

DOI: 10.22034/jmas.2026.567336.1259

پایش خشکسالی هواشناسی حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از

درصد بی‌هنجاری بارش و شاخص وضعیت بارش گرمسیری

سیما کاظم‌پور چورسی^۱، مهدی عرفانیان^{۲*}، هیراد عبقری^۲، میرحسن میریعقوب‌زاده^۲، خدیجه جوان^۳

^۱ دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۹

چکیده

پایش خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه به دلیل وضعیت بحرانی آن و مدیریت منابع آب، کشاورزی، معیشت جوامع انسانی و حفاظت از زیست‌بوم‌های حوضه امری حیاتی است. این مطالعه با هدف پایش خشکسالی هواشناسی با بهره‌گیری از شاخص‌های درصد بی‌هنجاری بارش (P_a) و شاخص وضعیت بارش گرمسیری (TRCI) در حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ انجام شد. برای محاسبه شاخص‌ها و تحلیل تغییرات مکانی و زمانی خشکسالی از داده‌های مقیاس‌کاهی شده ماهواره مأموریت اندازه‌گیری بارش گرمسیری (TRMM) با قدرت تفکیک مکانی ۰/۰۵ درجه (تقریباً ۵ کیلومتر) استفاده شد. نتایج نشان داد خشکسالی در دوره ۲۰۰۱-۲۰۱۹ تقریباً در تمام ماه‌های سال رخ داده است و شدت آن در ماه‌های آگوست تا نوامبر بالاتر و در بازه نوامبر تا فوریه، کاهش چشمگیر داشته است. تحلیل توزیع مکانی خشکسالی بر اساس شاخص‌های P_a و TRCI تفاوت‌هایی از نظر شدت و گستره یا پهنه طبقات خشکسالی نشان داد. شاخص P_a نوسانات شدید و کوتاه‌مدت بارش را برجسته می‌کند، در حالی که TRCI وضعیت پایدار و مناسب‌تر از خشکسالی حوضه ارائه می‌دهد. یافته‌های پژوهش نشان داد استفاده هم‌زمان از شاخص‌های P_a و TRCI می‌تواند دیدگاه کامل‌تر از الگوهای خشکسالی فراهم کند و تلفیق نتایج پایش خشکسالی در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب، توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، توزیع مکانی خشکسالی، دریاچه ارومیه، شاخص TRCI، TRMM

مقدمه

خشکسالی هواشناسی با کاهش مداوم بارش نسبت به میانگین بلندمدت یک منطقه آغاز می‌شود و در صورت تأثیر بر رطوبت خاک یا منابع آب به خشکسالی کشاورزی و آب‌شناسی منجر می‌شود (او یارزabal^۱ و همکاران، ۲۰۲۵). این نوع خشکسالی ناشی از کمبود بارش است، بدون این که لزوماً بر پوشش گیاهی، رطوبت خاک یا منابع آب اثر مستقیم بگذارد (کونیا^۲ و همکاران، ۲۰۱۹). خشکسالی کشاورزی زمانی رخ می‌دهد که کاهش بارش، افزایش تبخیر یا کمبود رطوبت خاک، تولیدات کشاورزی یا دامداری را تحت تأثیر قرار دهد (الوسما^۳ و همکاران، ۲۰۲۲). در مقابل، خشکسالی آب‌شناختی با کاهش سطوح آب‌های سطحی یا زیرزمینی مشخص می‌شود. کمبود طولانی‌مدت بارش، اغلب در بازه‌های زمانی بیش از شش ماه، بر سطح رودخانه‌ها و مخازن اثر گذاشته و به خشکسالی آب‌شناختی منجر می‌شود. برای درک فرایند و تأثیر خشکسالی، باید ویژگی‌هایی مانند شدت، مدت و وسعت مکانی را شناسایی کرد (ون لون^۴، ۲۰۱۵). مشکل اصلی در پایش و تحلیل خشکسالی، استفاده از شاخص‌های مناسب است. شاخص‌های خشکسالی معمولاً بر پایه متغیرهای منفرد یا ترکیبی از متغیرهایی که تحت تأثیر خشکسالی قرار می‌گیرند محاسبه شده و به منظور توصیف جنبه‌های مختلف این پدیده مورد استفاده قرار می‌گیرند (ژائو^۵ و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین، محققان شاخص‌های خشکسالی زیادی را توسعه داده‌اند که هر کدام مزایا و محدودیت‌هایی دارند که باید در نظر گرفته شوند. شاخص بارش استاندارد شده (SPI^۶) (مک کی، ۱۹۹۳)،

درصد بی‌هنجاری بارش (P_a^7) (CMA، ۲۰۱۷) و شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI^۸) (ویسنه-سرانو^۹ و همکاران، ۲۰۱۰) به دلیل محاسبه ساده، مقیاس زمانی متغیر و دقت بالا پرکاربرد هستند (ژائو و همکاران، ۲۰۱۸؛ وانگ^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۹). این شاخص‌ها برای شناسایی آغاز، مدت و شدت خشکسالی مناسب هستند (ایران‌نژاد^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۷). با این حال، در مناطق با ایستگاه‌های هواشناسی محدود، تحلیل دقیق تغییرات مکانی دشوار است، زیرا مقادیر نقطه‌ای جایگزین داده‌های مکانی می‌شوند. شاخص‌های SPI/SPEI با داده‌های کمتر دقت قابل قبولی دارند و برای اعتبارسنجی مناسب‌اند (جی و همکاران، ۲۰۱۸). داده‌های مأموریت اندازه‌گیری بارش گرمسیری (TRMM^{۱۲}) امکان تحلیل دقیق‌تر را فراهم می‌کنند. این ماهواره داده‌های بارش بلندمدت را برای اکثر مناطق جهان فراهم می‌کند و به‌طور گسترده در تحقیقات و پایش خشکسالی منطقه‌ای استفاده می‌شود (برازیل‌نتو^{۱۳} و همکاران، ۲۰۲۱؛ چن^{۱۴} و همکاران، ۲۰۲۰؛ کاظم پور چورسی^{۱۵} و همکاران، ۲۰۲۴).

