

تحلیل مکانی و زمانی شاخص خشکسالی PDI در منطقه شمال غرب ایران

ایوب میرزائی حسنیلو^۱، مهدی عرفانیان^{۲*}، خدیجه جوان^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۲/۶

چکیده

خشکسالی از مهم‌ترین پدیده‌های اقلیمی است که مخاطرات و پیامدهای زیادی برای انسان و محیط‌زیست دارد. در این پژوهش، از داده‌های دما و بارندگی ۲۰ ایستگاه سینوپتیک شمال غرب ایران در دوره آماری ۳۵ ساله (۱۹۸۷-۲۰۲۱) به منظور استخراج و تحلیل روند شاخص خشکسالی PDI و مقایسه آن با شاخص‌های SPI و SPEI استفاده شد. نتایج نشان داد براساس شاخص PDI، حدود ۸۵٪ ایستگاه‌ها، روند صعودی و ۱۵٪ ایستگاه‌ها، روند نزولی دارند. از لحاظ تغییرات مکانی ایستگاه مراغه، تبریز، سراب، سقز، خوی، ماکو و خلخال دارای بیشترین خشکسالی، و ایستگاه‌های خرمدره، سنندج، زنجان، تکاب، بیجار و جلفا دارای کمترین خشکسالی سالانه بوده است. علاوه بر این، بیشترین دوره ترسالی در ایستگاه بیجار و طولانی‌ترین دوره خشکسالی در ایستگاه اردبیل مشاهده شد. در بازه زمانی ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۴ تقریباً تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه، شرایط ترسالی داشتند. پس از ۱۹۹۸ تقریباً تعداد ایستگاه‌های با شرایط خشکسالی، افزایش داشت و در بازه زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ بیشتر ایستگاه‌ها، خشکسالی را تجربه کردند. نتایج نشان داد همبستگی بالایی بین شاخص PDI و شاخص‌های متداول خشکسالی SPI و SPEI وجود دارد. از شاخص PDI به دلیل محاسبه آسان و مستقل بودن آن از پارامترهای آماری، در تحلیل خشکسالی استفاده شد.

کلیدواژه‌ها: خشکسالی هواشناسی، تحلیل روند، تغییر اقلیم.

۱. دانشجوی دکتری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲. دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، m.erfanian@urmia.ac.ir

۳. دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

• این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی مستقل بوده و در دانشگاه ارومیه انجام شده است.

مقدمه

(پالمر،^{۱۲} ۱۹۶۵)، شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد (SPEI^{۱۳}) (ویسنته‌سرانو^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۰)، شاخص بارش استاندارد شده (SPI^{۱۵}) (مک‌کی^{۱۶} و همکاران، ۱۹۹۳)، شاخص خشکسالی احیا (RDI^{۱۷}) (وخورست،^{۱۸} ۱۹۹۶)، شاخص ناهنجاری رطوبت (شاخص Z) (پالمر، ۱۹۶۵) و در نهایت شاخص ناهنجاری بارش (ون‌روی^{۱۹}، ۱۹۶۵). بارش و دما، تنها متغیرهای هواشناسی مورد نیاز در محاسبه این شاخص‌ها است. تاکنون شاخص‌های مختلف خشکسالی مانند شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI)، شاخص بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)، درصد نرمال (PN^{۲۰})، شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، شاخص Z (CZI^{۲۱}) و شاخص دهک‌ها (DI^{۲۲})، به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی ویژگی خشکسالی استفاده شده است. شاخص‌های خشکسالی، هرکدام ویژگی‌های خاص خود را دارند و در تحقیقات خشکسالی و رطوبت در ایران و شمال غرب به نتایج مفیدی دست یافته‌اند. یک شاخص خشکسالی در اندازه‌گیری مؤثر شدت خشکسالی، به ویژگی‌های خاصی نیاز دارد که شامل سطح مهارت یا پیشرفته بودن، توسعه‌پذیری، چندبعدی بودن، سازگاری یا قابل مدیریت بودن، سادگی و شفافیت (فهم و کاربرد) است که در این میان، سطح مهارت، چندبعدی بودن و سازگاری، اهمیت بیشتری دارند (کیانتاش و دراکاپ،^{۲۳} ۲۰۰۲). پایداری (در شرایط اقلیمی مختلف) و قابلیت کنترل خصوصیات مکانی-زمانی یک شاخص خشکسالی مناسب را در بر می‌گیرند تا در مدیریت جنبه‌های کاربردی خشکسالی، مفید باشند. علاوه بر این، شاخص‌های خشکسالی باید با استفاده از داده‌های در دسترس، تا حد امکان، ساده‌تر محاسبه شوند و شرایط خشکسالی را به‌طور مستقیم منعکس کنند

خشکسالی یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی است (یو^۱ و همکاران، ۲۰۱۴) که از دهه آخر قرن بیستم، جدی‌ترین پدیده طبیعی شناخته شده است که بر محیط‌زیست، اکوسیستم‌های طبیعی، بخش‌های مختلف اقتصادی و اجتماعی و جامعه پیامدهای زیان‌باری تحمیل می‌کند (ژوانگ^۲ و همکاران، ۲۰۲۲؛ دای،^۳ ۲۰۱۱؛ ونر،^۴ ۲۰۱۱؛ اوباسی،^۵ ۱۹۹۴). این پدیده با موقعیت جغرافیایی، ارتفاع و فاصله از پیکره‌های آبی مرتبط است (میشرا و سینگ،^۶ ۲۰۱۰). خشکسالی به‌طور کلی به‌عنوان کمبود قابل توجه منابع آب شیرین طبیعی در یک دوره زمانی طولانی به‌دلیل تغییر در الگوهای بارش و دما تعریف می‌شود (کوندزوچ،^۷ ۲۰۰۹). از این رو، دوره‌هایی که بارندگی کمتر از حد متوسط را پوشش می‌دهند، معمولاً می‌توانند منجر به خشکسالی موقت، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک با دمای نسبتاً بالا شوند. به‌طور کلی، رویدادهای خشکسالی در سراسر جهان به چهار گروه هواشناسی، رطوبت خاک (کشاورزی)، هیدرولوژیکی و اجتماعی اقتصادی طبقه‌بندی می‌شوند (میشرا و سینگ، ۲۰۱۰). در سال‌های اخیر، افزایش فعالیت‌های انسانی و گرم شدن آب‌وهوا منجر به تغییر در الگوی توزیع مکانی خشکسالی شده است (مک‌نیل^۸ و همکاران، ۲۰۱۶؛ آتکین^۹ و همکاران، ۲۰۱۸).

تعیین شروع و پایان خشکسالی دشوار است؛ بنابراین برای ارزیابی کمی و کیفی پدیده خشکسالی، مانند شدت، مدت، بزرگی و وسعت مکانی از شاخص‌های خشکسالی استفاده می‌گردد (اصلاحی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۵). در حال حاضر، شاخص‌های خشکسالی متفاوتی برای اندازه‌گیری ویژگی‌های خشکسالی در جهان اتخاذ شده است؛ از جمله شاخص‌های رایج عبارتند از: شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI^{۱۱})

12. Palmer
13. Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index
14. Vicente-Serrano
15. Standardized Precipitation Index
16. McKee
17. Reconnaissance Drought Index
18. Weghorst
19. Van Rooy
20. Percent of Normal
21. China Z Index
22. Deciles
23. Keyantash

1. Yu
2. Zhuang
3. Dai
4. Wehner
5. Obasi
6. Mishra and Singh
7. Kundzewicz
8. McNeeley
9. Otkin
10. Eslahi
11. Palmer Drought Severity Index

(۲۰۱۶) تحلیل روند تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی و ترسالی شمال غرب کشور را براساس دو روش SPI و RAI^۶ بررسی کردند؛ نتایج به دست آمده نشان داد که شیب خط روند در اکثر ایستگاه‌های مطالعاتی، منفی بوده و بیشترین شیب منفی براساس شاخص‌های مذکور در ایستگاه مراغه مشاهده شد. نتایج نام‌برندگان نشان داد که می‌توان از دو شاخص خشکسالی SPI و RAI صرفاً برای تعیین روند تغییرات دوره‌های خشکسالی و ترسالی به دلیل همبستگی بالای آن‌ها، در ارزیابی و تعیین روند تغییرات خشکسالی و ترسالی استفاده کرد. صلاحی و همکاران (۲۰۱۶) تحلیل مکانی خشکسالی در شمال غرب ایران را انجام دادند؛ نتایج پژوهش ایشان نشان داد که مناطق غربی و شمال غربی منطقه، خشکسالی نسبتاً ملایم را تجربه کرده‌اند. از سوی دیگر، قسمت جنوب شرقی در معرض خشکسالی بسیار شدید قرار دارد. هدف از این پژوهش، مقایسه شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI با شاخص جدید PDI و تحلیل روند خشکسالی در ایستگاه‌های شمال غرب ایران برای تحلیل زمانی و مکانی خشکسالی است.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

