نشریه هواشناسی و علوم جوّ جلد ۸، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحات ۱۳ - ۱

شناسایی روند تغییرات و الگوی مکانی شدیدترین خشکسالی و ترسالی ها در ایران

علی زارعی[۱]*. معصومه مقبل[۲]

[۱] دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

[۲] دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰

چکیده

خشکسالی یکی از مهم‌ترین مخاطرات اقلیمی در ایران است که آثار گسترده‌ای بر منابع آب و امنیت غذایی دارد. این پژوهش با هدف تحلیل روند تغییرات خشکسالی در سه دهه اخیر و شناسایی الگوهای مکانی سال‌هایی با شدیدترین خشکسالی و ترسالی ها در ایران انجام شده است. برای این منظور، شاخص شدت خشکسالی استانداردشده (ZSI) به‌صورت سالانه و بر پایه داده‌های بارش بازتحلیل ERA5-Land محاسبه شد. روند تغییرات شاخص ZSI در طول دوره مورد مطالعه با استفاده از رگرسیون خطی تحلیل گردید. نتایج نشان داد که سال ۲۰۱۹ مرطوب‌ترین و سال ۲۰۲۱ خشک‌ترین سال‌های دوره مورد مطالعه بوده‌اند به‌گونه‌ای که در سال ۲۰۱۹ حدود ۶۳ درصد از مساحت کشور درگیر ترسالی متوسط تا بسیار شدید بوده است، در حالی‌که، در سال ۲۰۲۱ بیش از ۸۰ درصد از مساحت مناطق ایران شرایط خشکسالی متوسط تا بسیار شدید را تجربه کرده‌اند. تحلیل مکانی شاخص نیز تفاوت بارز در الگوی پراکنش مکانی شرایط تر و خشک را نشان داد؛ طوری‌که در سال ۲۰۱۹ نواحی شمال‌شرق، غرب و جنوب کشور بیشترین مقادیر مثبت شاخص را ثبت کرده‌اند، در حالی‌که در سال ۲۰۲۱ بیشترین شدت خشکسالی مربوط به نواحی شرقی، شمال‌غربی و غربی کشور بوده است. همچنین بررسی روند بلندمدت شاخص ZSI شیب منفی ضعیفی معادل ۰/۰۰۶۸- را نشان داد، که از نظر آماری معنادار نبوده و بیانگر فقدان روند پایدار در شدت خشکسالی طی این دوره است.

کلمات کلیدی: خشکسالی، ترسالی، تحلیل مکانی، رگرسیون، ایران.

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: alizarei2576@ut.ac.ir

مقدمه

خشکسالی یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین بلایای طبیعی است که با تأثیرگذاری بر منابع آب، کشاورزی، محیط‌زیست و اقتصاد، چالش‌های جدی برای جوامع انسانی ایجاد می‌کند (ویلهایت و پولوارتی، ۲۰۰۵)[1]. این پدیده نه‌تنها دارای ویژگی مکانی و زمانی متغیر است، بلکه در مقایسه با سایر مخاطرات اقلیمی، تشخیص و پایش آن نیز به‌واسطه ماهیت تدریجی‌اش دشوارتر است (ون لون، ۲۰۱۵)[2]. خشکسالی بر خلاف دیگر بلایای طبیعی نظیر سیل یا زلزله به‌صورت تدریجی رخ می دهد اما پیامدهای آن در بلندمدت می تواند بسیار گسترده و جبران‌ناپذیر باشد، به‌ویژه زمانی که با ضعف در مدیریت منابع آب و نبود برنامه‌ریزی مناسب همراه باشد (عباسی، ۱۳۹۶). در سال‌های اخیر، افزایش فراوانی و شدت خشکسالی‌ها تحت تأثیر تغییر اقلیم جهانی، موجب نگرانی گسترده‌ای در سراسر جهان شده است (اسپسنونی و همکاران، ۲۰۱۹)[3].

رضایی و همکاران (۱۴۰۳) تحلیل ویژگی‌های خشکسالی در ایران، شامل مدت، فراوانی، شدت را انجام دادند. آنها خشکسالی را براساس شاخص چندمتغیره در بازه‌های زمانی ۴۳ ساله (۱۹۸۰– ۲۰۲۲) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که خشکسالی با شدت‌های گوناگون در سراسر کشور رخ داده و به پدیده‌ای پایدار تبدیل شده است. از نظر مکانی، بیشترین فراوانی و شدت خشکسالی در جنوب شرق و شرق کشور، در حالی‌که، کمترین مقادیر در سواحل شمالی و جنوب‌غرب ایران مشاهده شد.

مطالعه‌ای توسط کریمی و حیدری (۱۴۰۲) با هدف بررسی تغییرپذیری و روند گستره شدت‌های ترسالی-خشکسالی در ایران انجام شده است. در این پژوهش از شاخص ZSI[4]، آزمون من-کندال و داده‌های بارش ماهانه ERA5 در بازه ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۱ استفاده شده است. نتایج نشان داد که در دهه ۸۰ گستره‌های ترسالی و خشکسالی تقریباً برابر بودند، دهه ۹۰ گستره ترسالی بیشتر و دو دهه اول قرن ۲۱ گستره خشکسالی، به‌ویژه خشکسالی شدید غالب بوده است. الگوی تغییرپذیری در زمستان و بهار مشابه سالانه و در پاییز افزایش گستره‌های ترسالی واضح بود؛ هم‌چنین رخداد خشکسالی‌های ضعیف و متوسط متوالی، زیاد و ترسالی‌های شدید، با توالی کم مشاهده شد.

مطالعه حیدری و همکاران (۱۴۰۱) با هدف شناسایی و تحلیل الگوهای مکانی خشکسالی‌های سالانه، فصلی و ماهانه ایران با استفاده از شاخص ZSI و داده‌های بارش ماهانه بازکاوی‌شده ERA5[5] در بازه ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۱ انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش شدت خشکسالی، پراکنش مکانی آن خوشه‌ای‌تر می‌شود. خوشه‌های خشکسالی شدید و بسیار شدید عمدتاً در جنوب، جنوب‌شرق و شرق ایران مشاهده شده است. هم‌چنین، خوشه‌های مکانی در شمال‌غرب، شمال‌شرق و سواحل خزر برای خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید ماهانه شناسایی شدند که نشان‌دهنده ضرورت توجه جدی به مدیریت منابع آب و کشاورزی در این نواحی است.