حوضه آبریز دریاچه ارومیه در دهه‌های اخیر با کاهش شدید سطح آب و فشارهای اکولوژیکی و اقتصادی مواجه شده و به‌منزله نمونه‌ای برجسته از مناطق نیازمند پایش دقیق خشکسالی مطرح است. در این پژوهش، از داده‌های TRMM 3B43، برای محاسبه دو شاخص کلیدی خشکسالی هواشناسی شامل درصد بی‌هنجاری بارش (P_a) و شاخص وضعیت بارش گرمسیری (TRCI^{۱۶}) در حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ استفاده شده است. داده‌های

^۹ Vicente-Serrano

^{۱۰} Wang

^{۱۱} Irannezhad

^{۱۲} Tropical Rainfall Measuring Mission

^{۱۳} Brasil Neto

^{۱۴} Chen

^{۱۵} Kazempour Choursi

^{۱۶} Tropical Rainfall Condition Index

^۱ Oyarzabal

^۲ Cunha

^۳ Elusma

^۴ Van Loon

^۵ Zhao

^۶ Standardized Precipitation Index

^۷ precipitation anomaly percentage

^۸ Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index

بارش ماهانه محصول TRMM 3B43 از ژانویه ۱۹۹۸ تا دسامبر ۲۰۱۹ در دسترس بوده و به منزله یکی از معتبرترین مجموعه داده‌های بارش با پوشش مکانی-زمانی گسترده شناخته می‌شود (کاظم‌پور چورسی و همکاران، ۱۴۰۳). شاخص P_a با سنجش انحراف بارش از میانگین بلندمدت، امکان شناسایی دوره‌های خشک و مرطوب را فراهم می‌کند، در حالی که شاخص TRCI با تمرکز بر ویژگی‌های بارش در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری، اطلاعات تکمیلی درباره شدت و توزیع خشکسالی ارائه می‌دهد. داده‌های TRMM به دلیل پوشش مکانی گسترده و سری‌های زمانی بلندمدت، ابزار مناسبی برای تحلیل دقیق تغییرات بارش در مناطقی با کمبود ایستگاه‌های هواشناسی هستند.

مطالعات متعددی در داخل و خارج از ایران به پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های مبتنی بر بارش و داده‌های ماهواره‌ای پرداخته‌اند. برای مثال، چن و همکاران (۲۰۲۰)، برازیل‌تو و همکاران (۲۰۲۱) و ژائو و همکاران (۲۰۱۸) دقت داده‌های TRMM را در پایش خشکسالی ارزیابی کرده و نشان داده‌اند که این داده‌ها به ویژه در مناطقی با کمبود ایستگاه‌های هواشناسی از کارایی قابل قبولی برخوردارند. همچنین یو و همکاران (۲۰۲۰) با به کارگیری شاخص‌های P_a و TRCI در استان یونان چین نشان دادند که استفاده از شاخص‌های مبتنی بر داده‌های TRMM می‌تواند الگوها و پویایی‌های مکانی-زمانی خشکسالی را با جزئیات بیشتری آشکار سازد. نتایج این مطالعات بیانگر آن است که شاخص‌هایی مانند P_a و TRCI توانایی مناسبی در شناسایی و تحلیل الگوهای زمانی و مکانی خشکسالی در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری دارند.

در ایران نیز پژوهش‌های متعددی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و شاخص‌های مبتنی بر بارش برای پایش و ارزیابی خشکسالی انجام شده است. در این راستا،

پایش خشکسالی هواشناسی موزه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از ... عبادی‌نهری و همکاران (۱۴۰۲) با توسعه شاخص تلفیقی خشکسالی (SDI) برای حوضه آبریز دریاچه ارومیه نشان دادند که الگوی پراکنش مکانی خشکسالی در این حوضه از شدت و گستردگی قابل توجهی برخوردار است. هم‌چنین قاسم‌پور و همکاران (۲۰۲۴) با بهره‌گیری از داده‌های سنجش‌ازدور و روش‌های رگرسیونی، تغییرات زمانی-مکانی خشکسالی و شوری خاک را در حوضه دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار دادند. از سوی دیگر، کاظم‌پور چورسی و همکاران (۱۴۰۳) با استفاده از داده‌های TRMM 3B43 به افزایش دقت برآورد بارش پرداختند که این داده‌ها می‌توانند مبنای مناسبی برای محاسبه و تحلیل شاخص‌های خشکسالی فراهم کنند. نتایج این پژوهش‌ها بر اهمیت عنصر بارش و نقش داده‌های ماهواره‌ای، به ویژه TRMM، در پایش دقیق خشکسالی در مناطقی با پوشش محدود ایستگاه‌های زمینی تأکید دارد.

با وجود این، اگرچه مطالعات متعددی در زمینه پایش خشکسالی انجام شده است، بررسی هم‌زمان شاخص‌های P_a و TRCI مبتنی بر داده‌های مقیاس‌کاهی شده TRMM در حوضه آبریز دریاچه ارومیه مورد توجه قرار نگرفته است. از این‌رو، پژوهش حاضر می‌تواند گامی در جهت تکمیل مطالعات پیشین و شناخت دقیق‌تر الگوهای زمانی و مکانی خشکسالی در این حوضه به شمار آید.

