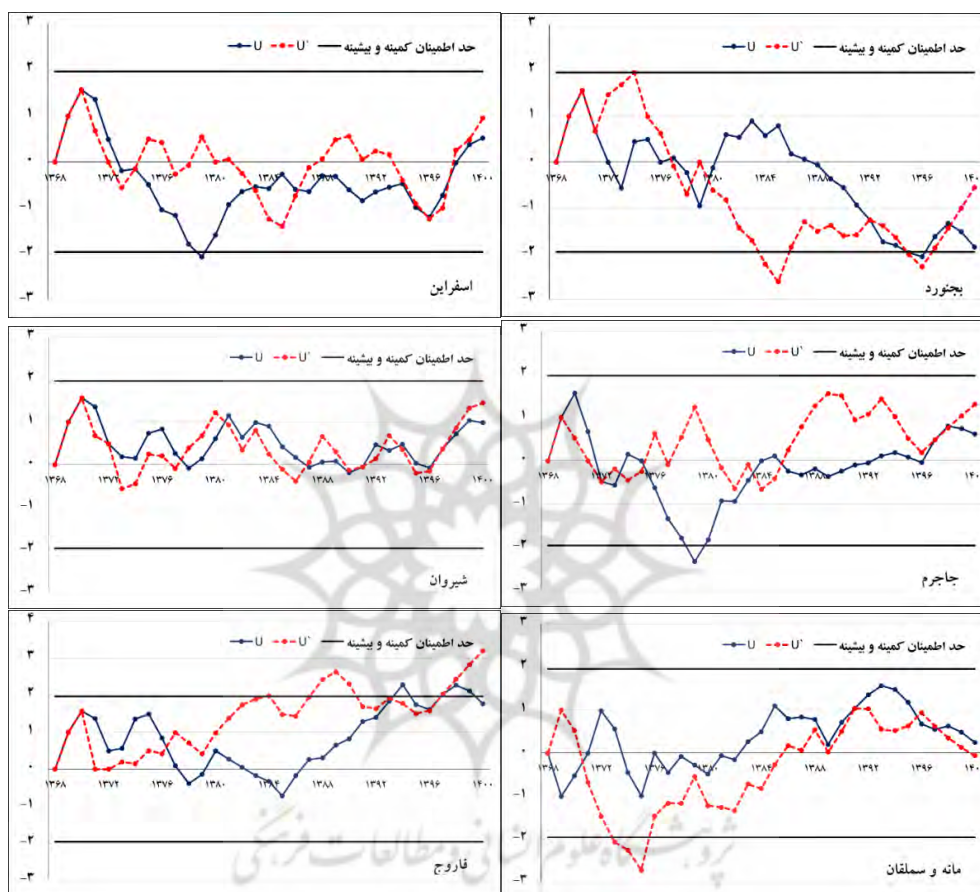
جدول ۸. مقادیر آماره Z من کندال و آماره Q تخمین‌گر سن در دوره‌های زمانی منتخب در ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام ایستگاه	آماره Z	آماره Q
بجنورد	-۱/۱۹*	-۰/۰۲۴
شیروان	۰/۳۶	۰/۰۱۱
اسفراین	-۰/۷۱	-۰/۰۲۴
مانه و سملقان	۰/۵۴	۰/۰۱۵
فاروج	۱/۱۲	۰/۰۴۶
جاجرم	۰/۴۶	۰/۰۱۹

