



Spatio- Decade analysis of Iranian droughts to environmental decision-making

Mahmoud Ahmadi¹, Mohammad Kamangar^{✉2}

1. Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Faculty of Earth Sciences, Tehran, Iran, Email: ma_ahmadi@sbu.ac.ir

2. Corresponding Author, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Faculty of Earth Sciences, Tehran, Iran, Email: Mohamad.Kamangar63@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history:</p> <p>Received: May. 2, 2022</p> <p>Revised: June. 29, 2022</p> <p>Accepted: July. 11, 2022</p> <p>Published online: Aug. 23, 2022</p> <p>Keywords: Rainfall Lack, Spatial Standard Deviation, Climate Change, Getis-Ord statistic, Iran.</p>	<p>Global warming have led to an increase in the frequency of severe weather events, including droughts. Monitoring and predicting spatio-temporal behavior phenomenon is very important to prevent negative socio-economic consequences and environmental planning. There has been no comprehensive long-term assessment of drought spatial analysis for Iran. For this purpose, first a decade of droughts with the PDSI index from 1980 to 2020 were extracted and then analyzed spatially. The results showed that the intensity of Palmer drought index in Iran increased from -2.12 to 1.45 to -5.73 to 1.34 and changed from dry to extremely dry. The elliptical direction showed three standard deviations in each of the four decades studied northwest and southeast, which was in the direction of unevenness, following the direction of Iran's rainfall. In order to clarify the type of spatial pattern, the G-Star clustering index was calculated and the results showed that in the first decade of the interval, hot spots (severe drought clustering) were found in small parts of the center of Iran and on low rainfall provinces and deserts. Second, hot spots in the southwest of Iran, including Bushehr and Khuzestan provinces, located in the third decade in many parts of the center of Iran, including Tehran, Semnan, Isfahan, Fars, Kohkiluyeh and Boyer Ahmad provinces, and in the fourth decade, hot spots in the south and southeast of Iran. including Hormozgan province and Sistan Baluchistan showed itself as meaningful cluster patterns. The spatial distribution of drought intensities indicates the displacement and intensity of rainfall systems over the decades, indicating that all parts of the country may be at risk of drought. Such research can identify areas at high drought risk and be used in environmental planning.</p>
<p>Cite this article: Ahmadi M., & Kamangar, M., (2022). Spatio- Decade analysis of Iranian droughts to environmental decision-making. <i>Iranian Journal of Soil and Water Research</i>, 53 (6), 1315-1330.</p> <p>© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.</p> <p>DOI: http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.342456.669258</p>	

تحلیل دهه‌ای-فضایی خشک‌سالی‌های ایران جهت پشتیبانی فرآیندهای تصمیم‌گیری محیطی

محمود احمدی^۱، محمد کامانگر^۲^۱. گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، تهران، ایران. ایمیل: ma_ahmadi@sbu.ac.ir^۲. نویسنده مسئول، گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، تهران، ایران.ایمیل: Mohamad.Kamangar63@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	افزایش دمای جهانی باعث افزایش فراوانی رویدادهای شدید آب و هوایی از جمله خشک‌سالی‌ها شده است. پایش و پیش‌بینی رفتار مکانی-زمانی این پدیده برای پیشگیری از تبعات منفی اقتصادی-اجتماعی و برنامه‌ریزی‌های محیطی دارای اهمیت زیادی است. تاکنون ارزیابی جامعی از تحلیل فضایی خشک‌سالی در کشور در بلندمدت صورت نگرفته است. در این راستا ابتدا خشک‌سالی‌ها دهه‌ای با شاخص PDSI از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ استخراج و سپس مورد تحلیل فضایی قرار گرفت. نتایج نشان داد شدت شاخص خشک‌سالی در ایران از ۲/۱۲- تا ۱/۴۵- به ۵/۷۳- تا ۱/۳۴- افزایش پیدا کرده، یعنی از طبقه خشک به فوق‌العاده خشک تغییر یافته است. راستای بیضوی سه انحراف معیار در هر چهار دهه مورد بررسی، شمال غرب و جنوب شرق را از خود نشان داده که به تبعیت از راستای بارشی ایران در جهت ناهمواری‌ها قرار داشت. جهت مشخص نمودن نوع الگوی مکانی، شاخص خوشه‌بندی جی استار محاسبه شده که نتایج نشان داد در دهه اول بازه مورد لکه‌های داغ (خوشه‌بندی خشک‌سالی شدید) در قسمت‌های کوچکی از مرکز ایران و بر روی استان‌های کم بارش و کویرها قرار داشته است در دهه دوم لکه‌های داغ در جنوب غرب ایران شامل استان‌های بوشهر و خوزستان قرار گرفته در دهه سوم در قسمت‌های زیادی از مرکز ایران از جمله استان‌های تهران، سمنان، اصفهان، فارس و کهگیلویه و بویر احمد و در دهه چهارم لکه‌های داغ در قسمت جنوب و جنوب شرق ایران شامل استان هرمزگان و سیستان بلوچستان به صورت الگوهای خوشه‌ای معنادار خود را نشان دادند. پراکنندگی مکانی شدت‌های مختلف خشک‌سالی حاکی از تغییر مکان و شدت سامانه‌های بارشی به صورت دهه‌ای است که نشان می‌دهد که همه نقاط کشور ممکن است در معرض مخاطره خشک‌سالی قرار گیرند. چنین تحقیقاتی می‌تواند موجب شناسایی مناطق در معرض شدید خشک‌سالی شده و در برنامه‌ریزی‌های محیطی مورد استفاده قرار گیرد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۱۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۴/۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۴/۲۰	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۶/۱	
واژه‌های کلیدی:	
کمبود بارش،	
انحراف معیار مکانی،	
تغییر اقلیم،	
آماره جی گیتس،	
ایران.	

استناد: احمدی، محمود؛ کامانگر، محمد. (۱۴۰۱). تحلیل دهه‌ای-فضایی خشک‌سالی‌های ایران جهت پشتیبانی فرآیندهای تصمیم‌گیری محیطی. مجله تحقیقات آب و خاک

/ایران، ۵۳ (۶)، ۱۳۳۰-۱۳۱۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.342456.669258>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

افزایش دمای جهانی، گرم شدن اقیانوس‌ها، کوچک شدن ورق‌های یخی، بالا آمدن سطح دریاها، اسیدی شدن اقیانوس‌ها و رویدادهای حدی دمایی همه نشانه‌های مشهودی از تغییرات اقلیمی در سطح کره زمین است. طبق یک اجماع علمی، بسته به شرایط اجتماعی - اقتصادی در آینده، اگر میزان گرم شدن کره زمین فقط ۱/۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شود تنش آب منطقه‌ای، با سطح اعتماد متوسط احتمال دارد ۵۰٪ افزایش یابد (IPCC, 2018). یکی از اثرات تغییر اقلیم تشدید چرخه هیدرولوژیکی است (Dai, 2011) به این معنی که پیش‌بینی می‌شود شدت، فراوانی و گستره وقوع پدیده‌های حدی آب‌وهوایی تحت تأثیر تغییر اقلیم افزایش یابد (Zhao et al., 2021).

وقوع پدیده‌های حدی آب‌وهوایی می‌تواند منجر به مخاطرات طبیعی شود، زیست‌بوم‌ها را تهدید کند و بر سلامت و اقتصاد مردم تأثیر منفی بگذارد. خشک‌سالی‌ها پیامد تنوع در چرخه آب جهانی است و مرتبط با الگوهای گردش آب و هوایی است (Golian et al., 2014). این پدیده به‌عنوان یکی از زیان‌بارترین مخاطره‌های آب‌وهوایی از پدیده‌های حدی آب‌وهوایی است که با توجه به روندهای افزایشی دما مشاهده شده، می‌تواند در همه رژیم‌های اقلیمی رخ دهد (Carrao et al., 2016). خشک‌سالی یک دوره محتمل آب‌وهوایی است که با کمبود منابع آبی و غذایی بر اقتصاد تأثیر می‌گذارد (Zhang et al., 2012). علیرغم توسعه آهسته خشک‌سالی، تأثیر منفی آن بر محیط‌زیست، هیدرولوژی و اقتصاد بسیار زیاد است زیرا حتی پس از پایان خشک‌سالی دوره جبران آن نیز طولانی است. خشک‌سالی ممکن است تأثیرهای زیادی بر زندگی انسان‌ها داشته باشد مسائل فراوانی را در مورد امنیت آب و غذا ایجاد می‌کند، منجر به خطرات اقتصادی و مالی شود و همچنین چالش‌هایی پیچیده‌ای را به ویژه برای اقتصادهای در حال توسعه ایجاد کند (Wilhite, 2005; Godfray et al., 2010).

خشک‌سالی یک خطر طبیعی تکرار شونده است که می‌تواند تقریباً در همه جای کره زمین اتفاق بیافتد (Rajsekhar and Gorelick, 2017; Schwalm et al., 2017). به طور کلی خشک‌سالی به خشک‌سالی هواشناسی، خشک‌سالی کشاورزی، خشک‌سالی هیدرولوژیکی و خشک‌سالی اجتماعی-اقتصادی طبقه‌بندی می‌شوند. خشک‌سالی هواشناسی به کمبود آب ناشی از عدم توازن بین بارش و تبخیر اشاره دارد. خشک‌سالی کشاورزی با تجزیه و تحلیل ویژگی‌های رطوبت خاک و مورفولوژی گیاهان در طول رشد بررسی می‌شود و نشان می‌دهد میزان رطوبت خاک کمتر از نیاز گیاهان است. خشک‌سالی هیدرولوژیکی زمانی رخ می‌دهد که جریان رودخانه کمتر از مقدار نرمال باشد یا زمانی که سطح آب یک سفره زیرزمینی نسبت به حد نرمال کاهش می‌یابد و خشک‌سالی اجتماعی-اقتصادی پدیده‌ای است که در آن تغییراتی در تولید و مصرف سیستم‌های طبیعی و اجتماعی-اقتصادی متأثر از کمبود آب رخ داده است (Liu et al., 2016). اگرچه تعاریف هر چهار نوع خشک‌سالی‌ها متفاوت هستند، اما همه آن‌ها پدیده‌های کم‌آبی ناشی از کمبود بارندگی به حساب می‌آیند که با یکدیگر در ارتباط‌اند.