لذا این مطالعه با هدف مقایسه نتایج دو شاخص P_a و TRCI و ارائه نقشه‌های خشکسالی انجام شده است. این نقشه‌ها امکان تحلیل دقیق‌تر الگوهای مکانی و زمانی خشکسالی را فراهم می‌کنند. نتایج این پژوهش می‌تواند به شناسایی دوره‌های بحرانی خشکسالی، ارزیابی کارایی شاخص‌های مورد استفاده، و ارائه راهکارهایی برای مدیریت بهینه منابع آب در حوضه دریاچه ارومیه کمک کند. این اطلاعات برای سیاست‌گذاران و مدیران در

راستای احیای دریاچه و کاهش اثرات منفی خشکسالی ارزشمند خواهد بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه، واقع در شمال غربی ایران، یکی از شش حوضه اصلی آبریز کشور است (شکل ۱). این حوضه با مساحت ۵۶۲۰۱ کیلومتر مربع بین سه استان آذربایجان غربی (۴۶٪)، آذربایجان شرقی (۴۳٪) و کردستان (۱۱٪) تقسیم شده است. میانگین بارندگی سالانه در این منطقه حدود ۳۵۲ میلی متر است که بیشتر در بازه پاییز تا اواسط بهار رخ می دهد. این بارش ها از جبهه های هوایی سرچشمه می گیرند که از اروپا و مناطق سرد به ایران وارد شده و از جهت شمال و شمال غربی بر حوضه آبریز دریاچه ارومیه تأثیر می گذارند (قاسم پور^۱ و همکاران، ۲۰۲۴).

داده ها

داده های مأموریت اندازه گیری بارش گرمسیری (TRMM) توسط اداره ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحده (NASA) و آژانس اکتشافات هوافضای ژاپن (JAXA^۲) جمع آوری شده اند و از سال ۱۹۹۷ تا پایان دوره فعالیت ماهواره در سال ۲۰۱۵، و سپس از طریق داده های جانشین آن (GPM^۳) تا حال حاضر در دسترس هستند. داده های TRMM با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ × ۰/۲۵ درجه در مقیاس زمانی روزانه و ماهانه، اطلاعات جامعی از میزان بارش در سطح جهانی ارائه می دهند (هافمن^۴ و همکاران، ۲۰۰۷). این داده ها به دلیل پوشش گسترده و دقت بالا، به ویژه در مناطقی مانند حوضه دریاچه ارومیه که با کمبود ایستگاه های هواشناسی مواجه است، برای تحلیل الگوهای بارش و

خشکسالی مناسب هستند. در این مطالعه، برای پایش خشکسالی هواشناسی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، از داده های بارش مقیاس کاهی شده ماهواره TRMM (کاظم پور چورسی و همکاران، ۲۰۲۴) با قدرت تفکیک ۰/۰۵ درجه (تقریباً ۵ کیلومتر) برای محاسبه شاخص های خشکسالی طی سال های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ استفاده شده است.

درصد بی هنجاری بارش (P_a)

درصد بی هنجاری بارش شاخصی برای پایش خشکسالی است که میزان بارندگی را به صورت درصدی از میانگین بلندمدت یا نرمال نشان می دهد (شائو^۵ و بینگ-فانگ^۶، ۲۰۱۰). این شاخص، خشکسالی ناشی از بی هنجاری بارندگی را به طور مستقیم منعکس می کند. محاسبه درصد بی هنجاری بارش ساده و داده های ورودی آن به راحتی قابل دسترس است (وی^۷ و همکاران، ۲۰۱۷):

$$P_a = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100 \quad (1)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

که در آن P_a درصد بی هنجاری بارش، P بارندگی در یک دوره مشخص (میلی متر)، $\bar{P}$ میانگین بارندگی در همان دوره (میلی متر) و n تعداد سال ها است. درجه های خشکسالی P_a بر اساس درجه های خشکسالی هواشناسی طبقه بندی شده است که در جدول ۱ نشان داده شده است (یو^۷ و همکاران، ۲۰۲۰).

شاخص وضعیت بارش گرمسیری (TRCI)

داده های سری 3B43 ماهواره TRMM تخمینی از بارش ماهانه را ارائه می کنند که می توان با استفاده از آن