پهلوانروی و قاسمی (۱۳۸۷) مطالعه‌ای با هدف تحلیل خشکسالی در منطقه زابل انجام دادند. آن‌ها با استفاده از شاخص ZSI و داده‌های ایستگاه سینوپتیک زابل (۱۹۶۳ تا ۲۰۰۳) خشکسالی را برای یک دوره ۴۱ ساله پایش کردند. نتایج نشان داد که چهار دوره خشکسالی مهم رخ داده است که خشک‌ترین سال با بیشترین تداوم مربوط به ۱۹۸۷ و دیگر دوره‌ها در سال‌های ۱۹۶۶، ۱۹۷۳ و ۲۰۰۱ بوده‌اند، در حالی‌که مرطوب‌ترین سال، ۱۹۸۰ گزارش شد. آثار

1 Wilhite
2 Van Loon
3 Spinoni

4 Z-Score Index
5 ECMWF Reanalysis v5

خشکسالی در زابل شامل کاهش منابع آب، کشاورزی و مراتع، کاهش تولیدات دامی و محصول، تخریب زمین و فرسایش بادی و مهاجرت ۶۰ درصدی جمعیت روستایی به شهرها بوده است.

ترابی نژاد و همکاران (۱۴۰۲) با هدف بررسی مشخصه‌ها و انواع خشکسالی در ایران طی چهار دهه گذشته، از داده‌های ۴۹ ایستگاه همدید در بازه زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ استفاده کردند. خشکسالی با استفاده از شاخص SPEI[6] در چهار مقیاس زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه تحلیل شد و مشخصه‌های آن شامل بزرگی، طول دوره، شدت و فراوانی محاسبه گردید. نتایج نشان داد که فراوانی خشکسالی در سطح کشور بین ۱۲/۱۳ تا ۱۸/۱۳ درصد از کل ماه‌ها متغیر بوده و این پدیده درشمال‌غرب، غرب، جنوب‌غرب، سواحل خلیج فارس و شمال‌غرب ایران فراوانی بیشتری دارد، در حالی‌که، در شرق، جنوب‌شرق و مرکز ایران، طول دوره خشکسالی بیشتر است. هم‌چنین بیش از ۶۰ درصد از رخدادهای خشکسالی از نوع متوسط بوده و خشکسالی‌های متوسط و شدید به‌طور عمده در نواحی غربی و شمال‌غربی کشور رخ داده‌اند. بررسی روندهای دهه‌ای نیز نشان‌دهنده افزایش تدریجی طول دوره و بزرگی خشکسالی و هم‌زمان کاهش شدت آن در سال‌های اخیر است.

با توجه به اینکه میانگین بارندگی ایران کمتر از یک‌سوم میانگین جهانی است، خشکسالی نه یک پدیده گذرا بلکه یک بحران دائمی و ساختاری محسوب می‌شود (موسوی و احمدی، ۱۴۰۰). در بسیاری از سال‌ها، کاهش چشمگیر بارندگی به‌مثابه عامل اصلی خشکسالی هواشناسی، همراه با افت منابع آب سطحی و زیرزمینی، افزایش تبخیر و تعرق و کاهش پوشش گیاهی، موجب تشدید خشکسالی کشاورزی و در مراحل بعد خشکسالی هیدرولوژیکی شده است. افزون بر این، گسترش بی‌رویه اراضی کشاورزی، توسعه غیراصولی منابع آبی و حفر چاه‌های غیرمجاز نیز نقش مهمی در تسریع کاهش تاب‌آوری منابع طبیعی ایفا کرده‌اند (رضایی و همکاران، ۱۳۹۷; مدنی، ۲۰۱۴). روند خشکسالی در ایران طی دهه‌های گذشته، هم در شدت و هم در گستره جغرافیایی، روندی فزاینده داشته است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که از دهه ۱۳۷۰ تاکنون، دوره‌های خشکسالی شدیدتر و متراکم‌تری در کشور تجربه شده است، به‌گونه‌ای که در برخی مناطق، حتی سال‌های به‌ظاهر نرمال نیز با کمبود منابع آب همراه بوده‌اند. این مسأله نه‌تنها موجب کاهش تولیدات کشاورزی و بروز بحران‌های معیشتی در مناطق روستایی شده، بلکه مهاجرت، افزایش تنش‌های اجتماعی و تهدید امنیت غذایی را نیز در پی داشته است. بنابراین، روند کاهشی بارش‌ها، افزایش دما، و بهره‌برداری ناپایدار از منابع آبی، آسیب‌پذیری کشور در برابر خشکسالی را بیش از پیش افزایش داده است (عباسپور و همکاران، ۲۰۰۹). بنابراین، پایش دقیق خشکسالی و ترسالی، شناسایی شدیدترین سال‌ها، و بررسی الگوهای مکانی آن، گامی اساسی برای مدیریت پایدار منابع آب در ایران محسوب می‌شود. با توجه به افزایش احتمال بروز خشکسالی‌های شدید در آینده، به‌ویژه تحت تأثیر تغییر اقلیم جهانی، ضرورت دارد که این پدیده به‌صورت دقیق و چندبُعدی مورد مطالعه قرار گیرد. از اینرو، هدف این پژوهش، بررسی روند تغییرات خشکسالی سالانه در سه دهه اخیر و شناسایی الگوهای مکانی سال‌هایی با شدیدترین خشکسالی و ترسالی در ایران است.

[6] Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

ایران با وسعتی در حدود ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومتر مربع در بخش جنوب‌غربی قاره آسیا واقع شده و به‌منزلهٔ یکی از کشورهای کلیدی در منطقه خاورمیانه شناخته می‌شود. میانگین ارتفاع این سرزمین از سطح دریا بیش از ۱۲۰۰ متر است. براساس طبقه بندی دمارتن بیشتر مساحت ایران را اقلیم خشک و پس از آن اقلیم نیمه خشک تشکیل می‌دهد(فتحی تپه رشت و همکاران، ۱۴۰۱). بیشترین میزان بارندگی سالانه در نواحی شمالی است در حالی‌که بخش‌هایی از مرکز و جنوب‌شرقی کشور، به‌ویژه دشت لوت، از کم‌بارش‌ترین مناطق به‌شمار می‌روند. اختلافات ارتفاع و موقعیت جغرافیایی موجب شده که ایران از تنوع اقلیمی گسترده‌ای برخوردار باشد؛ طوری‌که، در بسیاری از مناطق کشور، امکان تجربه‌ی چهار فصل متفاوت در یک زمان فراهم است (فرج‌زاده‌اصل، ۱۳۷۴؛ محمدی و همکاران، ۱۴۰۲).