بررسی و پایش خشک‌سالی‌ها، بیشتر با تحلیل فراوانی منطقه‌ای خشک‌سالی در مقیاس کوچک آغاز شد (Whipple, 1966) و به‌صورت توصیفی انجام می‌گرفت سپس توسط سایر پژوهشگران با ایجاد و توسعه شاخص‌ها ادامه یافت. برای تحلیل کمی خشک‌سالی، وجود یک شاخص مشخص به‌منظور تعیین دقیق دوره‌های مرطوب و خشک بسیار ضروری است (Silva, 2003). شاخص‌های خشک‌سالی از عناصر بارش، دما و تبخیر-تعرق استفاده می‌کنند و از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به شاخص‌های بارش استاندارد شده، شاخص پالمر، شاخص نمره Z، شاخص دهک‌ها و شاخص بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) اشاره نمود. در سال‌های اخیر، نظارت بر خشک‌سالی مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای نیز رواج یافته و به‌طور گسترده در مناطق مختلف جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Zhang et al., 2014). سنجش‌ازدور و GIS در دهه‌های گذشته به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است تا مشکلات زیست‌محیطی از جمله خشک‌سالی را پایش کند (Rhee et al, 2010; Caccamo et al., 2011; Zhang and et al., 2012; Choi & Hur, 2012; Abdrabbo et al., 2012; Mladenova et al., 2014).



شاخص‌های مختلف مبتنی بر سنجش‌ازدور مانند $NDVI^1$ ، LST^2 ، VCI^3 ، TCI^4 ، VHI^5 ، $TVDI^6$ ، $VSDI^7$ و شاخص رطوبت محصول (CMI^8) به‌طور عام برای ارزیابی خشک‌سالی‌های کشاورزی در مورد رشد و کاشت گیاه استفاده شده است.

(Huang et al., 2010; Wilhite, 2005; Tucker et al., 1983; Ghaleb et al., 2015). به‌تازگی نیز برخی از تحقیقات برای ارزیابی خشک‌سالی‌های کشاورزی از محتوای رطوبت خاک سیستم جهانی همسان سازی داده‌های زمین ($GLDAS^9$) برای جبران کمبود داده استفاده کرده‌اند (Zhou et al., 2021; Souza et al., 2021). احتمال تشخیص رخداد خشک‌سالی با این داده‌ها نسبتاً مناسب بود. نیمی از ۵۶۶ ایستگاه دارای POD^{10} ‌های بالاتر از ۰٫۹ بودند و یک سوم از این ایستگاه‌ها دارای مقادیر POD برابر با ۱ بودند. نتایج حاصل از شاخص‌های متعدد خشک‌سالی ماهواره‌ای در محدوده وسیع و با قدرت تفکیک زمانی کم می‌تواند به پیش‌خشک‌سالی‌ها کمک کند اما همچنان برای برآورد صحت سنجی نیاز به ایستگاه‌های زمینی و تحقیقات بیشتر وجود دارد. برخی از محققان رابطه بین انواع مختلف خشک‌سالی را بررسی و تحلیل کرده‌اند. انتقال خشک‌سالی هواشناسی به خشک‌سالی کشاورزی و آشکار کردن ارتباط دقیق بین آنها را در حوضه رودخانه Wei با روش تقسیم‌بندی اکتشافی و استفاده از شاخص شدت خشک‌سالی پالمرو و شاخص بارش استاندارد را در بازه زمانی ۱۹۶۰-۲۰۰۷ را (Huang et al., 2015) بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که خشک‌سالی کشاورزی با خشک‌سالی هواشناسی ارتباط نزدیکی دارد اما تغییرات زمان تأخیر خشک‌سالی کشاورزی در پاسخ به خشک‌سالی هواشناسی در مقیاس فصلی زیاد است و پاسخ سریع در تابستان و پاسخ نسبتاً آهسته در پاییز مشخص می‌شود همچنین تغییرات نوسان قطب شمال (AO) تأثیرات زیادی بر زمان تأخیر دارد که دارای تأثیرات مثبت و منفی است.

رویکردی چند شاخصه برای پیش‌خشک‌سالی در حوضه کشفروود با شاخص خشک‌سالی مبتنی بر بارش شاخص بارش استاندارد (SPI)، درصد شاخص نرمال (PNI)، شاخص دهک (DI)، شاخص خشک‌سالی مؤثر (EDI)، شاخص چین‌زی (CZI)، چین‌زی اصلاح شده (MCZI)، شاخص ناهنجاری بارندگی (RAI)، و شاخص امتیاز (ZSI) (Z) با استفاده از داده‌های بارش مشاهده‌ای و داده‌های بارش شبکه‌بندی AgMERRA طی دوره ۱۹۸۷-۲۰۱۰ را (Salehnia et al., 2017) به کار برده‌اند. نتایج ایشان نشان داد همه شاخص‌ها قادر به ردیابی شدت خشک‌سالی بودند در همه شاخص‌ها شدیدترین خشک‌سالی‌ها برای دوره مورد مطالعه در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸ رخ داده است. علاوه بر این، همبستگی بالایی ($R^2 = 0.99$) بین CZI و MCZI، و بین ZSI و RAI یافت شد. همه شاخص‌ها قادر به ردیابی شدت خشک‌سالی بودند، اما EDI و RAI مقادیر DDI بالاتری را در مقایسه با سایر شاخص‌ها نشان دادند. با توجه به همبستگی قوی بین شاخص‌های خشک‌سالی حاصل از داده‌های بارش AgMERRA و داده‌های بارش مشاهده‌شده ایستگاهی، پیشنهاد کرده‌اند که داده‌های بارش AgMERRA را می‌توان برای پر کردن شکاف‌های موجود در داده‌های بارش مشاهده‌شده ایستگاه در مطالعات آبی در ایران پذیرفت.

روش کمی برای آشکار کردن نحوه انتقال خشک‌سالی کشاورزی به خشک‌سالی هواشناسی را با استفاده از موجک‌های عرضی و روش‌های همبستگی مکانی را (Li et al., 2020) بررسی کردند. ایشان شاخص بارش استاندارد (SPI)، شاخص رواناب استاندارد (SRI)، شاخص استاندارد رطوبت خاک (SSI) و شاخص سلامت گیاه (VHI) به ترتیب برای توصیف خشک‌سالی‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی، رطوبت خاک و پوشش گیاهی مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد که زمان انتشار از خشک‌سالی هواشناسی تا هیدرولوژیکی ظرف یک ماه و از خشک‌سالی هیدرولوژیکی تا رطوبت خاک ظرف مدت دو ماه و از خشک‌سالی هیدرولوژیکی تا پوشش گیاهی در بیشتر مناطق حوضه رودخانه یانگ تسه بین دو تا سه ماه است. شاخص خودهمبستگی عمومی موران در SPI، SRI و SSI بالاتر از ۰٫۷ و شاخص موران محلی به‌طور عمده خوشه‌ای شدید بود که نشان می‌دهد خشک‌سالی‌ها به لحاظ مکانی از نزدیک با مناطق همسایه ارتباط دارند. مطالعات متعددی نیز در ایران برای پیش‌خشک‌سالی با استفاده از یک یا چند شاخص مختلف خشک‌سالی بدون در نظر گرفتن

- 1 Normalized Difference Vegetation Index
- 2 Land Surface Temperature
- 3 vegetation condition index
- 4 Temperature Condition Index
- 5 Vegetation Health Index
- 6 Temperature Vegetation Dryness Index
- 7 Shortwave Infrared Dryness Index
- 8 crop moisture index
- 9 Global Land Data Assimilation System
- 10 probability of detection

شرایط محیطی انجام‌شده (Naserzadeh and Karimi et al., 2011; Shakiba et al., 2010; Ensafi Moghadam, 2017) برای نمونه پایش خشک‌سالی ماهانه بر اساس شاخص استاندارد بارش در ۱۲ ایستگاه جنوب شرق کشور طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ و پیش‌بینی تا ۲۰۲۰ با استفاده از زنجیره مارکوف را (Zarei et al., 2017) انجام دادند. نتایج ایشان نشان داد بیشتر ایستگاه‌ها از نظر خشک‌سالی دارای وضعیت نرمال، متوسط و شدید هستند. ماتریس احتمال انتقال نشان داد که در تمامی ایستگاه‌ها، احتمال گذر از یک حالت معین به همان حالت و احتمال گذر از حالت مرطوب به خشک، زیاد؛ اما احتمال گذر از حالت خشک به تر، کم است. برخی از مطالعات هم به خاطر اقلیم خشک ایران تخبیر و تعرق را در شاخص‌ها مدنظر گرفته‌اند (Darand, 2014). به دلیل اینکه خشک‌سالی سهم عمده در پوشش‌های گیاهی دارد استفاده از پردازش‌های تصاویر سنجش‌ازدور رو به فزونی داشته است مطالعات زیادی با شاخص‌های سنجش‌ازدور همچون NDVI، VCI و TCI انجام گرفته است (Fazel Dehkordi et al., 2016; Safari Shad and Ildermi, 2017; Karimi and Shahdi, 2017; Hosseini et al., 2021). مطالعه تطبیقی کارایی برخی نمایه‌های خشک‌سالی هواشناسی در مناطق مختلف اقلیمی ایران با استفاده از داده‌های روزانه ۴۲ ایستگاه همدیدی را (Bazgir et al., 2020) بررسی کردند نتایج ایشان نشان داد که خشک‌سالی‌های رخ داده در طبقه متوسط قرار می‌گیرند. بر اساس سنجه کارآمد، نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که نمایه درصد نرمال بارش (PNPI)، شاخص مناسبی به‌ویژه برای مناطق مرطوب نبود. در حالی که نمایه تخبیر و تعرق - بارش استاندارد شده (SPEI)، شرایط خشک‌سالی در مناطق مرطوب‌تر را بهتر نشان داد. نتایج این پژوهش نشان داد که برخلاف رفتار دیگر نمایه‌ها، نمایه بارش استاندارد شده (SPI) در پایش خشک‌سالی در تمامی طبقات اقلیمی نتایج یکسانی داشته است. به نظر می‌رسد نتیجه مذکور منطقی نبوده و بیانگر این موضوع است که استفاده از SPI بایستی با دقت بیشتری صورت گیرد.