⁵ Shao-E and Bing-fang

⁶ Wei

⁷ Yu

¹ Ghasempour

² Japan Aerospace Exploration Agency

³ Global Precipitation Measurement

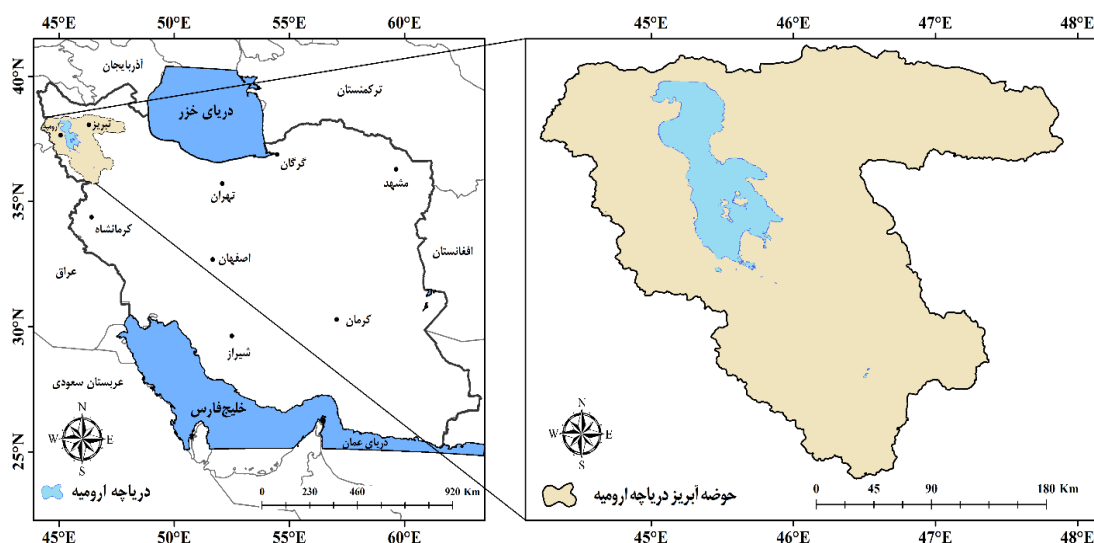
⁴ Huffman

پایش خشکسالی هواشناسی موضعه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از ...

$$TRCI = \frac{TRMM_i - TRMM_{min}}{TRMM_{max} - TRMM_{min}} \quad (3)$$

که در آن $TRCI$ میزان بارش در ماه i ام سال (۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹)، $TRMM_{max}$ و $TRMM_{min}$ به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار بارش یک پیکسل در همان ماه می‌باشند. مقادیر این شاخص بین ۰ تا ۱ متغیر است که وضعیت بارش بسیار کم تا بهینه را منعکس می‌کند (جدول ۱).

اطلاعات خشکسالی هواشناسی را به دست آورد. تخمین بارش دارای یک مؤلفه اقلیمی متأثر از زمان و مکان است. با این حال، آن را نمی‌توان مستقیماً با دیگر شاخص‌های خشکسالی تحلیل کرد. بنابراین، داده‌های $TRMM$ برای محاسبه $TRCI$ تغییر شکل داده و کمبود بارش از طریق سیگنال‌های اقلیمی به شرح ذیل بررسی شد:



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز دریاچه ارومیه

جدول ۱. طبقه‌بندی درجه خشکسالی بر اساس شاخص $TRCI$ و P_a

شاخص ماهانه $TRCI$	شاخص ماهانه P_a	شدت خشکسالی
$TRCI < 0.17$	$P_a < -40$	بدون خشکسالی
$0.17 < TRCI \leq 0.19$	$-60 \leq P_a < -40$	خشکسالی ضعیف
$0.19 < TRCI \leq 0.21$	$-80 \leq P_a < -60$	خشکسالی متوسط
$0.21 < TRCI \leq 0.23$	$-95 \leq P_a < -80$	خشکسالی شدید
$TRCI = 0$	$P_a > -95$	خشکسالی بسیار شدید

پیکسل‌هایی که در آن‌ها خشکسالی رخ داده است بر تعداد کل پیکسل‌ها بیان می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۳). شکل ۲ نشان می‌دهد که خشکسالی تقریباً در هر ماه از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ رخ داده و دارای الگوی زمانی مشخصی است.

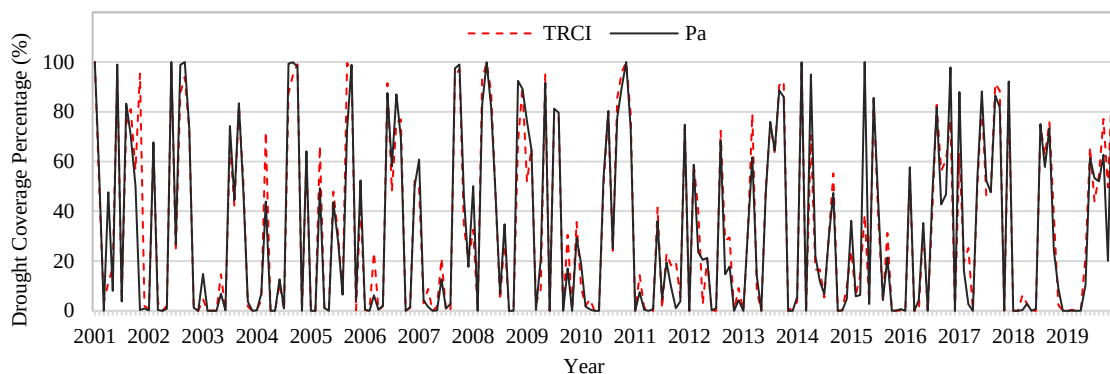
بحث و نتایج

شدت خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ بر اساس شاخص‌های P_a و $TRCI$ مطابق با جدول ۱ طبقه‌بندی شده است. درصد طبقات خشکسالی از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ به تفکیک هر ماه محاسبه شده است. درصد خشکسالی از تقسیم تعداد

سال‌ها، خشکسالی نه تنها از نظر زمانی طولانی‌تر بوده بلکه درصد بالاتری از مساحت حوضه را نیز دربر گرفته است که بیانگر وقوع یک دوره خشکسالی گسترده است.

در سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷، اگرچه شدت خشکسالی در برخی ماه‌ها کاهش نسبی نشان می‌دهد، اما الگوی وقوع آن همچنان تداوم دارد که بیانگر پایداری شرایط تنش اقلیمی در سیستم حوضه است. سال ۲۰۱۸ مجدداً تمرکز خشکسالی در فصل گرم را نشان می‌دهد. در سال ۲۰۱۹ بین ۲۰ تا ۹۵ درصد از مساحت حوضه در ماه‌های ژوئن تا نوامبر درگیر خشکسالی بوده است.

