

تحلیل زمانی و مکانی شاخص‌های خشکی UNEP و دومارتن در ایران طی دوره ۱۹۷۶-۲۰۲۰

خدیجه جوان،* آمنه یحیوی دیزج^۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۷

چکیده

شاخص خشکی به‌عنوان نسبت بین تبخیر و تعرق (دما) و بارندگی، بیانگر ویژگی‌های آب‌وهوایی یک منطقه است. پژوهش حاضر با هدف تحلیل زمانی و مکانی شاخص‌های خشکی UNEP و دومارتن در ایران با داده‌های دمای میانگین (°C)، متوسط رطوبت نسبی (%، سرعت باد (m/s) و ساعت آفتابی (h) ۴۰ ایستگاه سینوپتیک به بررسی ۴۵ ساله طبقه‌بندی اقلیم ایران پرداخت. بارش، دما و تبخیر و تعرق مرجع، پهنه‌بندی و روند تغییرات شاخص‌های خشکی با آزمون من-کندال تحلیل شد. نتایج شاخص UNEP نشان داد بیش از سه‌چهارم ایستگاه‌ها دارای اقلیم بسیار خشک، خشک، نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای هستند که از نظر توزیع مکانی در مناطق جنوب غرب، جنوب، جنوب شرق، مرکز، شمال غرب، غرب، شمال شرق کشور گسترش یافته و از لحاظ اقلیمی مستعد وقوع پدیده بیابان‌زایی هستند. نتایج شاخص خشکی دومارتن نیز منطبق بر شاخص UNEP است. براساس نتایج بررسی بارش، دما و تبخیر و تعرق مرجع در مناطق خشک، کاهش میزان بارش، افزایش دما و تبخیر و تعرق مرجع سبب افزایش نیاز آبی گیاهان و کاهش رطوبت خاک شده است. آزمون من-کندال حاکی از روند کاهشی معنادار در سطوح اطمینان ۹۹، ۹۵ و ۹۰٪ در بیش از نیمی از ایستگاه‌هاست. این امر در شاخص‌های مورد بررسی بیانگر خشکی اقلیم است.

کلیدواژه‌ها: ایران، شاخص خشکی UNEP، شاخص خشکی دومارتن، روند، من-کندال.

۱. دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، kh.javan@urmia.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

این مقاله برگرفته از پژوهش مستق است.

مقدمه

مدیریت علمی منابع آب، کشاورزی و محیط‌زیست اهمیت و ضرورت ویژه‌ای می‌یابد. شاخص خشکی مفهوم خشکی را به یک عدد خلاصه می‌کند (پارک^۶ و همکاران، ۲۰۱۸). به بیانی دیگر، شاخص خشکی (AI) به‌عنوان نسبت تبخیر و تعرق به بارش برای کمی‌سازی مقدار خشکی به کار می‌رود. این شاخص با در نظر گرفتن تحولات هم‌زمان نیاز آبی (ET₀) و تأمین آبی حاصل از بارش (Pre)، شاخص مناسبی برای بررسی وضعیت اکوهیدرولوژیک یک منطقه است (بختیاری و همکاران، ۱۴۰۰). شاخص خشکی AI در بسیاری از مطالعات (یولسآه، ۲۰۲۳^۸؛ ژانگ^۹ و همکاران، ۲۰۲۲b؛ تگاس، ۲۰۲۳^{۱۰}؛ وو، ۲۰۲۳) به‌عنوان نسبت تبخیر و تعرق مرجع به بارش استفاده شده است. شاخص خشکی دومارتن،^{۱۱} نیز شاخص دیگری است که برای کمی‌سازی خشکی، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران جهان (می^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۲؛ ژلزنوا و همکاران، ۲۰۲۲؛ فاجاردو^{۱۳} و همکاران، ۲۰۲۳؛ طاهری و کریون، ۲۰۲۳^{۱۴}) قرار گرفته است. شاخص خشکی دومارتن، نسبت بین مقادیر میانگین سالانه بارش (P) و دما (T) را مبنای دسته‌بندی قرار می‌دهد (وانگ^{۱۵} و همکاران، ۲۰۲۱).

روند تغییرات خشکی نیز از جمله موضوعات مهمی است که در نقاط مختلف جهان مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. در این زمینه مطالعه‌ای با هدف بررسی روند شاخص خشکی (AI) در ایستگاه‌های نوار شمالی کشور طی دوره ۱۹۸۲-۲۰۱۹ صورت گرفت. نتایج نشان داد شاخص خشکی در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره ۱۹۸۲-۲۰۱۹ دارای روند کاهشی بوده است (رنجبر و طباطبایی، ۲۰۲۲). پژوهشی دیگر با هدف به‌روزرسانی و تحلیل فضایی-زمانی طبقه‌بندی اقلیمی ایران براساس شاخص دومارتن با استفاده از

خشکی یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی است که از دیرباز گریبان‌گیر انسان‌ها بوده و از اصلی‌ترین بلایای طبیعی است که همواره بر ابعاد مختلف زندگی انسان‌ها تأثیرگذار بوده است (میشرا و سین، ۲۰۱۰). خشکی اصطلاحی است که بیشتر مردم آن را با تصویری از اراضی بیابانی، بارش اندک و پوشش گیاهی بسیار تنک در ذهن تجسم می‌کنند؛ اما در واقع خشکی نوعی ویژگی دائمی آب‌وهوایی در یک منطقه است که نشان از عدم کفایت بارش در حد لازم برای رشد حیات در آن منطقه دارد (کاوایانی و علیجانی، ۲۰۱۳). آگاهی از وضعیت خشکی هر منطقه‌ای به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک در مدیریت و برنامه‌ریزی مناسب منابع طبیعی و پایداری زیست‌بوم مناطق مختلف مهم و ضروری است (زارع و همکاران، ۲۰۱۶). حدود ۴۰ درصد از سطح زمین را مناطق خشک دربرگرفته که حدود دو میلیارد نفر جمعیت جهان را در خود جای داده است. ۹۰ درصد از جمعیت واقع در مناطق خشک در کشورهای درحال توسعه زندگی می‌کنند. این مناطق مقدار نسبتاً کمی از بارش را به‌صورت برف و باران دریافت می‌کنند (UN, 2011). در این بین، با توجه به موقعیت ایران که در کمربند خشک جهان قرار گرفته، حدود ۶۴/۷ درصد از وسعت آن (معادل ۱۰۵ میلیون هکتار) جزء اقلیم خشک و نیمه‌خشک است (باعتقیده و همکاران، ۲۰۱۱). موقعیت خاص ایران در جهان سبب شده که همواره در معرض خشکسالی و تبعات آن واقع شود. آگاهی از میزان خشکی و برنامه‌ریزی برای آن در دسترسی به مواد غذایی (وو^{۱۶} و همکاران، ۲۰۲۰)، منابع آب (پاکل^{۱۷} و همکاران، ۲۰۲۱) و همچنین بر محیط زیست (باخمیر^{۱۸} و همکاران، ۲۰۱۶) بسیار حائز اهمیت است.