روش پژوهش

در مطالعه حاضر، به‌منظور تحلیل روند و شناسایی الگوهای مکانی خشکسالی و ترسالی سالانه در ایران، از داده‌های بارش طی دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۵–۲۰۲۴) استفاده شد. داده‌های بارش ماهانه از محصول بازتحلیل-ERA5 Land استخراج و پس از برش مکانی به محدوده ایران، با استفاده از مجموع‌گیری زمانی به مقیاس سالانه تبدیل شدند. سپس به‌منظور شناسایی سال‌های خشک و تر، شاخص خشکسالی ZSI بر اساس بارش سالانه در سطح سلول‌های شبکه‌ای محاسبه گردید. در نهایت، نتایج این شاخص مبنای تحلیل‌های روند و الگوهای مکانی قرار گرفتند. براساس مطالعات پیشین، داده‌های ERA5 وERA5-Land همبستگی بالایی با داده‌های ایستگاهی دارند و برای تحلیل‌های اقلیمی کاملا مناسب و معتبر هستند (اربن[۷] و همکاران، ۲۰۲۱؛ کیاو[۸] و همکاران، ۲۰۲۳؛ زارعی و مقبل، ۱۴۰۴؛ زارعی و مقبل، ۲۰۲۵).

مراحل انجام پژوهش :

۱. محاسبه شاخص خشکسالی ZSI به‌منظور شناسایی شدت‌های مختلف خشکسالی و ترسالی در هر سال از دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴.

۲. شناسایی سال‌های با شدیدترین خشکسالی و ترسالی بر اساس شدت مقادیر شاخص ZSI.

۳ .ترسیم نقشه‌های مکانی پراکنش خشکسالی و ترسالی برای شدیترین سال تر و خشک به‌منظور استخراج و تحلیل الگوهای مکانی رخداد.

۴ .تحلیل روند تغییرات خشکسالی در طی ۳۰ سال اخیر با استفاده از رگرسیون خطی، به‌منظور ارزیابی جهت و شدت روندهای افزایشی یا کاهشی.

کلیه پردازش‌ها و تحلیل‌های آماری با استفاده از کدنویسی در سامانه Google Earth Engine، نرم‌افزار MATLAB و هم‌چنین سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام شده است.

تحلیل روند

برای تحلیل روند زمانی شاخص خشکسالی در سراسر ایران، از مدل رگرسیون خطی ساده استفاده شد. در این مدل، سال‌های تقویمی (۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴) به‌منزلهٔ متغیر مستقل و مقادیر سالانه شاخص ZSI برای کل ایران به‌منزلهٔ متغیر وابسته تعریف شدند. این روش به‌دلیل سادگی و قابلیت تفسیر بالا، یکی از ابزارهای متداول در تحلیل سری‌های

7 Urban

8 Kyaw

زمانی اقلیمی محسوب می‌شود (اسلام و همکاران، ۲۰۲۱). در این پژوهش همچنین برای ارزیابی معناداری آماری روند، مقدار p (p-value) محاسبه گردید. در این تحلیل، شیب خط رگرسیون به‌منزلهٔ شاخصی برای سنجش جهت و شدت تغییرات شاخص خشکسالی مورد استفاده قرار گرفت.

محاسبه شاخص ZSI

شاخص Z-Score Index (ZSI) یکی از شاخص‌های ساده و متداول برای ارزیابی خشکسالی است که با استفاده از آماره‌های توصیفی میانگین و انحراف معیار، بی هنجاری بارش را بیان می‌کند (جدول ۱). این شاخص نشان می‌دهد که مقدار بارش در یک سال خاص، چند انحراف معیار کمتر یا بیشتر از میانگین بلندمدت است(ندام و همکارن، ۲۰۱۹)[9]. شاخص مذکور به شکل نرمال شده بیان می‌شود و مقدار آن نشان‌دهنده شدت خشکسالی یا ترسالی است. در این مطالعه، میانگین و انحراف معیار بارش سالانه در بازه زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ به‌منزلهٔ دوره مرجع در نظر گرفته شده است(رابطه ۱).

$$ZSI = \frac{X-\mu}{\sigma} \qquad (۱)$$

در رابطه بالا X مقدار بارش در دوره مدنظر؛ μ میانگین درازمدت بارش در دوره مورد نظر و σ انحراف معیار مقادیر بارش در دوره مورد نظر می‌باشد.

جدول ۱. طبقه‌بندی شرایط خشکسالی و ترسالی بر اساس مقادیر شاخص ZSI (۲۰۱۷، جین[10] و همکاران۲۰۱۵، دافوف[11] و همکاران، ۲۰۲۲)

طبقه‌بندی	بازه مقدارZSI
خشکسالی بسیار شدید	ZSI ≤ -2.0
خشکسالی شدید	-1.99 < ZSI ≤ -1.5
خشکسالی متوسط	-1.49 < ZSI ≤ -1.0
نرمال	-0.99 ≤ ZSI ≤ 0.99
ترسالی متوسط	1.0 ≤ ZSI < 1.49
ترسالی شدید	1.5 ≤ ZSI < 1.99
ترسالی بسیار شدید	ZSI ≥ 2.0

نتایج

میانگین سالانه مقادیر شاخص ZSI

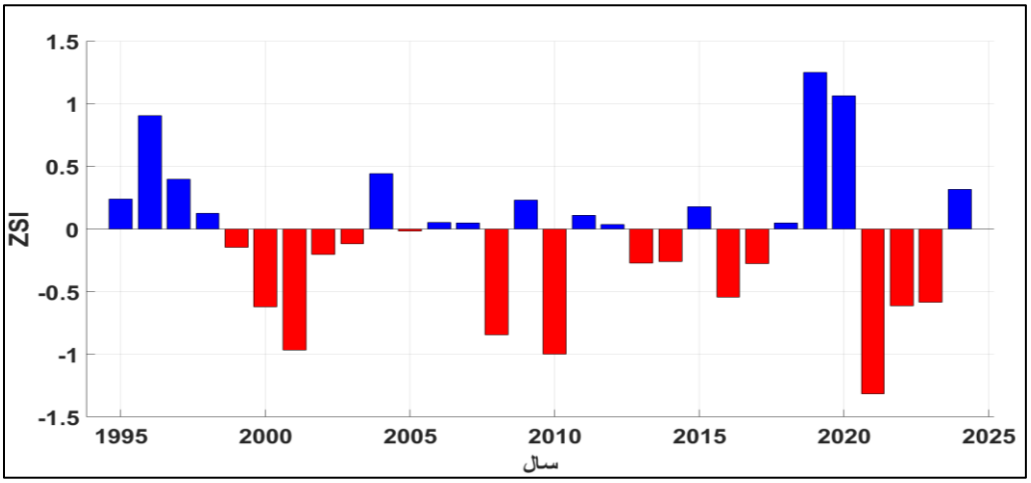
مقادیر شاخص خشکسالی استانداردشده (ZSI) طی دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴) نشان‌دهنده نوسانات قابل توجهی در وضعیت خشکسالی منطقه مورد مطالعه است. در سال‌های آغازین این دوره، به‌ویژه بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۸، شاخص مقادیر مثبت را نشان می‌دهد که بیانگر شرایط نرمال است که بیشترین مقدار مثبت شاخص در این دوره مربوط به سال۱۹۹۶ با حدود ۰/۹+ است. با این حال، از سال ۱۹۹۹ تا اوایل دهه ۲۰۰۰، کاهش محسوس در مقادیر شاخص مشاهده می‌شود و سال‌هایی مانند ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ با مقادیر منفی (۰/۶– و ۱–) همراه بوده است.