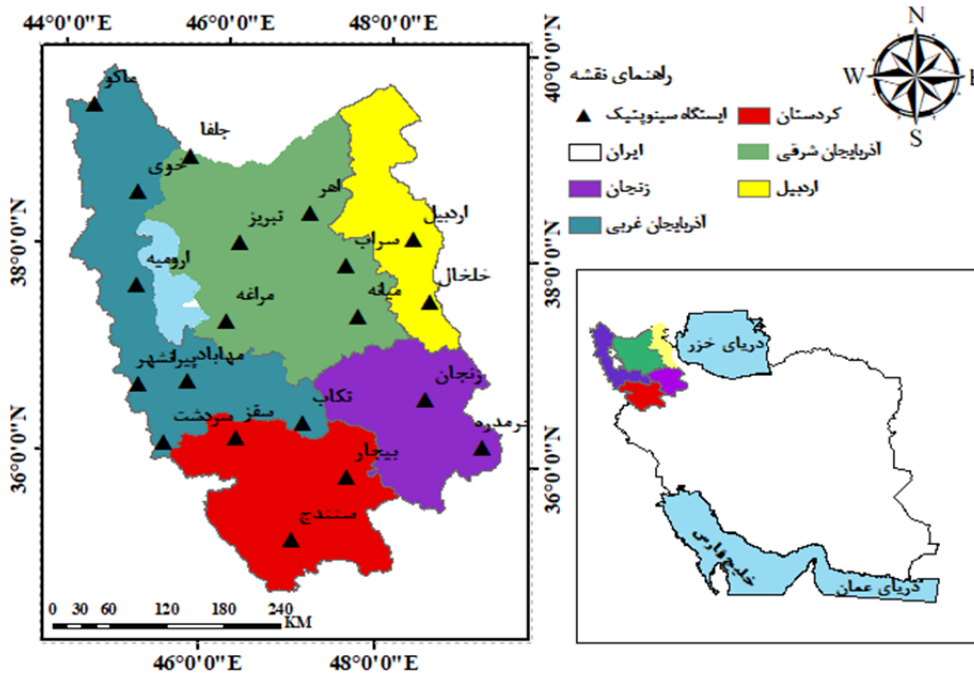
در این پژوهش، از داده‌های بارش ۲۰ ایستگاه سینوپتیک شمال غرب ایران (استان‌های اردبیل، تبریز، ارومیه، کردستان، زنجان) با دوره آماری ۳۵ ساله ۱۹۸۷-۲۰۲۱ به منظور پایش خشکسالی استفاده شد. مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل (۱) و جدول (۱) آورده شده است.

(لشکری، ۲۰۲۱). استفاده از شاخص SPI در ارزیابی ویژگی‌های خشکسالی به دلیل دربرگرفتن بیشتر جنبه‌های مذکور، بیشتر از سایر شاخص‌ها توصیه شده است (خو^۱ و همکاران، ۲۰۱۵؛ کیانتاش و دراکاپ، ۲۰۰۲). با وجود این، شاخص SPI مبتنی بر متغیر بارش است و متغیر دما و سایر عوامل مانند رطوبت خاک و آب زیرزمینی را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین، وجود سایر عوامل مؤثر بر خشکسالی در کنار مقدار بارش، تا حد زیادی، توانایی SPI را برای ارزیابی خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کاهش می‌دهد (نارش کومارت^۲ و همکاران، ۲۰۰۹؛ استیج^۳ و همکاران، ۲۰۱۶).

در زمینه استفاده از شاخص‌های خشکسالی مطالعات متعددی در ایران و سایر نقاط جهان صورت گرفته است. وی^۴ و همکاران (۲۰۲۲) توزیع مکانی و زمانی خشکسالی و رطوبت در چین براساس شاخص خشکسالی Pedj (PDI^۵) بررسی کردند. شاخص PDI هم به بارش و هم به دما حساس است و عملکرد بالایی برای تخمین شروع خشکسالی در مقیاس بلندمدت (۱۲ ماهه یا سالانه) دارد. ترابی‌نژاد و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی انواع خشکسالی و مشخصه‌های خشکسالی در ایران با استفاده از شاخص خشکسالی (SPEI) پرداختند، که نتایج نشان داد شدت خشکسالی نیز در مناطق شرقی و داخلی بیشتر از مناطق غربی و شمال غربی ایران است همچنین تغییرات دهه‌ای خشکسالی نیز نشان داد که طی دهه‌های اخیر، طول دوره و بزرگی خشکسالی در ایران افزایش یافته و شدت خشکسالی کاهش داشته است. جوان و همکاران (۲۰۱۵) وضعیت خشکسالی شمال غرب ایران را با استفاده از دو شاخص SPI و DI بررسی کردند؛ مقایسه شاخص دهک و شاخص بارش استاندارد در طول یک سال، نشان داد که بخش شرقی و شمال غربی در مقایسه با غرب منطقه، در یک دوره آماری ۵۸ ساله، ترسالی بیشتری را تجربه کرده است. علاوه بر این، قسمت‌های غربی و مرکزی منطقه آذربایجان بیشتر در معرض خشکسالی قرار گرفته است. منتصری و همکاران

1. Xu
2. Naresh Kumar
3. Stagge
4. Wu
5. Pedj Drought Index

6. Rainfall Anomaly Index



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه و ایستگاه‌های هواشناسی انتخاب شده در شمال غرب ایران

Figure (1): The geographical location of the region and selected meteorological stations in Northwest Iran

جدول (۱): مشخصات جغرافیایی و میانگین سالانه بارش و دما در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره آماری ۱۹۸۷-۲۰۲۱

Table (1): Geographical characteristics and annual average precipitation and temperature at stations during 1987-2021

ایستگاه	طول (DD)	عرض (DD)	بارش (mm)	دما (C°)	ایستگاه	طول (DD)	عرض (DD)	بارش (mm)	دما (C°)	ایستگاه	طول (DD)	عرض (DD)	بارش (mm)	دما (C°)
خلخال	۴۸/۵۳	۳۷/۶۰	۳۷۶/۱۹	۸/۶۰	مدیرانه‌ای	۴۵/۰۵	۳۷/۶۵	۳۱۳/۰۲	۱۱/۴۵	نیمه‌خشک	۴۸/۳۲	۳۸/۲۱	۲۷۴/۴۱	۹/۳۰
اردبیل	۴۸/۳۲	۳۸/۲۱	۲۷۴/۴۱	۹/۳۰	نیمه‌خشک	۴۷/۰۶	۳۸/۴۳	۲۸۳/۲۶	۱۱/۰۵	نیمه‌خشک	۴۷/۵۳	۳۷/۹۳	۲۳۶/۲۸	۸/۸۷
اهر	۴۷/۰۶	۳۸/۴۳	۲۸۳/۲۶	۱۱/۰۵	نیمه‌خشک	۴۷/۷	۳۷/۹۳	۲۷۴/۲۸	۱۴/۳۱	نیمه‌خشک	۴۶/۱۴	۳۷/۳۴	۲۸۴/۵۶	۱۳/۲۰
سراب	۴۷/۵۳	۳۷/۹۳	۲۳۶/۲۸	۸/۸۷	نیمه‌خشک	۴۵/۶	۳۸/۹۳	۲۰۸/۷۵	۱۵/۱۱	خشک	۴۶/۲۸	۳۸/۱۲	۲۵۶/۵۱	۱۳
میانه	۴۷/۷	۳۷/۹۳	۲۷۴/۲۸	۱۴/۳۱	نیمه‌خشک	۴۴/۴۶	۳۹/۳۷	۳۰۴/۳۸	۱۰/۷۸	نیمه‌خشک	۴۴/۹۵	۳۸/۵۵	۲۶۷/۰۸	۱۲/۸۹
مراغه	۴۶/۱۴	۳۷/۳۴	۲۸۴/۵۶	۱۳/۲۰	نیمه‌خشک	۴۸/۵۲	۳۶/۶۶	۲۸۸/۷۶	۱۱/۳۰	نیمه‌خشک				
جلفا	۴۵/۶	۳۸/۹۳	۲۰۸/۷۵	۱۵/۱۱	خشک									
تبریز	۴۶/۲۸	۳۸/۱۲	۲۵۶/۵۱	۱۳	نیمه‌خشک									
ماکو	۴۴/۴۶	۳۹/۳۷	۳۰۴/۳۸	۱۰/۷۸	نیمه‌خشک									
خوی	۴۴/۹۵	۳۸/۵۵	۲۶۷/۰۸	۱۲/۸۹	نیمه‌خشک									

* طبقه‌بندی اقلیمی: دومارتن، واحدها: درجه اعشاری (DD)، میلی‌متر (mm)، سلسیوس (C°)

شاخص خشکسالی SPI

SPI یکی از رایج‌ترین شاخص‌های خشکسالی است. مک‌کی و همکاران (۱۹۹۳) SPI را برای شناسایی و پایش رویدادهای خشکسالی با استفاده از داده‌های بارندگی ماهانه توسعه دادند. از این شاخص می‌توان برای شناسایی رویدادهای خشکسالی و تعیین کمیت بزرگی خشکسالی‌ها در مقیاس‌های زمانی متعدد ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه استفاده کرد. با توجه به قابلیت

اطمینان و توانایی آن در توصیف رویدادهای خشکسالی در مراحل زمانی متعدد برای مناطق مختلف آب‌وهوایی، SPI به‌طور گسترده در نقاط مختلف جهان استفاده شده است (وانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۵؛ یونیتا^۲ و همکاران، ۲۰۱۶؛ گوپتا و جین^۳، ۲۰۱۸). با این حال، داده‌های پیوسته و طولانی‌مدت حداقل ۳۰