بنابراین مطالعه و کمی‌سازی مقدار خشکی با استفاده از شاخص‌های خشکی اقلیمی در اقصانقاط جهان و به‌ویژه در ایران که همواره در این زمینه دچار چالش بوده و هست، برای

^۶Park

^۷Aridity Index

^۸Ullah

^۹Zhang

^{۱۰}Tegos

^{۱۱}De Martonne

^{۱۲}My

^{۱۳}Fajardo

^{۱۴}Taheri & Carrion

^{۱۵}Wang

^{۱۶}Mishra and Singh

^{۱۷}United Nation

^{۱۸}Wu

^{۱۹}Pokhel

^{۲۰}Bachmair

مورد تحلیل قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

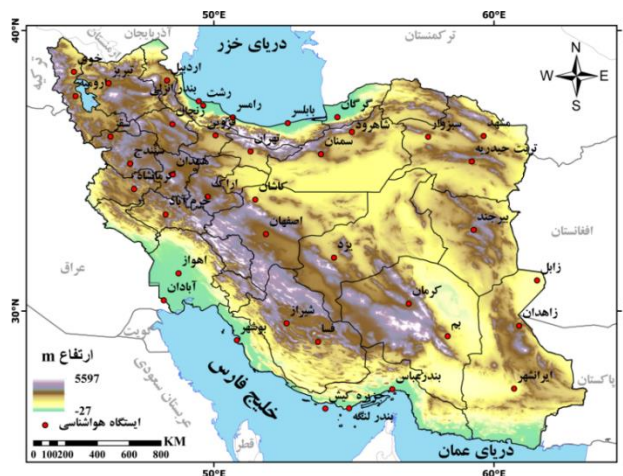
منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر کشور ایران است (شکل ۱). کشور ایران با وسعتی معادل 1648195 KM^2 بین عرض ۲۵ تا ۳۹ درجه شمالی و طول ۴۴ تا ۶۳ درجه شرقی واقع شده است (علایی طالقانی، ۲۰۰۳). از نظر اقلیمی ایران در منطقه کمربند مناطق خشک و بیابانی جهان قرار دارد که به سبب این موقعیت خاص متوسط بارش آن 250 mm و کمتر از یک سوم متوسط بارش سالانه کره زمین یعنی 860 mm در داخل کشور هم مناطق مختلف آن دارای ویژگی‌های بارشی متفاوتی هستند. از نظر پیکربندی، کشور ایران بخش اعظم فلات ایران را پوشش می‌دهد که ارتفاع متوسط آن حدود 1250 m است. پست‌ترین نقطه آن در دشت لوت (56 m) و بلندترین نقطه آن منطبق بر قله دماوند (5671 m) ارتفاع دارد (علایی طالقانی، ۲۰۰۳).

در پژوهش حاضر از ۴۰ ایستگاه سینوپتیک هواشناسی که دارای آمار بلندمدت ۴۵ ساله (۱۹۷۶-۲۰۲۰) هستند استفاده شد؛ بدین صورت که داده‌های روزانه هواشناسی ۴۰ ایستگاه سینوپتیک واقع در گستره ایران از سازمان هواشناسی کشور (IMO) اخذ گردید (سازمان هواشناسی ایران، ۲۰۲۲). این داده‌ها شامل دمای میانگین $^{\circ}\text{C}$ ، میانگین رطوبت نسبی %، سرعت باد m/s و ساعت آفتابی h هستند. ویژگی‌های اقلیمی و جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب پژوهش حاضر در جدول (۱) قابل مشاهده است.

آزمون من-کندال انجام شد. نتایج نشان داد ۱۴ درصد از ایستگاه‌های با روند نزولی (۸ ایستگاه) دارای روند نزولی معنادار و ۷ درصد ایستگاه‌های با روند صعودی (۷ ایستگاه) دارای روند صعودی معنادار در سطح ۹۵ درصد بودند (فتیحی تپهرشت و همکاران، ۱۴۰۱). پژوهشی با هدف ارزیابی شاخص خشکی قاره آسیا انجام شد و در آن پیش‌بینی شد که به‌ازای هر درجه افزایش متوسط دما، شاخص خشکی ۲ واحد کاهش می‌یابد که به معنای کاهش نسبت منابع آب به نیاز آبی است (وانگ و ژانگ، ۲۰۲۰). در یک پژوهش به اثر تغییر اقلیم در وضعیت اقلیمی چین در ۶۰ سال گذشته و آینده پرداخته شد. نتایج مدل GCM نشان داد که تا پایان این قرن، آب‌وهوا در چین روند کلی خشک شدن خواهد داشت (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲a).

جمع‌بندی پژوهش‌های مختلف در سطح بین‌المللی و ملی نشان می‌دهند که کمی‌سازی خشکی و بررسی روند تغییرات زمانی و مکانی آن، در نقاط مختلف جهان دارای اهمیت فراوان بوده و به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشکی مانند ایران ضرورت ویژه‌ای دارد. بر این اساس، پژوهش حاضر به منظور تحلیل زمانی و مکانی شاخص‌های خشکی UNEP و دومارتن در ایران با استفاده از داده‌های دمای میانگین $^{\circ}\text{C}$ ، متوسط رطوبت نسبی %، سرعت باد m/s و ساعت آفتابی h ۴۰ ایستگاه سینوپتیک در دوره آماری ۴۵ ساله طبقه‌بندی اقلیم ایران توسط شاخص‌های خشکی UNEP و دومارتن بررسی شد؛ سپس عناصر تأثیرگذار بر شاخص‌های خشکی UNEP و دومارتن، مانند بارش، دما و تبخیر و تعرق پهنه‌بندی شد. در نهایت، روند تغییرات شاخص‌های خشکی با استفاده از آزمون من-کندال



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی و ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه مورد مطالعه
 Figure (1): Geographical location and synoptic stations of the studied area
 جدول (۱): ویژگی‌های اقلیمی و جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه
 Table (1): Climatic and geographical characteristics of the studied stations

