

Research Paper

Drought Index Assessment with Satellite Data Available in Google Earth Engine

Zahra Shirmohammadi-
Aliakbarkhani ^{1*},

Seyed Farhad
Saberali ²,

Hossien nastari
nasrabadi ³,

Sayyed Mohammad
Javad Mirzaei ⁴

¹ Assistant Professor, Department of Water science and engineering, University of Torbat-e Jam, Iran. shirmohammadi@tjamcaas.ac.ir (Corresponding author).

² Associate professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. saberali@modares.ac.ir.

³ Assistant Professor, Department of horticulture science and engineering, University of Torbat-e Jam, Iran. nastari@tjamcaas.ac.ir.

⁴ Assistant Professor, Department of Water science and engineering, University of Torbat-e Jam, Iran. j.mirzaei@tjamcaas.ac.ir.



10.22125/iwe.2024.429308.1776

Received:

March 2, 2024

Accepted:

June 16, 2024

Available online:

October 13, 2024

Keywords:

Aridity, Google Earth Engine, MODIS, Remote Sensing

Abstract

Aridity is a climatic characteristic that has a significant impact on many aspects of life, mainly in agriculture but also in other economic sectors. This study utilized the Google Earth Engine (GEE) platform to evaluate two aridity indexes, the De Martonne and FAO aridity indexes, at ten stations in Razavi Khorasan province from 2000 to 2021. Satellite data were compared with ground data using statistical indices such as the correlation coefficient (CC), relative bias (RBIAS), root mean squared error (RMSE), Nash–Sutcliffe efficiency coefficient (NSE), and probability of detection (POD). Results showed that the De Martonne aridity index performed best in Mashhad, Torbat Jam, Neishabour, Gonabad, and Golmakan stations, with CCs ranging from 0.704 to 0.851, RMSEs from 1.228 to 2.419, negative RBIAS from 0.096 to 0.227, NSEs from 0.142 to 0.633, and POD between 0.773 and 1. In other stations, the FAO method was more accurate. Overall, the current study's use of satellite data is appropriate and yields dependable and satisfying results because of its suitable spatiotemporal separation.

1. Introduction

Aridity is a major problem worldwide resulting from precipitation deficit and increased evapotranspiration which increased in recent decades, especially in arid and semi-arid regions. Long-term data and good coverage of the region affected by aridity conditions are required for drought monitoring. Google Earth Engine was first launched by Google in December 2010 to provide the ability to monitor, explore and measure global change. In this system there is a large database of various images

* **Corresponding Author: Zahra Shirmohammadi-Aliakbarkhani**

Address: Department of Water science and engineering,
University of Torbat-e Jam, Iran

Email: shirmohammadi@tjamcaas.ac.ir

Tel: 05152547041

and information from the world that can be easily accessed and analyzed. Northeast Iran has an arid and semi-arid climate, so water scarcity is one of the main problems in this area. As a result, droughts of varying degrees occurred in this region in different years. However, despite the importance of this topic, few studies on aridity in other regions of Iran have been conducted, but no comprehensive studies on the spatio-temporal evolution of the aridity indices in this area have been published. Therefore, the present study focused on assessing the spatio-temporal distribution of the drought indices in northeastern Iran. This analysis of this study improves the understanding of the link between climate change and drought in northeastern Iran and may be helpful for agricultural irrigation systems.

2. Materials and Methods

The Meteorological data used in this study are ten synoptic meteorological stations data of Khorasan Razavi Province of the Islamic Republic of Iran Meteorological Organization (IRIMO). The study area includes Golmakan, Gonabad, Kashmar, Neyshabour, Mashhad, Quchan, Sarakhs, Sabzevar, Torbat-e Jam, and Torbat-e Heydarieh counties. In this study, a Google Earth Engine (GEE) platform was implemented to monitor and Evaluation of two aridity indexes, such as the De Martonne aridity index, and FAO aridity index in ten stations in Razavi Khorasan province from 2000 to 2021. In this platform, the University of Idaho monthly climate dataset (TerraClimate), from 1958 to 2022, was used to calculate monthly potential evapotranspiration. The monthly reference evapotranspiration (ET₀) was calculated using the Penman-Montieth approach. It has been argued that ET₀ is a more appropriate measure of potential water loss than purely temperature-based metrics for estimating potential evapotranspiration because it uses an energy balance approach. To calculate the temperature, the MODIS data set (MOD11A1 V6.1) for calculating the surface temperature of the earth was used. This data set is available daily from 2000 to 2023. The product data set (CHIRPS) available in the Google Earth Engine platform with reasonable spatial resolution daily from 1981 to 2023 was used to calculate the monthly amount of precipitation. CHIRPS uses 0.05-resolution satellite imagery and ground station data to construct gridded precipitation time series for trend analysis and seasonal drought monitoring. The prediction performance of the aridity index calculated with satellite data against the aridity index calculated with station data evaluated using widely accepted statistical indices such as the correlation coefficient (CC), Relative bias (RBIAS), Root Mean Squared Error (RMSE), Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE) and Probability of Detection (POD). Generally, the closer the values of CC, NSE, and POD to 1, and the value of RBIAS and RMSE to 0 the better the model performance.

3. Results

Using the results of statistical analysis, the calculation of two drought indices in the studied stations using ground data and satellite data showed that the De Martonne aridity index was due to the lower Relative bias, correlation coefficient, and higher Probability of Detection than the FAO method. In Mashhad, Torbat-e Jam, Neyshabour, Gonabad, and Golmakan stations, it was selected as the best method for calculating the annual drought index. In other studied stations, based on statistical indicators, the FAO method was chosen as the best method for calculating the drought index in these stations due to the optimal value of the root mean square error, Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient, and Relative bias. The reason for these results may be related to the different weather conditions and geographical environments. For this reason, the use of satellite data to calculate drought indices needs to be validated in each region.

4. Discussion and Conclusion

Aridity is a serious problem that can have devastating short- and long-term consequences for the environment. Aridity affects all climates; However, aridity is often more frequent and severe in arid and semi-arid climates. However, one of the biggest challenges in studying this phenomenon is the lack of ground stations and their incorrect distribution. With the advancement of technology and remote sensing, environmental scientists now have a diverse range of satellite data at their disposal. This article presents a publicly available tool, provided through the Google Earth Engine and based on the JavaScript programming language, that can calculate the spatial and temporal distribution of aridity using a combined index across homogeneous climates. The aridity in this study was analyzed based on the scaled aridity condition index (De Martonne and FAO), which is a combination of three remotely sensed derived data, temperature, which is calculated using land surface temperature (LST) obtained

from MODIS sensor placed on the Terra satellite; the ETO, which is calculated from TerraClimate; and the precipitation data from the Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) in ten stations in Razavi Khorasan province from 2000 to 2021. The results showed that the De Martonne aridity index was chosen as the best method for calculating the annual aridity index in Mashhad, Torbat Jam, Neyshabour, Gonabad, and Golmakan stations. In Sarkhas, Torbat-e heydarieh, Kashmer, and Sabzevar stations, the FAO method was selected as the best method to calculate the drought index in these stations.