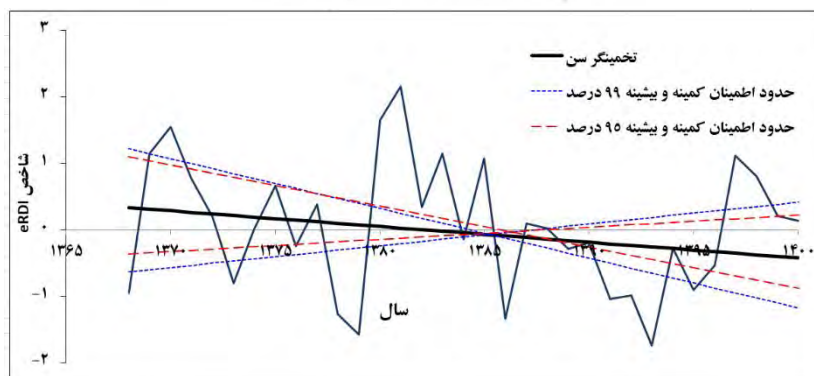
* معنی‌داری در سطح ۵ درصد

نمایش گرافیکی آزمون من-کندال که در آن نوسانات، جهش‌ها و تغییر روندهای معنی‌دار و غیر معنی‌دار (در سطح ۵ درصد) قابل بررسی است برای ایستگاه‌های مختلف در شکل ۴ آورده شده است. در نمودار مربوط به ایستگاه بجنورد نیز هرچند نوسانات متعددی از متغیر دیده می‌شود ولی روند کلی مقادیر شاخص نزولی است. در ایستگاه اسفراین نیز چندین نوسان و جهش غیر معنی‌دار

به همراه روند نزولی دیده می‌شود. در ایستگاه جاجرم، هرچند بین سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۷۹ روند نزولی متغیر ملاحظه می‌شود ولی روند کلی شاخص صعودی غیر معنی‌دار است. در ایستگاه مانه و سملقان علیرغم اینکه حدود سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۳۷۵ روند نزولی متغیر مشاهده می‌شود ولی از آن سال به بعد روند صعودی غیر معنی‌دار ملاحظه می‌گردد. در ایستگاه شیروان جهش‌ها و نوسانات زیاد متغیر ملاحظه می‌گردد که منجر به روند معنی‌داری نشده است. در ایستگاه فاروج نوسانات ترسالی و خشک‌سالی متعددی دیده می‌شود که در مجموع نمودار روند صعودی معنی‌دار به خود گرفته است. شکل ۵ نیز آماره Q تخمین‌گر سن، روند شیب و حدود اطمینان در ایستگاه بجنورد را به عنوان نمونه نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۸، آماره Q ایستگاه بجنورد مقدار ۰/۰۲۴- را نشان می‌دهد انتظار روند نزولی متغیر وجود دارد که در شکل ۵ مشخص است.



شکل ۴. نمایش گرافیکی مقادیر eRDI (محور عمودی) در دوره زمانی منتخب با آزمون من-کندال در سال‌های مختلف (محور افقی) (محدوده اطمینان ۹۵ درصد)