1. Wang
2. Ionita
3. Gupta and Jain

$$IM = \left(\frac{TM}{5}\right)^{1.514} \quad (9)$$

که PET مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه به میلی متر، TM دمای متوسط ماهانه و I شاخص حرارتی است.

$$D_i = P_i - PET_i \quad (10)$$

فرم کلی تابع چگالی احتمال این تابع به صورت رابطه زیر است:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma}\right)^\beta\right]^{-2} \quad (11)$$

که در آن، پارامترهای α و β و γ به ترتیب پارامترهای توزیع آماری هستند. فرم تابع احتمالی لوگ-لو جستیک سه پارامتری نیز مطابق رابطه زیر است.

$$f(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma}\right)^\beta\right]^{-1} \quad (12)$$

جدول (۲): طبقه بندی شاخص های SPEI و SPI
Table (2): Classification of the SPEI and SPI indices

وضعیت	طبقه خشکسالی
ترسالی بسیار زیاد	بیشتر از ۲
ترسالی زیاد	۱/۵ تا ۱/۹۹
ترسالی متوسط	۱ تا ۱/۴۹
نرمال	-۰/۹۹ تا ۰/۹۹
خشکسالی متوسط	-۱ تا -۱/۴۹
خشکسالی شدید	-۱/۵ تا -۱/۹۹
خشکسالی بسیار شدید	کمتر از -۲

شاخص خشکسالی PDI^۴

برای تعیین اثرات تغییرات بارش و دما بر ویژگی های خشکسالی و رطوبت (از نظر شدت، فراوانی، مدت و گسترش) از شاخص خشکسالی پج^۵ (۱۹۷۵) و الاگیب و الحاق^۶ (۲۰۱۱) استفاده شد که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$PDI = SAI_{Tm} - SAI_{Pr} \quad (13)$$

که در آن، SAI_{Pr} و SAI_{Tm} به ترتیب شاخص های ناهنجاری استاندارد شده (SAI) میانگین دما و بارش در مقیاس مورد مطالعه است. محدوده PDI مربوط به سطوح مختلف خشکسالی و ترسالی در جدول (۲) آورده شده است.

سال برای محاسبه SPI مورد نیاز است (مککی و همکاران، ۱۹۹۳).

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{SD} \quad (1)$$

P_i مجموع بارش های ماهانه، \bar{P} میانگین مجموع بارش های ماهانه، SD انحراف معیار میانگین مجموع بارش های ماهانه هستند. تابع توزیع احتمال بارش از توزیع گاما پیروی می کند که تابع چگالی احتمال این توزیع به صورت رابطه (۲) است:

$$F(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} X^{\alpha-1} E^{-\frac{x}{\beta}} \quad (2)$$

در این رابطه، X مقدار متغیر، α و β به ترتیب پارامتر شکل و مقیاس توزیع هستند. $\Gamma(\alpha)$ نیز تابع ضربی گاما است که براساس رابطه (۳) به دست می آید.

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty Y^{\alpha-1} e^{-Y} dy \quad (3)$$

ضریب های بهینه α و β به صورت رابطه های (۴) و (۵) محاسبه می شود.

$$\alpha = \frac{x}{\beta} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{4a} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4a}{3}}\right) \quad (5)$$

شاخص خشکسالی SPEI

شاخص SPEI را ویسته سرانو^۱ و همکاران (۲۰۰۹) توسعه داده اند. شاخص SPEI با گنجاندن اثرات دما از طریق تبخیر و تعرق، ماهیت چندمقیاسی خشکسالی را به روشی بهتر به تصویر می کشد. براساس نتایج ماوروماتیس^۲ (۲۰۰۷) مبنی بر تشابه روش های ساده و پیچیده برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل، ویسته سرانو از روش تورنت وایت^۳ (۱۹۸۴) بدین منظور استفاده کرد. شاخص SPEI براساس روابط زیر به دست می آید:

$$PET = 16NM \left(\frac{10TM}{I}\right)^A \quad (6)$$

که NM ضریب تصحیح است

$$A = \frac{(675 * (10^{-9})I^3) - (771 * (10^{-7})I^2) + (179 * (10^{-4}) * I)}{1} \quad (7)$$

$$I = \sum_{M=1}^{12} IM \quad (8)$$

4. Pedj Drought Index
5. Pedj
6. Elagib & Elhag

1. Vicente-Serrano
2. Mavromatis
3. Thornthwaite

$$z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{اگر } s > 0 \\ 0 & \text{اگر } s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{اگر } s < 0 \end{cases} \quad (19)$$

در صورت مثبت بودن آماره Z، روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن، روند نزولی در نظر گرفته می‌شود. اگر قدر مطلق آماره Z در سطح معناداری ۰/۰۵ بزرگ‌تر از ۱/۹۶ = Z_{0.05} باشد، در این صورت فرض صفر رد شده و درحقیقت روند وجود داشته و معنادار است. مقدار منفی آماره Z، نشان‌دهنده روند کاهشی و مقدار مثبت Z، نشان‌دهنده روند افزایشی است (سبزی‌پرور و شادمانی، ۲۰۱۱).

نتایج

فراوانی طبقات شاخص خشکسالی PDI در منطقه شمال غرب ایران در شکل (۲) نشان داده شده است. بر این اساس، ایستگاه‌های مراغه، تبریز و سراب در آذربایجان شرقی و ایستگاه‌های سقز، خوی و ماکو در آذربایجان غربی و خلخال در اردبیل، دارای بیشترین مقادیر خشکسالی سالانه و ایستگاه‌های خرمرده، سنندج، زنجان، تکاب، بیجار و جلفا دارای کمترین مقدار خشکسالی سالانه بوده است. از نظر شدت خشکسالی، شدیدترین طبقات خشکسالی در ایستگاه‌های مهاباد و سنندج رخ داده است. مقادیر سالانه شاخص خشکسالی PDI در مراکز استان در منطقه مورد بررسی در شکل (۳) آورده شده است. بیشتر ایستگاه‌ها در بازه زمانی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۵ ترسالی و در سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۷ خشکسالی را تجربه کرده‌اند (جدول ۴) که در ایستگاه‌های سنندج، اردبیل و زنجان شدیدترین مقدار خشکسالی در سال ۲۰۲۱ رخ داده است. همچنین بیشترین دوره ترسالی در جنوب و ایستگاه بیجار (۹ سال) و بیشترین دوره خشکسالی در شرق و ایستگاه اردبیل (۸ سال) رخ داده است که با نتایج عزیزی و صادقی (۲۰۲۱) مطابقت دارد. این نتایج مبنی بر این است که فراوانی خشکسالی در نواحی جنوب دریاچه ارومیه کمترین میزان و به سمت نواحی مرکزی افزایش پیدا کرده، به طوری که قسمت شرقی منطقه دارای بیشترین فراوانی ماه‌های خشک بوده است. در پژوهش دیگر، رزمی و همکاران (۲۰۲۲) در بررسی خشکسالی در شمال غرب ایران نشان دادند که در قسمت‌های جنوب به‌ویژه در استان زنجان وقوع خشکسالی خفیف بوده است.

$$SAI = \frac{(X - \bar{X})}{S} \quad (14)$$

که در آن، X رکورد سال مورد نظر است، \bar{X} و S به ترتیب میانگین و انحراف استاندارد تمام رکوردهای سال در طول دوره زمانی هستند.

جدول (۳): طبقه‌بندی شاخص PDI		
Table (3): Classification of the PDI index		
کد طبقه	وضعیت	طبقه خشکسالی
ExD	خشکسالی خیلی شدید	DPI ≥ 3
SeD	خشکسالی شدید	2 ≤ DPI < 3
MoD	خشکسالی متوسط	1 ≤ DPI < 2
MiD	خشکسالی خفیف	-0.5 ≤ DPI < 1
Nor	نرمال	-0.5 ≤ DPI < +0.5
MxH	ترسالی خفیف	-1 ≤ DPI < -0.5
MeH	ترسالی متوسط	-2 ≤ DPI < -1
StH	ترسالی شدید	-3 ≤ DPI < -2
EtH	ترسالی خیلی شدید	DPI < -3

آزمون من کندال (Mann-Kendall)

چندین رویکرد برای ارزیابی تحلیل روند وجود دارد (چن^۱ و همکاران، ۲۰۰۷). آزمون من-کندال (من، ۱۹۴۵؛ کندال، ۱۹۷۵)، پرکاربردترین آزمون برای ارزیابی روند مطالعات اقلیمی است (احمد^۲ و همکاران، ۲۰۱۸). مراحل محاسبه این آزمون به شرح زیر است:

الف) محاسبه اختلاف بین تک تک داده‌های شاخص‌های خشکسالی در ایستگاه‌های مورد مطالعه و اعمال تابع علامت و استخراج پارامتر S که از رابطه (۱۵) به دست می‌آید:

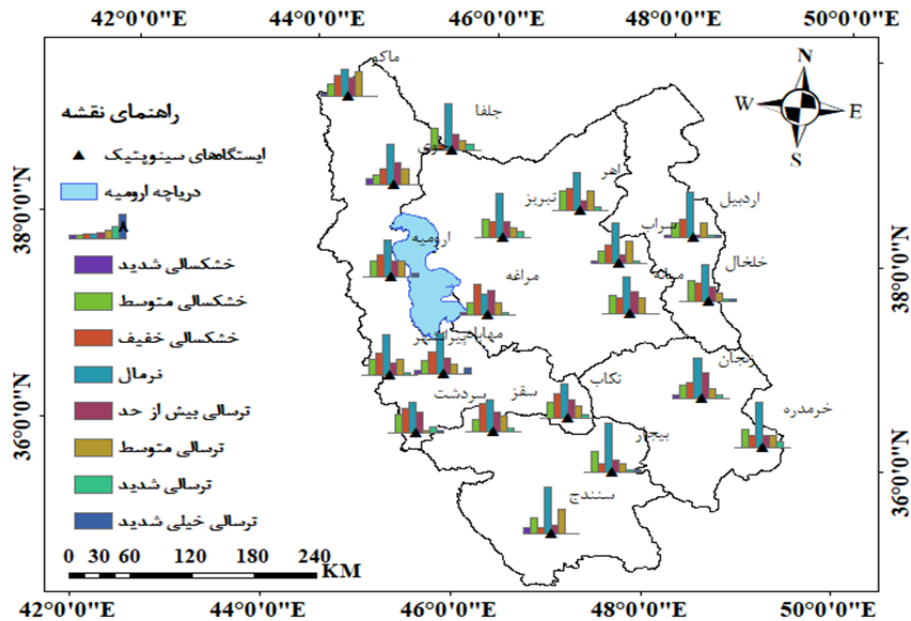
$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (15)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{اگر } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{اگر } (x_j - x_i) = 0 \\ 1 & \text{اگر } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{var}(s) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (17)$$

$$\text{VAR}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (18)$$

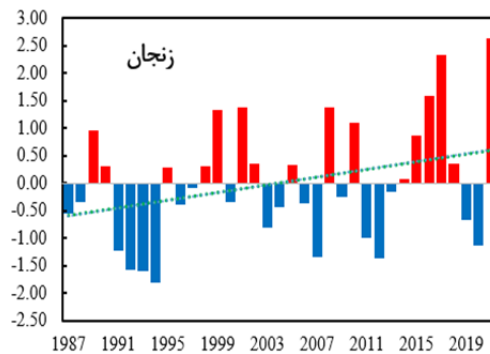
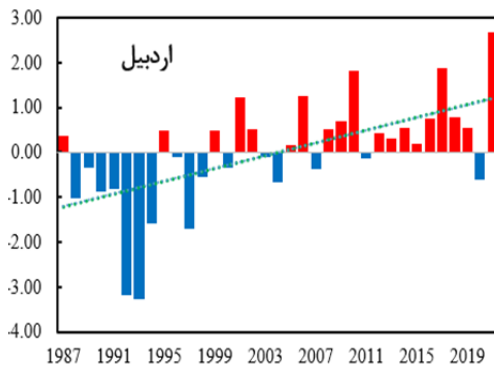
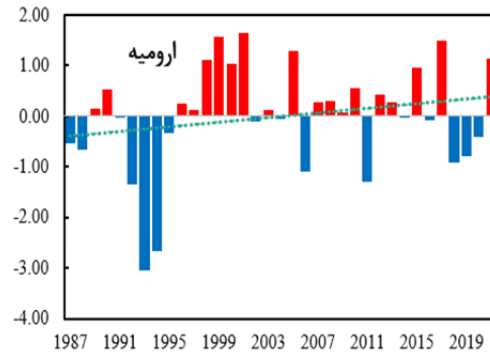
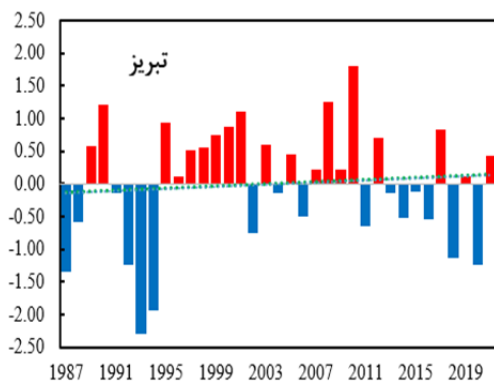
1. Chen
2. Ahmad

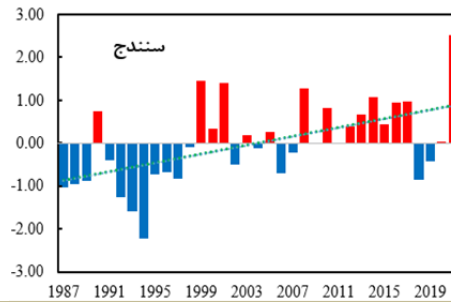


شکل (۲): تغییرات مکانی فراوانی طبقات شاخص خشکسالی PDI در منطقه شمال غرب ایران
 Figure (2): Spatial variability of the frequency of severity classes of PDI in Northwest Iran

غرب ایران، طولانی‌ترین دوره‌های مرطوب به‌طور متوسط ۵/۵ سال و طولانی‌ترین دوره خشکسالی به‌طور متوسط ۵/۷ سال است. همچنین ایستگاه میانه، دو دوره خشکسالی ۵ ساله و ایستگاه تبریز، دو دوره ترسالی ۴ ساله را تجربه کرده‌اند.

طولانی‌ترین دوره‌های رطوبت و خشکسالی براساس مقادیر متوالی PDI سالانه در جدول (۴) آورده شده است. بیشترین دوره ترسالی (۹ سال) در ایستگاه بیجار و طولانی‌ترین دوره خشکسالی در ایستگاه اردبیل (۸ سال) مشاهده شد. در شمال





شکل (۳): مقادیر سالانه شاخص PDI در مراکز استان‌های شمال غرب ایران (قرمز: خشکسالی، آبی: ترسالی)

Figure (3): Annual values of the PDI index in the centers of northwestern Provinces of Iran (Red: drought, Blue: wet)

جدول (۴): طولانی‌ترین دوره‌های خشک و مرطوب براساس شاخص خشکسالی PDI

Table (5): The longest dry and wet periods based on the PDI drought index

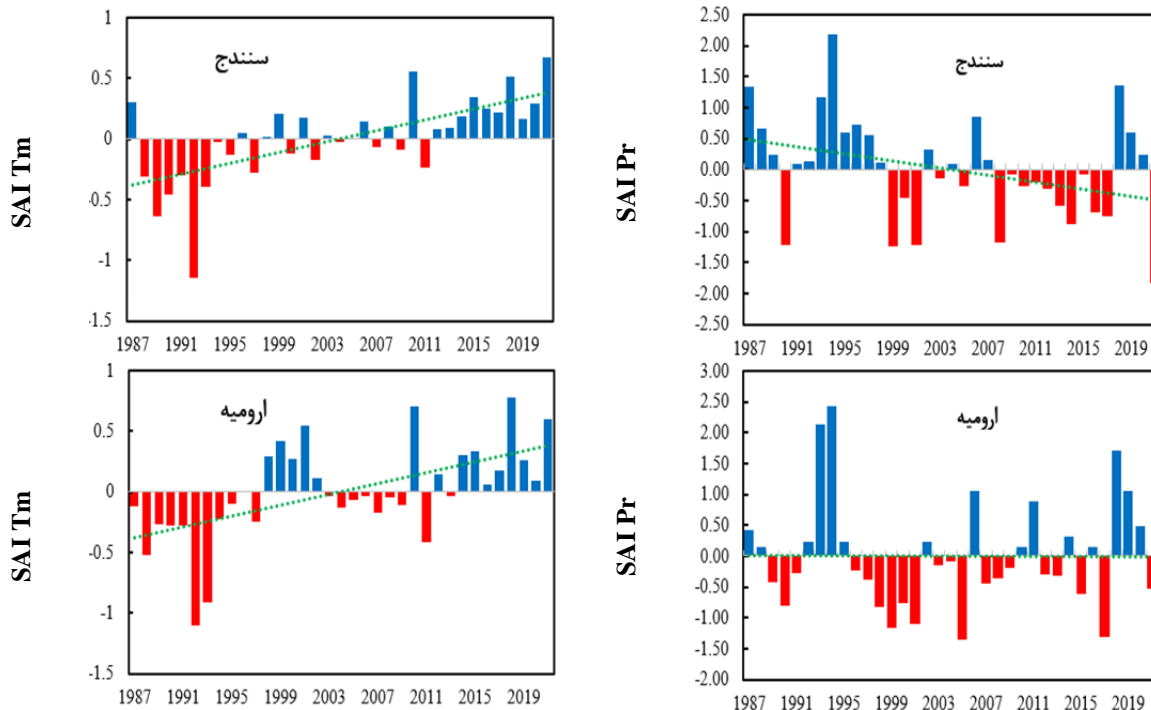
ردیف	ایستگاه	طولانی‌ترین دوره مرطوب		طولانی‌ترین دوره خشک	
		تداوم (سال)	دوره	تداوم (سال)	دوره
۱	خلیخال	۵	۱۹۹۴-۱۹۹۰	۷	۲۰۱۹-۲۰۱۳
۲	اردبیل	۷	۱۹۹۷-۱۹۸۸	۸	۲۰۱۹-۲۰۱۲
۳	اهر	۴	۱۹۹۴-۱۹۹۱	۴	۲۰۱۹-۲۰۱۶
۴	سراب	۷	۱۹۹۷-۱۹۹۱	۵	۲۰۱۹-۲۰۱۵
۵	میانه	۵	۱۹۹۴-۱۹۹۰	۵	۱۹۹۹-۱۹۹۵
۶	مراغه	۷	۱۹۹۷-۱۹۹۱	۶	۲۰۱۷-۲۰۱۲
۷	جلفا	۷	۲۰۱۳-۲۰۰۷	۴	۱۹۹۸-۱۹۹۵
۸	تبریز	۴	۱۹۹۴-۱۹۹۱	۷	۲۰۰۱-۱۹۹۵
۹	ماکو	۸	۲۰۰۹-۲۰۰۲	۷	۲۰۰۱-۱۹۹۵
۱۰	خوی	۴	۱۹۹۴-۱۹۹۱	۶	۲۰۰۷-۲۰۰۲
۱۱	ارومیه	۵	۱۹۹۵-۱۹۹۱	۶	۲۰۰۱-۱۹۹۶
۱۲	تکاب	۴	۱۹۹۴-۱۹۹۱	۶	۲۰۱۷-۲۰۱۳
۱۳	مهاباد	۴	۱۹۹۴-۱۹۹۱	۶	۲۰۱۷-۲۰۱۳
۱۴	پیرانشهر	۴	۱۹۹۴-۱۹۹۱	۵	۲۰۰۲-۱۹۹۸
۱۵	سردشت	۷	۱۹۹۷-۱۹۹۱	۶	۲۰۱۷-۲۰۱۲
۱۶	سنندج	۸	۱۹۹۸-۱۹۹۱	۶	۲۰۱۷-۲۰۱۲
۱۷	بیجار	۹	۱۹۹۸-۱۹۹۱	۶	۲۰۱۷-۲۰۱۲
۱۸	سقز	۴	۱۹۹۴-۱۹۹۱	۵	۲۰۱۷-۲۰۱۳
۱۹	خرمدره	۴	۱۹۹۴-۱۹۹۱	۵	۲۰۱۷-۲۰۱۳
۲۰	زنجان	۴	۱۹۹۴-۱۹۹۱	۴	۲۰۱۸-۲۰۱۴