در اوایل دوره (۲۰۰۱ تا ۲۰۰۷)، خشکسالی عمدتاً در ماه‌های تابستان و اوایل پاییز متمرکز بوده است، به طوری که بیشترین فراوانی وقوع در بازه ژوئن تا اکتبر مشاهده می‌شود. این تمرکز فصلی بیانگر حساسیت بالای حوضه به کمبود بارش و افزایش دما در فصل گرم سال است. در سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۳، علاوه بر تداوم الگوی تابستانه، گسترش خشکسالی به ماه‌های سرد سال نیز مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تداوم تنش رطوبتی است. سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۳ به‌منزله سال‌های بحرانی دوره مطالعه قابل شناسایی‌اند. یافته‌ای که با نتایج مطالعات پیشین در این حوضه هم‌خوانی دارد (عبادی‌نهری و همکاران، ۱۴۰۲). در این



شکل ۲. درصد شدت خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه بر اساس شاخص‌های P_a و TRCI طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹

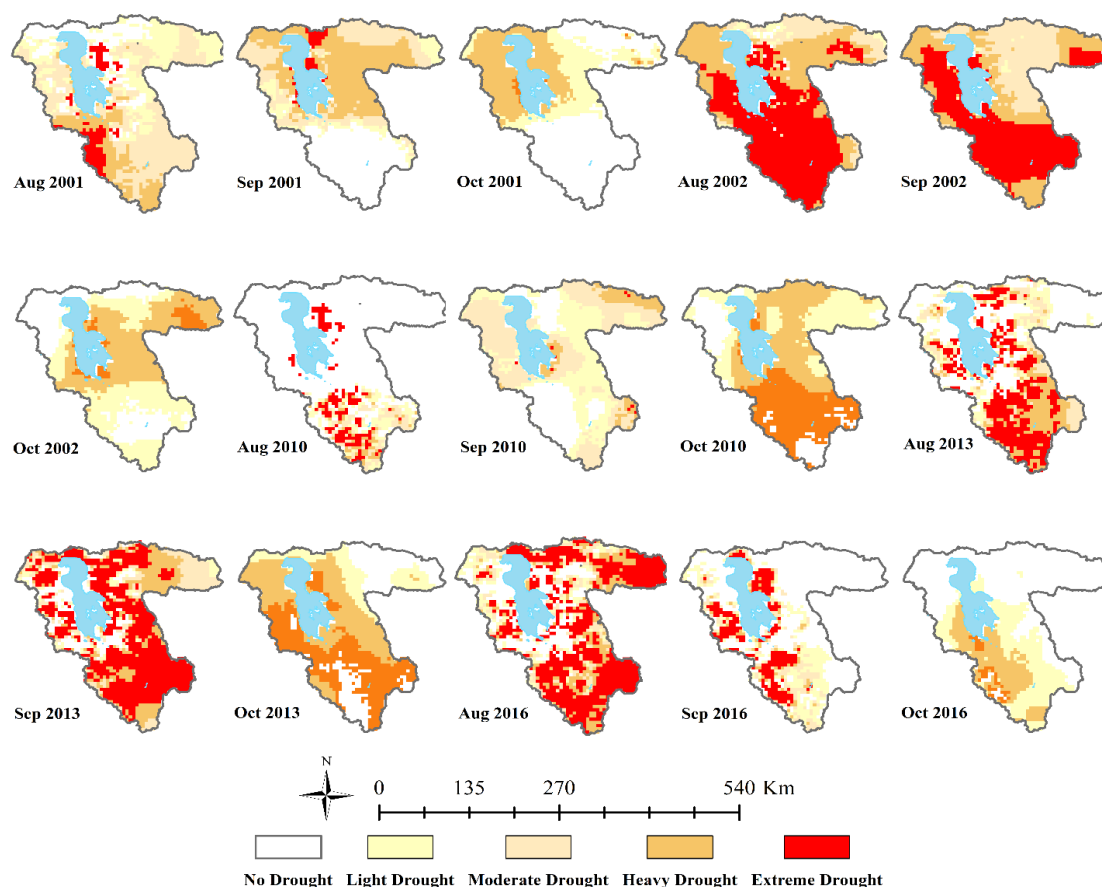
و ۲۰۱۶ به‌منزله سال‌های شاخص انتخاب شدند، زیرا بر اساس تحلیل درصد پوشش مکانی خشکسالی و هم‌زمانی مقادیر شدید شاخص‌های P_a و TRCI، این سال‌ها از نظر شدت و گستره مکانی در میان کل دوره مطالعه برجسته بودند. علاوه بر این، مطالعات پیشین نیز سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۱۰ را به‌منزله دوره‌های خشکسالی شدید در حوضه آبریز دریاچه

شکل ۲ نشان می‌دهد که درصد پوشش مکانی خشکسالی بیش از ۵۰ درصد بیشترین فراوانی را در ماه‌های آگوست، سپتامبر و اکتبر در طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ دارد. بنابراین، ویژگی‌های توزیع مکانی و زمانی خشکسالی در این ماه‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. توزیع مکانی خشکسالی بر اساس شاخص P_a در سطح حوضه دریاچه ارومیه در شکل ۳ نشان داده شده است. سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۱۰، ۲۰۱۳

پایش خشکسالی هواشناسی موزه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از ... حوضه مشاهده می شود که نشان دهنده شکل گیری گرادیان مکانی شدت خشکسالی است. در سال ۲۰۰۲، تقریباً تمام سطح حوضه در ماه های آگوست و سپتامبر تحت تأثیر خشکسالی متوسط تا بسیار شدید قرار گرفته است. این وضعیت حاکی از یک رخداد منطقه ای با انسجام مکانی بالا است. در مقابل، در سال های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۳، به ویژه در ماه اکتبر، خشکسالی ضعیف تا شدید در بیشتر سطح حوضه اتفاق افتاده است. در آگوست و سپتامبر ۲۰۱۳ و نیز آگوست ۲۰۱۶، خشکسالی بسیار شدید در بخش های قابل توجهی از حوضه توسعه یافته اند. این تمرکز مکانی نشان دهنده تشدید تنش رطوبتی در برخی زیرحوضه های حساس است.