شکل ۵. شیب تخمینگر سن در مقادیر شاخص eRDI دوره زمانی منتخب ایستگاه بجنورد

۴- بحث و نتیجه گیری

در پژوهش حاضر مقایسه دو شاخص RDI و eRDI و انتخاب بهترین گزینه از طریق مطابقت با عملکرد محصول گندم دیم به منظور تحلیل و پیش بینی روند انجام گرفت. بدین منظور از داده‌های ۳۳ ساله هواشناسی ۶ شهر استان خراسان شمالی طی سال‌های ۱۳۶۸ تا ۱۴۰۰ استفاده شد. بخشی از اهمیت پژوهش به دلیل فنولوژی خاص گندم و حساسیت مضاعف آن به کمبود رطوبت در برخی دوره‌های خاص رشد آن است. لذا تعیین دوره زمانی مرجع مختص هر شهر با اقلیم متفاوت بسیار ضروری به نظر می‌رسد. شاخص اصلاح شده RDI که به جایگزینی بارش مؤثر در شاخص اصلی پرداخته، میزان بارش قابل استفاده گیاه در محاسبات را لحاظ می‌کند. به همین دلیل ۴ روش تجربی مختلف تعیین بارش مؤثر نیز مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج مؤید این مطلب بود که روش USDA نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد که رحیمی و همکاران (Rahimi et al., 2013) و خالقی (khaleghi, 2016) هم این روش را در مناطق خشک و نیمه‌خشک توصیه نموده بودند و با نتایج آن‌ها مطابقت دارد. بررسی نتایج دوره‌های زمانی روش eRDI هم نشان داد که هر شهر با توجه به شرایط اقلیمی و جغرافیایی، دوره زمانی مختص خود در عملکرد محصول را دارد و این نکته که در مطالعات مختلف از دوره‌های زمانی مشخصی برای مقایسه شهرها استفاده شده، نیاز به بازبینی مجدد دارد. این موضوع با نتایج تحقیق تیگ کاس و همکاران (Tigkas et al., 2018) منطبق است. نتایج تحلیل روند نیز به مطابقت دو آزمون من-کندال و تخمین گر سن در تشخیص روند عملکرد محصول شهرها و کاهشی بودن روند در بجنورد و اسفراین (البته غیر معنی‌دار در سطح ۵ درصد) و افزایشی بودن شیب روند (غیر معنی‌دار در سطح ۵ درصد) اشاره می‌کند. هرچند موضوع مزبور نیازمند داده‌های طولانی-مدت تر اقلیمی و عملکردی محصول برای تشخیص دقیق تر روند را نیاز دارد ولی می‌تواند با دخالت سطح زیر کشت گندم، در تحلیل و برنامه‌ریزی در حیطه امنیت غذایی کمک شایانی نماید. از دیگر موارد قابل بررسی و پیشنهاد در این زمینه می‌توان به استفاده از سایر روش‌های معتبر برآورد تبخیر اشاره نمود که به دلیل کمبود سایر متغیرهای اقلیمی (به‌جز ایستگاه سینوپتیک بجنورد) در این تحقیق بدان پرداخته نشد.

۵- سپاس‌گزاری

نویسنده‌گان تمایل دارند از نظرات ارزشمند داوران مقاله قدردانی نمایند.

۶- فهرست منابع

- احمدی، مژگان، کاویانی، عباس، رضانی اعتدالی، هادی، توکلی، علیرضا. (۱۴۰۲). شبیه‌سازی عملکرد گندم دیم با استفاده از شاخص‌های خشکسالی و با به‌کارگیری روش شبکه عصبی مصنوعی، جنگل تصادفی و رگرسیون بردار پشتیبان مطالعه موردی: شهرستان سقز. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۹ (۴): ۹۵-۱۰۹.
- تیموری، مهدی، غلامی، وحید، خالقی، محمدرضا. (۱۴۰۱). مقایسه دو شاخص خشکسالی بارش استاندارد در ارزیابی تأثیر خشکسالی بر عملکرد گندم دیم در استان خراسان شمالی. هواشناسی کشاورزی، ۱۰ (۲): ۲۷-۱۷.
- جوان، خدیجه. (۱۳۹۹). بررسی روند خشکسالی هیدرولوژیک در سطح حوضه آبریز دریاچه‌ی ارومیه. هیدروژئومورفولوژی، ۲۵: ۱۱۹-۱۳۸.
- خالقی، نوشین. (۱۳۹۴). مقایسه روش‌های برآورد بارش مؤثر در کشاورزی. آب و توسعه پایدار، ۲ (۲): ۵۸-۵۱.
- رحیمی، جابر، بذرافشان، جواد، خلیلی، علی. (۱۳۹۲). مطالعه تطبیقی روش‌های برآورد بارش مؤثر در زراعت گندم دیم در اقلیم‌های مختلف ایران. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی (پژوهش‌های جغرافیایی)، ۴۵ (۳): ۳۱-۴۶.
- شکوهی، علیرضا. (۱۳۹۱). مقایسه شاخص‌های RDI و SPI برای تحلیل خشکسالی در مقیاس ایستگاهی با تکیه بر خشکسالی کشاورزی (مطالعه موردی: قزوین و تاکستان). مهندسی آبیاری و آب، ۳ (۹): ۱۱۱-۱۲۲.
- علی زاده، پریسا، کامکار، بهنام، شتایی، شعبان، کاظمی، حسین. (۱۳۹۸). پایش مکانی و زمانی خشکسالی کشاورزی در اراضی تحت کشت گندم با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (مطالعه موردی غرب استان گلستان). بوم‌شناسی کشاورزی، ۱۱ (۳): ۱۰۸۴-۱۰۶۹.