شکل‌های (۴) و (۵) نتایج تحلیل روند ناهنجاری دما و بارش را نشان می‌دهد. نتایج SAIPr و SAIIm در دو ایستگاه سنندج و ارومیه به‌عنوان نمونه آورده شده است. شاخص‌های ناهنجاری بارندگی و دما براساس میانگین و انحراف معیار بلندمدت به دست می‌آید. بر این اساس هرچه قدر ناهنجاری (آنومالی) بارندگی بیشتر و ناهنجاری (آنومالی) دما کمتر باشد، شاخص خشکسالی PDI منفی‌تر (ترسالی) خواهد بود. در

ایستگاه سنندج و ارومیه به‌ترتیب بیشترین ناهنجاری بارندگی (۲/۱۹)، (۲/۴۳) در سال ۱۹۹۴ و کمترین ناهنجاری دما (۱/۱۴-)، (۱/۱۰-) در سال ۱۹۹۲ بوده است. براساس نتایج شکل (۲ و ۳) تغییرات شاخص خشکسالی PDI بیشتر متأثر از تغییرات بارندگی بوده است. براساس شاخص ناهنجاری بارندگی، روند ناهنجاری بارندگی در ۶۰٪ ایستگاه‌ها (۱۲) ایستگاه شامل بیجار، اردبیل، سقز، مهاباد، سردشت، تکاب،

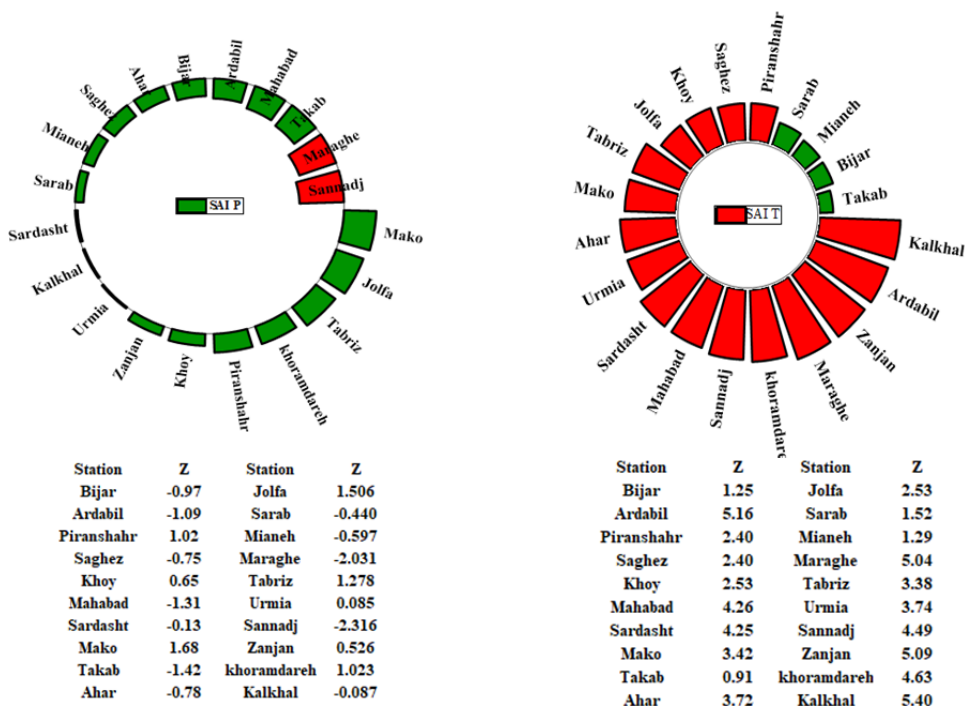
صعودی و غیرمعداری داشته است. شاخص ناهنجاری دما در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه، روند صعودی داشته و به جز ایستگاه‌های بیجار، تکاب، سراب و میانه (رنگ قرمز)، در مابقی ایستگاه‌ها در سطح ۰/۹۵ معنادار بوده است.

اهر، سراب، میانه، مراغه، سنندج و خلخال) نزولی بوده، که ایستگاه‌های سنندج و مراغه در سطح ۰/۹۵ (رنگ قرمز) معنادار هستند و فقط ۴۰٪ (۸ ایستگاه شامل پیرانشهر، خوی، ماکو، جلفا، تبریز، ارومیه، زنجان و خرم‌آباد)، روند بارندگی



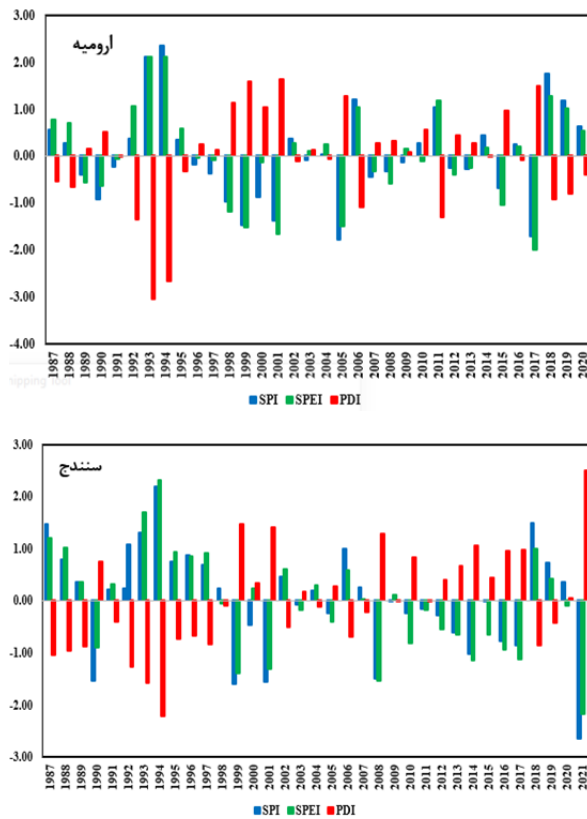
شکل (۴): تغییرات سالانه شاخص‌های ناهنجاری استاندارد شده بارش (SAI_{Pr}) و دما (SAI_{Tm}) در ایستگاه‌های سنندج و ارومیه

Figure (4): The annual variability of the SAI_{Tm} and SAI_{Pr} indices at Sanandaj and Urmia Stations



شکل (۵): روند شاخص‌های SAI_{Tm} و SAI_{Pr} (میل‌های بیرون دایره: روند صعودی و سایر میل‌ها: روند نزولی، قرمز: روند معنادار)

Figure (5): Trend of SAI_{Tm} and SAI_{Pr} indices (Bars outside: Increasing trend, other bars: Decreasing trend; Red color: significant trend)



شکل (۶): مقایسه تغییرات زمانی شاخص‌های خشکسالی SPI، SPEI و PDI

PDI و

Figure (6): Comparison of temporal changes in drought indices of SPI, SPEI, PDI

در تجزیه و تحلیل روند شاخص خشکسالی PDI، ۲۰ ایستگاه سینوپتیک مورد مطالعه در شمال غرب کشور در شکل (۶) آمده است؛ که در این بین، فقط ایستگاه‌های پیرانشهر، تبریز و جلفا روند نزولی داشته‌اند (۱۵٪ ایستگاه‌ها) و مابقی ایستگاه‌ها (۸۵٪ ایستگاه‌ها) روند صعودی داشته، که ایستگاه‌های با رنگ قرمز در سطح (۹۵٪) معنادار بوده‌اند. بیشترین روند صعودی خشکسالی در ایستگاه‌های اردبیل و مراغه مشاهده شد که با نتایج متصری و همکاران (۱۳۹۴) که نشان دادند حداکثر شیب منفی شاخص‌های خشکسالی SPI و RAI در ایستگاه مراغه بوده است، مطابقت دارد.