ردیف	نام ایستگاه	طول λ	عرض φ	ارتفاع m	UNEP	دومارتن	شاخص خشکی
۱	جزیره کیش	۵۳/۹۸	۲۶/۵۲	۳۰	بسیار خشک	خشک	تیپ اقلیمی
۲	بندرلنگه	۵۴/۸۳	۲۶/۵۳	۲۲/۷	بسیار خشک	خشک	
۳	بندرعباس	۵۶/۳۷	۲۷/۲۱	۹/۸	بسیار خشک	خشک	
۴	ایران شهر	۶۰/۷۲	۲۷/۲۳	۵۹۱/۱	بسیار خشک	خشک	
۵	فسا	۵۳/۷۲	۲۸/۹	۱۲۶۸	خشک	نیمه خشک	
۶	بوشهر	۵۰/۸۲	۲۸/۹۶	۹	خشک	نیمه خشک	
۷	بم	۵۸/۳۵	۲۹/۱	۱۰۶۶/۹	بسیار خشک	خشک	
۸	زاهدان	۶۰/۹	۲۹/۴۷	۱۳۷۰	بسیار خشک	خشک	
۹	شیراز	۵۲/۶	۲۹/۵۶	۱۴۸۸	خشک	نیمه خشک	
۱۰	کرمان	۵۶/۹۶	۳۰/۲۶	۱۷۵۴	بسیار خشک	خشک	
۱۱	آبادان	۴۸/۲۱	۳۰/۳۸	۶/۶	بسیار خشک	خشک	
۱۲	زابل	۶۱/۵۴	۳۱/۰۹	۴۸۹/۲	بسیار خشک	خشک	
۱۳	اهواز	۴۸/۷۴	۳۱/۳۴	۲۲/۵	بسیار خشک	نیمه خشک	
۱۴	یزد	۵۴/۲۹	۳۱/۹	۱۲۳۰/۲	بسیار خشک	خشک	
۱۵	اصفهان	۵۱/۸۶	۳۲/۷۴	۱۵۵۱/۹	بسیار خشک	خشک	
۱۶	بیرجند	۵۹/۲۸	۳۲/۸۹	۱۴۹۱	بسیار خشک	خشک	
۱۷	خرم‌آباد	۴۸/۲۸	۳۳/۴۴	۱۱۴۷/۸	نیمه خشک	نیمه مرطوب	
۱۸	کاشان	۵۱/۴۸	۳۳/۹۷	۹۵۵	خشک	خشک	
۱۹	اراک	۴۹/۷۸	۳۴/۰۷	۱۷۰۲/۸	نیمه خشک	مدیترانه ای	
۲۰	کرمانشاه	۴۷/۱۵	۳۴/۳۵	۱۳۱۸/۵	نیمه خشک	مدیترانه ای	
۲۱	همدان	۴۸/۵۳	۳۴/۸۷	۱۷۴۰/۸	نیمه خشک	مدیترانه ای	
۲۲	سندج	۴۷/۱۰	۳۵/۲۵	۱۳۷۳/۴	نیمه خشک	نیمه مرطوب	
۲۳	تربت حیدریه	۵۹/۲۱	۳۵/۳۳	۱۴۵۱	نیمه خشک	خشک	
۲۴	سمنان	۵۳/۸۲	۳۵/۵۹	۱۱۲۷	بسیار خشک	خشک	
۲۵	تهران	۵۱/۳۱	۳۵/۶۹	۱۱۹۱	خشک	نیمه خشک	
۲۶	سبزوار	۵۷/۶۵	۳۶/۲۱	۹۶۲	بسیار خشک	نیمه خشک	
۲۷	سقز	۴۶/۳۱	۳۶/۲۲	۱۵۲۲/۸	نیمه مرطوب	نیمه مرطوب	
۲۸	مشهد	۵۹/۶۳	۳۶/۲۴	۹۹۹/۲	خشک	نیمه خشک	
۲۹	قزوین	۵۰/۰۶	۳۶/۲۶	۱۲۷۹/۱	نیمه خشک	مدیترانه ای	
۳۰	شاهرود	۵۴/۹۳	۳۶/۳۸	۱۳۲۵/۲	خشک	نیمه خشک	
۳۱	زنجان	۴۸/۵۲	۳۶/۶۶	۱۶۵۹/۴	نیمه خشک	مدیترانه ای	
۳۲	بابلسر	۵۲/۶۴	۳۶/۷	-۲۱	مرطوب	مرطوب	
۳۳	رامسر	۵۰/۶۸	۳۶/۹	-۲۰	بسیار مرطوب	بسیار مرطوب	
۳۴	گرگان	۵۴/۴۱	۳۶/۹۱	۰	نیمه مرطوب	نیمه مرطوب	
۳۵	رشت	۴۹/۶۲	۳۷/۳۲	۸/۶	بسیار مرطوب	بسیار مرطوب	
۳۶	بندرانزلی	۴۹/۴۶	۳۷/۴۸	۲۳/۶	بسیار مرطوب	بسیار مرطوب	
۳۷	ارومیه	۴۵/۰۶	۳۷/۶۶	۱۳۲۸	نیمه خشک	مدیترانه ای	
۳۸	تبریز	۴۶/۲۴	۳۸/۱۲	۱۳۶۱	خشک	مدیترانه ای	

مدیرانه‌ای	نیمه‌خشک	۱۳۳۵/۲	۳۸/۲۲	۴۸/۳۳	اردبیل	۳۹
مدیرانه‌ای	نیمه‌خشک	۱۱۰۳/۴	۳۸/۵۳	۴۵	خوی	۴۰

ثابت سایکرومتری است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

محاسبه شاخص‌های خشکی

شاخص خشکی UNEP: در این پژوهش شاخص AI براساس معادله (۱) محاسبه شد.

$$AI = \frac{ET_0}{Pre} \quad (1)$$

که در آن، ET_0 مقدار تبخیر و تعرق سالانه و Pre میزان بارندگی سالانه برحسب mm هستند.

شاخص خشکی دومارتن: در این شاخص که مبنای شاخص خشکی بنا نهاده شده است، دما و بارندگی برای تعیین نوع اقلیم استفاده می‌شود. برای محاسبه این شاخص از معادله (۲) استفاده می‌شود.

$$I = \frac{P}{t+10} \quad (2)$$

که I شاخص خشکی، P میانگین بارش سالانه برحسب mm و t دمای سالانه برحسب °C است.