غزنوی، منصوره، مساعدی، ابوالفضل، قبائی سوق، محمد. (۱۴۰۰). تأثیر شکست سری زمانی داده‌های بارش بر تغییرات مشخصه‌های خشکسالی (مطالعه موردی شهرهای تبریز و اراک)، آب و خاک، ۳۵(۳): ۴۰۹-۴۲۵

مقیمی، محمدمهدی، خواجه‌ای، فرزانه، محمودی، محمدرضا. (۱۳۹۸). شبیه‌سازی شاخص‌های RDI و SPEI در ایستگاه‌های فاقد آمار کافی، تحقیقات منابع آب ایران ۱۵(۲): ۳۴۲-۳۴۶

ملکی، علیرضا، ترکمانی، محمدجواد. (۱۳۹۴). مدیریت خشک‌سالی برای استفاده بهینه از منابع آب استان خراسان شمالی. تحقیقات اقتصاد کشاورزی، ۱۷(۱): ۶۵-۸۹

نساچیان زواره، محمدحسین، ملکی‌نژاد، حسین، اختصاصی، محمدرضا، زارع‌ارنانی، محمد. (۱۴۰۰). تحلیل زمانی و مکانی خشک‌سالی با استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی و گشتاورهای خطی در حوضه بوبین اصفهان. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۳(۳): ۶۳۷-۶۲۵

نیکبخت، جعفر، هادلی، فاطمه. (۱۴۰۰). مقایسه شاخص‌های SPI، RDI و SPEI جهت پایش خشک‌سالی در شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: ایستگاه کرمانشاه). هواشناسی کشاورزی، ۹(۱): ۲۵-۱۴.

References

- Ahmadi, M., Kaviani, A., Ramezani Etedali, H., & Tavakoli, A. (2023). Simulation of Rainfed Wheat Yield Using Drought Indices by Employing Artificial Neural Network, Random Forest and Support Vector Regression (Case Study: Saqqez City). *Iran-Water Resources Research*, 19(4), 95-109. 10.22034/iwrr.2023.177606 [In Persian]
- Alizadeh, P., Kamkar, B., Shataee, S., & Kazemi, H. (2019). Spatial and Temporal Monitoring of Agricultural Drought in the Wheat Cultivated Area using Standard Precipitation Index (Case Study: West of Golestan Province). *Journal Of Agroecology*, 11(3), 1069-1084. 10.22067/jag.v11i3.72931 [In Persian]
- Altieri, M.A. (2018). *Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture*; CRC Press: Cleveland, OH, USA.
- Asadi Zarch, M., Sivakumar, B. & Sharma, A. (2015). Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI). *Journal of Hydrology*, 526. 183-195. 10.1016/j.jhydrol.2014.09.071
- Ashika, M. Ruwangika, A. & Perera, U. (2020). Comparison of Statistical, Graphical, and Wavelet Transform Analyses for Rainfall Trends and Patterns in Badulu Oya Catchment, Sri Lanka. *Complexity*, <https://doi.org/10.1155/2020/7146593>
- Bhatti, M.T., Anwar, A.A. & Hussain, K. (2023). Characterization and outlook of climatic hazards in an agricultural area of Pakistan, *Scientific Reports*, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36909-4>
- Brouwer C. & Heibloem, M. (1986). *Irrigation water management: irrigation water needs*. Training manual no. 3. FAO, Rome
- Dabanli, Ismail. (2018). Drought hazard, vulnerability, and risk assessment in Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*. 11:538. doi.org/10.1007/s12517-018-3867-x
- Gaznavi, M., Mosaedi, A., & Ghabaei Sough, M. (2021). The Impact of Breakpoints in Rainfall Time Series on Drought Characteristics Changes (Case Study: Tabriz and Arak Stations, Iran). *Water and Soil*, 35(3), 409-425. 10.22067/jsw.2021.14899.0. [In Persian]
- Hess, T. (2010). Estimating green water footprints in a temperate environment. *Water*, 2(3):351-362. <https://doi.org/10.3390/w2030351>
- IPCC (2013) In: Stocker TF et al (eds) *Climate change 2013: the physical science basis*. Contribution of working group I to the fifth assessment Report of the IPCC. Cambridge University press, Cambridge
- IPCC (2014). In: Pachauri RK et al (eds) *Climate change 2014: synthesis Report*. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment Report of the IPCC. IPCC, Geneva
- Javan, K. (2021). Identification of hydrological drought trends in the Lake Urmia Basin. *Hydrogeomorphology*, 7(25), 138-119. <https://doi.org/10.22034/hyd.2021.43326.1562> [In Persian]
- khaleghi, N. (2016). Comparison of effective rainfall estimation methods in agriculture. *Journal of Water and Sustainable Development*, 2(2), 51-58. 10.22067/jwsd.v2i2.46823 [In Persian]
- Khalili, D., Farnoud, T., Jamshidi, H., Kamgar-Haghighi, A.A. & Zand-Parsa, S. (2011). Comparability analyses of the SPI and RDI meteorological drought indices in different climatic zones. *Water Resources Management*, 25(6):1737-1757. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9772-z>
- Lingdong, D., Qingjiu, T., Tao Y., Qingyan, M., Tamas, J., Udvardy, P. & Huang, Y. (2013). A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data, *International Journal*