با بررسی مطالعات انجام‌شده مشخص می‌شود که تحقیقات بیشتر بر استخراج تک‌بعدی خشک‌سالی و ارزیابی شاخص‌های سنجش‌ازدوری تمرکز داشته‌اند. گرچه استخراج نقشه‌های خشک‌سالی مهم است اما مدل‌سازی تغییرات مکانی بر این فرآیند نیز اهمیت فراوانی دارد. تعیین اینکه الگوی های خشک‌سالی بیشتر در کجا، چه موقع و چگونه رخ می‌دهد برای مشخص نمودن پایداری اراضی کشاورزی حیاتی است. با توجه به تغییرات الگوی دما - بارش جهانی و اینکه ایران بر روی کمربند خشکی جهان قرار گرفته است احتمال وقوع خشک‌سالی‌ها در آن زیاد است. وقوع این پدیده می‌تواند تهدیدی مهم برای اقتصاد ملی و معیشت مردم باشد. خشک‌سالی گسترده سال ۱۴۰۰ در سراسر کشور را می‌توان نمونه‌ای از زیان‌بارترین مخاطره‌های اقلیمی در چند سال اخیر ذکر کرد که مسائل زیادی را در تأمین آب برای کلیه بخش‌های کشور ایجاد کرد. اولین گام برای مقابله با بحران خشک‌سالی، پایش آن است. هدف از این تحقیق استخراج دهه‌ای خشک‌سالی‌ها به صورت شبکه‌ای در ایران و تحلیل و تبیین فضایی خشک‌سالی‌ها جهت پشتیبانی فرآیندهای تصمیم‌گیری و مدیریتی است.

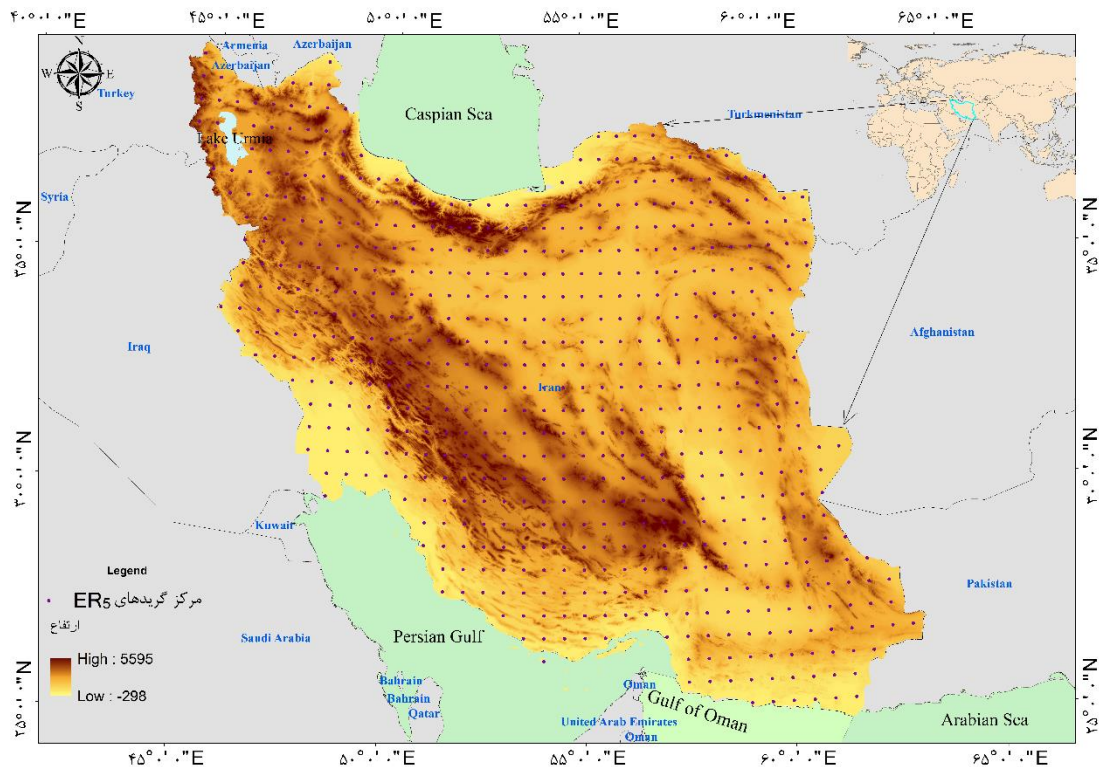
روش بررسی

محدوده مورد بررسی

محدوده مورد مطالعه کشور ایران در جنوب غرب آسیا بین عرض‌های جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و ۴۴ تا ۶۴ درجه شرقی با مساحت ۱'۶۴۸'۱۹۵ کیلومتر مربع است (شکل ۱). ایران از شمال غرب با ارمنستان و آذربایجان، از شمال با دریای خزر، از شمال شرق با ترکمنستان، از شرق با افغانستان و پاکستان، از جنوب با خلیج فارس و دریای عمان و در غرب با عراق و ترکیه هم‌مرز است. (شکل ۱). سرزمین ایران به‌طور کلی کوهستانی و نیمه‌خشک بوده و میانگین ارتفاع آن بیش از ۱۲۰۰ متر از سطح دریاست. به علت گستردگی ایران و وجود عوامل متعدد جغرافیایی از یک طرف و از طرف دیگر قرارگیری در محل گذار سامانه‌های متفاوت گردش جوی، تنوع اقلیمی در سرتاسر آن وجود دارد (Alijani, 2012).

ایران از لحاظ دمایی به دو بخش سرد کوهستانی و گرم کم ارتفاع تقسیم می‌شود. میانگین دمای کشور حدود ۱۸ درجه سلسیوس است. حاکمیت سامانه‌های همدید، نظیر کم‌فشار گنگ و پرفشار آزور از یک سو و محتوای رطوبتی جو نیز از سوی دیگر در شکل‌گیری نواحی دمایی ایران نقش دارند (Masoudian et al., 2008). وضعیت دمایی ایران در تابستان همگن‌تر از زمستان است. میانگین بارش سالانه در ایران حدود ۲۵۰ میلی‌متر است که ایران را جزو کشورهای خشک دنیا قرار داده است. در دوره سرد سال، به علت حاکمیت بادهای غربی و نزدیکی به منبع رطوبتی دریای مدیترانه بارندگی زیادی دارد، اما دوره گرم سال نفوذ پرفشار آزور باعث کاهش بارندگی می‌شود. توزیع زمانی و مکانی باران در کشور نیز پراکندگی یکسانی ندارد. بیشترین مقدار بارش‌ها مربوط به کرانه‌های جنوبی دریای خزر

و کمترین مقدار مربوط به بیابان‌های مرکزی لوت و کویر نمک است (Karimi et al., 2019)



شکل ۱. موقعیت مرکز گریدهای ERA5 و ارتفاع‌های محدوده مورد مطالعه

برای انجام این پژوهش مراحل ذیل دنبال گردید:

الف- انتخاب پیمونگاه‌های آب‌وهوا شناسی همدید

داده‌های دما و بارش پیمونگاه آب‌وهواشناسی همدید در این پژوهش برای ۴۵ پیمونگاه طی دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۰ اخذ گردید. در انتخاب پیمونگاه‌ها افزون بر لحاظ نمودن مناطق آب‌وهوایی گوناگون کشور سعی شد تا از هر استان یک پیمونگاه انتخاب شود. از اقلیم کرانه‌های خزری ۵ ایستگاه نماینده، از اقلیم دامنه‌های شمالی البرز ۲ ایستگاه نماینده، از اقلیم بلندی‌ها ۱۳ ایستگاه نماینده، از اقلیم کوهپایه‌های غربی ۳ ایستگاه نماینده، از اقلیم کرانه‌های خلیج فارس ۳ ایستگاه نماینده، از اقلیم کوهپایه‌های شرقی ۷ ایستگاه نماینده، از اقلیم فلات شرقی ۸ ایستگاه و اقلیم کرانه‌های عمان ۴ ایستگاه نماینده انتخاب شد.

ب- داده‌های باز تحلیل :

امروزه مراکز نظیر (NASA) و نوا (NOAA) و غیره حجم قابل توجهی از داده‌های آب و هوایی را به صورت شبکه بندی شده و نسل جدیدی از داده‌های هواشناسی رادر مقیاس جهانی و منطقه ای با قدرت تفکیک مکانی و زمانی متفاوت در پایگاه داده‌هایی همانند^۱-NCEP، NCAR^۲، MERRA^۳ و GLDAS و ECMWF تحت عنوان پایگاه داده باز تحلیل را ارائه کردند. که از ترکیب پیش بینی‌های مدل‌های عددی و داده‌های مشاهده‌ای داده‌های پایگاه بازتحلیل تهیه می‌شوند. در مطالعات که محدوده وسیع همچون ایران مورد بررسی قرار می‌گیرد، مجموعه داده‌های بازتحلیلی می‌توانند سری‌های زمانی بارش_دما ناکافی یا عدم وجود داده مکانی را جبران کند در این تحقیق از داده‌های باز تحلیل ERA5 مرکز پیش‌بینی هوای متوسط اروپا به آدرس (www.ECMWF.int) استفاده شد. در مقایسه با ERA-Interim، ERA5 قدرت تفکیک مکانی به ۰٫۲۵ درجه و قدرت تفکیک زمانی ۱ ساعته افزایش یافته است (Zhao et al., 2019). در این تحقیق با پردازش داده‌ها میانگین ماهانه در بازه ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ محاسبه و استخراج شد.