در بازه زمانی سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴ نوسانات شاخص کمتر بوده و بیشتر سال‌ها شرایط نزدیک به نرمال داشته‌اند، اگرچه در برخی سال‌ها نظیر ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰، شاخص به مقادیر منفی بیشتری متمایل شده است. از سال ۲۰۱۵ به بعد، شاخص نوسانات بیشتری داشته است؛ به‌گونه‌ای که در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۱۹ مقدار شاخص به بیشتر از ۱+ رسیده است که نشان‌دهنده ترسالی متوسط می‌باشد. در مقابل، سال

9 Nedham
10 Jain
11 Dafouf

۲۰۲۱ خشک‌ترین سال‌های دوره مورد بررسی بوده است. میانگین شاخص در سراسر ایران در این سال به کمتر از ۱/۳- سقوط کرده است. مقادیر منفی در سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ نیز تداوم یافته، هرچند شدت آن نسبت به سال ۲۰۲۱ اندکی کاهش یافته است.

به‌طور کلی، مرطوب‌ترین سال براساس میانگین شاخص ZSI در کل ایران، سال ۲۰۱۹ با مقدار حدود ۱/۴+ و خشک‌ترین سال، سال ۲۰۲۱ با مقدار کمتر از ۱/۳- شناخته شد(شکل ۱).



شکل ۱.میانگین سالانه مقادیر شاخص ZSI کشور ایران طی دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴

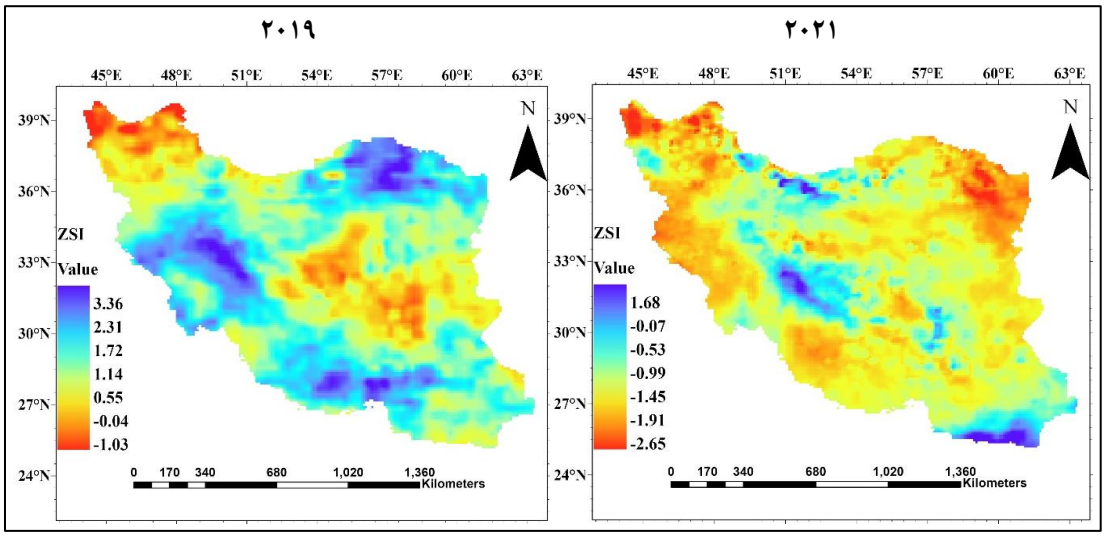
الگوی مکانی شاخص ZSI برای شدیدترین ترسالی (۲۰۱۹) و خشکسالی (۲۰۲۱) دوره مورد مطالعه

نقشه‌های مکانی شاخص شدت خشکسالی استانداردشده (ZSI) برای دو سال متضاد از نظر وضعیت بارندگی، یعنی سال تر ۲۰۱۹ و سال خشک ۲۰۲۱، تفاوت‌های چشمگیری را در توزیع مکانی و شدت شرایط بارشی در سراسر کشور نشان می‌دهند.

در سال ۲۰۱۹ که به‌منزلهٔ ترسالی شناخته می‌شود، اغلب مناطق کشور مقادیر مثبت شاخص را تجربه کرده‌اند. در این سال حداکثر مقدار مثبت و منفی به ترتیب برابر با ۳/۳۶ و ۱/۰۳- است. بیشترین مقادیر مثبت شاخص (۳/۳۶) در شمال‌شرق، غرب و جنوب کشور به چشم می‌خورد که نشان‌دهنده وقوع ترسالی شدید در آن نواحی است. در مقابل، مناطق محدودی در مرکز و شمال غرب کشور دارای مقادیر منفی بوده‌اند که بیانگر شرایط نرمال در آن نواحی است.

در مقابل، سال ۲۰۲۱ با گستره‌ی وسیعی از مقادیر منفی شاخص همراه بوده است. اکثر نقاط کشور در این سال با شرایط خشکسالی متوسط تا شدید مواجه بوده‌اند؛ به‌ویژه نواحی شرقی، شمال غربی و غربی که مقادیر شاخص تا حدود ۲/۶۵- نیز کاهش یافته است. در این سال تنها بخش‌های کوچکی از نواحی ساحلی جنوب شرق کشور، ارتفاعات البرز و زاگرس دارای مقادیر مثبت بوده‌اند که نشان از شرایط نرمال تا ترسالی متوسط در آن نواحی دارد. نکته قابل توجه این است که منطقه شمال‌غرب کشور در هر دو سال‌های مرطوب و خشک، با خشکسالی مواجه بوده است؛ به‌خصوص در سال ۲۰۲۱ که شدت خشکسالی در این منطقه به‌طور چشمگیری افزایش یافته بود.