- of Applied Earth Observation and Geoinformation, 23: 245-253. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.09.010>
- Maleki, A., & Torkamani, M. (2015). Drought Management for Optimazation of Water Resources. *Agricultural Economics Research*, 7(25), 65-89. 20.1001.1.20086407.1394.7.25.4.9. **[In Persian]**
- Merabti, A., Martins, DS., Meddi, M. & Pereira, LS. (2018). Spatial and time variability of drought based on SPI and RDI with various time scales. *Water Resources Management* 32(3):1087-1100. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1856-6>
- Moghimi, M. M., Khajehi, F., & Mahmoudi, M. R. (2019). Simulation of RDI and SPEI indices in stations without enough statistics. *Iran-Water Resources Research*, 15(2), 342-346. 20.1001.1.17352347.1398.15.2.26.5 **[In Persian]**
- Mohammed, S., Alsafadi, K., Enaruvbe, G.O. , Bashir, B. , Elbeltagi, A. , Széles, A. , Alsalman, A. & Harsanyi, E. (2022). Assessing the impacts of agricultural drought (SPI/SPEI) on maize and wheat yields across Hungary. *Scientific Reports*, 12, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12799-w>
- Nassajian Zavareh, M. H., Malekinezhad, H., Ekhtesasi, M. R., & Zare, M. (2021). Temporal and spatial analysis of drought in Boein Aquifer using drought indices and linear moment technique. *Watershed Engineering and Management*, 13(3), 625-637. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2021.351117.1819> **[In Persian]**
- Nikbakht, J., & Hadeli, F. (2021). Comparison of SPI, RDI and SPEI indices for drought smonitoring under climate change conditions (Case study: Kermanshah station). *Journal of Agricultural Meteorology*, 9(1), 14-25. 10.22125/agmj.2021.249498.1103. **[In Persian]**
- Oleksiak, T., Spyroglou, I., Pacoń, D., Matysik, P., Pernisová, M. & Rybka, K. (2022). *Crop science*. 62(2): 728-743. <https://doi.org/10.1002/csc2.20690>
- Rahimi, J., Bazrafshan, J., & Khalili, A. (2013). A Comparative Study on Empirical Methods for Estimating Effective Rainfall for Rainfed Wheat Crop in Different Climates of Iran. *Physical Geography Research*, 45(3), 31-46. 10.22059/jphgr.2013.35833 **[In Persian]**
- Roudier, P. & Mahe, G. (2010). Study of water stress and droughts with indicators using daily data on the Bani River (Niger basin, Mali). *International Journal of Climatology*. 30 (11), 1689–1705. <https://doi.org/10.1002/joc.2013>.
- Shokoohi, A. & Morovati, R. (2015). Basinwide Comparison of RDI and SPI Within an IWRM Framework. *Water Resources Management*. 29. 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0925-y>
- Shokoohi, A. (2012). Comparison of SPI and RDI in drought analysis in local scale with emphasizing on agricultural drought (Case study: Qazvin and Takestan). *Irrigation and Water Engineering*, 3(1), 111-122. www.waterjournal.ir/article_70565.html?lang=en **[In Persian]**
- Sidiqi, M., Kasiviswanathan, KS., Scheytt, T. & Devaraj, S. (2023). Assessment of Meteorological Drought under the Climate Change in the Kabul River Basin, Afghanistan. *Atmosphere*, 14(3):570. <https://doi.org/10.3390/atmos14030570>