شکل (۸) گستره مکانی رویدادهای ترسالی ($PDI \geq 1$) و خشکسالی ($PDI \leq -1$) را نشان می‌دهد. در بازه زمانی ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۴، تقریباً ۱۰٪ از ایستگاه‌های مورد بررسی شرایط ترسالی داشته‌اند. از ۱۹۹۸ به بعد، ایستگاه‌های بیشتری در معرض خشکسالی قرار گرفته‌اند. همچنین در بازه زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷، بازهم بیشتر ایستگاه‌ها در شمال غرب دچار

شاخص‌های خشکسالی SPEI و SPI به‌طور گسترده در مطالعات بررسی خشکسالی برای توصیف ترسالی و خشکسالی در دنیا استفاده شده است. در این پژوهش، کارایی شاخص خشکسالی PDI برای بررسی رویدادهای ترسالی و خشکسالی در ایستگاه‌های شمال غرب کشور با مقادیر بارندگی و دمای متفاوت بررسی شد. شاخص PDI همبستگی قوی و معنادار در سطح ۰/۹۵ با شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI در ایستگاه‌های مورد بررسی داشته است؛ اما به‌علت دخالت دادن مقدار دما و بارندگی در محاسبه شاخص DPI بیشترین همبستگی را با شاخص SPEI داشته است که با نتایج لشکری و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت دارد. همچنین مقایسه تغییرات زمانی شاخص‌های مذکور در شکل (۶) نشان می‌دهد که شاخص PDI توانسته است شرایط ترسالی و خشکسالی را مشابه با شاخص‌های SPEI و SPI اندازه‌گیری کند.

جدول (۵): ضریب همبستگی شاخص PDI با شاخص‌های خشکسالی

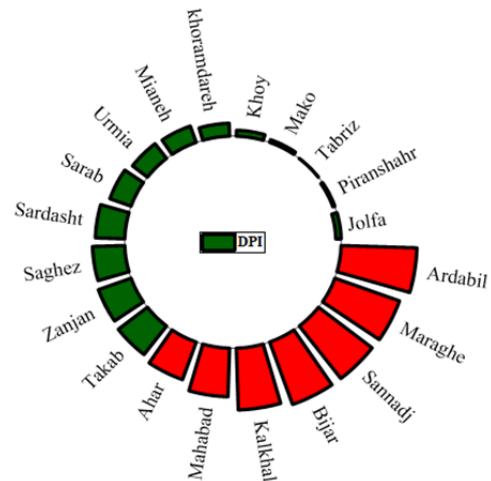
SPEI و SPI

Table (4): The correlation coefficient of PDI index with SPI and SPEI drought indices

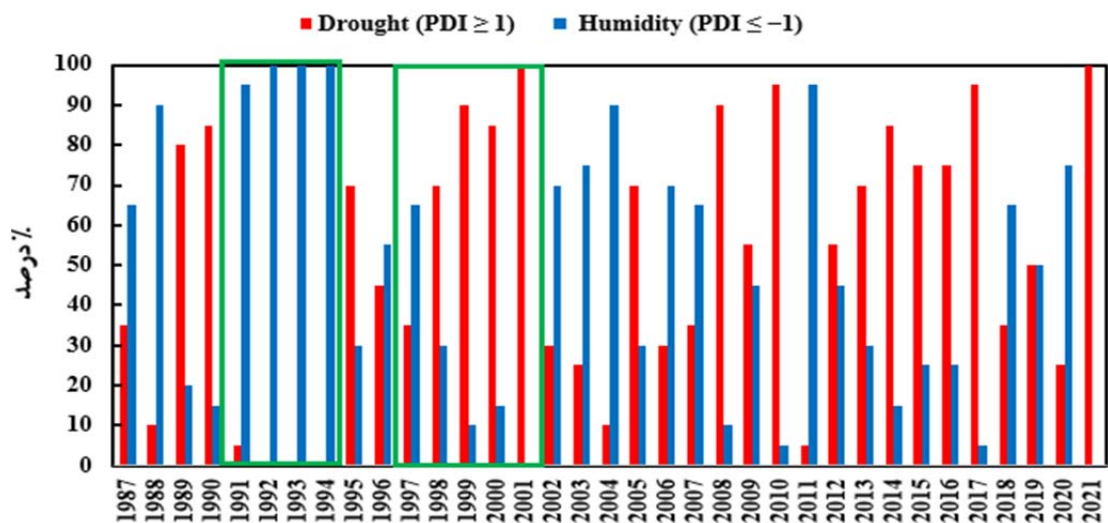
ردیف	استان	ایستگاه	PDI	
			SPEI	SPI
۱	اردبیل	خلیخال	-۰/۹۳	-۰/۸۵
۲		اردبیل	-۰/۹۵	-۰/۸۹
۳	آذربایجان شرقی	اهر	-۰/۹۷	-۰/۹۱
۴		سراب	-۰/۹۵	-۰/۸۴
۵	آذربایجان شرقی	میانه	-۰/۹۳	-۰/۹۶
۶		مراغه	-۰/۸۹	-۰/۹۳
۷		جلفا	-۰/۹۲	-۰/۹۳
۸	آذربایجان شرقی	تبریز	-۰/۹۴	-۰/۹۲
۹		ماکو	-۰/۹۶	-۰/۸۷
۱۰	آذربایجان غربی	خوی	-۰/۹۴	-۰/۹۱
۱۱		ارومیه	-۰/۹۵	-۰/۹۳
۱۲	آذربایجان غربی	تکاب	-۰/۹۰	-۰/۹۱
۱۳		مهاباد	-۰/۹۷	-۰/۹۴
۱۴	آذربایجان غربی	پیرانشهر	-۰/۹۶	-۰/۹۰
۱۵		سردشت	-۰/۹۶	-۰/۸۹
۱۶	کردستان	سنندج	-۰/۹۸	-۰/۹۴
۱۷		بیجار	-۰/۹۶	-۰/۹۴
۱۸	کردستان	سقز	-۰/۹۵	-۰/۹۱
۱۹		خرمدره	-۰/۹۷	-۰/۹۱
۲۰	زنجان	زنجان	-۰/۹۷	-۰/۸۹

خشکسالی شده‌اند. در سال ۲۰۰۱ و ۲۰۲۱، تمامی ایستگاه‌ها و میرزایی و همکاران (۲۰۲۲) بیان کردند که وجود ناهنجاری‌های رطوبت ویژه و ناهنجاری‌های منابع تأمین رطوبتی در شمال غرب ایران باعث حاکمیت شرایط خشک بر منطقه مورد مطالعه می‌شود.

Station	Z	Station	Z
Bijar	3.38	Jolfa	-0.27
Ardabil	3.78	Sarab	1.12
Piranshahr	-0.10	Mianeh	0.88
Saghez	1.60	Maraghe	3.42
Khoy	0.30	Tabriz	-0.01
Mahabad	2.47	Urmia	0.94
Sardasht	1.46	Sannadj	3.38
Mako	0.14	Zanjan	1.73
Takab	1.83	khormdareh	0.65
Ahar	2.03	Kalkhal	3.14