به‌طور کلی، مقایسه نقشه‌های مکانی نشان می‌دهد که شرایط بارشی کشور در طول این دو سال تفاوت قابل‌توجهی داشته است. در حالی‌که در سال ۲۰۱۹ بخش عمده‌ای از کشور تحت تأثیر شاخص مثبت قرار دارد، در سال ۲۰۲۱ الگوی غالب، خشکسالی بوده است. این نوسانات بارز بین‌سالی در شدت و گستره‌ی خشکسالی و ترسالی، اهمیت توجه به سیستم‌های هشدار سریع، پایش مستمر و برنامه‌ریزی سازگار با هر کدام از شرایط را برجسته می‌سازد(شکل ۲).

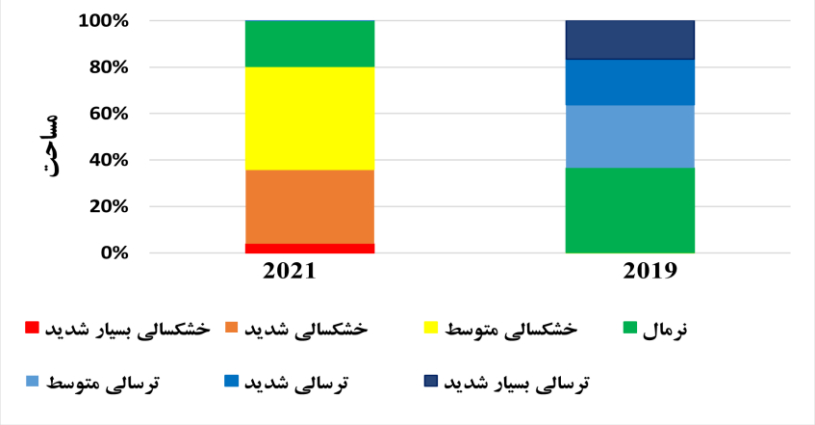


شکل ۲. الگوهای مکانی شدیدترین ترسالی (۲۰۱۹) و خشکسالی (۲۰۲۱) سالانه ایران، دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴

تغییرات سهم مساحت کشور در هر طبقه خشکسالی و ترسالی بر اساس شاخص ZSI در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰

در سال ۲۰۱۹، بخش قابل‌توجهی از کشور در شرایط ترسالی قرار داشته است. به‌طور مشخص، حدود ۱۶/۵ درصد از مساحت کشور در شرایط ترسالی بسیار شدید، ۱۹/۷ درصد با ترسالی شدید و ۲۷/۱ درصد با ترسالی متوسط رو به رو بوده است. همچنین، ۳۶/۵ درصد از مساحت کشور در وضعیت نرمال اقلیمی قرار داشته و تنها ۰/۰۱ درصد از مساحت کشور دچار خشکسالی متوسط بوده است. در این سال، هیچ‌گونه خشکسالی شدید یا بسیار شدید در کشور حاکم نبوده که نشان‌دهنده شرایط مطلوب بارندگی در بخش زیادی از کشور می‌باشد.

در مقابل، سال ۲۰۲۱ که به‌منزلهٔ یکی از سال‌های خشک شناخته می‌شود؛ شرایط اقلیمی متفاوتی را نسبت به سال ۲۰۱۹ نشان می‌دهد. در این سال، حدود ۳/۸ درصد از مساحت کشور با خشکسالی بسیار شدید، ۳۲/۱ درصد با خشکسالی شدید و ۴۴/۴ درصد با خشکسالی متوسط مواجه بوده است. در این میان، تنها ۱۹/۶ درصد از مساحت کشور دارای وضعیت نرمال بوده است. سهم مناطق دارای ترسالی متوسط و ترسالی شدید به‌ترتیب تنها ۰/۰۷ و ۰/۰۰۶ درصد بوده و ترسالی بسیار شدید نیز در این سال مشاهده نشده است. این توزیع بیانگر کاهش بارندگی و گسترش خشکسالی در مقایسه با یک ترسالی است(شکل ۳).



شکل ۳ تغییرات مساحت شرایط شاخص ZSI در سال ۲۰۱۹ (ترسالی) و ۲۰۲۱ (خشکسالی)

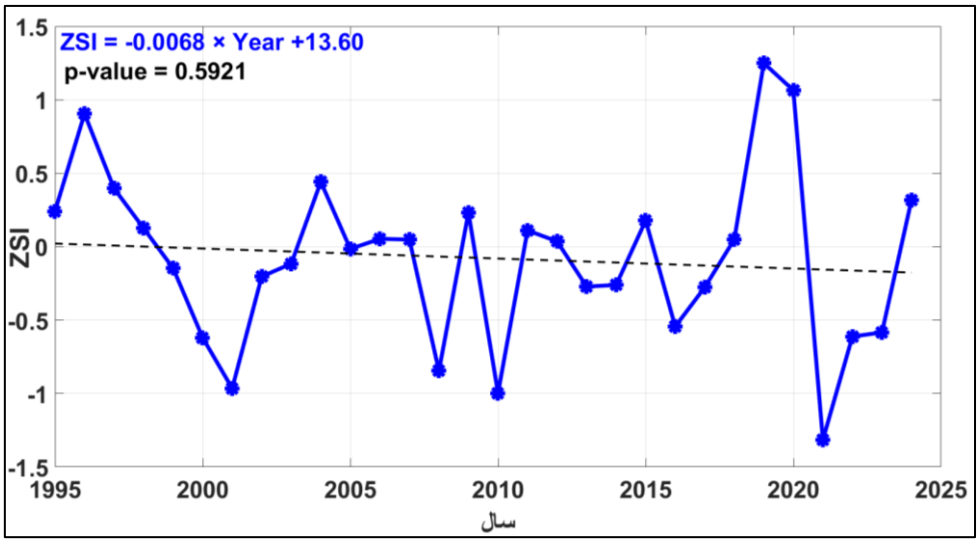
روند تغییرات شاخص خشکسالی ZSI

نتایج روند تغییرات سالانه شاخص خشکسالی استانداردشده (ZSI) در بازه‌ی زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴، حاکی از شیب ۰/۰۰۶۸- در سال است. اگرچه این مقدار دارای علامت منفی است و به‌ظاهر از کاهش خفیف مقادیر شاخص در طول این دوره حکایت دارد، اما نتایج آزمون معناداری، نشان دهنده آن است که این روند از لحاظ آماری معنادار نیست.