محاسبه تبخیر تعرق و مرجع (ET_0)

فرایند پیچیده تبخیر و تعرق به عوامل متعدد اقلیمی وابسته است که تخمین دقیق آن برای مدیریت بهینه منابع آب ضروری است. با توجه به اینکه سازمان غذا و کشاورزی (FAO)، در سال ۱۹۹۸ (نشریه فائو) مدل پنمن-مانتیت فائو ۵۶ را به‌عنوان یک روش استاندارد در برآورد ET_0 معرفی و پیشنهاد کرده است. از این رو این مدل، مناسب‌ترین مدل ترکیبی استاندارد پنمن-مانتیت فائو ۵۶ (FAO-56 PM) است. این مدل برای استفاده در بازه زمانی روزانه برای گیاه چمن با ارتفاع ۰/۱۲ متر، مقاومت سطحی ثابت ۰/۷ ثانیه بر متر و ضریب آلیبدو ۰/۳۲ به‌صورت معادله (۳) است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (3)$$

که در آن، ET_0 تبخیر و تعرق سطح مرجع چمن، e_s و e_a فشار بخار اشباع و فشار واقعی بخار آب، T دمای هوا در ارتفاع ۲ m، U_2 سرعت باد در روز در ارتفاع ۲ m از سطح زمین، R_n مقدار تابش خالص در سطح گیاه و G شار گرمایی خاک، Δ شیب منحنی تغییرات فشار بخار اشباع (e_s) برحسب (mb/°C) و γ

پهنه‌بندی بارش، دما و تبخیر و تعرق در گستره ایران

پهنه‌بندی روشی مناسب برای محاسبه منطقه‌ای عناصر مختلف است که در این پژوهش برای منطقه‌ای نمودن بارش، دما و تبخیر و تعرق از آن بهره گرفته شد. از این رو در پژوهش حاضر عناصر تأثیرگذار خشکی از جمله بارش، دما و تبخیر و تعرق در گستره ایران با استفاده از روش درون‌یابی IDW در محیط GIS که نسبت به سایر روش‌های درون‌یابی نتایج مناسب‌تری داشت، مورد استفاده قرار گرفت.

روش تحلیل روند ناپارامتری من-کندال

روش من-کندال را ابتدا من (۱۹۴۵) ارائه و سپس کندال (۱۹۴۸) بسط و توسعه داد. فرض صفر آزمون من-کندال بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری داده‌ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده‌هاست. در این روش ابتدا اختلاف بین هریک از مشاهدات با تمام مشاهدات پس از آن محاسبه شده و پارامتر S مطابق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (5)$$

که n تعداد مشاهدات سری، و x_j و x_k به ترتیب داده‌های j ام و k ام سری هستند. تابع علامت sgn نیز به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\text{Sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

در مرحله بعد، محاسبه واریانس S توسط یکی از روابط زیر محاسبه شد:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (7)$$

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (8)$$

که n و m معرف تعداد دنباله‌هایی است که در آن‌ها حداقل یک داده تکراری وجود دارد. t نیز بیانگر فراوانی داده‌هایی با ارزش یکسان در یک دنباله (تعداد گره‌ها) است. درنهایت نیز

دو شاخص خشکی UNEP و دومارتن نشان داد که ایستگاه‌های پربارش مطالعه حاضر یعنی بندرانزلی، رشت و رامسر در مناطق بسیار مرطوب قرار گرفته‌اند. کمترین میزان بارش ایستگاه‌های مطالعاتی مربوط به ایستگاه زابل با مقدار بارش ۵۴/۲ میلی‌متر است. بعد از ایستگاه زابل، ایستگاه‌های بم و ایرانشهر با مقادیر بارشی ۵۷/۷ و ۱۱۰/۲ میلی‌متر در بین ایستگاه‌های مطالعاتی جایگاه کم‌بارش را به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به نتایج شاخص‌های خشکی مورد بررسی در این مطالعه، مشاهده می‌شود که در شاخص UNEP ایستگاه‌های کم‌بارش پژوهش حاضر در مناطق بسیار خشک و در شاخص دومارتن در مناطق خشک واقع شده‌اند.

نتایج بررسی دمای ایران در مقیاس زمانی سالانه

با توجه به اینکه دما به‌عنوان یکی از مؤثرترین عناصر جوی است، در پژوهش حاضر نیز در مقیاس زمانی سالانه (شکل ۲ د) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی دمای متوسط و تغییرات آن در طول دوره آماری ۴۵ ساله بیانگر این است که در بین ۴۰ ایستگاه مورد نظر پژوهش حاضر، ایستگاه بندرلنگه بالاترین دمای متوسط سالانه را با میزان ۲۷/۸ درجه سلسیوس به خود اختصاص داده است. ایستگاه‌های جزیره کیش با میزان دمای ۲۷/۲ و اهواز با دمای ۲۶/۲ بعد از بندرلنگه جزو گرم‌ترین ایستگاه‌های منتخب پژوهش حاضر هستند. نتایج بررسی دمای متوسط ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که گرم‌ترین ایستگاه‌ها با مناطق بسیار خشک در شاخص خشکی UNEP منطبق‌اند. براساس شاخص خشکی دومارتن این ایستگاه‌ها در مناطق خشک (بندرلنگه و جزیره کیش) و نیمه‌خشک (اهواز) قرار دارند. همچنین نتایج بررسی دمای متوسط ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که کمترین دما و به عبارتی دیگر خنک‌ترین ایستگاه مربوط به ایستگاه اردبیل با میزان دمای ۹/۵ است. ایستگاه‌های زنجان و سقز به ترتیب با میزان دماهای ۱۱/۳ و ۱۱/۹ درجه سلسیوس در رده‌های بعدی خنک‌ترین ایستگاه‌ها واقع شده‌اند. با توجه به شاخص خشکی UNEP ایستگاه‌های اردبیل و زنجان در مناطق نیمه‌خشک و ایستگاه سقز در مناطق نیمه‌مرطوب قرار گرفته است؛ این درحالی است که براساس شاخص خشکی دومارتن، ایستگاه‌های اردبیل و زنجان از اقلیم

آماره Z به کمک رابطه زیر استخراج می‌شود:

$$Z = \begin{cases} \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (9)$$

با فرض دو دامنه آزمون روند، فرضیه صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که شرط زیر برقرار باشد:

$$Z1 \leq Z\alpha/2 \quad (10)$$

که α سطح معناداری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و $Z\alpha$ آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معناداری α است که با توجه به دو دامنه بودن آزمون، $\alpha/2$ استفاده شده است. در بررسی حاضر این آزمون برای سطوح اعتماد ۹۵٪ به کار گرفته شده است. در صورتی که آماره Z مثبت باشد، روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن روند نزولی در نظر گرفته می‌شود (من، ۱۹۴۵؛ کندال، ۱۹۴۸؛ عزیززاده و جوان، ۲۰۱۵).

نتایج

شناخت شرایط اقلیمی و چگونگی بروز پارامترهای شاخص هواشناسی یعنی بارندگی و دما در یک محل از عوامل تعیین‌کننده اقلیم آن منطقه در درازمدت است. بارش یکی از متغیرهای اساسی اقلیمی برای ارزیابی مهبایی بالقوه منابع آب است که اگر توزیع زمانی و مکانی آن متناسب باشد، همگنی و یکدستی منابع آب از ثبات بیشتری برخوردار است و عرضه دائمی منابع آب امکان‌پذیر می‌شود (نیلوفری، ۲۰۱۹). از آنجاکه عناصر بارش، تبخیر تعرق و دما، اثرات تأثیرگذاری روی خصوصیات اقلیمی هر منطقه دارند که نتیجه آن خشکی یا مرطوبی اقلیم است، در ادامه به بررسی نتایج هرکدام از عناصر مذکور پرداخته خواهد شد.