ارومیه گزارش کرده اند (کاظم پور چورسی و همکاران، ۲۰۲۴).

شکل ۳ نشان می دهد که توزیع مکانی خشکسالی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه بر اساس P_a در طول زمان بسیار متفاوت است. الگوی مکانی خشکسالی نشان می دهد که شدت و گستره آن نه تنها بین سال ها بلکه در مقیاس درون فصلی نیز دچار تغییرات قابل توجهی بوده است. در سال ۲۰۰۱، خشکسالی در ماه آگوست به صورت فراگیر کل حوضه را دربر گرفته است. با این حال، در سپتامبر و اکتبر همان سال، الگوی مکانی از حالت یکنواخت خارج شده و تمرکز آن بیشتر در نواحی شمالی، غرب، شرق و شمال شرقی



شکل ۳. توزیع مکانی شدت خشکسالی بر اساس شاخص P_a در حوضه آبریز دریاچه ارومیه.

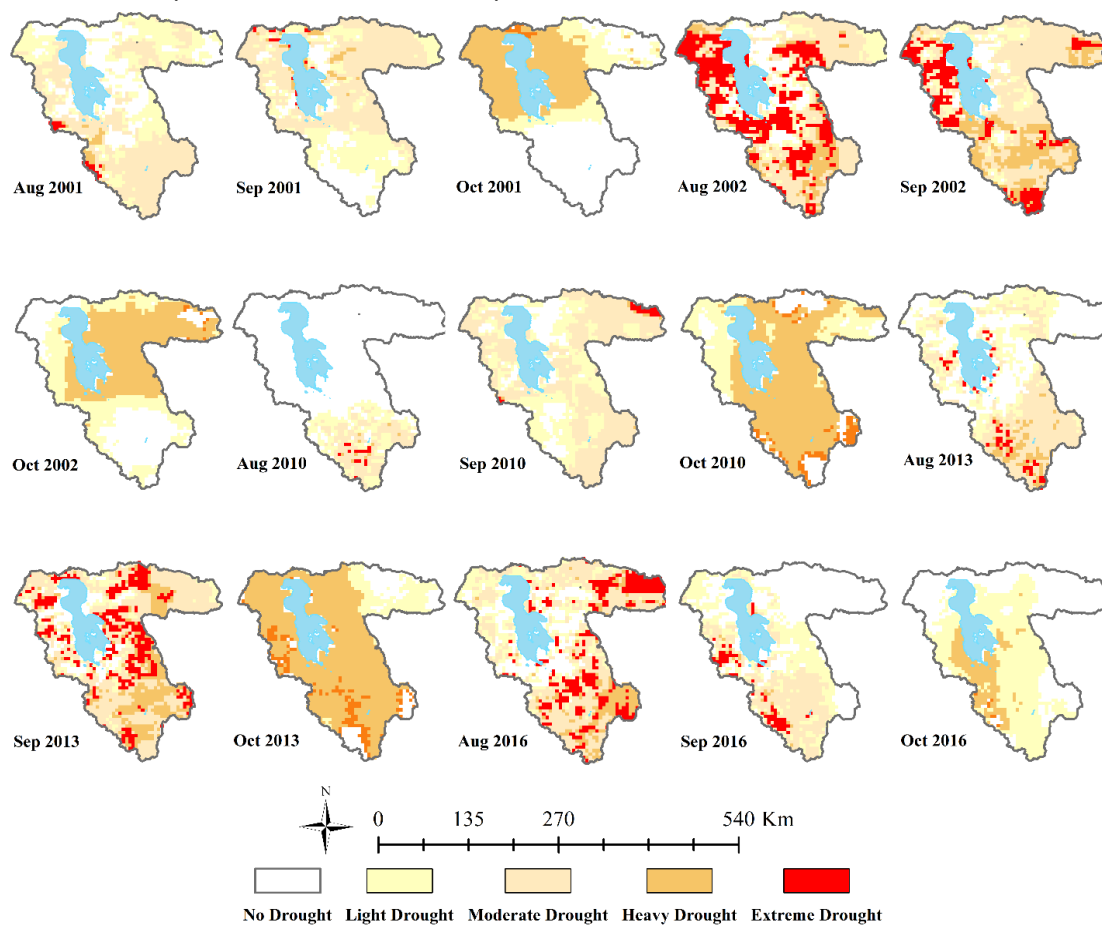
نقشه توزیع مکانی شدت خشکسالی بر اساس شاخص TRCI به تفکیک ماه طی سال های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ تهیه شد. ویژگی های توزیع مکانی و زمانی خشکسالی در ماه های آگوست، سپتامبر و اکتبر طی سال های ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۱۰، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۶ مورد تحلیل قرار گرفتند (شکل ۴).

مشاهده می شود که در ماه های آگوست و سپتامبر سال ۲۰۰۱ خشکسالی ضعیف تا متوسط در بیشتر نواحی حوضه دریاچه ارومیه اتفاق افتاده است. در حالی که، در اکتبر ۲۰۰۱ نواحی جنوب، جنوب غربی و شرقی خشکسالی را تجربه نکرده است. خشکسالی ضعیف تا بسیار شدید در ماه های آگوست و سپتامبر ۲۰۰۲، سپتامبر ۲۰۱۳ و آگوست ۲۰۱۶ تقریباً کل سطح حوضه را تحت تأثیر قرار داده است. در ماه اکتبر سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۳ خشکسالی شدید بیشتر سطح حوضه را فرا گرفته است.