ج_ ارزیابی کارایی داده‌های مشاهداتی و مدل سازی شده

1 National Center For Environmental prediction - National Center For Atmospheri Research

2 Modern_Era Retrospective Analysis for Research and Applications

3 Global Land Data Assimilation System

جهت ارزیابی داده‌های دما و بارش بازو اکاوی شده مدل ERA5 از آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین انحراف خطا (MBE) و میانگین مربعات خطا (RMSE) که معادلات آن به ترتیب در روابط زیر انجام خواهد شد. ضریب تعیین یکی از معیارهای مهم ارزیابی بین دو متغیر می باشد، مقدار آن از صفر تا یک متغیر است و از طریق رابطه ی (۱) می توان ضریب تعیین را محاسبه نمود:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

میانگین انحراف خطا (MBE): این معیار بیانگر اختلاف بین میانگین مقادیر مشاهده ای و برآورد شده است که انحراف از میانگین را نیز نشان می دهد و مقدار آن می تواند مثبت و یا منفی باشد، MBE هر چقدر به صفر نزدیک باشد، اختلاف کمتر مقدار های برآورد شده را نسبت به مقادیر مشاهده ای را نشان می دهد و از طریق رابطه (۲) محاسبه می شود.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{n} \quad \text{رابطه (۲)}$$

جزر میانگین مربعات خطا (RMSE): این آماره برای ارزیابی دقت داده‌های پیش بینی شده یا شبیه‌سازی شده شود و طبق رابطه (۳) قابل محاسبه است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در چهار رابطه بالا شده X_i و Y_i به ترتیب i امین داده واقعی و شبیه‌سازی شده توسط مدل، \bar{X} و \bar{Y} میانگین کل داده‌های X_i و Y_i در جامعه آماری n تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی می باشند.

د- شاخص خشک‌سالی پالم: برای بیان کمی و تحلیل خشک‌سالی دهه‌ای در ایران و همچنین ارزیابی آن‌ها از شاخص خشک‌سالی PDSI^۱ در بازه‌های زمانی دهه ای استفاده شد. این شاخص گاهی اوقات شاخص شدت خشک‌سالی پالم نامیده می‌شود، یک شاخص خشک‌سالی است که معمولاً برای پایش رویدادهای خشک‌سالی و مطالعه وسعت و شدت دوره‌های خشک‌سالی منطقه‌ای استفاده می‌شود (Ashok and Singh, 2010). این شاخص از داده‌های بارش و دما برای مطالعه عرضه و تقاضای رطوبت با استفاده از یک مدل ساده تعادل آب استفاده می‌کند (Loon and Anne, 2015). شاخص پالم به‌طور گسترده به‌صورت عملیاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد و نقشه‌های پالم هر هفته توسط اداره ملی اقیانوسی و جوی دولت ایالات متحده منتشر می‌شود. همچنین توسط اقلیم شناسان برای استانداردسازی تجزیه و تحلیل خشک‌سالی طولانی‌مدت جهانی استفاده شده است (Dai, 2004). PDSI شاید پرکاربردترین شاخص باشد که برای نظارت بر خشک‌سالی استفاده شده است که برای شدت دوره‌های مختلف خشک‌سالی (Palmer, 1965; Karl and Quayle, 1981) و بررسی فضایی و ویژگی‌های خشک‌سالی زمانی (Soule, 1993; Jones et al., 1996) و همچنین برای کشف رفتار دوره‌ای خشک‌سالی (Rao and Padmanabhan, 1984) خشک‌سالی در مناطق وسیع جغرافیایی (Johnson and Kohne, 1993) و پیش‌بینی خشک‌سالی (Kim and Valdes, 2003; Özger et al., 2009) مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش ابتدا با تجزیه و تحلیل اقلیمی فاکتورهایی میزان تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل، تلفات، تغذیه و رواناب که در محاسبه شاخص دخیل هستند محاسبه می‌شود. تبخیر و تعرق پتانسیل از روش تورنت وایت طبق رابطه چهار محاسبه می‌شود.

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta R_n + \gamma \frac{900}{T_a + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن ET_0 تبخیر و تعرق پتانسیل، T_a دمای هوا، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری، $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار اشباع هوا، R_n تابش خالص در سطح زمین و Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع با دما.

تلفات عبارت (PL^۲) است از مقدار رطوبتی که خاک می تواند از دست دهد در صورتی که تمام بارش نازل شده طی دوره مورد نظر از طریق تبخیر و تعرق تلف شود که از رابطه پنج بدست می آید.

$$PL = PL_s + PL_u \quad \text{رابطه (۵)}$$



که در آن PL_s پتانسیل تلفات از لایه سطحی خاک، PL_u پتانسیل تلفات از لایه زیرین خاک است. پتانسیل تلفات از لایه سطحی خاک از رابطه شش محاسبه می شود.

$$PL_s = \min \{PE, S_u\} \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن S_s مقدار رطوبت قابل دسترس در لایه سطحی خاک در آغاز یک ماه معین است و همچنین پتانسیل تلفات از لایه زیرین طبق رابطه هفت محاسبه می شود. که در آن S_u مقدار رطوبت قابل دسترس لایه زیرین خاک در آغاز یک ماه معین AWS^1 ظرفیت رطوبت قابل دسترس در هر دو لایه سطحی و زیرین خاک است.

$$PL_u = \frac{(PE - PL_s)}{AWC}, \quad PL_u \leq S_u \quad \text{رابطه ۷}$$

پتانسیل تغذیه (PR) مقدار رطوبت مورد نیاز برای اینکه خاک به ظرفیت زراعی برسد و از رابطه هشت به دست می آید.

$$PR = AWC - (S_s + S_u) \quad \text{رابطه ۸}$$

پتانسیل رواناب عبارت است از پتانسیل بارش منهای پتانسیل تغذیه که رابطه نه بدست می آید.

$$PRO = AWC - PR = AWC - AWC + (S_s + S_u) \quad \text{رابطه ۹}$$

تغذیه واقعی (R^2): برای تغذیه رطوبتی خاک باید مقدار بارش بیشتر از تبخیر و تعرق پتانسیل باشد در این صورت مقدار تغذیه رطوبتی خاک از رابطه ۱۰ محاسبه می شود.

$$\begin{cases} IF P - PE > WCs - S_s = \\ else R_s = P - PE, R_u = 0 \end{cases} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که در آن WCs ظرفیت رطوبت قابل دسترس در لایه سطحی خاک و R_s و R_u تغذیه لایه سطحی و تحتانی خاک هستند.

تلفات واقعی (L^3): تلفاتی خاک که از طریق تبخیر و تعرق است که موقعی اتفاق می افتد که $PE > P$ از رابطه ۱۱ تا ۱۳ بدست می

آید.

$$L_s = \min \{S_s, PE - P\} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$PL_u = \frac{(PE - P - L_s) S_u}{AWC}, \quad L_u \leq S_u \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$L = L_s + L_u \quad \text{رابطه ۱۳}$$

رواناب واقعی موقعی اتفاق می افتد اگر هر دو لایه سطحی و زیرین به گنجایش رطوبتی بیشینه خود یعنی AWC رسیده باشند بنابراین دو شرط $P > PE$ و $P - PE > PR$ باید برقرار باشد چنانچه شرط نخست برقرار باشد و شرط دوم برقرار نباشد مقدار $RO = 0$ اگر هر دو شرط برقرار باشد مقدار رواناب از رابطه ۱۴ بدست می آید (بذر افشان و حجابی، ۱۳۹۵)

$$RO = P - PE - PR \quad \text{رابطه ۱۴}$$

بعد از محاسبه فاکتورهای دخیل ابتدا شاخص بی هنجاری رطوبتی (Z) از رابطه ۱۵ محاسبه می شود و سپس از روی آن شاخص

شدت خشکسالی پالمر طبق رابطه ۱۶ بدست می آید

$$Z = Kd \quad \text{رابطه ۱۵}$$

که در آن $d = P - \hat{P}$ و $K = \frac{PE + \bar{R} + \bar{RO}}{\bar{P} + \bar{L}}$ است. شدت خشکسالی برای ماه i یعنی $X(i)$ از رابطه تعیین می شود (بذر افشان و حجابی، ۱۳۹۵).

$$X(i) = \frac{\sum_{t=1}^i Z(t)}{2.691 + 0.309i} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

جهت آشنایی بیشتر با مراحل محاسباتی به منبع (Palmer, 1965) رجوع شود. درجه بندی این شاخص در جدول یک آورده شده

است.

1 Available Water Capacity

2 Recharge

3 Losses

جدول ۱. درجه‌بندی شاخص شدت خشک‌سالی پالمر

میزان شدت	طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی	میزان شدت	طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی
۳ تا ۳/۹۹	زیاد مرطوب	-۰/۵ تا -۰/۹۹	آغاز دوره خشک‌سالی
۲ تا ۲/۹۹	تقریباً مرطوب	-۱ تا -۱/۹۹	کمی خشک
۱ تا ۱/۹۹	کمی مرطوب	-۲ تا -۲/۹۹	خشک
۰/۵ تا ۰/۹۹	آغاز دوره مرطوب	-۳ تا -۳/۹۹	زیاد خشک
۰/۴۹ تا ۰/۰	تقریباً نرمال	-۴ یا کمتر	فوق‌العاده خشک
		۴ یا بیشتر	فوق‌العاده مرطوب

۵- تحلیل فضایی: فرآیند تحلیل فضایی توصیف چگونگی و استدلال چرایی پراکندگی‌ها را شامل می‌شود (Alijani, 2015).