نتایج بررسی بارش ایران در مقیاس زمانی سالانه

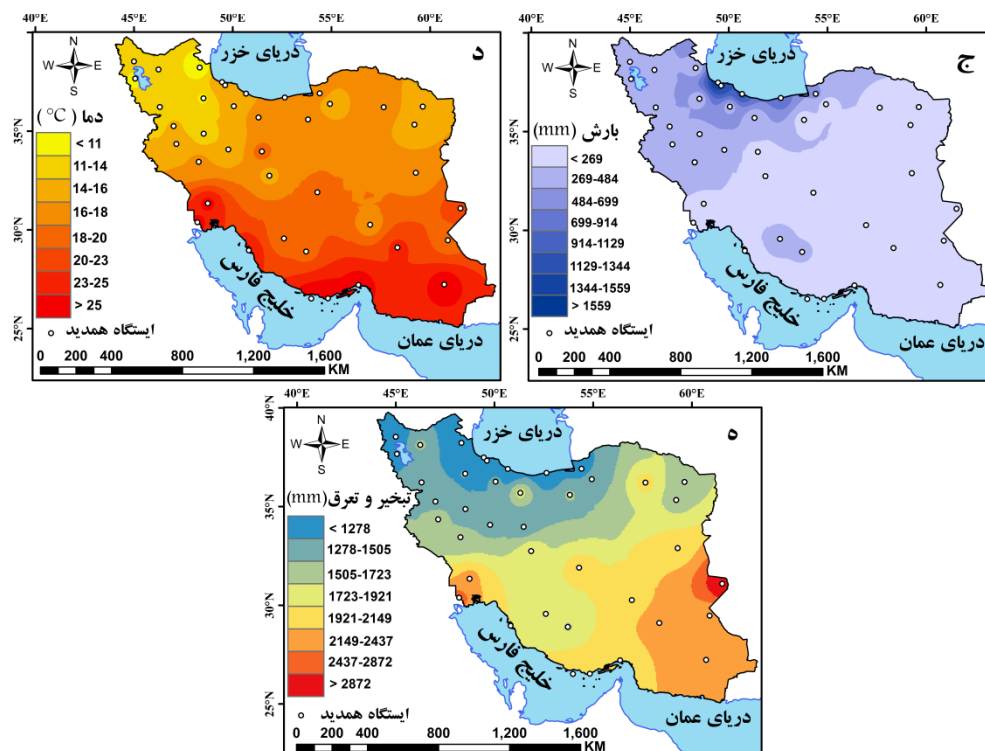
میانگین مجموع بارش سالانه ۴۰ ایستگاه منتخب پژوهش حاضر در طی دوره آماری ۴۵ ساله (۱۹۷۶-۲۰۲۰) (شکل ۲ ج) نشان می‌دهد که بیشترین میزان بارش متعلق به ایستگاه بندرانزلی با مقدار بارش ۱۷۹۲/۰ میلی‌متر است. پس از آن ایستگاه‌های رشت و رامسر به ترتیب با مقادیر بارشی ۱۳۳۵/۳ و ۱۲۴۲/۵ در رده‌های بعدی قرار دارند. پیش‌تر نیز نتایج هر

که براساس شاخص‌های خشکی مورد بررسی پژوهش حاضر، منطبق بر مناطق بسیار خشک (UNEP) و خشک (دومارتن) هستند. درعین حال کمترین میزان تبخیر تعرق متعلق به ایستگاه رامسر با مقدار ۸۴۱/۴ میلی‌متر است. در رده‌های بعدی، ایستگاه‌های رشت و بندرانزلی به ترتیب با میزان ۸۵۴/۹ و ۸۹۹/۷ قرار گرفته‌اند. چنان‌که پیش‌تر نیز مشاهده شد که در شاخص‌های خشکی UNEP و دومارتن، ایستگاه‌های با کمترین میزان تبخیر تعرق در مناطق بسیار مرطوب واقع شده‌اند. نتایج این بخش از پژوهش حاضر با نتایج مطالعه یحیوی دیزج و همکاران (۲۰۲۳) که در پژوهشی دیگر به ارزیابی تغییر مقدار تبخیر تعرق مرجع در ایران طی دهه‌های اخیر پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در مقیاس سالانه روش فائونپمن مانیتث کمترین مقدار تبخیر تعرق مرجع، متعلق به مناطق شمالی و شمال غربی و بیشترین مقدار آن مربوط به مناطق جنوب شرقی و جنوبی است.

مدیرانه‌ای برخوردارند و ایستگاه سقز در مناطق نیمه‌مرطوب قرار دارد.

نتایج بررسی تبخیر تعرق مرجع در مقیاس سالانه

در این پژوهش به منظور بررسی تبخیر تعرق مرجع در گستره ایران، معادله فائونپمن مانیتث ۵۶ که توسط سازمان فائو به‌عنوان روش استاندارد برای تعیین تبخیر تعرق مرجع و درستی‌سنجی سایر روش‌ها توصیه شده، مورد استفاده واقع شد که در شکل (۲) قابل مشاهده است. براساس نتایج حاصل از محاسبه تبخیر تعرق مرجع در این پژوهش ایستگاه زابل در بین ۴۰ ایستگاه مورد مطالعه در دوره آماری ۴۵ ساله با مقادیر عددی ۳۳۶۸/۶ میلی‌متر بیشترین تبخیر تعرق را به خود اختصاص داده است. پس از آن، ایستگاه‌های بم و آبادان با مقادیر تبخیر تعرق ۲۳۵۶/۹ و ۲۵۶۱/۰ بیشترین میزان تبخیر تعرق را در بین سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهند



شکل (۲): نقشه‌های بارش mm/year (ج)، دما °C (د)، و تبخیر تعرق مرجع mm/year (ه) ۱۹۷۶-۲۰۲۰

Figure (2): Maps of precipitation mm/year (c), temperature °C (d) and Reference evapotranspiration mm/year (e) 1976-2020

نشان می‌دهد، می‌توان دریافت که اغلب ایستگاه‌های واقع در مناطق جنوبی و جنوب شرقی از جمله ایستگاه‌های اصفهان، اهواز، ایرانشهر، آبادان، بم، بندرعباس، بندرلنگه، بیرجند،