به بیان دیگر، مقدار بالای p-value (۰/۵۹) نشان می‌دهد که نمی‌توان روند مشاهده‌شده را به یک تغییر نظام‌مند و پایدار نسبت داد، بلکه احتمال آن وجود دارد که تغییرات شاخص عمدتاً ناشی از نوسانات طبیعی، تصادفی یا دوره‌ای باشند. بنابراین، نمی‌توان با اطمینان از وجود روند مشخص کاهشی یا افزایشی در شدت خشکسالی سالانه طی این سه دهه سخن گفت.

اگرچه در این بازهٔ زمانی برخی سال‌ها با خشکسالی شدید (مانند سال ۲۰۲۱) و برخی دیگر با شرایط مرطوب (مانند سال ۲۰۱۹) همراه بوده‌اند، اما در مجموع، روند کلی شاخص از ثبات نسبی برخوردار بوده است و تغییر چشمگیر یا قابل پیش‌بینی در آن مشاهده نمی‌شود.

این نتایج نشان‌دهندهٔ آن است که پدیده‌ی خشکسالی سالانه در ایران طی دورهٔ مورد بررسی بیشتر به‌صورت نوسانات بین‌سالی بروز یافته است و فاقد یک الگوی پایدار و جهت‌دار (مثلاً کاهشی یا افزایشی) بوده است. در نتیجه، مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی‌های مرتبط با مقابله با خشکسالی باید بیش از آن‌که بر پیش‌بینی روندهای بلندمدت تکیه کند، بر پایش مستمر شرایط، واکنش سریع به نوسانات سالانه، و تدوین سیاست‌های تطبیقی متمرکز شود(شکل ۴).



شکل ۴. روند تغییرات شاخص ZSI دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴

بحث

هدف از مطالعه حاضر، بررسی روند تغییرات خشکسالی سالانه در سه دهه اخیر و شناسایی الگوهای مکانی شدیدترین سال‌های خشکسالی و ترسالی در ایران است. پس از محاسبه شاخص شدت خشکسالی استانداردشده (ZSI) برای هر سال در دوره‌ی ۳۰ ساله مورد بررسی (۱۹۹۵–۲۰۲۴)، سال ۲۰۱۹ به‌منزلهٔ مرطوب‌ترین و سال ۲۰۲۱ به‌منزلهٔ خشک‌ترین سال این بازه شناخته شد که این نتیجه با مطالعه آریا صدر و رحیمی (۱۴۰۳) همسو است. میانگین شاخص ZSI در سال ۲۰۱۹ برابر با حدود ۱/۴+ و در سال ۲۰۲۱ کمتر از ۱/۳- بوده است که نشان‌دهنده تضاد آشکار بارشی میان این دو سال است.

بررسی الگوی مکانی این دو سال نیز مؤید همین تفاوت شدید در وضعیت بارشی کشور است. در سال ۲۰۱۹، اغلب مناطق ایران به‌ویژه شمال‌شرق، غرب و جنوب کشور مقادیر مثبت بالایی از شاخص را تجربه کرده‌اند و حداکثر مقدار شاخص به ۳/۳۶+ رسیده است که نشان‌دهنده وقوع ترسالی شدید در این نواحی می‌باشد. در مقابل، در سال ۲۰۲۱، بیشتر بخش‌های کشور با مقادیر منفی قابل‌توجهی مواجه بوده‌اند و شاخص در برخی مناطق به ۲/۶۵- نیز کاهش یافته است، به‌ویژه در نواحی شرقی، شمال‌غربی و غربی ایران که خشکسالی‌های شدیدتری را تجربه کرده‌اند. منطقه شمال‌غرب کشور در هر دو سال‌های مرطوب و خشک، با خشکسالی مواجه بوده است؛ به‌خصوص در سال ۲۰۲۱ که شدت خشکسالی در این منطقه به‌طور چشمگیری افزایش یافته بود. این نتیجه با مطالعه ترابی نژاد و همکاران (۱۴۰۲) که نشان داد خشکسالی‌های متوسط و شدید در ایران بیش‌تر در شمال‌غرب ایران دیده می‌شوند، تایید می‌گردد.

از نظر توزیع درصدی مساحت نیز تفاوت‌های بارزی بین این دو سال مشاهده می‌شود. در سال ۲۰۱۹، حدود ۱۶/۵ درصد از مساحت کشور در شرایط ترسالی بسیار شدید، ۱۹/۷ درصد در ترسالی شدید و ۲۷/۱درصد در ترسالی متوسط قرار داشته‌اند. این نتایج با مطالعات کریمی و همکاران (۱۴۰۲) مطابقت دارد که با استفاده از شاخص (ZSI) نشان داده‌اند در سال آبی ۲۰۱۹-۲۰۲۰ ترسالی ها بیشتر مناطق کشور را در برگرفته است. در حالی‌که تنها ۰/۰۱ درصد از کشور خشکسالی متوسط را

تجربه کرده و هیچ منطقه‌ای درگیر خشکسالی شدید یا بسیار شدید نبوده است. این در حالی است که در سال ۲۰۲۱، حدود ۳/۸ درصد از کشور با خشکسالی بسیار شدید، ۳۲/۱ درصد با خشکسالی شدید و ۴۴/۴ درصد با خشکسالی متوسط مواجه بوده و سهم مناطق دارای شرایط نرمال به تنها ۱۹/۶ درصد کاهش یافته است. به‌عبارتی، سهم مناطق دارای شرایط تر به کمتر از یک درصد تنزل یافته است که حاکی از گسترش فراگیر خشکسالی در سطح کشور در این سال است.

نتایج پژوهش حیدری و همکاران(۱۴۰۳) که با شاخص RAI به مطالعه روند تغییرات نواحی هم رخداد بارشی در ایران پرداخته است، وقوع خشکسالی در سال آبی ۲۰۲۰-۲۰۲۱ را تایید می کند.