طبق نتایج فوق می توان گفت توزیع خشکسالی P_a شدیدتر از TRCI است. شاخص

P_a به دلیل محاسبه بر اساس انحراف بارش از میانگین بلندمدت، تغییرات شدید و نوسانی بارش را برجسته می سازد، در حالی که شاخص TRCI با نرمال سازی مقادیر بارش نسبت به حداقل و حداکثر دوره آماری، شدت خشکسالی را به صورت واقع بینانه و تعدیل شده ارائه می دهد.

از نظر مدیریتی، به کارگیری هم زمان شاخص های P_a و TRCI، با توجه به تفاوت در مبانی محاسباتی و حساسیت آن ها به نوسانات کوتاه مدت و روندهای پایدارتر، می تواند عدم قطعیت ارزیابی را کاهش داده و چارچوب تحلیلی جامع تری برای تصمیم گیری در مدیریت منابع آب فراهم آورد، به ویژه در حوضه هایی که با محدودیت داده های ایستگاهی و تغییرات شدید کاربری اراضی مواجه هستند.



شکل ۴. توزیع مکانی شدت خشکسالی بر اساس شاخص TRCI در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

نتیجه گیری

خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ با استفاده از داده‌های مقیاس کاهی شده ماهواره TRMM با قدرت تفکیک مکانی ۰/۵ درجه (تقریباً ۵ کیلومتر) مورد بررسی قرار گرفت. دو شاخص کلیدی شامل شاخص بی‌هنگاری بارش (P_a) و شاخص وضعیت رطوبت (TRCI) محاسبه شدند.

نتایج شاخص‌های P_a و TRCI نشان داد که خشکسالی هواشناسی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ نه تنها فراوان بوده، بلکه الگوی زمانی مشخصی داشته است. به طوری که ماه‌های آگوست تا نوامبر

بیشترین شدت خشکسالی را تجربه کرده‌اند. این الگو می‌تواند ناشی از کاهش ورودی‌های سامانه‌های بارشی مدیترانه‌ای در اواخر تابستان، افزایش دمای سطح زمین و تبخیر بالا و همچنین خشکسالی تجمعی ناشی از بارش‌های کمتر از نرمال در فصل سرد باشد. در مقابل، کاهش شدت خشکسالی در دوره نوامبر تا فوریه احتمالاً به دلیل فعالیت سامانه‌های بارشی غربی و بارش‌های زمستانی شکل می‌گیرد که بخش قابل توجهی از رطوبت سالانه حوضه را تأمین می‌کنند.

مقایسه نتایج دو شاخص P_a و TRCI نشان داد که شاخص P_a نسبت به نوسانات کوتاه مدت

منابع

- عبادی نهاری، ز.، عرفانیان، م.، و کاظم پور چورسی، س. (۱۴۰۲). ارائه یک روش نوین برای ارزیابی و پایش جامع خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از شاخص تلفیقی خشکسالی SDI. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۳ (۶۸)، ۲۴۳-۲۵۷.
- کاظم پور چورسی، س.، عرفانیان، م.، عبقری، ه.، میریعقوبزاده، م.، و جوان، خ. (۱۴۰۳). تصحیح داده‌های بارش ماهانه TRMM 3B43 با استفاده از مدل رگرسیون چندکی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. مدیریت بیابان، ۱۲ (۱)، ۵۷-۷۴.
- Brasil Neto, R. M., Santos, C. A. G., Silva, J. F. C. B. D. C., da Silva, R. M., Dos Santos, C. A. C., & Mishra, M. (2021). Evaluation of the TRMM product for monitoring drought over Paraíba State, northeastern Brazil: a trend analysis. *Scientific Reports*, 11(1), 1097.
- Chen, S., Zhang, L., Zhang, Y., Guo, M., & Liu, X. (2020). Evaluation of Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite precipitation products for drought monitoring over the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin, China. *Journal of Geographical Sciences*, 30(1), 53-67.
- CMA. (2017). GB/T 20481-2017 Grades of meteorological drought. Standards Press of China.
- Cunha, A. P. M., Zeri, M., Deusdará Leal, K., Costa, L., Cuartas, L. A., Marengo, J. A., ... & Ribeiro-Neto, G. (2019). Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere*, 10(11), 642.
- Elusma, M., Tung, C. P., & Lee, C. C. (2022). Agricultural drought risk assessment in the Caribbean region: the case of Haiti. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 83, 103414.
- Ghasempour, R., Aalami, M. T., Saghebani, S. M., & Kirca, V. O. (2024). Analysis of spatiotemporal variations of drought and soil salinity via integrated multiscale and remote sensing-based techniques (Case study: Urmia Lake basin). *Ecological Informatics*, 81, 102560.
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., ... & Stocker, E. F. (2007). The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), 38-55.
- Irannezhad, M., Ahmadi, B., Kløve, B., & Moradkhani, H. (2017). Atmospheric circulation patterns explaining climatological drought dynamics in the boreal environment of Finland, 1962-2011. *International Journal of Climatology*, 37, 801-817.
- Kazempour Choursi, S., Erfanian, M., Abghari, H., Miryaghoubzadeh, M., & Javan, K. (2024). Enhancing drought monitoring through spatial downscaling: A بارش حساسیت بیشتری دارد و می‌تواند دوره‌های خشکی مقطعی را با شدت بیشتری آشکار سازد، در حالی که شاخص TRCI به دلیل نرمال‌سازی مقادیر بارش نسبت به حداقل و حداکثر دوره آماری، روندهای پایدارتر و الگوهای بلندمدت خشکسالی را بهتر منعکس می‌کند. این تفاوت ناشی از ماهیت محاسباتی این دو شاخص است، به گونه‌ای که P_a مبتنی بر انحراف از میانگین بارش بوده، در حالی که TRCI بر مقایسه نسبی مقادیر بارش در چارچوب یک دوره آماری استوار است.
- نتایج تحلیل مکانی نیز نشان داد که بخش‌های شمالی، شرقی و جنوب شرقی حوضه در بسیاری از سال‌ها بیش از سایر مناطق در معرض خشکسالی قرار داشته‌اند. این امر می‌تواند به عواملی نظیر بارش کمتر، گرادیان ارتفاعی ضعیف‌تر و میزان تبخیر-تعرق بالاتر نسبت به مناطق مرتفع غربی حوضه مرتبط باشد.
- به طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از شاخص‌های P_a و TRCI می‌تواند تصویری جامع‌تر از ویژگی‌های زمانی و مکانی خشکسالی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه ارائه دهد و محدودیت‌های ناشی از استفاده از یک شاخص منفرد را کاهش دهد. با توجه به شرایط بحرانی دریاچه ارومیه، چنین رویکردی می‌تواند مبنایی مؤثر برای پایش خشکسالی، برنامه‌ریزی منابع آب، مدیریت کشاورزی و تدوین راهبردهای احیای پایدار این حوضه فراهم سازد.