نتایج حاصل از شاخص خشکی UNEP

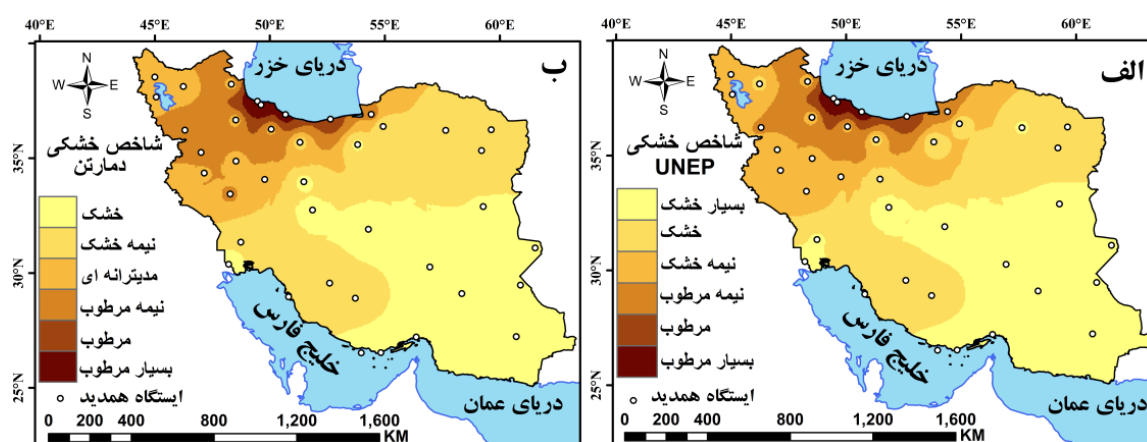
براساس شکل (۳ الف) که نتایج حاصل از شاخص خشکی UNEP را طی بازه زمانی ۴۵ ساله از سال ۱۹۷۶ تا سال ۲۰۲۰

مشاهده می‌شود که بخش اعظم مناطق جنوبی و جنوب شرقی ایران که شامل ایستگاه‌های اصفهان، ایرانشهر، آبادان، بم، بندرعباس، بندرلنگه، بیرجند، جزیره کیش، زابل، زاهدان، سمنان، کاشان، کرمان و یزد است، دارای اقلیم خشک هستند. بررسی شاخص خشکی دومارتن نشان می‌دهد که برخی از ایستگاه‌های مطالعاتی پژوهش حاضر که ایستگاه‌های اهواز، بوشهر، تربت حیدریه، تهران، سبزوار، شاهرود، شیراز، فسا و مشهد هستند، در مناطق نیمه‌خشک قرار گرفته‌اند. در عین حال بخشی از مناطق غربی و شمال غربی کشور که شامل ایستگاه‌های اراک، اردبیل، ارومیه، تبریز، خوی، زنجان، قزوین، کرمانشاه و همدان است، در شرایط اقلیمی مدیترانه‌ای قرار می‌گیرند. براساس شاخص دومارتن در این پژوهش، مناطق نیمه‌مرطوب ایستگاه‌های خرم‌آباد، سقز، سنندج و گرگان را دربرمی‌گیرد. تنها ایستگاه مطالعاتی پژوهش حاضر که در منطقه مرطوب واقع شده، ایستگاه بابلسر است. در نهایت، با مشاهده شکل (۳ ب) می‌توان دریافت که نوار ساحلی شمال کشور مناطق بسیار مرطوب را به خود اختصاص داده که در این بین، سه ایستگاه مطالعاتی این پژوهش را که شامل ایستگاه‌های بندرانزلی، رامسر و رشت هستند، در خود جای داده است. نتایج حاصل از شاخص خشکی دومارتن و مقایسه آن با شاخص UNEP نشان داد که این شاخص نیز از عوامل محلی و فرامحلی تبعیت می‌کند.

جزیره کیش، زابل، زاهدان، سبزوار، کرمان و یزد در مناطق بسیار خشک واقع شده‌اند. مطابق شاخص UNEP مناطق خشک ایستگاه‌های بوشهر، تبریز، تربت حیدریه، تهران، سمنان، شاهرود، شیراز، فسا، کاشان و مشهد را دربرگرفته است؛ این درحالی است که ایستگاه‌های اراک، اردبیل، ارومیه، خرم‌آباد، خوی، زنجان، سنندج، قزوین، کرمانشاه و همدان شرایط نیمه‌خشکی را تجربه کرده‌اند. دو ایستگاه از ایستگاه‌های مطالعاتی پژوهش حاضر که در مناطق نیمه‌مرطوب واقع شده‌اند، ایستگاه‌های سقز و گرگان هستند. ایستگاه بابلسر در بین ایستگاه‌های مطالعاتی تنها ایستگاهی است که در مناطق مرطوب واقع شده است. در نهایت، مناطق بسیار مرطوب متعلق به ایستگاه‌های رشت، رامسر و بندرانزلی است. نتایج کلی حاصل از شاخص خشکی UNEP در این پژوهش نشان داد که آرایش جغرافیایی الگوی خشکی تابع عوامل محلی (ارتفاعات و عرض جغرافیایی) و بیرونی (عناصر گردش عمومی جو) بوده که حاکی از افزایش خشکی از شمال به جنوب و از غرب به شرق است.

نتایج حاصل از شاخص خشکی دومارتن

براساس شاخص خشکی دومارتن اقلیم مناطق مختلف جهان را می‌توان به شش طبقه مختلف اقلیمی دسته‌بندی کرد؛ این درحالی است که هر شش نوع اقلیم مبتنی بر این شاخص خشکی در ایران موجود است. شکل (۳ ب) این شاخص را از سال ۱۹۷۶ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. با توجه به این شکل



شکل (۳): طبقه‌بندی اقلیمی ایران براساس شاخص‌های خشکی UNEP و دومارتن ۱۹۷۶-۲۰۲۰

Figure (2): Climatic classification of Iran based on UNEP and De Martonne aridity indices 1976-2020

ایستگاه‌های اهواز، ایرانشهر، بندر لنگه و کاشان روند کاهشی شاخص خشکی UNEP را در سطح اطمینان ۹۰٪ نمایش می‌دهند. این بخش از نتایج با نتایج پژوهش طاوسی در سال ۱۳۹۵ که بررسی روند تغییرات بارندگی و شاخص خشکی UNEP در پهنه‌های آب‌وهوایی غرب و شمال غرب ایران را مورد توجه قرار داد و همچنین با نتایج رنجبر و طباطبایی که در سال ۱۴۰۱ که به بررسی روند شاخص خشکی در ایستگاه‌های نوار شمالی ایران طی دوره ۱۹۸۲-۲۰۱۹ پرداختند، همسوست. در نهایت، پژوهش حاضر نشان داد که ایستگاه‌های اراک، اصفهان، بوشهر، تهران، جزیره کیش، رامسر، رشت، زاهدان، زنجان، شاهرود، شیراز و قزوین در سری داده‌ها فاقد روند هستند.