5. Six important references

- 1) Abatzoglou, J. T., S. Z. Dobrowski, S. A. Parks, and K. C. Hegewisch. 2018. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data* 5:170191.
- 2) Allen, R. G., L. S. Pereira, R. Dirk, and S. Martin. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Irrigation and Drainage.
- 3) Gavrilov, M. B., W. An, C. Xu, M. G. Radaković, Q. Hao, F. Yang, Z. Guo, Z. Perić, G. Gavrilov, and S. B. Marković. 2019. Independent Aridity and Drought Pieces of Evidence Based on Meteorological Data and Tree Ring Data in Southeast Banat, Vojvodina, Serbia.
- 4) Lang, D., J. Zheng, J. Shi, F. Liao, X. Ma, W. Wang, X. Chen, and M. Zhang. 2017. A comparative study of potential evapotranspiration estimation by eight methods with FAO Penman–Monteith method in southwestern China. *Water (Switzerland)* 9.
- 5) Paniagua, L. L., A. García-Martín, F. J. Moral, and F. J. Rebollo. 2019. Aridity in the Iberian Peninsula (1960–2017): distribution, tendencies, and changes. *Theoretical and Applied Climatology* 138:811–830.
- 6) Thaeri Qazvini, A., and D. Carrion. 2023. A Spatiotemporal Drought Analysis Application Implemented in the Google Earth Engine and Applied to Iran as a Case Study. *Remote Sensing* 15:2218.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors would like to thank the University of Torbat-e Jam for financial support.

ارزیابی شاخص‌های خشکی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای موجود در سامانه گوگل ارث انجین

زهره شیرمحمدی-علی اکبرخانی^{۱*}، سید فرهاد صابرعلی^۲، حسین نستری نصرآبادی^۳، سید محمدجواد میرزایی^۴

تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۷

مقاله پژوهشی

چکیده

خشکی یک ویژگی اقلیمی است که بر بسیاری از جنبه‌های زندگی، عمدتاً بر کشاورزی، بلکه در سایر بخش‌های اقتصادی تأثیر بسزایی دارد. در این مطالعه از پلتفرم گوگل ارث انجین (Google Earth Engine (GEE)) برای پایش و ارزیابی دو شاخص خشکی دومارتن و فائو در ده ایستگاه در استان خراسان رضوی در مقیاس سالانه و در دوره آماری ۲۰۰۰-۲۰۲۱ استفاده شده است. به منظور ارزیابی شاخص‌های خشکی از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی (CC)، بایاس نسبی (RBIAS)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص نش-ساتکلیف (NSE) و مقدار احتمال تخمین (POD) استفاده شد. نتایج آنالیزهای آماری نشان داد که شاخص خشکی دومارتن در ایستگاه‌های مشهد، تربت جام، نیشابور، گناباد و گل‌مکان با ضریب همبستگی در محدوده ۰/۷۰۴-۰/۸۵۱، ریشه میانگین مربعات خطا در محدوده ۲/۴۱۹-۱/۲۲۸، بایاس نسبی (منفی) در محدوده ۰/۲۲۷-۰/۰۹۶، شاخص نش-ساتکلیف در محدوده ۰/۶۳۳-۰/۱۴۲ و احتمال تخمین در محدوده ۰/۷۷۳-۱ به عنوان بهترین روش برای محاسبه شاخص خشکی در مقیاس سالانه انتخاب گردید. در سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه روش فائو به عنوان بهترین روش محاسبه شاخص خشکی در نظر گرفته شد. به طور کلی استفاده از داده‌های ماهواره‌ای پلت فرم گوگل ارث انجین در تحقیق حاضر با توجه به تفکیک مکانی - زمانی مناسب، نتایج قابل اعتماد و رضایت بخشی به دست می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: خشکی، سنجش از دور، مادیس، گوگل ارث انجین

^۱ گروه علوم و مهندسی آب، مجتمع آموزش عالی تربت‌جام، تربت‌جام، ایران. (*-نویسنده مسئول: shirmohammadi@tjamcaas.ac.ir)

^۲ گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. saberali@modares.ac.ir

^۳ گروه علوم و مهندسی باغبانی، مجتمع آموزش عالی تربت‌جام، تربت‌جام، ایران. nastari@tjamcaas.ac.ir

^۴ گروه علوم و مهندسی آب، مجتمع آموزش عالی تربت‌جام، تربت‌جام، ایران. j.mirzaei@tjamcaas.ac.ir

مقدمه

تغییرات آب و هوا و گرم شدن کره زمین دو نگرانی عمده در چند دهه گذشته بوده است که کشورهای زیادی را در معرض خطر خشکسالی قرار داده است (Vogt et al. 2021b). آخرین گزارش ارائه شده توسط هیئت بین دولتی تغییرات آب و هوایی (IPCC) در سال ۲۰۲۲ اشاره می‌کند که اکوسیستم‌های زمینی، آب شیرین، آب‌های ساحلی و دریایی همگی آسیب قابل توجهی از تغییرات آب و هوایی متحمل شده‌اند (Pörtner et al. 2022). ارزیابی و پایش چنین پدیده‌ای به ویژه در مناطقی که کشاورزی یکی از بزرگترین بخش‌های اقتصاد قابل تجارت است، اهمیت دارد. خشکسالی یک پدیده دوره‌ای است که می‌تواند هفته‌ها یا دهه‌ها طول بکشد و بخش‌های وسیعی را تحت تأثیر قرار دهد (Vogt et al. 2021a). همانطور که می‌دانیم، خشکسالی زمانی رخ می‌دهد که بارندگی کمتر از حد معمول باشد که منجر به کاهش جریان آب، افت سطح دریاچه‌ها و مخازن و افت سطح آب‌های زیرزمینی می‌شود (Thaeri Qazvini and Carrion, 2023). اثرات خشکسالی گسترده‌است و می‌تواند سیستم حمل و نقل، کیفیت خاک، اکوسیستم، تولید انرژی، صادرات جهانی را تحت تأثیر قرار دهد (Deniz et al. 2011). خشکسالی‌ها معمولاً به سه نوع اصلی، یعنی خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و خشکسالی کشاورزی طبقه‌بندی می‌شوند (Wilhite et al. 2007). خشکسالی هواشناسی مهم‌ترین و رایج‌ترین نوع خشکسالی است که زمانی رخ می‌دهد که بارندگی برای مدت زمان مشخصی از یک حد آستانه کمتر باشد (Deniz et al. 2011). در صورت تداوم، خشکسالی هواشناسی منجر به خشکسالی هیدرولوژیکی می‌شود (Ghavidel et al. 2020) که نتیجه کاهش منابع آبی، کاهش آب‌های زیرزمینی و رودخانه‌ها و خشک شدن قنات‌ها در یک دوره زمانی است (Thaeri Qazvini and Carrion 2023).