geographically weighted regression approach using TRMM 3B43 precipitation in the Urmia Lake Basin. *Earth Science Informatics*, 17(4), 2995-3020.

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales, *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. California, pp 179-183.

Oyarzabal, R. S., Santos, L. B., Cunningham, C., Broedel, E., de Lima, G. R., Cunha-Zeri, G., ... & Cunha, A. P. (2025). Forecasting drought using machine learning: a systematic literature review. *Natural Hazards*, 121, 9823-9851.

Shao-E, Y., & Bing-fang, W. (2010, March). Calculation of monthly precipitation anomaly percentage using web-serviced remote sensing data. In *2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control* (Vol. 5, pp. 621-625). Ieee.

Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4), 359-392.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.

Wang, H., Chen, Y., Pan, Y., Chen, Z., & Ren, Z. (2019). Assessment of candidate distributions for SPI/SPEI and sensitivity of drought to climatic variables in China. *International Journal of Climatology*, 39(11), 4392-4412.

Wei, K., Wang, Q. J., Zhou, B. B., & He, B. (2017). Analysis of drought characteristics in Shaanxi province based on precipitation anomaly percentage. *Journal of Soil and Water Conservation*, 31, 318-322.

Yu, Y., Wang, J., Cheng, F., Deng, H., & Chen, S. (2020). Drought monitoring in Yunnan Province based on a TRMM precipitation product. *Natural Hazards*, 104, 2369-2387

Zhang, T., Zhang, B., Wang, Y., Liu, X., An, M., & Zhang, J. (2013). Drought characteristics in the Shiyang River Basin during the recent 50 years based on a composite index. *Acta Ecologica Sinica*, 33(3), 975-984.

Zhao, Q., Chen, Q., Jiao, M., Wu, P., Gao, X., Ma, M., & Hong, Y. (2018). The temporal-spatial characteristics of drought in the Loess Plateau using the remote-sensed TRMM precipitation data from 1998 to 2014. *Remote Sensing*, 10(6), 838.

Zhao, Y., Zhang, J., Bai, Y., Zhang, S., Yang, S., Henchiri, M., ... & Nanzad, L. (2022). Drought monitoring and performance evaluation based on machine learning fusion of multi-source remote sensing drought factors. *Remote Sensing*, 14(24), 6398.

Meteorological drought monitoring in the Urmia Lake Basin using Precipitation Anomaly Percentage and Tropical Rainfall Condition Index

Sima Kazempour Choursi¹, Mahdi Erfanian^{2*}, Hiran Abghari², Mirhassan Miryaghoubzadeh², Khadijeh Javan³

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

² Associate Professor, Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

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

*Corresponding Author Email: Erfanian.ma@gmail.com

Received: 19 December 2025, Accepted: 30 May 2026

ABSTRACT

Drought monitoring in the Urmia Lake basin (ULB) is essential due to its prolonged hydrological crisis and the associated challenges in water resource management, agriculture, human livelihoods, and ecosystem sustainability. This study evaluates meteorological drought conditions using the Precipitation Anomaly Percentage (P_a) and the Tropical Rainfall Condition Index (TRCI) across the ULB from 2001 to 2019. Drought indices were derived from downscaled monthly precipitation data obtained from the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), with a spatial resolution of 0.5°. Analysis revealed that drought events occurred throughout the year over 2001-2019, with peak severity from August to November and a notable reduction between November and February. Spatial assessments based on P_a and TRCI indicated discrepancies in drought intensity and spatial extent. The P_a index captured short-term and abrupt precipitation variability, while TRCI reflected more persistent and representative drought conditions across the basin. The combined application of P_a and TRCI enhances the characterization of drought dynamics and provides a more robust framework for drought assessment. Incorporating these indices into water resource planning is recommended to support adaptive management strategies in drought-prone regions.

Keywords: Climate Change, Urmia Lake, Spatial Distribution of Drought, TRCI Index, TRMM

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Kazempour Choursi, S., Erfanian, M., Abghari, H., Miryaghoubzadeh, M. & Javan, K., (2026). Meteorological drought monitoring in the Urmia Lake Basin using Precipitation Anomaly Percentage and Tropical Rainfall Condition Index. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*. 8(2), 19-31. DOI: 10.22034/jmas.2026.567336.1259

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/>).