نتایج روند شاخص خشکی دومارتن

با توجه به شکل (۴) روند شاخص خشکی دومارتن، نتایج حاصل از آزمون ناپارامتریک من-کندال در دوره آماری ۴۵ ساله نشان‌دهنده آن است که تنها ایستگاهی که در بین سری داده‌های مطالعاتی دارای روند معنادار کاهشی در سطح اطمینان ۹۹٪ است، ایستگاه سنندج است؛ در حالی که ایستگاه‌های اردبیل، بندرعباس، بیرجند، کرمان، گرگان، مشهد و یزد جزو ایستگاه‌هایی هستند که روند کاهشی شاخص خشکی دومارتن را در سطح اطمینان ۹۵٪ به خود اختصاص داده‌اند. در عین حال ایستگاه‌های بندر لنگه، تربت حیدریه، زاهدان، سبزوار، شاهرود و یزد روند کاهشی شاخص خشکی دومارتن را در سطح اطمینان ۹۰٪ نشان می‌دهند. در نهایت، سایر ایستگاه‌های پژوهش حاضر که در شکل (۴) روند شاخص خشکی دومارتن، قابل مشاهده هستند، در سری داده‌های مورد بررسی فاقد روند هستند.

نتایج تحلیل روند سری زمانی یک ایستگاه منتخب در هر اقلیم در جدول (۲) قابل مشاهده است. در این جدول، یک ستاره روند معناداری در سطح ۹۵٪ و سه ستاره معناداری در سطح ۹۹٪ را نشان می‌دهد. همان‌طور که روند ایستگاه‌های منتخب اقلیم‌های شش‌گانه نشان می‌دهد، دارای روند کاهشی یا منفی هستند که این نتایج بیانگر آن است که کاهش مقدار شاخص خشکی، گویای خشکی بیشتر منطقه و بالعکس

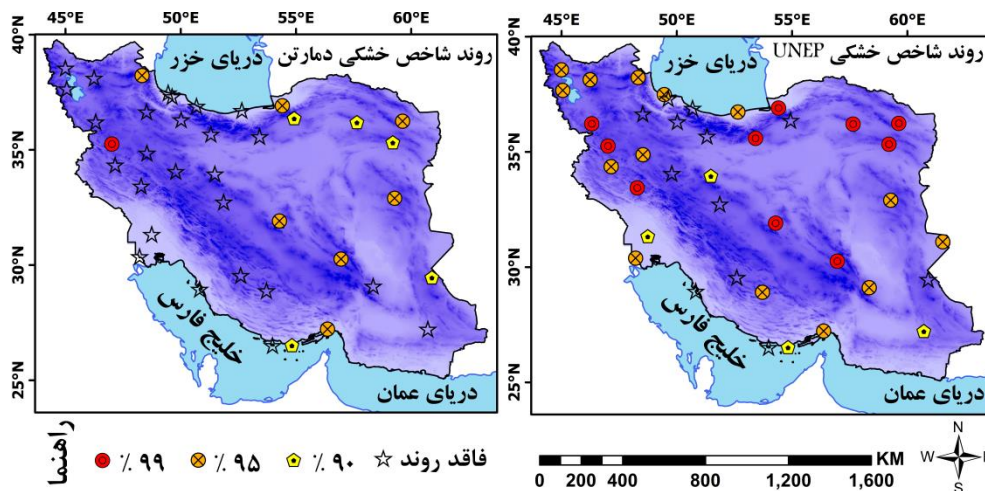
نتایج تحلیل روند ناپارامتریک من-کندال

افزایش مناطق خشک، خشکی را به یک مشکل عمده زیست‌محیطی در مناطق مختلف زمینی و به‌ویژه ایران تبدیل کرده است. از آنجاکه کاهش و یا افزایش خشکی به معنای تغییر شکل زندگی در مناطق مختلف ایران است، به منظور شناسایی روندهای کاهشی و افزایشی شاخص‌های خشکی مورد نظر در پژوهش حاضر (UNEP و دومارتن)، با استفاده از روش ناپارامتریک من-کندال، روند شاخص‌های مذکور به صورت سالانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت که نتایج بررسی‌ها در پی می‌آیند.

نتایج روند شاخص خشکی UNEP

بر اساس شکل (۴) روند شاخص خشکی UNEP، نتایج آزمون ناپارامتریک من-کندال در طول دوره آماری ۴۵ ساله نشان داد که در بین سری‌های ایستگاه‌های مورد بررسی، بیشترین روند تأییدشده توسط آزمون من-کندال در سری داده‌های ایستگاه‌های تربت حیدریه، خرم‌آباد، سبزوار، سقز، سمنان، سنندج، کرمان، گرگان، مشهد و یزد مشاهده شد؛ بدین صورت که ایستگاه‌های فوق در آزمون من-کندال در سطح اطمینان ۹۹٪ دارای روند کاهشی و معنی‌دار بوده‌اند. همچنین روند خشکی برای شاخص خشکی UNEP حاکی از این امر است که در طول دوره آماری مورد نظر، شرایط خشکی در بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه رو به افزایش بوده است. این بخش از نتایج پژوهش حاضر با نتایج پایان‌نامه کارشناسی ارشد نیلوفری در سال ۱۳۹۹ که در دانشگاه سیستان و بلوچستان به بازنگری طبقه‌بندی و منطقه‌بندی اقلیم استان سیستان و بلوچستان پرداختند، مطابقت دارد. در این پژوهش، سری داده‌های مورد مطالعه در سطح اطمینان ۹۵٪ شامل ایستگاه‌های اردبیل، ارومیه، آبادان، بابلسر، بزم، بندرانزلی، بندرعباس، بیرجند، تبریز، خوی، زابل، فسا، کرمانشاه و همدان است که در این ایستگاه‌ها مشاهده می‌شود که شاخص خشکی UNEP در دوره آماری مورد مطالعه کاهشی بوده است. همچنین

می باشد (نیلوفری، ۲۰۱۹).



شکل (۴): توزیع مکانی روند سالانه شاخص های خشکی UNEP و دومارتن ۱۹۷۶-۲۰۲۰
Figure (4): Spatial distribution of annual trend of UNEP and De Martonne drought indices 1976-2020

جدول (۲): نتایج تحلیل روند سری زمانی یک ایستگاه منتخب در هر اقلیم

Table (2): The results of time series trend analysis of a selected station in each climate

اقلیم	نام ایستگاه	روند	معناداری	شیب روند
خشک	کرمان	-۴/۹۴	***	-۰/۰۰۹
نیمه خشک	مشهد	-۳/۵۹	***	-۰/۰۰۳
مدیترانه ای	اردبیل	-۲/۱۲	*	-۰/۰۸۲
نیمه مرطوب	گرگان	-۴/۹۳	***	-۰/۰۰۹
مرطوب	بابل	-۲/۲۰	*	-۰/۰۰۶
بسیار مرطوب	بندر انزلی	-۲/۳۴	*	-۰/۰۰۹