خشکسالی در کشاورزی ناشی از کاهش رطوبت خاک در طول فصل رشد گیاهان است (Thaeri Qazvini and Carrion, 2023). خشکی آب و هوا یک ویژگی اقلیمی دائمی برای شرایط آب و هوایی معین است و معمولاً با شاخص خشکی تعریف می‌شود. گسترش مناطق خشک جهان خطر افزایش بیابانی شدن مناطق را بیشتر می‌کند. همپنین افزایش خشکی خطر جدی برای جامعه بوده چرا که نواحی را مستعد خشکسالی و آتش سوزی نموده که به شدت بر کشاورزی، کیفیت آب، بهره‌وری پوشش گیاهی، از بین رفتن جنگل‌ها و تنوع زیستی تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، پیش‌بینی شده که مناطق مستعد خشکی با مناطق در معرض خطر خشکسالی شدید، کاهش شدید رطوبت خاک و تغییر در توزیع بالقوه پوشش گیاهی همپوشانی دارند (Park et al. 2018). برای محاسبه خشکی شاخص‌های متفاوتی برای نقاط مختلف جهان پیشنهاد شده است (Pellicone et al. 2019). شاخص خشکی (AI)، که به عنوان نسبت تبخیر و تعرق بالقوه سالانه (ET0) به بارندگی سالانه (Pre) تعریف می‌شود، یک پارامتر کلیدی در توصیف خشکی است و به عنوان شاخص‌های مناسبی برای تعیین شدت خشکی در نظر گرفته شده‌اند که می‌توانند در تخمین اثرات تغییر اقلیم و طرح طبقه‌بندی اقلیمی مورد استفاده قرار گیرند (Thorntwaite 1948, Shifteh Some'e et al. 2013, Djaman et al. 2015, Paniagua et al. 2019). بطوریکه به طور گسترده برای ارزیابی روندهای خشکی یا رطوبت استفاده شده است (Robert Maliva 2012, Huo et al. 2013, Wang et al. 2013). شاخص خشکی دو مارتن شاخص شناخته شده‌ای است که می‌تواند برای مقیاس‌های زمانی مختلف، مانند ماهانه، فصلی، یا سالانه محاسبه شود (Gavrilov et al. 2019). این شاخص اغلب به عنوان تابعی از بارش و دما بیان می‌شوند. این شاخص ابزار قابل اعتمادی برای طبقه‌بندی اقلیم و بررسی خشکی یا رطوبت هوای



کردند (Gidey et al. 2018, Kocaaslan et al., 2021). سامانه گوگل ارث انجین ابزارهای عملی و داده‌های مکانی گسترده‌ای را فراهم می‌کند که به خوبی با اهداف پایش خشکی مطابقت دارد اما تاکنون تحقیقی به منظور تعیین شاخص‌های خشکی دومارتن و فائو با استفاده از داده‌های این سامانه انجام نشده‌است. بنابراین هدف ما در این مطالعه ارزیابی دو شاخص خشکی دومارتن و فائو در مقیاس سالانه در ۱۰ ایستگاه در استان خراسان رضوی برای یک دوره ۲۱ ساله با استفاده از اطلاعات این سامانه و ایستگاه‌های زمینی است.

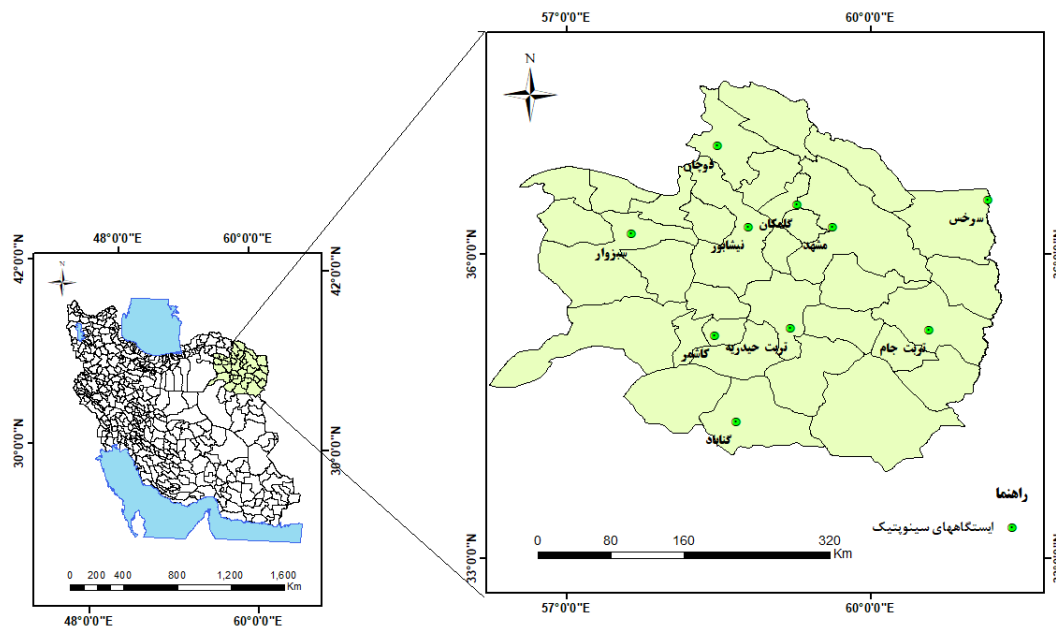
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان خراسان رضوی در شمالی شرقی ایران و در طول جغرافیایی ۶۲۰-۵۶۰ شرقی و در عرض جغرافیایی ۳۸۰-۳۳۰ شمالی با مساحت ۱۱۷۲۰۰ کیلومترمربع گسترش یافته است. متوسط سالانه بارندگی در این استان ۲۵۰ میلی‌متر گزارش شده است. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان خراسان رضوی در شکل ۱ آورده شده است. این پژوهش با استفاده از داده‌های هواشناسی ماهانه در ۱۰ ایستگاه سینوپتیک این استان شامل تربت جام، تربت حیدریه، سبزوار، سرخس، قوچان، کاشمر، گل‌مکان، گناباد، نیشابور و مشهد انجام شده است. اطلاعات جغرافیایی و طول دوره آماری ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است.

داده‌های دریافتی از ایستگاه سینوپتیک مورد مطالعه شامل حداقل و حداکثر درجه حرارت، حداقل و حداکثر رطوبت نسبی، سرعت باد، بارندگی و ساعات آفتابی که به صورت روزانه می‌باشد. سپس با استفاده از روش‌های ارائه شده در این بخش تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش‌های مختلف به صورت روزانه محاسبه و سپس تبدیل به میانگین سالانه گردید.

منطقه است (Araghi et al. 2018). توسط بسیاری از دانشمندان برای نشان دادن تغییرات مکانی خشکی در بسیاری از مناطق استفاده شده است (Haider and Adnan, 2014; Paltineanu et al. , 2007). پایش خشکی مستلزم داده‌های بلندمدت و پوشش کامل منطقه‌ای است. فناوری سنجش از دور اطلاعات جغرافیایی ارزشمندی را برای شرایط خشکی با قابلیت دریافت تصاویر ماهواره‌ای از گذشته تا به امروز فراهم می‌کند و برای مناطق وسیع، امکان ایجاد نقشه‌های دوره‌ای و دقیق وضعیت خشکی وجود دارد (Aksoy et al. 2019, Ejaz et al. 2023). سامانه گوگل ارث انجین (GEE) به عنوان یک سامانه محاسبات ابری برای ذخیره و پیشبرد مجموعه داده‌های جغرافیایی، ایجاد نقشه‌های چند زمانی یا انجام تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای موجود در سامانه می‌باشد. از زمان معرفی این سامانه در سال ۲۰۱۰، قابلیت‌های آن در کاربردهای مختلفی از جمله نقشه‌برداری و پایش پوشش گیاهی (Sazib et al. 2018, Tamiminia et al. (2020)، پایش تغییر کاربری، پوشش زمین و پایش سیل (Sidhu et al. 2018, DeVries et al. 2020) تحلیل شده‌اند. علاوه بر این، با حجم قابل توجهی از تصاویر ماهواره‌ای آزادانه در دسترس و پردازش تصویر مستقیم، سامانه گوگل ارث انجین برای تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی خشکسالی در چندین مطالعه پیشنهاد شده است (Sazib et al. 2018, Aksoy et al. 2019, Khan et al. 2019). اکثر محققان از مجموعه داده‌های ماهواره‌ای طیف‌سنجی تصویربرداری با وضوح متوسط مادیس و الگوریتم‌های گوگل ارث انجین برای پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی بازتابی شده توسط سنجش از دور (RSDI) استفاده