نتیجه این فرآیند تولید دانش علمی مستند و نهایتاً تبیین پراکندگی است (هاوری، ۱۹۶۷). اندازه‌گیری توزیع مکانی داده‌ها این امکان را به ما می‌دهد تغییرات توزیع فضایی در راستای مؤلفه‌های مکان یعنی طول، عرض و ارتفاع را بررسی و مقایسه کنیم. برای محاسبه شاخص‌های مکانی گرانیگاه (مرکز میانگین، بیضوی انحراف استاندارد) از روش‌های مختصات طولی (x_c) عرضی (y_c) آن‌ها بر اساس رابطه‌های ۱۷ و ۱۸ زیر برآورد گردید:

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^n T_i x_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad \text{رابطه ۱۷}$$

$$Y_c = \frac{\sum_{i=1}^n T_i y_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad \text{رابطه ۱۸}$$

در اینجا x_i و y_i مختصات عارضه i و $\{\bar{X}, \bar{Y}\}$ به ترتیب میانگین مرکزی عوارض و n برابر با تعداد کل عوارض در لایه مورد تحلیل است. برای به دست آوردن الگوی مکانی خشک‌سالی و اینکه آیا این پدیده خوشه‌ای است یا نه روش‌های مختلفی وجود دارد. با توجه به قانون جغرافیایی اصل نزدیکی - همانندی آزمون خودهمبستگی فضایی رویدادها و پدیده‌های آب و هوایی می‌تواند حاوی اطلاعات ارزشمندی باشد (Asakereh and Seifipour, 2012). برای مثال، رابطه‌ی فضایی رویدادها و پدیده‌های آب و هوایی می‌تواند بین نواحی مجاور است. شناسایی این روابط می‌تواند در تشخیص مرزهای آب و هوایی و نیز تعیین اثر عوامل مکانی بر رفتار پدیده‌ها حائز اهمیت باشد. بررسی الگوی پراکندگی خوشه‌ای بودن مکانی رویدادها، در برابر «فرض مقابل» یعنی تصادفی بودن است (Haining, 2004). نمایه مورن یکی شاخص‌های برآورد تجمع مکانی پدیده‌ها است که با استفاده از رابطه ۱۹ قابل برآورد است (Dai et al., 2010).

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{رابطه ۱۹}$$

در این رابطه، n تعداد پدیده‌ها، x_i اندازه مشاهده‌شده بر روی مکان پدیده i ام، \bar{x} میانگین x_i هاست. y_{ij} اندازه وزن متعلق به i و j است که براساس مجاورت برآورد شده و نشان دهند میزان وابستگی فضایی است. مجموع وزن‌ها در ماتریس وزن‌های $\{w_{ij}\}$ گویای اندازه‌ی مجموعه روابط فضایی مفروض بین نواحی است (Haining, 2004) که به روش‌های مختلفی قابل محاسبه‌اند. یکی از راه‌ها، به کارگیری وزن‌هایی با ارزش صفر و یک (دو دوئی) است. در این حالت، اگر نواحی i و j هم مرز باشند، $w_{ij} = 0$ خواهد بود. آماره‌ی مورن کلی مانند ضریب خودهمبستگی بین $+1$ و -1 بوده تفسیر مشابهی دارد. مقادیر نزدیک به $+1$ گویای الگوی مکانی قوی است. مقادیر نزدیک به -1 گواهی بر خودهمبستگی مکانی منفی بوده، گویای این است که مقادیر با ارزش بالا نزدیک مقادیر با ارزش کم هستند (وضعیت نادر) و در نهایت، مقدار نزدیک صفر، عدم الگوی مکانی (تصادفی مکانی) را گواهی می‌دهد. بنابراین، اگر مقادیر آماره برای دونقطه‌ی مجاور مثبت یا منفی باشد، به معنی این است که مقادیر دو نقطه‌ی مذکور بالاتر از میانگین باشد، همبستگی مکانی منفی است (Gail, 2007). سپس نمره‌ی Z ، در یک سطح اطمینان دلخواه ارزیابی می‌شود. در سطح اطمینان ۹۵ درصد اگر قدر مطلق نمره Z مشاهده شده $Z(I)$ بزرگ‌تر از نمره Z بحرانی (± 1.96) باشد؛ فرض صفر در سطح اطمینان مذکور رد شده (Askare and Shadman, 2015) و معنی‌داری روابط قابل استنباط خواهد بود. برای شناسایی بزرگی مقادیر الگوهای فضایی، آماره جی استار (G^*) استفاده می‌شود که از مجموع ارزش‌های

موزون مکانی پدیده‌ها در فاصله مشخص (d) از یاخته‌ی i ام نسبت به مجموع ارزش‌های تمامی مکان پدیده‌ها محاسبه می‌شود. امتیاز محاسبه شده نشان می‌دهد که در کجای داده‌ها مقادیر زیاد و کم خوشه بندی شده‌اند (Fischer, 2006). این شاخص با استفاده از رابطه ۲۰ محاسبه می‌گردد:

$$Z_i(d) = \frac{G_i(d) - E(G_i^*(d))}{\sqrt{\text{var}(G_i^*(d))}} = \frac{\sum_j w_{ij}(d)x_j - w_i \bar{x}}{s \sqrt{\frac{w_i^*(n-w_i)}{n-1}}} \quad \text{رابطه ۲۰}$$

در رابطه ۲۰ داریم:

$$S^2 = \sum_{j=1}^N \frac{x_j^2}{n - \bar{x}^2} \quad w_i^* = \sum_{i=1}^N W_{ij}(d)$$

یافته‌ها و بحث

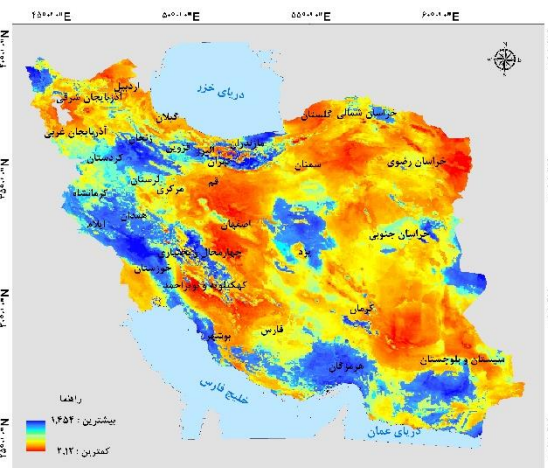
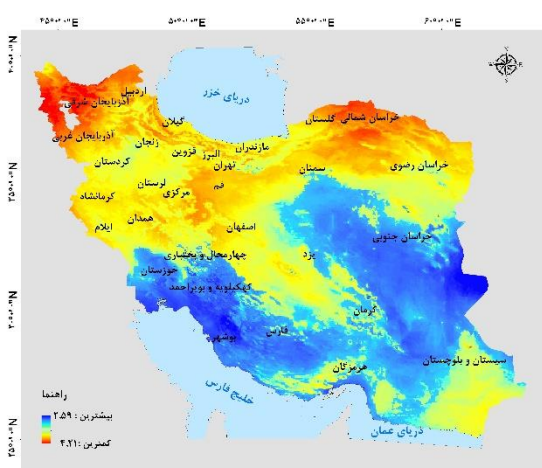
ابتدا مجموعه داده بارش ERA5 جمع آوری و با داده‌های مشاهده‌ای و شاخص‌های خطا به صورت ماهیانه مقایسه شد که به صورت میانگین کلی شاخص خطا تمام سلول‌ها محاسبه شده در جدول دو آورده شده است. با توجه ضریب تعیین ۰/۶۱ برای بارش ۰/۷۷ برای دما بین داده‌های باز تحلیل و مشاهده‌ای نتایج نشان می‌دهد که بین ERA5 و داده‌های مشاهده‌ای همبستگی بالایی وجود دارد گرچه مقدار داده‌های شبکه بندی برای دما بهتر از بارش است. با توجه به توپوگرافی پیچیده ایران و وجود کوهستان‌های بلند در غرب و شمال و همچنین بارش‌های پیچیده همرفتی در شمال استفاده از مقادیر بارش و دما مجموعه داده ERA5 به صورت ماهیانه قابل قبول بود. همانطور که (Navidi Nasaj et al., 2021) تایید کرده‌اند استفاده از ERA5 جهت پایش خشکسالی به خصوص در پایش بلند مدت خشکسالی‌ها می‌تواند کارا باشد.