- Smith, M. (1992) CROPWAT—a computer program for irrigation planning and management. FAO Irrigation and Drainage Paper 46. Rome, Italy
- Stamm, GG. (1967). Problems and procedures in determining water supply requirements for irrigation projects. In: Hagan et al. (eds) *Irrigation of agricultural lands*. Agronomy Monograph 11, American Society of Agronomy, Madison : 771–784.
- Teimouri, M., Gholami, V., & Khaleghi, M. R. (2023). Assesment of drought impacts on rainfed wheat yield using SPI and Agricultural-SPI indices (Case study: North Khorasan province). *Journal of Agricultural Meteorology*, 10(2), 17-27. doi: 10.22125/agmj.2022.305592.1123 **[In Persian]**
- Tigkas, D., Harris, V., Nikolaos, P., & George, T. (2022). Incorporating aSPI and eRDI in Drought Indices Calculator (DrinC) Software for Agricultural Drought Characterisation and Monitoring. *Hydrology* 9(6): 100. <https://doi.org/10.3390/hydrology906010>
- Tigkas, D., Vangelis, H. & Tsakiris, G. (2015). DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. *Earth Science Informatics*, 8(3):697-709, doi: 10.1007/s12145-014-0178-y
- Tigkas, D., Vangelis, H. & Tsakiris, G. (2016). Introducing a modified reconnaissance drought index (RDIE). *Proced Eng* 162:332–339
- Tigkas, D., Vangelis, H. & Tsakiris, G. (2017). An Enhanced Effective Reconnaissance Drought Index for the Characterisation of Agricultural Drought. *Environment Processes*. 4, 137–148 <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0219-x>
- Tigkas, D., Vangelis, H. & Tsakiris, G. (2019). Drought characterisation based on an agriculture-oriented standardised precipitation index. *Theoretical and Applied Climatology*. 135:1435–1447. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2451-3>

- Tsakiris, G., Nalbantis, I., Pangalou, D., Tigkas, D. & Vangelis, H. (2008). Drought meteorological monitoring network design for the Reconnaissance Drought Index (RDI), 1st international conference "drought management: scientific and technological innovations". Zaragoza-Spain
- Tsakiris, G., Pangalou, D., Tigkas, D. & Vangelis, H. (2007). Assessing the areal extent of drought. Water resources management: new approaches and technologies, European water resources association, Chania, Crete-Greece, 14–16 June
- Vicente-Serrano, SM., Beguería, S. & López-Moreno, JI. (2010). A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index–SPEI. *Journal of Climate* 23:1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Zarei, A.R., Moghimi, M.M. & Bahrami, M. (2019). Comparison of reconnaissance drought index (RDI) and effective reconnaissance drought index (eRDI) to evaluate drought severity. *Sustainable Water Resources Management*. 5, 1345–1356. <https://doi.org/10.1007/s40899-019-00310-9>
- Zarei, A.R., Shabani, A. & Moghimi, M.M. (2021). Accuracy Assessment of the SPEI, RDI and SPI Drought Indices in Regions of Iran with Different Climate Conditions. *Pure and Applied Geophysics*. 178, 1387–1403. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02704-3>