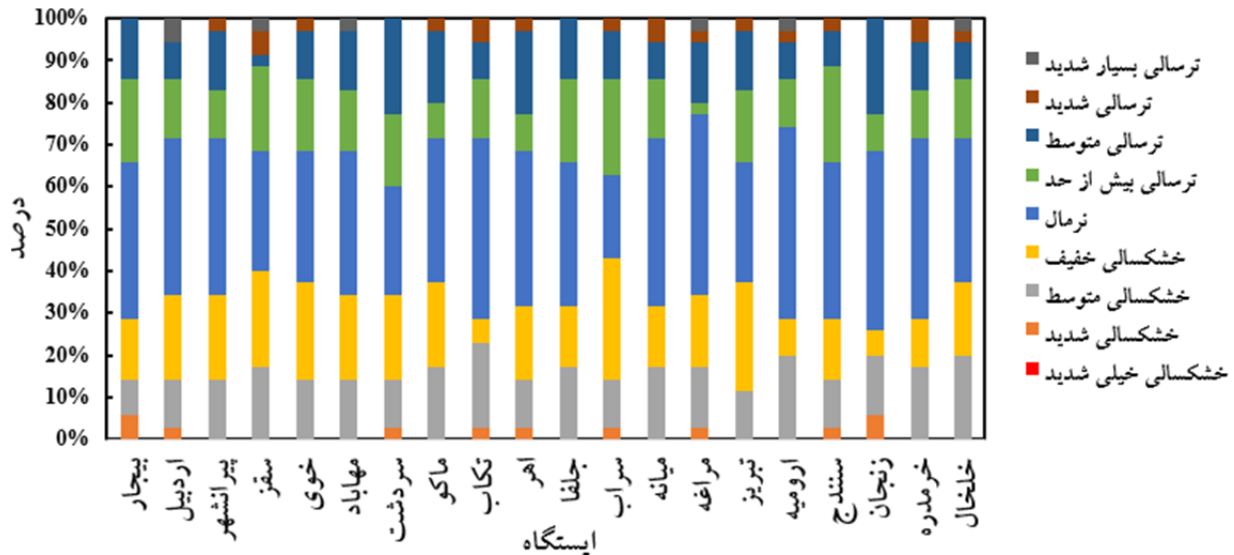
شکل (۷): نوع روند شاخص خشکسالی PDI در ایستگاه‌ها (میله‌های بیرون دایره: روند صعودی و سایر میله‌ها: روند نزولی، قرمز: روند معنادار)
Figure (7): Trend type of the PDI drought index in stations (Bars outside: Increasing trend, other bars: Decreasing trend; Red color: significant trend)



شکل (۸): درصد وقایع خشکسالی و ترسالی براساس شاخص PDI در منطقه مورد مطالعه
Figure (8): Percentage of drought and wet events based on the PDI index in the study area

شکل (۹) درصد وضعیت‌های شاخص خشکسالی PDI را در هر ایستگاه نشان می‌دهد. براساس نتایج، هیچ کدام از ایستگاه‌ها خشکسالی خیلی شدید (ExD) را تجربه نکرده‌اند. به ترتیب شدیدترین درصد خشکسالی شدید در زنجان (۵/۷۱٪)، خشکسالی متوسط خلخال (۲۰٪)، و خشکسالی خفیف تبریز، مراغه و پیرانشهر برابر ۴۲/۸۵٪ بوده و بیشترین درصد ایستگاه با ترسالی بیش از حد، بیجار (۴۲/۸۵)، ترسالی متوسط ماکو (۱۷)، ترسالی قوی تکاب، خرمدره و میانه (۵/۷۱) و ترسالی بسیار قوی (۵/۷۱) در استان اردبیل بوده است.

شکل (۹) درصد وضعیت‌های شاخص خشکسالی PDI را در هر ایستگاه نشان می‌دهد. براساس نتایج، هیچ کدام از ایستگاه‌ها خشکسالی خیلی شدید (ExD) را تجربه نکرده‌اند. به ترتیب شدیدترین درصد خشکسالی شدید در زنجان (۵/۷۱٪)، خشکسالی متوسط خلخال (۲۰٪)، و خشکسالی خفیف تبریز، مراغه و پیرانشهر برابر ۴۲/۸۵٪ بوده و بیشترین درصد ایستگاه با ترسالی بیش از حد، بیجار (۴۲/۸۵)، ترسالی متوسط ماکو (۱۷)، ترسالی قوی تکاب، خرمدره و میانه (۵/۷۱) و ترسالی بسیار قوی (۵/۷۱) در استان اردبیل بوده است.



شکل (۹): توزیع درصد طبقات ترسالی و خشکسالی شاخص PDI در ایستگاه‌های مورد مطالعه

Figure (9): Percentage distribution of wet and dry classes based on the PDI index at the studied stations

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از شاخص PDI، اثرات تغییرات بارندگی و دما بر رویدادهای ترسالی و خشکسالی طولانی‌مدت در ۲۰ ایستگاه شمال غرب در بازه زمانی ۳۵ ساله (۱۹۸۷-۲۰۲۱) مورد بررسی قرار گرفت. ایستگاه‌های شمال غرب ایران، دوره ترسالی را در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۴ و دوره خشکسالی را در سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۱ و ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۷ تجربه کردند که در این خصوص، میرزائی حسنلو و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که در ایستگاه‌های حوضه دریاچه ارومیه در سال‌های ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۴ بیشترین مقدار بارندگی رخ داده و از سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳ بارندگی روند کاهشی، و دما روند صعودی و معناداری داشته است. طولانی‌ترین مدت رطوبت به‌طور متوسط ۵/۵ سال بود، درحالی‌که طولانی‌ترین خشکسالی بیش از ۵/۷ سال ادامه داشت. در مقیاس سالانه، PDI تا حد زیادی قادر به توصیف تغییرات مکانی-زمانی ترسالی و خشکسالی‌های منطقه مورد

مطالعه شد. براساس نتایج شاخص‌های SPEI، SPI و PDI در آذربایجان شرقی ایستگاه‌های مانند مراغه، تبریز و سراب و آذربایجان غربی ایستگاه‌های سقز، خوی و ماکو و در استان اردبیل، خلخال دارای بیشترین مقادیر خشکسالی سالانه، بوده‌اند. همچنین براساس شاخص‌های مذکور تقریباً ۸۵٪ از ایستگاه‌های شمال غرب ایران خشکسالی روند صعودی داشته است. طلوعی و همکاران (۲۰۲۱) بیان کردند که در فصول بهار و زمستان و بهار، الگوهای پیوند از دور HCNA، SNA، NAM و NPI بیشترین همبستگی و تأثیرپذیری را بر خشکسالی شمال غرب ایران داشته‌اند. این شاخص در عین سادگی، در مقایسه با شاخص‌های متداول خشکسالی SPI و SPEI که به فرضیات آماری و پارامترهای توزیع آماری وابسته‌اند، نتایج قابل قبولی را ارائه کرد. همبستگی قوی‌تر PDI با SPEI نسبت به SPI توانایی PDI را برای توضیح اثرات تغییرات بارش و دما بر ترسالی و خشکسالی، در منطقه شمال غرب ایران نشان می‌دهد.

منابع

- Ahmed, K., Shahid, S., & Nawaz, N. (2018). Impacts of climate variability and change on seasonal drought characteristics of Pakistan. *Atmospheric Research*, 214, 364-374.
- Azizi, A., & Sadeghi, R. (2021). Drought and Ecological Migration in Northwestern of Iran over the Last Three Decades (1986-2016). *Journal of Environmental Studies*, 46(4), 601-623.
- Chen, H., Guo, S., Xu, C.Y. & Singh, V.P. (2007). Historical temporal trends of hydro-climatic variables and runoff response to climate variability and their relevance in water resource management in the Hanjiang basin. *Journal of Hydrology*, 344(3-4), 171-184.
- Dai, A. (2011). Drought under Global Warming: A Review. Wiley Interdisciplinary Reviews. *Climate*