جدول ۲. ارزیابی داده‌های ERA5 بازه زمانی ۱۹۸۰-۲۰۲۰

شاخص خطا (میانگین کل کشور)	بارش	دما
ضریب تعیین R^2	۰/۶۱	۰/۷۷
میانگین انحراف خطا (MBE)	۱/۷۶	۰/۵۵
جزر میانگین مربعات خطا (RMSE)	۰/۵۲	۰/۴۷

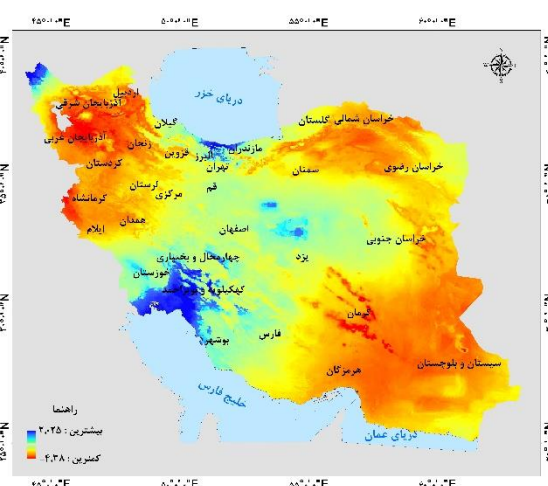
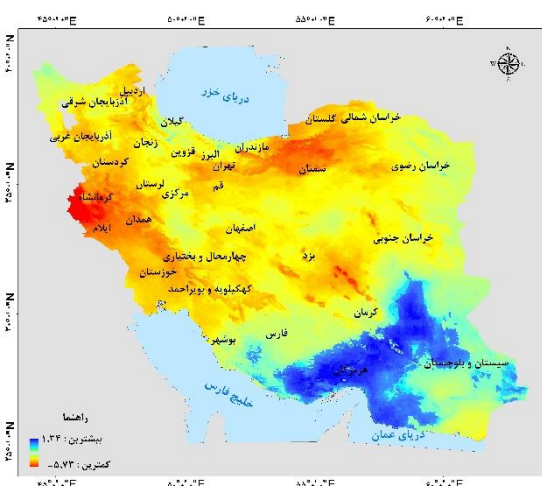
نقشه‌های خشکسالی PDSI در بازه‌های زمانی ده‌ساله آن در اشکال دو تا چهار آورده شده است. شکل دو نقشه خشکسالی‌ها را بین دهه ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ نشان می‌دهد. شاخص خشکسالی بین ۲/۱۲- تا ۱/۴۵ قرار گرفته است یعنی شدت خشکسالی در بازه خشک تا کمی مرطوب قرار داشته است. غرب و جنوب بیشتر در حالت مرطوب قرار داشته‌اند مناطق مرکزی و کویری، قسمت کوچکی از کهکیلویه و بویر احمد و قسمتی شمال شرق در محدوده طبقه خشک قرار گرفته‌اند. در این دوره استان‌های اهواز و مازندران با مقدار ۱/۴۵ دارای بیشترین ترسالی‌ها را تجربه کرده‌اند. کویرهای ایران به دلیل کمبود بارش شدیدترین خشک‌هایی این دوره را تجربه کرده‌اند نکته قابل توجه وجود طبقه خشک در اطراف دریاچه ارومیه این مدت است. روند مکانی خاصی در این دوره دیده نمی‌شود. در شکل سه مقدار شاخص خشکسالی برای دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰ آورده شده است. ملاحظه می‌گردد مقدار شاخص خشکسالی این دوره بین ۲/۵۹ تا ۴/۱۲- قرار گرفته است گرچه به صورت کلی بیشتر مناطق ایران در حالت نرمال و بالاتر قرار گرفته‌اند اما در این دوره بعضی مناطق تقریباً مرطوب و بعضی مناطق فوق‌العاده خشک را تجربه کرده‌اند. کمترین مقدار مربوط به شمال غرب و بیشترین مقدار شاخص مربوط به جنوب شرق بوده است. در مجموع خشکسالی در راستای شمال به جنوب کشور کاهش یافته است. شکل چهار شاخص PDSI ایران در بازه سال بین ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ را نشان می‌دهد. شاخص بین طبقه تقریباً مرطوب و فوق‌العاده خشک قرار گرفته است در این دوره به غیر از کهکیلویه و بویر احمد، قسمت کوچکی از منتهی الیه شمال غرب و قسمت کوچکی از نوار شمالی کشور بقیه اکثر خشکسالی را تجربه کرده‌اند. نکته قابل توجه در این دوره کویر قم و اصفهان برخلاف کویر لوت خشکسالی‌های شدید نداشته‌اند. مساحت طبقه نرمال در این دوره زیاد بوده و مناطق تحت طبقه مرطوب و بالاتر کم است. بررسی شکل پنج در دهه بین ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ شاخص خشکسالی بین ۵/۷۳- تا ۱/۳۴ را نشان داد یعنی شدت خشکسالی در بازه کمی مرطوب تا فوق‌العاده خشک قرار داشته است. به نظر می‌آید هرچه در بازه زمانی به جلو رفته‌ایم شدت خشکسالی در ایران بسیار شدید شده است وجود شاخص PDSI با مقدار ۵/۷۳- به‌طور میانگین در دهه اخیر نشان از وجود

خشک‌سالی‌های فوق‌العاده‌ای دارد. قسمت‌های از جنوب شرق شامل شرق استان هرمزگان و اطراف جازموربان در شرایط کمی مرطوب قرار گرفته‌اند که احتمالاً بر اثر بارش‌های موسمی و فعال شدن بیشتر شدن آن‌ها نسبت به گذشته باشد. شدیدترین خشک‌سالی‌های دهه‌ای در این بازه زمانی مربوط به استان کرمانشاه و ایلام و شمال سمنان بوده است. از شمال به جنوب کشور در این بازه زمانی از شدت خشک‌سالی‌ها کاسته شده است. با توجه به اینکه عوامل جغرافیایی هر مکان همچون توپوگرافی تقریباً ثابت هستند، جابه‌جایی شدت‌های خشک‌سالی نشان از تغییر مکان و شدت سامانه‌های بارشی به صورت دهه‌ای است؛ که نشان می‌دهد که همه نقاط کشور ممکن است در معرض مخاطره خشک‌سالی قرار گیرند.



شکل ۳. میانگین خشک‌سالی دهه‌ای بین بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۰۰

شکل ۲. میانگین خشک‌سالی دهه‌ای بین بازه زمانی ۱۹۸۰-۱۹۹۰

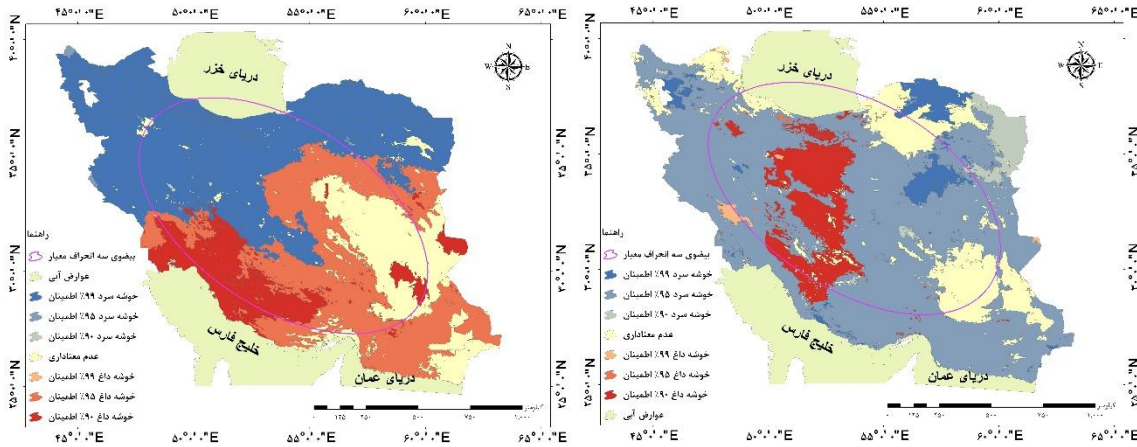


شکل ۵. میانگین خشک‌سالی دهه‌ای بین بازه زمانی ۲۰۱۰-۲۰۲۰

شکل ۴. میانگین خشک‌سالی دهه‌ای بین بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۰

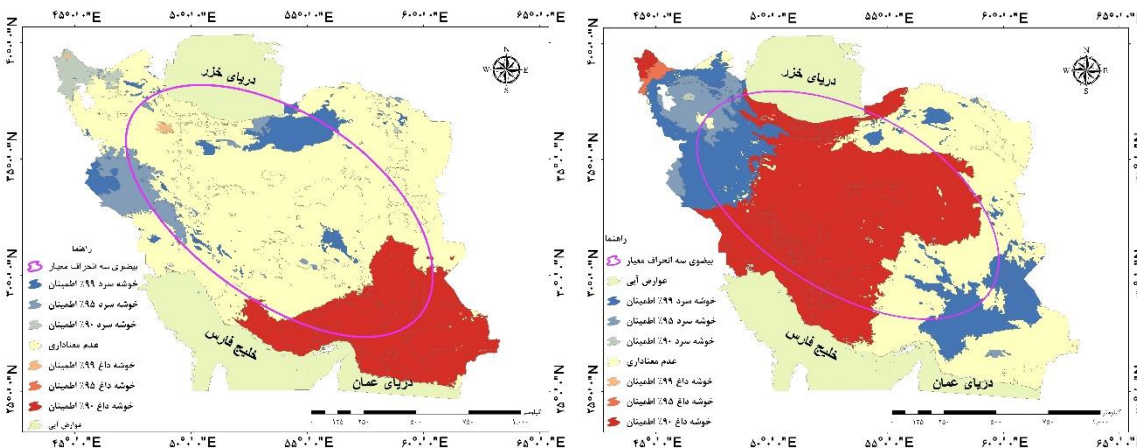
از تابع بیضوی انحراف جهت بررسی پراکنندگی پدیده خشک‌سالی و خودهمبستگی فضایی لکه‌های داغ ($Getis-ord Gi^*$) برای نشان دادن توزیع فضایی الگوی حاکم بر خشک‌سالی‌ها و خوشه‌بندی آن، به صورت دهه‌ای استفاده شد. با این آماره هفت الگوی مکانی مختلف برای خشک‌سالی‌ها آشکار شد. به غیر از نمره صفر $Gi-Bin$ که فاقد الگوی معنی‌داری را نشان می‌دهد؛ شاخص ۶ نمره دیگر نیز ارائه شده است؛ نمره ۱ تا ۳ نمایانگر الگوی خوشه‌ای بالا (خشک‌سالی گرم) و نمره ۱- تا ۳- نشان‌دهنده الگوی خشک‌سالی پایین (خشک‌سالی سرد) هستند. بر اساس آماره‌های $GiZSore$ و $GiPValue$ شاخص $(Getis-ord Gi^*)$ سه الگوی خشک‌سالی گرم و سه الگوی خشک‌سالی سرد شناسایی گردید. بطوریکه $GiZSore$ با مقدار P-Value معنی‌دار در سطح ۹۰ درصد الگوی خشک‌سالی درجه سوم، در سطح ۹۵ درصد الگوی خشک‌سالی درجه دوم و در سطح معنی‌داری ۹۹ درصد خشک‌سالی درجه یک جدا شدند. نتایج طبق شکل

شش تا نه آورده شده است. در این شکل نحوه پراکنش تجمع رویداد خشک‌سالی از حالت پراکنده تا خوشه‌ای و سطح معنی‌داری با آماره p_value و مقادیر بحرانی (آماره Z) آورده شده است؛ و به‌منظور شناخت مکانی فراوانی نقاط داغ و نقاط سرد آماره جی گیتس محاسبه که در اشکال نمایش داده شده است.