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در استان خراسان رضوی واقع در شمال شرق ایران

جدول (۱): مشخصات جغرافیایی و تعداد سال‌های آماری مورد استفاده در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

کد ایستگاه	ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	سال‌های آماری
S1	تربت جام	۶۰° ۳۵'	۳۵° ۱۶'	۹۵۰/۴	۱۳۷۸-۱۴۰۱
S2	تربت حیدریه	۵۹° ۱۳'	۳۵° ۲۰'	۱۴۵۱	۱۳۷۸-۱۴۰۱
S3	سبزوار	۵۷° ۳۹'	۳۶° ۱۲'	۹۶۲	۱۳۷۸-۱۴۰۱
S4	سرخس	۶۱° ۱۰'	۳۶° ۳۲'	۲۳۵	۱۳۷۸-۱۴۰۱
S5	قوچان	۵۸° ۳۰'	۳۷° ۰۴'	۱۲۷۸	۱۳۷۸-۱۴۰۱
S6	کاشمر	۵۸° ۲۸'	۳۵° ۱۶'	۱۱۱۰	۱۳۷۸-۱۴۰۱
S7	گلمکان	۵۹° ۱۷'	۳۶° ۲۹'	۱۱۷۶	۱۳۷۸-۱۴۰۱
S8	گناباد	۵۸° ۴۱'	۳۴° ۲۱'	۱۰۵۶	۱۳۷۸-۱۴۰۱
S9	مشهد	۵۹° ۳۸'	۳۶° ۱۴'	۹۹۹/۲	۱۳۷۸-۱۴۰۱
S10	نیشابور	۵۸° ۴۸'	۳۶° ۱۶'	۱۲۱۳	۱۳۷۸-۱۴۰۱

شاخص خشکی

شاخص‌های خشکی برای توصیف وضعیت خشکی و کمبود آب در مناطق مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مطالعه از دو روش شاخص خشکی دو مارتن (De Martonne) بر اساس بارش

و دما و شاخص خشکی سازمان خواربار و کشاورزی (FAO) بر اساس بارش و تبخیر و تعرق بالقوه برای ارزیابی توزیع مکانی خشکی در مقیاس سالانه استفاده کرد معادلات شاخص‌های خشکی و طبقه‌بندی اقلیمی بر اساس شاخص‌های خشکی در این مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول (۲): شاخص های خشکی و طبقه بندی های اقلیمی بر اساس شاخص ها

شاخص خشکی	معادله	مقدار شاخص	اقلیم
شاخص دومارتن	$AI_{DM} = \frac{P}{T + 10}$	$AI_{DM} < 10$	خشک
		$10 \leq AI_{DM} < 20$	نیمه خشک
		$20 \leq AI_{DM} < 24$	مدیترانه ای
		$24 \leq AI_{DM} < 28$	نیمه مرطوب
		$28 \leq AI_{DM} < 30$	مرطوب
		$30 \leq AI_{DM} \leq 50$	خیلی مرطوب
		$AI_{DM} > 50$	فوق العاده مرطوب
شاخص خشکی سازمان خواربار و کشاورزی (FAO)	$AI_F = \frac{P}{ET_0}$	$AI_F < 0.3$	بیش از حد خشک
		$0.3 \leq AI_F < 0.5$	خشک
		$0.5 \leq AI_F < 0.75$	نیمه خشک
		$0.75 \leq AI_F < 1.0$	خشک زیر مرطوب
		$1.0 \leq AI_F \leq 1.75$	مرطوب زیر مرطوب
		$AI_F > 1.75$	مرطوب

در روابط بالا P بارندگی سالانه بر حسب میلی متر، T متوسط درجه حرارت سالانه بر حسب درجه سانتی گراد، ET_0 تبخیر-تعرق سالانه بر حسب میلی متر می باشد.

مگا ژول بر مترمربع بر روز، G شار گرمای خاک برحسب مگا ژول بر مترمربع بر روز، T میانگین روزانه دمای هوا در ارتفاع دو متری برحسب درجه سانتی گراد، u_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری برحسب متر بر ثانیه، e_s و e_a به ترتیب فشار بخار اشباع و واقعی هوا برحسب کیلو پاسکال، γ ثابت سایکرومتری برحسب کیلو پاسکال بر درجه سانتی گراد می باشد.

داده های ماهواره ای مورد استفاده سامانه گوگل ارث

انجین

گوگل ارث انجین برای اولین بار در تاریخ دسامبر ۲۰۱۰ توسط شرکت گوگل راه اندازی شد، تا این امکان را برای نظارت، اکتشاف و اندازه گیری تغییرات جهانی فراهم

تبخیر و تعرق پنمن مانیتث فائو^۵

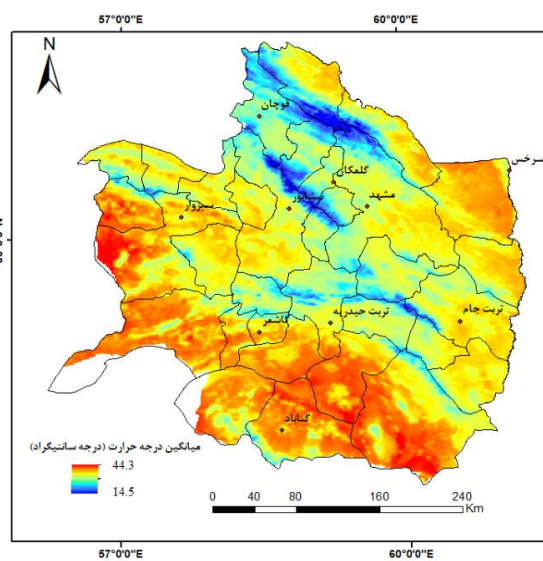
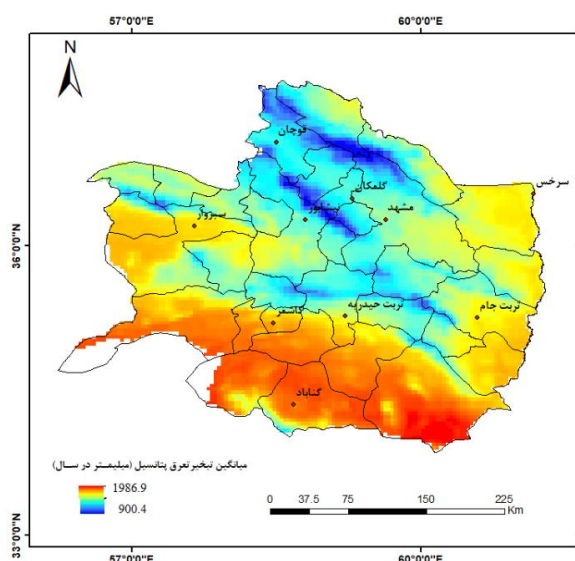
برای محاسبه شاخص خشکی فائو نیاز به تعیین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل می باشد که به این منظور از روش تبخیر-تعرق پنمن مانیتث فائو استفاده شد. این روش معادله ای برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع به صورت زیر ارائه می دهد (Allen et al. 1998)

$$ET_{PM} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

که در آن ET_{PM} تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش فائو پنمن مانیتث برحسب میلی متر در روز، Δ شیب منحنی فشار بخار آب نسبت به دما برحسب کیلو پاسکال بر درجه سانتی گراد، R_n تابش خالص ورودی به سطح گیاه برحسب