تحلیل روند مقادیر سالانه شاخص طی دوره مورد بررسی نشان می‌دهد که روند تغییرات سالانه به لحاظ آماری معنادار نیست که به وسیله مطالعه (رضیبی و همکاران، ۱۳۸۴) تایید می‌گردد. شیب محاسبه‌شده برابر با ۰/۰۰۶۸- در سال بوده، اما با توجه به عدم معناداری، نمی‌توان نتیجه‌گیری کرد که خشکسالی در کشور در حال افزایش یا کاهش سیستماتیک است. بنابراین، به‌نظر می‌رسد خشکسالی در ایران طی سه دهۀ گذشته بیشتر تابع نوسانات طبیعی و غیرخطی بوده و فاقد جهت‌گیری مشخص است.

بنابراین، با توجه به یافته‌های این پژوهش، سیاست‌گذاری در حوزه مدیریت منابع آب و مقابله با خشکسالی نباید صرفاً مبتنی بر پیش‌بینی بلندمدت باشد، بلکه باید تمرکز اصلی بر پایش مستمر، هشدار سریع و طراحی راهکارهای انعطاف‌پذیر در مقابل نوسانات اقلیمی قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از شاخص خشکسالی استانداردشده (ZSI) وضعیت خشکسالی ایران طی دورۀ ۳۰ سالۀ ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار گرفت. بر پایه تحلیل سالانه شاخص، سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۱ به‌ترتیب به‌منزلۀ مرطوب‌ترین و خشک‌ترین سال‌های دوره شناسایی شدند. این دو سال نمایانگر تضاد بارز بارشی در کشور هستند و بررسی الگوهای مکانی آن‌ها نشان داد که دامنه و شدت ترسالی و خشکسالی به‌صورت گسترده در سطح کشور پراکنده بوده است.

در سال ۲۰۱۹، بخش بزرگی از کشور با ترسالی متوسط تا بسیار شدید مواجه بود، در حالی‌که در سال ۲۰۲۱، بیشتر مناطق ایران تحت تأثیر خشکسالی متوسط تا بسیار شدید قرار گرفته است. تحلیل مساحت تحت تاثیر نیز این تفاوت را به‌خوبی نشان داد، به‌طوری‌که نسبت مساحت تحت تأثیر ترسالی شدید در سال ۲۰۱۹ با نسبت مناطق درگیر خشکسالی شدید در سال ۲۰۲۱ تفاوت چشمگیری دارد.

نتایج این پژوهش نشان داد که منطقه شمال‌غرب ایران به‌منزلۀ یکی از مناطق بحرانی خشکسالی، حتی در سال‌های با بارش نسبتاً بالا نیز دچار خشکسالی بوده است. این پایداری خشکسالی، به ویژه شدت قابل توجه آن در سال ۲۰۲۱، نشان‌دهنده شکنندگی بیشتر این منطقه نسبت به تغییر اقلیم و نیاز مبرم به مدیریت بهینه منابع آب و برنامه‌ریزی‌های جامع مقابله با خشکسالی است.

روند کلی تغییرات شاخص ZSI در این بازه دارای شیب منفی بسیار خفیف بود (۰/۰۰۶۸- در سال)، اما این روند از نظر آماری معنادار تشخیص داده نشد. این موضوع بیانگر آن است که تغییرات خشکسالی سالانه در ایران طی سه دهه اخیر از الگوی خاص یا روند بلندمدت پیروی نمی‌کند و بیشتر تابع نوسانات طبیعی، نامنظم و بین‌سالی است.

در نتیجه، اتکای صرف به پیش‌بینی‌های بلندمدت برای مدیریت خشکسالی نمی‌تواند راهبرد مناسبی باشد. بلکه لازم است سیاست‌گذاری در این حوزه بر پایه پایش مستمر شرایط اقلیمی، سامانه‌های هشدار سریع و

برنامه‌ریزی منعطف و منطقه‌محور انجام گیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده با تمرکز بر عوامل مؤثر بر شدت و تداوم خشکسالی در مقیاس‌های محلی و بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های اقلیمی پیشرفته، درک دقیق‌تری از رفتار این پدیده در ایران فراهم آورند.

منابع

۱. آریا صدر، مریم.، و رحیمی، داریوش . (۱۴۰۳). مقایسه آماری -همدیدی بارش ایران در خشکسالی و تر سالی (۲۰۲۱-۱۹۹۱). مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۵(۵۶)، ۱۴۰-۱۲۳. doi: 10.22034/jargs.2023.416873.1056

۲. پهلوانروی، احمد.، و قاسمی، حسین. (۱۳۸۷). برآورد دوره های ترسالی و خشکسالی با استفاده از شاخص مرتبه Z در زابل. کنفرانس بین المللی بحران آب. SID. https://sid.ir/paper/809216/fa

۳. زارعی، علی.، و مقبل، معصومه . (۱۴۰۴). تغییرات فضایی-زمانی دمای میانگین در سراسر ایران : مقایسه تطبیقی گذشته دور و نزدیک. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی, ۶(۲۳), ۵۷-۷۶. doi: 10.30488/ccr.2025.527490.1288

۴. ترابی‌نژاد، ن.، زرین، آ.، و داداشی‌رودباری، ع. (۱۴۰۲). بررسی انواع خشکسالی و مشخصه‌های آن در ایران با استفاده از شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI). مجله آب و خاک، ۳۷(۳)، ۴۸۶-۴۷۳. https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81322.1257

۵. حیدری، سوسن.، کریمی، مصطفی.، عزیزی، قاسم.، شمسی پور، علی اکبر(۱۴۰۱). تبیین الگوهای مکانی شدت های خشکسالی در ایران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی.; ۹ (۴) ۱-۲۰: http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-3306-fa.html

۶. رضایی، س.، معصوم‌پور سماکوش، ج.، و میری، م. (۱۴۰۳). تحلیل ویژگی‌های خشکسالی (شدت، مدت، بزرگی) ایران بر اساس شاخص خشکسالی چندمتغیره. فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۴(۱)، ۸۲-۹۸. https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10319.1114

۷. رضایی، م.، حسینی، ر.، و ناصری، س. (۱۳۹۷). پیامدهای اجتماعی خشکسالی در مناطق روستایی ایران. فصلنامه مطالعات توسعه روستایی، ۹(۳)، ۵۶-۷۲. doi: 10.22034/fakh.2015.143789

۸. رضیی، ط.، دانش‌کارآراسته، پ.، و ثقفیان، ب. (۱۳۸۴). بررسی روند بارندگی سالانه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی و شرقی ایران. آب و فاضلاب، ۱۶(۲)، ۷۳-۸۱.

۹. عباسی، ک. (۱۳۹۶). مدیریت پایدار منابع آب در شرایط خشکسالی. نشریه مدیریت منابع طبیعی، ۴(۲)، ۲۱-۳۸.