شکل ۶. خوشه‌بندی خشک‌سالی کشور بازه زمانی ۱۹۸۰-۱۹۹۰

شکل ۷. خوشه‌بندی خشک‌سالی کشور زمانی ۱۹۹۰-۲۰۰۰



شکل ۸. خوشه‌بندی خشک‌سالی کشور بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۰

شکل ۹. خوشه‌بندی خشک‌سالی کشور بازه زمانی ۲۰۱۰-۲۰۲۰

انحراف معیار مکانی در نقشه‌ها فاصله مکانی شدت خشک‌سالی هر پیکسل نسبت به مرکز جرمی این پدیده را نشان می‌دهد در تمامی دهه‌ها راستای آن شمال غرب به جنوب شرق قرار گرفته یکی از دلایل عمده این جهت‌گیری، بارش‌ها ایران به تبعیت از ناهمواری عمومی ایران است که راستای آن شمال غرب به جنوب شرق است. آماره جی گیتس که برای مکان هر پیکسل محاسبه شده است به‌نوعی امتیاز Z است، برای امتیاز Z مثبت و معنادار از نظر آماری، هرچه امتیاز Z بالاتر باشد به میزان زیادی خشک‌سالی خوشه‌بندی شده و لکه داغ تشکیل می‌شود. در اشکال شش تا نه محدوده‌های قرمز رنگ به معنای تمرکز بیشتر خشک‌سالی در آن مکان است. آماره جی گیتس محاسبه شده دهه اول مورد بررسی نشان داد لکه‌های داغ (خوشه‌بندی خشک‌سالی شدید) در قسمت‌های کوچکی از مرکز ایران و بروری استان کم بارش و کویرها قرار گرفته و لکه‌های سرد (خوشه‌بندی خشک‌سالی کم) بیشتر در شمال غرب مورد مطالعه قرار گرفته است. تبعیت از نرم‌های بارشی در دهه اول بازه زمانی تغییرات چندانی را نشان نداده است. آماره جی گیتس محاسبه شده دهه دوم (۱۹۹۰-۲۰۰۰) نشان داد لکه‌های داغ (خوشه‌بندی خشک‌سالی شدید) در جنوب غرب ایران استان‌های بوشهر و خوزستان قرار گرفته و لکه‌های سرد (خوشه‌بندی خشک‌سالی کم) بیشتر در عرض‌های بالا ایران قرار گرفته است. آماره جی گیتس محاسبه شده دهه سوم (۲۰۰۰-۲۰۱۰) نشان داد لکه‌های داغ (خوشه‌بندی خشک‌سالی شدید) در قسمت‌های زیادی از مرکز ایران از جمله استان‌های تهران، سمنان، اصفهان، فارس و حتی استان‌های

پر بارش همچون کهگیلویه و بویر احمد دچار خشک‌سالی‌های خوشه‌ای شدید شده‌اند. لکه‌های سرد (خوشه‌بندی خشک‌سالی کم) بیشتر در عرض‌های بالا ایران در شمال غرب و قسمت کوچکی از جنوب شرق شامل استان سیستان بلوچستان بوده که احتمالاً بارش‌های موسمی مناسب در این دهه از شدت خشک‌سالی‌ها کاسته است. آماره جی گیتس محاسبه‌شده دهه چهارم (۲۰۱۰-۲۰۲۰) مورد بررسی نشان داد لکه‌های داغ (خوشه‌بندی خشک‌سالی شدید) در قسمت جنوب و جنوب شرق شامل استان هرمزگان و سیستان بلوچستان قرار گرفته و لکه‌های سرد (خوشه‌بندی خشک‌سالی کم) از مساحت آن‌ها بسیار کاسته شده و بیشتر در شمال شرق کشور و قسمت کوچکی از غرب کشور را در بر گرفته‌اند. درک چنین تغییراتی برای توسعه راهبردهای سازگاری مهم است. در نتایج این تحقیق نشان داده‌شده الگوهای خشک‌سالی به صورت دهه‌ای چقدر متفاوت هستند. الگوی جابه‌جایی مکانی نیز وقوع خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌ها به صورت دهه‌ای در ایران از نظم خاصی تبعیت نکرده و در بین مناطق مختلف از هماهنگی خاصی برخوردار نیست. با بررسی نقشه‌های خشک‌سالی دهه‌ای وجود تقریباً سه ناحیه متجانس قابل استخراج است یعنی در دهه‌های مختلف سامانه‌های بارشی از دید میزان آب آورده به کشور تغییرات زیادی داشته‌اند که می‌تواند هم‌راستا با تغییرات اقلیمی به لحاظ بارشی باشد. انتظار می‌رود گرمایش زمین چرخه هیدرولوژیکی را تغییر دهد (AghaKouchak et al., 2020) در نتیجه ویژگی‌های خشک‌سالی به‌طور قابل توجهی در مکان‌های مختلف متفاوت خواهد بود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از شاخص PDSI خشک‌سالی‌های ایران در چهار دهه گذشته استخراج و مورد تحلیل فضایی قرار گرفت. توزیع متفاوت مکانی بارش‌ها، پراکندگی پوشش گیاهی و همچنین تأثیر متفاوت عناصر اقلیمی باعث تفاوت مکانی رخداد خشک‌سالی در ایران شده است. میزان خشک‌سالی‌ها که به صورت دهه‌ای محاسبه شد نشان داد علاوه بر افزایش مساحت خشک‌سالی‌ها طبقات شدت این پدیده از کمی خشک به فوق‌العاده خشک در ایران افزایش یافته است. به تبعیت از جهت ناهمواری‌ها، بیضوی انحراف معیار در هر چهار دهه مورد بررسی راستای شمال غرب و جنوب شرق را از خود نشان داد. با توجه به حد آستانه‌ای شاخص خودهمبستگی مکانی الگوی حاکم بر این پدیده در ایران به صورت خوشه‌ای داغ و سرد معنادار خود را نشان داده است. آماره جی گیتس محاسبه‌شده دهه اول مورد بررسی نشان داد لکه‌های داغ (خوشه‌بندی خشک‌سالی شدید) در قسمت‌های کوچکی از مرکز ایران و بر روی استان کم بارش و کویرها قرار گرفته در دهه دوم در جنوب غرب ایران شامل استان‌های بوشهر و خوزستان قرار گرفته در دهه سوم در قسمت‌های زیادی از مرکز ایران از جمله استان‌های تهران، سمنان، اصفهان، فارس و کهگیلویه و بویر احمد در دهه چهارم قسمت جنوب و جنوب شرق ایران شامل استان هرمزگان و سیستان بلوچستان را در بر گرفته‌اند. چنین تحقیقاتی می‌تواند موجب شناسایی مناطق در معرض شدید خشک‌سالی شده و در برنامه‌ریزی‌های محیطی برای پیاده‌سازی اقدامات پیشگیرانه و برای برنامه‌ریزی‌های هوشمندانه کشاورزی و تخصیص منابع و امکانات مورد استفاده قرار گیرد. در پایان پیشنهاد می‌شود بررسی خشک‌سالی‌ها بر مبنای تحلیل نیاز آبی محدوده و سناریوهای تغییر اقلیم برای پیش‌بینی آن مورد مطالعه قرار گیرد.

سپاس‌گزاری

این مقاله مستخرج از طرح تحقیقاتی به شماره ۱۳۳/ص/۱۴۰۱ با عنوان "تبیین تغییرات مکانی-زمانی انتقال خشک‌سالی هواشناسی به خشک‌سالی کشاورزی در ایران و پیش‌نگری خشک‌سالی‌ها با رویکرد تغییر اقلیم" است. بدین‌وسیله محققین این مقاله نهایت تشکر و سپاس‌گزاری را از بنیاد علم ایران به خاطر پشتیبانی‌های ایشان اعلام می‌نمایند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Abdrabbo, M.A. , Farag, A. , Abul-Soud, M. , El-Mola, M.M. , Moursy, F.S. , Sadek, I.I. , Hashem, F.A. , Taqi, M.O. , El-Desoky, W.M.S. , Shawki, H.H.(2012). Utilization of satel- lite imagery for drought monitoring in Egypt. *World Rural Obs.* 4, 27-37.
- Alijani, B. (2012). *Synoptic climatology*. Tehran: Samt Publications. (In Persian)
- Abyaneh, H., and Mahboubi, A., and Neyshabouri, M. (2004). Investigation of drought situation and its trend in Hamedani region based on drought statistical indicators. *Research and Construction in Agriculture and*



Horticulture, 17, 2-7.