دسترس می‌باشد. برای محاسبه درجه حرارت هم از مجموعه داده‌های مادیس (MOD11A1 V6.1) برای محاسبه دمای سطح زمین استفاده گردید این مجموعه داده هم از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ بصورت روزانه در دسترس می‌باشد. برای محاسبه مقدار بارندگی ماهانه از مجموعه داده‌های محصول (CHIRPS) که با تفکیک مکانی قابل قبول بصورت روزانه از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۳ در سامانه گوگل ارث انجین موجود است استفاده گردید. CHIRPS از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح ۰/۰۵ درجه با داده‌های ایستگاه زمینی برای ایجاد سری‌های زمانی بارندگی شبکه‌ای برای تحلیل روند و پایش خشکی فصلی استفاده می‌کند.

کند. در این سامانه یک دیتاست بزرگ از اطلاعات و تصاویر مختلف دنیا وجود دارد که به آسانی می‌توان آن را فراخوانی و تجزیه و تحلیل کرد. در این پژوهش از داده‌های تبخیر و تعرق پنمن مانیتیت موجود در مجموعه داده‌های اقلیمی ماهانه دانشگاه آیداهو (TerraClimate) که از سال ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ در سامانه گوگل ارث انجین در دسترس می‌باشد، برای مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه استفاده گردید (Abatzoglou et al. 2018). در این مجموعه داده تبخیر و تعرق برای محاسبه تبخیر و تعرق از روش پنمن مانیتیت استفاده شده است. این داده‌ها با وضوح مکانی بالا برای تمام جهان در



شکل (۲): مقادیر متوسط سالانه تبخیر-تعرق پتانسیل (میلی‌متر) و درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد) در دوره آماری با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای (TerraClimate and MODIS/06/MOD11A1)

مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر مشاهداتی زمانی می‌باشد که قدر مطلق خطای نسبی و ریشه میانگین مربعات خطا بین ۰ تا ۰/۲ بوده و ضریب همبستگی بین ۰/۸ و ۱ قرار گیرد (Lang et al. 2017). مقادیر احتمال تخمین هم هرچه به عدد ۱ نزدیکتر باشد نشان‌دهنده دقت بالای پیش‌بینی داده‌های ماهواره‌ای می‌باشد. برای محاسبه مقادیر این

آنالیزهای آماری

برای ارزیابی شاخص خشکی محاسبه شده با داده‌های ماهواره از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی (CC)، بایاس نسبی (RBIAS)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص نش-ساتکلیف (NSE) و مقدار احتمال تخمین (POD) استفاده گردید جدول (۳). بهترین تطابق آماری بین

پارامترها از نرم افزار متلب نسخه R2013a استفاده گردید.

جدول (۳): شاخص های آماری مورد استفاده در این پژوهش به منظور ارزیابی شاخص های خشکی محاسبه شده با داده های ماهواره ای

مقدار مطلوب	معادله	شاخص های آماری
۱	$CC = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})(r_n - \bar{r})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (r_n - \bar{r})^2}}$	ضریب همبستگی (CC)
۰	$RBIAS = \frac{\sum_{n=1}^N (f_n - r_n)}{\sum_{n=1}^N r_n} \times 100\%$	بایاس نسبی (RBIAS)
۰	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - r_n)^2}$	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)
۱	$NSE = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (r_n - f_n)^2}{\sum_{n=1}^N (r_n - \bar{r})^2}$	نش-ساتکلیف (NSE)
۱	$POD = \frac{H}{H + M}$	احتمال تخمین (POD)

که در آن n : تعداد داده ها، مقادیر r_n مقادیر محاسباتی شاخص های خشکی با استفاده از داده های ایستگاه های زمینی و f_n مقدار پیش بینی شده شاخص های خشکی با استفاده از داده های ماهواره ای، H تعداد سال هایی که شاخص های خشکی توسط داده های زمینی (محاسبه شده) و ماهواره ای (پیش بینی شده) در کلاس یکسان قرار گرفته اند، M تعداد سال هایی که شاخص های خشکی محاسبه شده و پیش بینی شده در دو کلاس متفاوت قرار گرفته اند.

بحث و نتایج

شاخص خشکی دو مارتن

نتایج آنالیزهای آماری مقایسه شاخص خشکی دومارتن محاسبه شده با داده های ایستگاه های زمینی و شاخص خشکی دومارتن محاسبه شده با داده های ماهواره ای در جدول ۴ آورده شده است. مقادیر ضریب همبستگی در ایستگاه های مورد مطالعه در محدوده ۰/۷ تا ۰/۸۵ متغیر بود بالاترین ضریب همبستگی در ایستگاه تربت جام و پایین ترین ضریب همبستگی در ایستگاه گلمکان مشاهده گردید. در بین ایستگاه های مورد مطالعه به جز ایستگاه های تربت حیدریه، گناباد و گلمکان بقیه ایستگاه ها ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۸ را نشان دادند. مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا در مناطق مورد مطالعه در محدوده ۱/۲۳ تا ۶/۳۸ متغیر بود.

در تمامی مناطق مورد مطالعه این شاخص در محدوده بالاتری از مقدار مطلوب قرار داشت. پایین ترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا در ایستگاه گناباد و بالاترین مقدار این شاخص در ایستگاه قوچان مشاهده گردید. مقادیر بایاس نسبی در ایستگاه های مورد مطالعه در محدوده ۰/۰۹ - تا ۰/۴۱ - متغیر بود مقادیر بایاس نسبی در تمام ایستگاه های مورد مطالعه نشان داد که شاخص خشکی دومارتن محاسبه شده با داده های ماهواره ای کم برآورد می گردد کمترین مقدار بایاس نسبی در ایستگاه تربت جام و بالاترین مقدار آن در ایستگاه قوچان مشاهده گردید. مقادیر شاخص نش-ساتکلیف در ایستگاه های مورد مطالعه در محدوده ۱/۶۸ - تا ۰/۶۳ متغیر بود. مقدار این ضریب هر چه به یک نزدیکتر باشد، مطلوب تر می باشد. پایین ترین مقدار شاخص نش-ساتکلیف در ایستگاه قوچان و بالاترین

پایین‌ترین مقدار این شاخص در ایستگاه قوچان مشاهده گردید. در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه به جز ایستگاه‌های قوچان و تربت حیدریه مقدار این شاخص بالاتر از ۰/۷۷ به دست آمد.