۱۰. فرج‌زاده‌اصل، م.، و دارند، م. (۱۳۸۷). تحلیل تأثیر دمای هوا بر مرگ‌ومیر شهر تهران. تحقیقات نظام سلامت حکیم، ۱۱(۳)، ۲۷-۳۴. http://hakim.tums.ac.ir/article-۱-۴۵۲-fa.html

۱۱. فتحی تپه رشت، ا.، شفیع زاده مقدم، ح.، و کوچک زاده، م. (۱۴۰۱) تحلیل فضایی - زمانی طبقه بندی اقلیمی ایران بر اساس روش دومارتن و آزمون من-کندال در دوره آماری ۱۳۷۴ تا ۱۳۹۸. فصلنامه علوم محیطی doi: 10.52547/envs.2021.1105

۱۲. کریمی، م.، و حیدری، س.(۱۴۰۲). تغییرپذیری و روند شدت-گستره ی ترسالی و خشکسالی در ایران. نشریه مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲ (۳۶)، ۱۲۹-۱۴۸. doi: 10.22111/jneh.2022.42519.1905

۱۳. محمدی، ح.، ایزدی، ن.، و قاسمی گرکانی، ا. (۱۴۰۲). بررسی آسیب‌پذیری و تحلیل مکانی ریسک خشکسالی بخش کشاورزی در ایران. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲(۳۶)، ۷۹-۹۸. doi: 10.22111/jneh.2022.41968.1892

14. Abbaspour, K. C., Faramarzi, M., Ghasemi, S. S., & Yang, H. (2009). Assessing the impact of climate change on water

15. Abbaspour, K. C., Faramarzi, M., Ghasemi, S. S., & Yang, H. (2009). Assessing the impact of

16. climate change on water resources in Iran. Water Resources Research, 45(10). https://doi.org/10.1029/2008WR007615

17. Dafouf, S., Lahrach, A., Tabyaoui, H., El Hafyani, M., & Benaabidate, L. (2022). Meteorological drought assessment in the Ziz watershed (South East of Morocco). Ecological Engineering & Environmental Technology, 23, Article 9. https://doi.org/10.12912/27197050/150113

18. Islam, A., Karim, M., & Mondol, M. (2021). Appraising trends and forecasting of hydroclimatic variables in the north and northeast regions of Bangladesh. Theoretical and Applied Climatology, 143, 1–18. https://doi.org/10.1007/s00704-020-03411-0

19. Jain, V. K., Pandey, R. P., Jain, M. K., & Byun, H.-R. (2015). Comparison of drought indices for appraisal of drought characteristics in the Ken River Basin. Weather and Climate Extremes, 8, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.05.002

20. Kyaw, A. K., Hamed, M. M., & Shahid, S. (2023). Spatiotemporal changes in Universal Thermal Climate Index over South Asia. Atmospheric Research, 292, 106838. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106838

21. Madani, K. (2014). Water management in Iran: What is causing the looming crisis? Journal of Environmental Studies and Sciences, 4(4), 315–328. https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z
22. Nedham, U. S., & Hassan, A. S. (2019). Comparison of some drought indices in Iraq. Al-Mustansiriyah Journal of Science, 30(4), 1–9.
23. Spinoni, J., Vogt, J. V., Naumann, G., Barbosa, P., & Dosio, A. (2018). Will drought events become more frequent and severe in Europe? International Journal of Climatology, 38(4), 1718–1736. https://doi.org/10.1002/joc.5291
24. Urban, A., Di Napoli, C., Cloke, H. L., Kyselý, J., Pappenberger, F., Sera, F., ... & Gasparrini, A. (2021). Evaluation of the ERA5 reanalysis-based Universal Thermal Climate Index on mortality data in Europe. Environmental Research, 198, 111227.
25. Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2(4), 359–392. https://doi.org/10.1002/wat2.1085
26. Wilhite, D. A., & Buchanan-Smith, M. (2005). Drought as hazard: Understanding the natural and social context. In D. A. Wilhite (Ed.), Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues (Vol. 3, pp. 29–51). CRC Press.
27. Zarei, A., Asadi, E., Ebrahimi, A., Jafary, M. M., Malekian, A., Tahmoures, M., & Alizadeh, E. E. (2017). Comparison of meteorological indices for spatio-temporal analysis of drought in Chahrmahal-Bakhtiyari province in Iran. Hrvatski Meteorološki Časopis, 52, 13–26.
28. Zarei, A., & Moghbel, M. (2025). Detection of changes in the annual cooling degree days (ACDD) index in Iran for the historical and future periods, considering the highly populated provinces. Journal of Thermal Biology, Article 104147. https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2025.104147

Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences *Volume 8, Issue 1, Spring And Summer 2025*

Identification of Trends and Spatial Patterns of Extreme Droughts and Wet Events in Iran

***Ali Zarei*[1*], *Masoumeh Moghbel*[2]**

[1] *Ph.D. Student, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran*

[2] *Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran*

*Corresponding Author Email: *alizarei2576@ut.ac.ir*

Received: 13 December 2025, Accepted: 19 February 2026

ABSTRACT

Drought is one of the most significant climatic hazards in Iran, with extensive impacts on water resources and food security. This study aims to analyze drought trends over the past three decades and to identify the spatial patterns of the most extreme droughts and wet events in Iran. For this purpose, the Standardized Drought Severity Index (ZSI) was calculated on an annual basis using ERA5-Land reanalysis precipitation data. The temporal trends of the ZSI were examined using linear regression. The results indicated that 2019 and 2021 were the wettest and driest years of the study period, respectively, with approximately 63% of the country affected by moderate to extreme wet conditions in 2019, whereas over 80% of Iran experienced moderate to extreme drought in 2021. Spatial analysis of the index revealed distinct patterns, with the highest positive ZSI values recorded in the northeast, west, and south regions in 2019, and the most severe drought conditions occurring in the eastern, northwest, and western regions in 2021. Furthermore, long-term trend analysis of the ZSI showed a weak negative slope of -0.0068, which was not statistically significant, indicating the absence of a persistent trend in drought severity over the study period.

Keywords: *Drought, Wet events, Spatial analysis, Regression, Iran*

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Zarei, A. and Moghbel, M. (2026). Identification of Trends and Spatial Patterns of Extreme Droughts and Wet Events in Iran. Journal of Meteorology and Atmospheric Science., 8(1): 1- 13. Doi: 10.22034/jmas.2026.565314.1256

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal.
This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).