- AghaKouchak, A., Chiang, F., Huning, L. S., Love, C. A., Mallakpour, I., Mazdiyasn, O., Moftakhari, H., Papalexiou, S. (2020), Climate extremes and compound hazards, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 519-547.
- Alijani, Behloul (2015). Spatial analysis. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 2 (3), 1-14.
- Asakereh, H., and Seifipour, Z. (2012). Spatial modeling of annual rainfall in Iran. *Journal of Geography and Development*, 10 (29), 15-30.
- Asakereh, H., and Shadman, H. (2015). Identifying the spatial relationships of pervasive hot days in Iran. *Geographical Research Quarterly*, 30 (1), 53-69.
- Ashok, K., Singh, P. (September 2010). "A review of drought concepts". *Journal of Hydrology*. 391 (1-2): 202-216. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.012.
- Bazgir, S., Asadi Oskooi, E., Abbasi, F., Rezazadeh, P., Haghghat, Ma. (2020). Comparative study of the efficiency of some meteorological drought indices in different climatic regions of Iran. *Iranian Soil and Water Research*, 51 (11), 2751-2760.
- Caccamo, G., Chisholm, L.A., Bradstock, R.A., Puotinen, M.L. (2011). Assessing the sensitivity of MODIS to monitor drought in high biomass ecosystems. *Remote Sens. Environ.* 115, 2626-2639.
- Carrão, H., Naumann, G., and Barbosa, P. (2016). Mapping global patterns of drought risk: An empirical framework based on sub-national estimates of hazard, exposure and vulnerability, *Global Environ. Change*, 39, 108-124,
- Choi, M., Hur, Y. (2012). A microwave-optical/infrared disaggregation for improving spatial representation of soil moisture using AMSR-E and MODIS products. *Remote Sens. Environ.* 124, 259-269.
- Darand. M. (2014). Drought monitoring in Iran with the help of Palmer Drought Intensity Index and its relationship with atmospheric-oceanic connection patterns. *Geographical Research*, 29, 4, 67-82.
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review: Drought under global warming. *WIREs Clim Change* 2 (1), 45-65.
- Dai, A. (2004). A Global Dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with Soil Moisture and Effects of Surface Warming, *Journal of Hydrometeorology*, 5, 6, 1117-30, 2004.
- Dai, X., Guo, Z., & Zhang, L. D. (2010). Spatio-temporal exploratory analysis of urban surface temperature field in Shanghai. *Environ Res Risk Assess*, 24, 247-257.
- Ensafi Moghadam, Tahereh (2007). Evaluation of several climatic drought indicators and determination of the most appropriate indicator in the salt lake basin. *Iranian Range and Desert Research*, 14 (2), 271-288.
- Fazel Dehkordi, L., and Azarnivand, H., and Zare Chahouki, M., and Mahmoudi Kohan, F., and Khaliqi Sigaroudi, Sh. (2016). Drought monitoring using NDVI vegetation index (Case study: Rangelands of Ilam province). *Rangeland and Watershed Management (Natural Resources of Iran)*, 69 (1), 141-154.
- Ghaleb, M. Mario, A.N. Sandra, A. (2015). Regional landsat-based drought monitoring from 1982 to 2014. *Climate*, 3 (3), pp. 563-577.
- Godfray, H. C. J., J. R. Beddington, I. R. Crute, L. Haddad, D. Lawrence, J. F. Muir, J. Pretty, S. Robinson, S. M. Thomas, and C. Toulmin. (2010). Food security: The challenge of feeding 9 billion people, *Science*, 327(5967), 812-818.
- Fischer. M., & Manfred. M. (2006). *Spatial Analysis and Geocomputation*. Germany: Springer.
- Haining, R. (2004). *Spatial Data Analysis: Theory and Practice*. UK: Cambridge University Press.
- Hersbach, Hans, et al. "The ERA5 global reanalysis." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146.730 (2020): 1999-2049.
- Huang, SH., Huang, O., Chang, J., Leng, G., Xing, L. (2015). The response of agricultural drought to meteorological drought and the influencing factors: A case study in the Wei River Basin, China, *Agricultural Water Management*, 159, 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.05.023>.
- Gail, M., Krickeberg, K., Samet, J., Tsiatis, A., & Wong, W. (2007). *Statistics for Biology and Health*. USA: Springer.
- Golian, S., O. Mazdiyasn, and A. AghaKouchak (2014). Trends in meteorological and agricultural droughts in Iran, *Theor. Appl. Climatol*, 119(3-4), 679-688.
- IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report*.
- IPCC, 2018. *Summary for Policymakers*. In: *Global warming of 1.5_C*. An.
- Iqtadari, M., Bazrafshan, J., Shafiei, M., and Hijabi, S. (2016). Prediction of river flow using SPI index and Markov chain in Karkheh catchment, *Soil water conservation research*, 23 (2), 115-130.

- Karimi, M., and Shahdi, K. (2017). Investigation of meteorological, hydrological and agricultural drought using drought indicators (Case study: Qarasu watershed), remote sensing and GIS in natural resources, 9 (2), 1-16.
- Karimi M, Kaki S, Rafati S. (2018). Iran's Future Climate Conditions and Hazard in Climate Research. Jsaeh. 5 (3),1-22
- Karimi, W., Habibnejad Roshan, M., and Abkar, A. (2011). Investigation of meteorological drought indices in synoptic stations of Mazandaran. Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering, 2 (1), 15-25.
- Li, R., Chen, N., Zhang, X., Zeng, L., Wang, X., Tang, S.H., Li, D., and Niyo, D. (2020). Quantitative analysis of agricultural drought propagation process in the Yangtze River Basin by using cross wavelet analysis and spatial autocorrelation, Agricultural and Forest Meteorology, of simulated and in-situ soil moisture observations. J. Hydrol. 545, 226-250.
- Liu, X., Zhu, X., Pan, Y. (2016). Agricultural drought monitoring: Progress, challenges, and prospects. J. Geogr. Sci. 26, 750-767
- Mladenova, I.E., Jackson, T.J., Njoku, E., Bindlish, R., Chan, S., Cosh, M.H., Holmes, T.R.H., de Jeu, R.A.M., Jones, L., Kimball, J. (2014). Remote monitoring of soil moisture using passive microwave-based techniques —Theoretical basis and overview of selected algorithms for AMSR-E. Remote Sens. Environ. 144, 97-213.
- Masoudian, S., and Zinali, H., and Hojjatizadeh, R. (2008). Temperature zones of Iran. Geographical Research, 23 (2), 3-18.
- Mir Mohammad Hosseini, T., Chashmeghermz, B., Hosseini, S., and Sharafati, A. (2021). Assessing the Relationship between Meteorological Drought and Vegetation of Dryland Lands in Lorestan Province, Watershed Management Research, Volume 34, Number 2 - Serial Number 131, pp. 77-90.
- Navidi Nesaj, B., and Zahrabi, N., and Nikbakht Shahbazi, A., and Fathian, H. (2021). Evaluation of global network precipitation data in drought monitoring (Case study: Karun Bozorg catchment). Water and Soil Resources Protection, 10 (3), 79-96.
- Naserzadeh, M., and Ahmadi, A. (2012). Investigating the performance of meteorological drought indicators in assessing drought and its zoning in Qazvin province. Journal of Applied Research in Geographical Sciences, 12 (27), 141-162.
- Palmer, WC (1965). *Meteorological drought*. U.S. Research Paper No. 45. US Weather Bureau, Washington, DC.
- Rajsekhar, D., Gorelick, S.M. (2017). Increasing drought in Jordan: climate change and cascading Syrian land-use impacts on reducing transboundary flow. Sci. Adv. 3, e1700581.
- Rhee, J., Im, G., Carbone, J. (2010). Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data Remote Sens. Environ. 114 (12) (2010), pp. 2875-2887
- Safari Shad, M., and Ildermi, A., and Akhzari, d. (2017). Drought monitoring using plant indices in MODIS satellite images Case study: Isfahan province. Range Science, 7 (2), 148-159.
- Sari Sarraf, B., Mahmoudi, S., Zanganeh, S., and Pashaei, Z. (2015). Monitoring and forecasting of wetlands and drought in Tabriz using CLIMGEN model and SPI index. Hydrogeomorphology, 2 (2), 61-78.
- Shakiba, A., and Mirbagheri, B., and Kheiri, A. (2010). Drought and its impact on groundwater resources in the east of Kermanshah province using SPI index. Geography, 8 (25), 104-124.
- Salehnia, N., Alizadeh, A., Sanaeinejad, H. et al. Estimation of meteorological drought indices based on AgMERRA precipitation data and station-observed precipitation data. J. Arid Land 9, 797-809 (2017).
- chwalm, C.R., Anderegg, W.R.L., Michalak, A.M., Fisher, J.B., Biondi, F., Koch, G., et al., 2017. Global patterns of drought recovery. Nature 548, 202-205.
- Tucker, C, J, C Vanprael, E. Boerwinkel, and A. Gaston. (1983). Satellite remote sensing of total dry matter production in the Senegalese sahel. Remote Sensing of Environment. 13:461-474.
- Whipple, W. (1966) Regional Drought Analysis, Irrigation and Drainage Division, (92), pp. 3-11.
- Wilhite, D., Glantz, M., (1985). Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. Water Int. 10 (3), 111-120.
- Wilhite, D.A., 2005. Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues. Crc Press.
- Zarei, R., Moghimi, M., and Bahrami, M. (2017). Monthly Drought Monitoring and Prediction Using Standard Precipitation Index and Markov Chain (Case Study: Southeastern Iran). Geography and Environmental Sustainability, No. 32, 39-51.



- Zhang, Q., Xiao, M., Singh, V.P., Li, J. (2012). Regionalization and spatial changing properties of droughts across the Pearl River basin. *China. J. Hydrol.* 472, 355–366.
- Zhao, B., Zhang, B., Shi, C., Liu, J., Jiang, L., 2019. Comparison of the global energy cycle between chinese reanalysis interim and ECMWF reanalysis. *J. Meteorol. Res.* 33 (3), 563–575.
- Zhao, R., Huixiao, W., Ji, C., Guobin, F., Chesheng, Z., Huicai, Y. (2021). Quantitative analysis of nonlinear climate change impact on drought based on the standardized precipitation and evapotranspiration index, *Ecological Indicators*, 121, 107107.
- Zhou, K., Li, J., Zhang, T., & Kang, A. (2021). The use of combined soil moisture data to characterize agricultural drought conditions and the relationship among different drought types in China. *Agricultural Water Management*, 243, 106479. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106479>.