مقدار این شاخص در ایستگاه تربت جام مشاهده گردید. مقادیر احتمال تخمین در ایستگاه‌های مورد مطالعه در محدوده ۰/۲۷ تا ۱ متغیر بود. مطلوب‌ترین مقدار این شاخص در ایستگاه گناباد و

جدول (۴): نتایج آنالیز آماری مقایسه شاخص خشکی دومارتن محاسبه شده با داده‌های ایستگاه‌های زمینی و داده‌های ماهواره‌ای

کد ایستگاه	ضریب همبستگی (CC)	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)	بایاس نسبی (RBAIS)	نش-ساتکلیف (NSE)	احتمال تخمین (POD)
S1	۰/۸۵۱	۱/۳۲۳	-۰/۰۹۶	۰/۶۳۳	۰/۹۰۹
S2	۰/۷۲۲	۳/۷۵۵	-۰/۳۱۹	-۰/۲۸۷	۰/۶۸۲
S3	۰/۸۳۹	۲/۹۳۳	-۰/۳۹۰	-۰/۴۷۰	۰/۸۶۴
S4	۰/۷۹۲	۱/۹۰۴	-۰/۲۱۶	۰/۱۲۶	۰/۹۵۵
S5	۰/۸۱۸	۶/۳۷۲	-۰/۴۱۶	-۱/۶۸۹	۰/۲۷۳
S6	۰/۸۵۵	۱/۷۸۲	-۰/۲۰۱	۰/۳۷۹	۰/۹۵۵
S7	۰/۷۰۴	۲/۴۱۹	-۰/۲۲۷	-۰/۱۴۲	۰/۸۶۴
S8	۰/۷۴۸	۱/۲۲۸	-۰/۱۰۱	۰/۴۷۲	۱/۰۰
S9	۰/۸۴۹	۱/۹۴۰	-۰/۱۶۷	۰/۳۶۴	۰/۷۷۳
S10	۰/۸۴۹	۱/۸۴۱	-۰/۱۲۳	۰/۵۳۰	۰/۸۱۸

شاخص خشکی فائو

نتایج آنالیزهای آماری مقایسه شاخص خشکی فائو محاسبه شده با داده‌های ایستگاه‌های زمینی و شاخص خشکی فائو محاسبه شده با داده‌های ماهواره‌ای در جدول ۵ آورده شده است. مقادیر ضریب همبستگی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در محدوده ۰/۵۱ تا ۰/۸۳ متغیر بود بالاترین ضریب همبستگی در ایستگاه تربت جام و پایین‌ترین ضریب همبستگی در ایستگاه گل‌مکان مشاهده گردید. در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه به جز ایستگاه‌های قوچان، گناباد و گل‌مکان بقیه ایستگاه‌ها ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۷ را نشان دادند. مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا در مناطق مورد مطالعه در محدوده ۰/۰۳ تا ۰/۰۹ متغیر بود. در تمامی مناطق مورد مطالعه این شاخص در محدوده مقدار مطلوب قرار داشت. پایین‌ترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا در ایستگاه سبزواری و بالاترین مقدار این شاخص در ایستگاه قوچان مشاهده گردید. مقادیر بایاس

نسبی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در محدوده ۰/۱۷ تا ۰/۷۳ متغیر بود مقادیر بایاس نسبی در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه به جز کاشمر و قوچان نشان داد که شاخص خشکی فائو محاسبه شده با داده‌های ماهواره‌ای بیش برآورد می‌گردد کمترین مقدار بایاس نسبی در ایستگاه سبزواری و بالاترین مقدار آن در ایستگاه تربت جام مشاهده گردید. مقادیر شاخص نش-ساتکلیف در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه ۰/۹۹ به دست آمد. مقدار این ضریب هر چه به یک نزدیکتر باشد، مطلوب‌تر می‌باشد. تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه در محدوده مقدار مطلوب به دست آمد. مقادیر احتمال تخمین در ایستگاه‌های مورد مطالعه در محدوده ۰/۵۹ تا ۰/۹ متغیر بود. مطلوب‌ترین مقدار این شاخص در ایستگاه سبزواری و پایین‌ترین مقدار این شاخص در ایستگاه نیشابور مشاهده گردید. در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه به جز ایستگاه‌های نیشابور و گناباد مقدار این شاخص بالاتر از ۰/۷۲ به دست آمد.



جدول (۵): نتایج آنالیز آماری مقایسه شاخص خشکی فائو محاسبه شده با داده‌های ایستگاه‌های زمینی و داده‌های ماهواره‌ای

کد ایستگاه	شاخص آماری			
	ضریب همبستگی (CC)	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)	بایاس نسبی (RBAIS)	نش-ساتکلیف (NSE)
S1	۰/۸۲۸	۰/۰۶۳	۰/۷۲۸	۱/۰۰
S2	۰/۷۳۳	۰/۰۵۷	۰/۱۰۱	۱/۰۰
S3	۰/۷۹۱	۰/۰۲۸	۰/۰۱۰	۱/۰۰
S4	۰/۷۲۳	۰/۰۳۸	۰/۰۲۵	۱/۰۰
S5	۰/۶۹۹	۰/۰۹۸	-۰/۱۷۱	۱/۰۰
S6	۰/۷۲۹	۰/۰۵۰	-۰/۰۶۲	۱/۰۰
S7	۰/۵۱۴	۰/۰۶۷	۰/۲۳۰	۱/۰۰
S8	۰/۶۶۰	۰/۰۳۴	۰/۱۳۱	۱/۰۰
S9	۰/۷۶۴	۰/۰۵۸	۰/۲۹۴	۱/۰۰
S10	۰/۷۹۷	۰/۰۷۴	۰/۳۵۱	۱/۰۰

مقایسه دو شاخص خشکی دومارتن و فائو در

ایستگاه‌های مورد مطالعه

در شکل ۳ نمودار heatmap مقایسه دو شاخص خشکی در ایستگاه‌های مورد مطالعه با استفاده از داده‌های زمینی و داده‌های ماهواره‌ای آورده شده است. نتایج نشان داد که شاخص خشکی دومارتن به دلیل بایاس نسبی پایین‌تر، ضریب همبستگی و مقادیر احتمال تخمین بالاتر نسبت به روش فائو در ایستگاه‌های مشهد، تربت جام، نیشابور، گناباد و گل‌مکان به عنوان بهترین روش برای محاسبه شاخص خشکی در مقیاس سالانه انتخاب گردید. در سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه بر اساس شاخص‌های آماری، روش فائو به دلیل مطلوبترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا، شاخص نش-ساتکلیف و بایاس نسبی به عنوان بهترین روش محاسبه شاخص خشکی در این ایستگاه‌ها انتخاب گردید. دلیل این نتایج را می‌توان به متفاوت بودن شرایط آب و هوایی و محیط‌های جغرافیایی مرتبط دانست. شرایط محلی مانند تغییرات توپوگرافی، پوشش گیاهی نیز می‌توانند به طور محلی نتایج را تحت تأثیر قرار دهند و موجب تفاوت بین داده‌های ماهواره‌ای و زمینی در نواحی مختلف شوند. به همین دلیل استفاده از داده‌های

ماهواره‌ای برای محاسبه شاخص‌های خشکی در هر منطقه نیاز به اعتبار سنجی دارند. نقشه تحلیل مکانی شاخص‌های خشکی با مقایسه شاخص‌های فائو و دومارتن با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در شکل ۴ آورده شده است.