- Change*, 2(1), 45-65
5. Elagib, N.A., & Elhag, M.M. (2011). Major climate indicators of ongoing drought in Sudan. *Journal of Hydrology*, 409, 612–625.
 6. Eslahi, M., Sobhani, B., & Pourasghar, F. (2015). Studying and applying the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (Case study: Tabriz Meteorological Station). *Journal of Climate Change*, 5(19), 23-38.
 7. Gupta, V., & Jain, M.K. (2018). Investigation of multi-model spatiotemporal mesoscale drought projections over India under climate change scenario. *Journal of Hydrology*, 567, 489–509.
 8. Ionita, M., Scholz, P., & Chelcea, S., (2016). Assessment of droughts in Romania using the Standardized Precipitation Index. *Natural Hazards*, 81(3), 1483–1498.
 9. Javan, Kh., Azizzade, M.R., Bashiri, H., & Shahriar, F. (2015). Zoning SPI and DI drought indices using rainfall network data in Northwest of Iran. *Natural Geography Quarterly*, 8(29), 117-130.
 10. Kendall, M.G. (1975). *Rank correlation methods*. Griffin. London: UK.
 11. Keyantash, J., & Dracup, J.A. (2002). The quantification of drought: An evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1180-1167.
 12. Kundzewicz, Z.W. (2009). Adaptation to floods and droughts in the Baltic Sea basin under climate change. *Boreal Environment Research*, 14, 193–203.
 13. Lashkari, A., Irannezhad, M., Zare, H., & Labzovskii, L. (2021). Assessing long-term spatio-temporal variability in humidity and drought in Iran using Pedj Drought Index (PDI). *Journal of Arid Environments*, 185, 104336.
 14. Mann, H.B. (1945). Nonparametric test against trend. *Econometrica*, 13, 245- 259.
 15. Mavromatis, T. (2007). Drought index evaluation for assessing future wheat production in Greece. *International Journal of Climatology*, 27, 911-924.
 16. McKee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration t time scales. In Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA, USA, 17–22 January 1993; American Meteorological Society: Anaheim, CA, USA.
 17. McNeeley, S.M., Beeton, T.A., & Ojima, D.S. (2016). Drought risk and adaptation in the interior United States: Understanding the importance of local context for resource management in times of drought. *Weather Climate and Society*, 8, 147–161.
 18. Mirzaei Hassanlu, A., Abghari, H., & Erfanian, M., 2020. Evaluation of SPEI Drought Index and Trend Analysis Using Nonparametric Methods in the Selected Stations of Urmia lake Basin. *Journal of Watershed Management Research*, 11(22), 175-187.
 19. Mirzaei, M., Amininia, k., & Panahi, A., 2022. Statistical-Synoptic Analysis of the Occurrence of Dry Autumns in Northwest of Iran. *Geographical Space*, 22(78), 165-190.
 20. Mishra, A.K., & Singh, V.P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391, 204–216.
 21. Montaseri, M., Amirataee, B., & Khalili, K. (2016). Identification of Trend in Spatial and Temporal Dry and Wet Periods in Northwest of Iran Based on SPI and RAI Indices. *Journal of Water and Soil*, 30(2), 655-671.
 22. Naresh Kumar, M., Murthy, C.S., Sesha Sai, M.V.R., & Roy, P.S. (2009). On the use of Standardized Precipitation Index (SPI) for drought intensity assessment. *Meteorological Applications*, 16, 381–389.
 23. Obasi, G.O.P. (1994). WMO's role in the international decade for natural disaster reduction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 75(9), 1651-1661.
 24. Otkin, J.A., Svoboda, M., Hunt, E.D., Ford, T.W., Anderson, M.C., Hain, C., & Basara, J.B. (2018). Flash droughts: A review and assessment of the challenges imposed by rapid onset droughts in the United States *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99, 911–919.
 25. Palmer, W. (1965). Meteorological Droughts; Weather Bureau Research Paper 45; U.S. Department of Commerce: Washington, DC, USA, p.58.
 26. Pedj, D.A. (1975). On the indicator of drought and moisture surplus. In Proceedings of HMC of USSR; Science Press: Beijing, China, 156, 19–38.
 27. Razmi, R., Sotoudeh, F., Ghane, M., & Ostad-Ali-Askari, K. (2022). Temporal-spatial analysis of drought and wet periods: case study of a wet region in Northwestern Iran (East Azerbaijan, West Azerbaijan, Ardebil and Zanjan provinces). *Applied Water Science*, 12(11), 251.
 28. Sabziparvar, A.A., & Shadmani, M. (2011). Trends Analysis of Reference Evapotranspiration Rates by Using the Mann Kendall and Spearman Tests in Arid Regions of Iran. *Journal of Water and Soil*, 25(4), 823-834.
 29. Salahi, B., & Faridpour, M. (2016). Spatial analysis of climatic drought in North West of Iran using spatial autocorrelation statistics. *Journal of Spatial Analysis Environment*, 3(3), 1-20.
 30. Stagge, J.H., Tallaksen, L.M., Gudmundsson, L., Van Loon, A.F., & Stahl, K. (2016). Response to comment on 'Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI)'. *International Journal of Climatology*, 36, 2132–2138.
 31. Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38, 55–94.
 32. Torabinezhad, N., Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A.A. (2023). Analysis of different types of droughts and their characteristics in Iran using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

- (SPEI). *Journal of Water and Soil*, 37(3), 473-486.
33. Toloei, Y., Gandomkar, A., & Bagheri Badaghabadi, M. (2021). Investigating the Relationship between Northern Hemisphere Transplant Patterns and Drought in Northwestern Iran. *Journal of Physical Geography*, 14(51), 55-74.
34. Van Rooy, M.P. (1965). A Rainfall Anomaly Index Independent of Time and Space, *NOTOS*, 14, 43-48.
35. Vicente-Serrano, S.M., Begueria, S., & Lopez-Moreno, J.I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23, 1696-1718.
36. Wang, W., Zhu, Y., Xu, R., & Liu, J. (2015). Drought severity change in China during 1961-2012 indicated by SPI and SPEI. *Natural Hazards*, 75(3), 2437-2451.
37. Weghorst, K. (1966). The reclamation drought index: Guidelines and practical applications. In Proceedings of the North American Water and Environment Congress & Destructive Water, Anaheim, CA, USA, 22-28 June.
38. Wehner, M., Easterling, D.R., Lawrimore, J.H., Heim, R.R., Vose, R.S., & Santer, B.D. (2011). Projections of future drought in the continental United States and Mexico. *Journal of Hydrometeorology*, 12(6), 1359-1377.
39. Wu, X., Shen, X., & Li, J. (2022). Spatiotemporal Distribution of Drought and Humidity in China Based on the Pedj Drought Index (PDI). *Sustainability*, 14(8), 4546.
40. Xu, K., Yang, D.W., Yang, H.B., Li, Z., Qin, Y., & Shen, Y. (2015). Spatio-temporal variation of drought in China during 1961-2012: A climatic perspective. *Journal of Hydrology*, 526, 253-264.
41. Yu, M., Li, Q., F. Hayes, M.J., Svoboda, M.D., & Heim, R.R. (2014). Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index: 1951-2010? *International Journal of Climatology*, 34, 545-558.
42. Zhuang, X., Hao, Z., Singh, V. P., Zhang, Y., Feng, S., Xu, Y., & Hao, F., 2022. Drought propagation under global warming: Characteristics, approaches, processes, and controlling factors. *Science of The Total Environment*, 838, 156021.

Spatial and temporal analysis of PDI drought index in the Northwest of Iran

Ayub Mirzaei Hassanlu¹, Mahdi Erfanian^{2*}, Khadijeh Javan³

Received: 2024/02/01

Accepted: 2024/04/25

Extended Abstract

Introduction: Drought stands as an inevitable natural disaster with no means of prevention. Its detrimental impacts extend across diverse sectors, including water resources, agriculture, and the environment. Drought is typically defined as a substantial scarcity of natural freshwater resources persisting over an extended period due to shifts in precipitation and temperature patterns. Consequently, periods marked by below-average rainfall often result in temporary drought, particularly in arid and semi-arid regions characterized by relatively high temperatures. Globally, drought events are classified into four categories: meteorological, soil moisture (agricultural), hydrological, and socio-economic. Studying drought becomes imperative for implementing optimal solutions and strategies to manage water resources and ensure food security, among other concerns.

Materials and Methods: This research utilizes the Pedj Drought Index (PDI), a unique and potent tool, to delve into drought analysis. The PDI, grounded in precipitation and temperature data, offers a more accurate and accessible understanding of drought's spatial and temporal characteristics. Based on yearly averages at stations, this innovative approach provides a fresh perspective on drought analysis. We gathered and scrutinized annual rainfall and temperature data from 20 synoptic stations in Northwestern Iran from 1987 to 2021 to conduct this study. The PDI's accuracy and accessibility make it a reliable choice for drought analysis, providing a comprehensive view of the situation.

Results: From 1991 to 1995, most of the studied stations experienced wet conditions, while from 2013 to 2017, they faced a severe drought. The most extended wet period occurred in the south at the Bijar station (9 years), and the most prolonged drought period happened in the east at the Ardabil station (8 years). The maximum wet period based on the PDI index (9 years) was observed at the Bijar station, and the most prolonged drought period was at the Ardabil station (8 years). In the northwest of the country, the average duration of the most extended wet periods is 5.5 years, and the average duration of the most prolonged drought periods is 7.5 years. Additionally, the central station experienced two 5-year drought periods, and the Tabriz station underwent two 4-year wet periods. Based on the precipitation anomaly index, 60% of the stations (12 stations) showed a decreasing trend in precipitation anomalies, with the Sanandaj and Maragheh stations having a significant 95% decrease. In comparison, only 40% (8 stations) exhibited an insignificant upward trend in precipitation. The temperature anomaly index showed an upward trend in all studied stations, with only Bijar, Takab, Sarab, and Miandoab stations (highlighted in red) having a significant 95% increase. According to the drought index PDI, none of the stations experienced extremely dry (ExD) or moderately dry (MiD) conditions. The highest percentage of severe drought was observed in Zanjan (71.5%), moderate drought in Khalkhal (20%), and mild drought in Tabriz, Maragheh, and Piranshahr (42.85%). Severe dryness was observed in the Bijar station (42.85%), moderate dryness in Maku (17%), severe dryness in Takab, Khormabad, and Miandoab (71.5%), and highly severe

1. Ph.D. Student, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

2. Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran; m.erfanian@urmia.ac.ir

3. Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran

dryness (71.5%) in Ardabil Province. These findings underscore the urgent need for effective drought management and water resource planning in the northwest region of Iran. These findings underscore the urgent need for effective drought management and water resources planning in the northwest area of Iran.

Discussion and Conclusion: This study investigated the effects of annual mean precipitation and temperature changes on drought and long-term dry events using the PDI index in 20 stations in the northwest region of Iran, spanning five provinces over 35 years (1987-2021). The northwest Iran stations experienced wet periods from 1990 to 1994, dry periods from 1998 to 2001, and from 2013 to 2017. The most extended wet period was approximately 5.5 years, and the longest prolonged drought period was around 7.5 years. On an annual scale, the PDI could describe the spatiotemporal variations of drought and wetness in the study area to a considerable extent. Despite its simplicity, the PDI provided highly accurate results compared to common drought indices such as SPI and SPEI, which rely on statistical assumptions and distribution-related parameters. The stronger correlation of PDI with SPEI, as opposed to SPI, demonstrates the capability of PDI to explain the effects of precipitation and temperature changes on drought and wetness in the northwest region of Iran.

Keywords: Meteorological Drought, Trend Analysis, Climate Change.