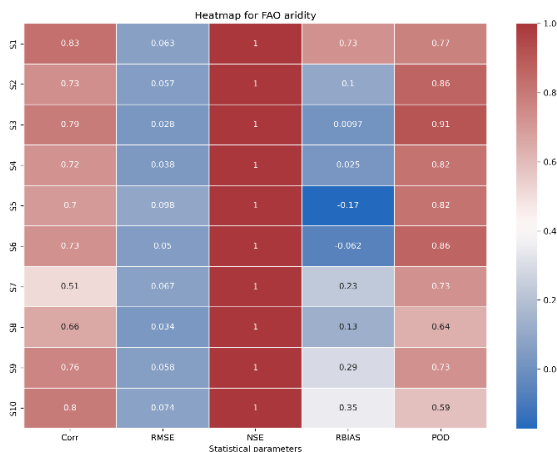
نتایج تحقیقات ما نشان داد که شاخص‌های خشکسالی مشتق شده از داده‌های ماهواره‌ای موجود در سامانه گوگل ارث انجین اطلاعات مکانی مفیدی را برای ارزیابی شرایط خشکسالی در سطح استان خراسان رضوی فراهم می‌کند. علاوه بر این، فناوری سنجش از دور در مناطقی با ایستگاه‌های آب و هوایی محدود و در دسترس بودن داده‌ها بسیار مفید است. بنابراین، یافته‌های این مطالعه برای درک ما از ماهیت خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک حیاتی است. (Aksoy et al., 2019) نیز در مطالعات خود در بررسی توزیع مکانی-زمانی شرایط خشکسالی در ترکیه با استفاده از شاخص‌های مختلف خشکسالی تولید شده از داده‌های ماهواره مادیس در پلت فرم گوگل ارث انجین به نتایج مطلوبی دست یافتند، Ejaz و همکاران (۲۰۲۲) در عربستان سعودی با استفاده از داده‌های ماهواره لندست شاخص خشکی SPI را مورد بررسی قرار دادند نتایج آنان که داده‌های ماهواره‌ای از دقت کافی برای بررسی خشکسالی در مناطق بسیار

GPM در سامانه گوگل ارث استفاده نمودند و نتایج مطلوبی برای پایش خشکسالی در ایران به دست آوردند.

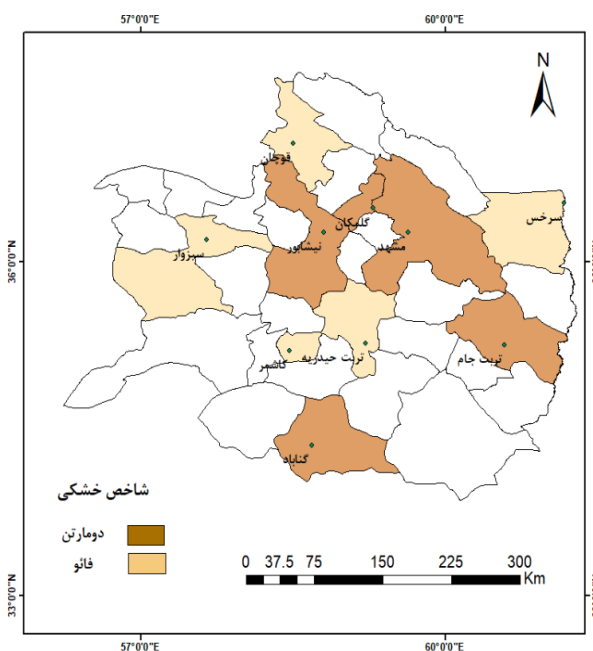
نتیجه گیری

خشکی می تواند پیامدهای مخرب کوتاه مدت و بلندمدتی بر محیط زیست داشته باشد. خشکی همه اقلیمها را تحت تأثیر قرار می دهد. با این حال، اقلیمهای خشک و نیمه خشک اغلب خشکیهای مکرر و شدیدتری را تجربه می کنند. اما یکی از چالشهای اصلی مطالعه این پدیده کمبود ایستگاههای زمینی و همچنین توزیع نامناسب آنهاست. امروزه با پیشرفت تکنولوژی و سنجش از دور، طیف متنوعی از دادههای ماهوارهای در دسترس دانشمندان محیط زیست قرار گرفته است. در این راستا، در این مقاله، ابزاری همگانی ارائه شده است که از طریق موتور گوگل ارث و بر اساس زبان برنامه نویسی جاوا اسکریپت ارائه شده است و می تواند توزیع مکانی و زمانی خشکی را با شاخصهای ترکیبی بر روی مناطق آب و هوایی همگن ارائه دهد. این ابزار به کاربران اجازه می دهد نتایج را مشاهده کرده و با آنها تعامل داشته باشند، نقشه های خود را بسازند و داده ها را استخراج کنند. در پژوهش حاضر با استفاده از داده های ماهواره ای (TerraClimate)، برای محاسبه تبخیر و تعرق بالقوه ماهانه، داده های MODIS (MOD11A1 (V6.1) برای محاسبه دما و از مجموعه داده های محصول (CHIRPS) برای محاسبه میزان بارش ماهانه در دوره آماری ۱۳۷۸-۱۴۰۱، توزیع مکانی خشکی بر اساس شاخصهای دومارتن (Martonne) و فائو (FAO) در مقیاس سالانه در ۱۰ ایستگاه سینوپتیک در شمال شرق ایران مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که شاخص خشکی دومارتن در ایستگاههای مشهد، تربت جام، نیشابور، گناباد و گلکان با ضریب همبستگی در

خشک برخوردار می باشند. Mehravar و همکاران (۲۰۲۱) برای پایش خشکی در ایران با استفاده از شاخص RDSI از تصاویر مادیس، بارش TRMM و



شکل (۳): نمودار Heatmap مقایسه شاخص های خشکی با استفاده از داده های ماهواره ای و داده های زمینی در ایستگاه های مورد مطالعه



شکل (۴): نقشه تحلیل مکانی شاخص های خشکی با مقایسه شاخص های فائو و دومارتن: تحلیل داده های ماهواره ای و زمینی

تعیین شاخص‌های خشکی در تحقیق حاضر مناسب است که با توجه به تفکیک مکانی - زمانی مناسب، نتایج قابل اعتماد و رضایت بخشی به دست می‌دهد. از سوی دیگر، پوشش فضایی ناکافی ایستگاه‌های هواشناسی و خلاء آماری زیاد آن‌ها در چنین حوضه نسبتاً وسیعی، استفاده از این داده‌های ماهواره‌ای ارزشمند و مفید را توجیه می‌کند.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از نتایج طرح تحقیقاتی اجرا شده از محل اعتبارات معاونت پژوهشی مجتمع آموزش عالی کشاورزی و دامپروری تربت‌جام می‌باشد. بدین‌وسیله از حمایت مالی این مجتمع تقدیر و تشکر می‌گردد.

محدوده ۰/۷۰۴-۰/۸۵۱، ریشه میانگین مربعات خطا در محدوده ۱/۲۲۸-۲/۴۱۹، بایاس نسبی (منفی) در محدوده ۰/۰۹۶-۰/۲۲۷، شاخص نش-ساتکلیف در محدوده ۰/۶۳۳-۰/۱۴۲ و احتمال تخمین در محدوده ۰/۷۷۳-۱ به عنوان بهترین روش برای محاسبه شاخص خشکی در مقیاس سالانه انتخاب گردید. در ایستگاه‌های سرخس، تربت حیدریه، کاشمر و سبزوار روش فائو با ضریب همبستگی در محدوده ۰/۷۲۳-۰/۷۹۱، ریشه میانگین مربعات خطا در محدوده ۰/۰۲۸-۰/۵۷، بایاس نسبی (مثبت) در محدوده ۰/۰۱-۰/۱۰، شاخص نش-ساتکلیف در محدوده ۱/۰۰ و احتمال تخمین در محدوده ۰/۰۹۷۲۷-۰/۰۰، به عنوان بهترین روش محاسبه شاخص خشکی در این ایستگاه‌ها انتخاب گردید. به طور کلی استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به منظور

منابع

- Abatzoglou, J. T., S. Z. Dobrowski, S. A. Parks, and K. C. Hegewisch. 2018. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data* 5:170191.
- Aksoy, S., O. Usal, and E. Sertel. 2019. Drought Monitoring using MODIS derived indices and Google Earth Engine Platform.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, R. Dirk, and S. Martin. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Irrigation and Drainage.
- Araghi, A., C. J. Martinez, J. Adamowski, and J. E. Olesen. 2018. Spatiotemporal variations of aridity in Iran using high-resolution gridded data. *International Journal of Climatology* 38:2701–2717.
- Deniz, A., H. Toros, and S. Incecik. 2011. Spatial variations of climate indices in Turkey. *International Journal of Climatology*.
- DeVries, B., C. Huang, J. Armston, W. Huang, J. W. Jones, and M. W. Lang. 2020. Rapid and robust monitoring of flood events using Sentinel-1 and Landsat data on the Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment* 240:111664.
- Djaman, K., A. B. Balde, A. Sow, B. Muller, S. Irmak, M. K. N. Diaye, B. Manneh, Y. D. Moukoubi, K. Futakuchi, and K. Saito. 2015. Journal of Hydrology : Regional Studies Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 3:139–159.
- Ejaz, N., J. Bahrawi, K. Mohammed Alghamdi, K. Rahman, and S. Shang. 2023. Drought Monitoring Using Landsat Derived Indices and Google Earth Engine Platform: A Case Study from Al-Lith Watershed, Kingdom of Saudi Arabia. *Remote Sensing* 15:984.
- Gavrilov, M. B., W. An, C. Xu, M. G. Radaković, Q. Hao, F. Yang, Z. Guo, Z. Perić, G. Gavrilov, and S. B. Marković. 2019. Independent Aridity and Drought Pieces of Evidence Based on Meteorological Data and Tree Ring Data in Southeast Banat, Vojvodina, Serbia.
- Ghavidel, Y., A. Hosseini, A. M. Khorshiddoust, and M. Farajzadeh. 2020. Spatio-temporal Analysis of Dry and Wet Periods in Iran by Using Global Precipitation Climatology Center - Drought Index (GPCC -DI). *Theoretical and Applied Climatology*.
- Gidey, E., O. Dikinya, R. Sebege, E. Segosebe, and A. Abraha. 2018. Using Drought Indices to



Model the Statistical Relationships Between Meteorological and Agricultural Drought in Raya and Its Environs, Northern Ethiopia. *Earth Systems and Environment* 2.

Haider, S., and S. Adnan. 2014. Classification and Assessment of Aridity Over Pakistan Provinces (1960-2009). *International journal of Environment* 3:2091–2854.

Huo, Z., X. Dai, S. Feng, S. Kang, and G. Huang. 2013. Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China. *Journal of Hydrology*.

Khan, R., H. Gilani, N. Iqbal, and I. Shahid. 2019. Satellite-based (2000–2015) drought hazard assessment with indices, mapping, and monitoring of Potohar plateau, Punjab, Pakistan. *Environmental Earth Sciences* 79.

Kocaaslan, S., N. Musaoğlu, and S. Karamzadeh. 2021. Evaluating Drought Events by Time-Frequency Analysis: A Case Study in Aegean Region of Turkey. *IEEE Access* 9:125032–125041.

Lang, D., J. Zheng, J. Shi, F. Liao, X. Ma, W. Wang, X. Chen, and M. Zhang. 2017. A comparative study of potential evapotranspiration estimation by eight methods with FAO Penman–Monteith method in southwestern China. *Water (Switzerland)* 9.

Mehrarvar, S., M. Amani, A. Moghimi, F. Dadrass Javan, F. Samadzadegan, A. Ghorbanian, A. Stein, A. Mohammadzadeh, and S. M. Mirmazloumi. 2021. Temperature-Vegetation-soil Moisture-Precipitation Drought Index (TVMPDI); 21-Year Drought Monitoring in Iran using Satellite Imagery within Google Earth Engine. *Advances in Space Research* 68.

Paltineanu, C., I. F. Mihailescu, I. Seceleanu, C. Dragota, and F. Vasenciu. 2007. Using aridity indices to describe some climate and soil features in Eastern Europe: A Romanian case study. *Theoretical and Applied Climatology*.

Paniagua, L. L., A. García-Martín, F. J. Moral, and F. J. Rebollo. 2019. Aridity in the Iberian Peninsula (1960–2017): distribution, tendencies, and changes. *Theoretical and Applied Climatology* 138:811–830.

Park, C.-E., S.-J. Jeong, M. Joshi, T. J. Osborn, C.-H. Ho, S. Piao, D. Chen, J. Liu, H. Yang, H. Park, B.-M. Kim, and S. Feng. 2018. Keeping global warming within 1.5 °C constrains emergence of aridification. *Nature Climate Change* 8:70–74.

Pellicone, G., T. Caloiero, and I. Guagliardi. 2019. The De Martonne aridity index in Calabria (Southern Italy). *Journal of Maps* 15:788–796.

Pörtner, H.-O., D. Roberts, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama, D. Belling, W. Dieck, S. Götze, T. Kersher, P. Mangele, B. Maus, A. Mühle, and N. Weyer. 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Robert Maliva, T. M. 2012. *Arid Lands Water Evaluation and Management*.

Sazib, N., I. Mladenova, and J. Bolten. 2018. Leveraging the Google Earth Engine for Drought Assessment Using Global Soil Moisture Data.

Shifteh Some'e, B., A. Ezani, and H. Tabari. 2013. Spatiotemporal trends of aridity index in arid and semi-arid regions of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*.

Sidhu, N., E. Pebesma, and G. Câmara. 2018. Using Google Earth Engine to detect land cover change: Singapore as a use case. *European Journal of Remote Sensing* 51:486–500.

Tamiminia, H., B. Salehi, M. Mahdianpari, L. Quackenbush, S. Adeli, and B. Brisco. 2020. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 164:152–170.

Thaeri Qazvini, A., and D. Carrion. 2023a. A Spatiotemporal Drought Analysis Application Implemented in the Google Earth Engine and Applied to Iran as a Case Study. *Remote Sensing* 15:2218.

Thaeri Qazvini, A., and D. Carrion. 2023b. A Spatiotemporal Drought Analysis Application Implemented in the Google Earth Engine and Applied to Iran as a Case Study. *Remote Sensing* 15:2218.

Thornthwaite, C. W. 1948. *An Approach toward a Rational Classification of Climate*.



Geographical Review.

Vogt, J., W. Erian, R. Pulwarty, and M. Gordon. 2021a. GAR Special Report on Drought 2021 (United Nations).

Vogt, J., W. Erian, R. Pulwarty, and M. Gordon. 2021b. GAR Special Report on Drought 2021 (United Nations).

Wang, W., W. Xing, Q. Shao, Z. Yu, S. Peng, T. Yang, B. Yong, J. Taylor, and V. P. Singh. 2013. Changes in reference evapotranspiration across the Tibetan Plateau: Observations and future projections based on statistical downscaling. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*.

Wilhite, D., M. Svoboda, and M. Hayes. 2007. Understanding the Complex Impacts of Drought: A Key to Enhancing Drought Mitigation and Preparedness. *Water Resources Management* 21:763–774.