بحث و نتیجه گیری

نتایج حاصل از طبقه بندی شاخص خشکی UNEP نشان داد که از بین ۴۰ ایستگاه مطالعاتی پژوهش حاضر ۱۴ ایستگاه دارای اقلیم بسیار خشک اند. همچنین ۱۰ ایستگاه از ایستگاه های منتخب نیز در مناطق خشک قرار گرفته اند. علاوه بر این ها ۸ ایستگاه نیز از ایستگاه های مطالعاتی در مناطق نیمه خشک هستند. با توجه به نتایج پژوهش حاضر بیش از سه چهارم ایستگاه های مطالعاتی که از اقلیم بسیار خشک، خشک و نیمه خشکی برخوردارند، از لحاظ اقلیمی از مستعدترین اقلیم ها برای وقوع پدیده بیابان زایی به شمار می روند. در عین حال نتایج به دست آمده از شاخص خشکی دومارتن نیز نتایج شاخص خشکی UNEP را تأیید کرده و بر آن منطبق است. نتایج توزیع مکانی شاخص های مذکور نشانگر آن است که طبقات بسیار خشک، خشک، نیمه خشک و مدیترانه ای در مناطق جنوب

در این پژوهش به منظور تحلیل زمانی و مکانی شاخص های خشکی UNEP و دومارتن در ایران طی دوره آماری ۴۵ ساله از سال ۱۹۷۶ تا ۲۰۲۰ ابتدا داده های دماهای بیشینه و کمینه (°C)، متوسط رطوبت نسبی (%، سرعت باد (m/s) و ساعت آفتابی (h) ۴۰ ایستگاه سینوپتیک از سازمان هواشناسی کشور اخذ و سپس با استفاده از شاخص های خشکی UNEP و دومارتن مناطق مختلف کشور طبقه بندی اقلیمی گردید. برای بررسی عناصر تأثیرگذار در شاخص های فوق از جمله بارش، دما و تبخیر تعرق مرجع در سطح کشور اقدام به پهنه بندی عناصر مذکور شد. در نهایت با استفاده از آزمون من-کندال روند تغییرات شاخص های خشکی مورد نظر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

مطالعاتی است. این روند نزولی در سری‌های زمانی شاخص‌های مورد بررسی، یکی از چالش‌های اصلی مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به‌ویژه ایران است؛ زیرا این مطلب گویای این مسئله است که بیشتر مناطق ایران تمایل به خشکی دارند و در طبقات بسیار شدید و شدید خطر بیابان‌زایی قرار می‌گیرند. با توجه به اهمیت موضوع و ضرورت مطالعه آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به‌خصوص ایران که دچار تنش آبی است و به بیانی دیگر با محدودیت شدید منابع آب مواجه است، پیشنهاد می‌گردد که در مطالعات آینده به‌منظور مدیریت کشاورزی با استفاده از شاخص‌های خشکی UNEP و دومارتن، توزیع خشکی در فصل رشد مورد بررسی قرار گیرد.

غرب، جنوب، جنوب‌شرق، مرکز، شمال‌غرب، غرب، شمال شرق واقع شده‌اند. همچنین هر دو شاخص مورد بررسی پژوهش حاضر حاکی از آن است که مناطق شمالی، ارتفاعات البرز مرکزی و سواحل شمالی دارای اقلیم نیمه‌مرطوب، مرطوب و بسیار مرطوب هستند. نتایج حاصل از بررسی بارش، دما و تبخیر تعرق مرجع نشان‌دهنده آن است که در مناطق خشک کاهش میزان بارش، افزایش دما به‌همراه افزایش تبخیر تعرق مرجع سبب افزایش نیاز آبی گیاهان و کاهش رطوبت خاک می‌شود. نتایج آزمون من-کندال روند شاخص‌های خشکی سالانه UNEP و دومارتن نیز حاکی از روند کاهش معنادار در سطوح اطمینان ۹۹، ۹۵ و ۹۰٪ در بیش از نیمی از ایستگاه‌های

منابع

- Alaei Taleghani, M., 2003. *Geomorphology of Iran*, Tehran, Qoms Publishing House, 5-17
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: Fao.
- Azizzadeh, M., & Javan, K. (2015). Analyzing trends in reference evapotranspiration in northwest part of Iran. *Journal of Ecological Engineering*, 16(2), 1-12.
- Bachmair, S., Stahl, K., Collins, K., Hannaford, J., Acreman, M., Svoboda, M., ... & Overton, I. C. 2016. Drought indicators revisited: the need for a wider consideration of environment and society. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 3(4), 516-536.
- Bagheeda, M., Alijani, B., & Ziaian, P., 2011. Evaluating the possibility of using the NDVI index to analyze and monitor droughts in Esfahan Province. *Arid Regions Geographic Studies*, 2(4): 1-16.
- Fathi Taperasht, A., Shafizadeh-Moghadam, H., & Kouchakzadeh, M. (2022). Spatial-temporal analysis of Iran's climatic classification based on Domartén method and Mann-Kendall test in the statistical period of 1995-2019. *Environmental Sciences*, 20(3), 137-154.
- Fajardo, A., Gazol, A., Meynard, P. M., Mayr, C., Martínez Pastur, G. J., Peri, P. L., & Camarero, J. J. 2023. Climate change-related growth improvements in a wide niche-breadth tree species across contrasting environments. *Annals of Botany*, mcad053.
- Iran Meteorological Organization 2022. product & services database, from <https://irimo.ir/eng/wd/720-Products-Services.html>
- Kaviani, M., & Alijani, B., 2013. Basics of Hydrology and Meteorology, Tehran, Samit Publications.
- Kendall, M.G. 1948. Rank correlation methods, New York: Griffin.
- Mann, H.B. 1945. Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 13(3), 245-259
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. 2010. A review of drought concepts. *Journal of hydrology*, 391(1-2), 202-216.
- My, L., Di Bacco, M., & Scorzini, A. R. 2022. On the use of gridded data products for trend assessment and aridity classification in a Mediterranean context: The case of the Apulia Region. *Water*, 14(14), 2203.
- Niloufari, N., 2019. Revision of the classification and regionalization of the climate of Sistan and Baluchistan province. Master's thesis. University of Sistan and Baluchestan.
- Park, Chang-Eui, Su-Jong Jeong, Manoj Joshi, Timothy J. Osborn, Chang-Hoi Ho, Shilong Piao, Deliang Chen et al. Keeping global warming within 1.5 C constrains emergence of aridification. *Nature Climate Change* 8, no. 1 .2018. 70-74.
- Pokhrel, Y., Felfelani, F., Satoh, Y., Boulange, J., Burek, P., Gädeke, A., ... & Wada, Y. 2021. Global terrestrial water storage and drought severity under climate change. *Nature Climate Change* 11(3), 226-233.
- Ranjbar, f., tabatabaai, h .2022. Investigation of the trend of Aridity index in the northern stations of Iran during the period 1982-2019, *Climate Change Research*, 3(9), 12-24.
- Taheri Qazvini, A., & Carrion, D .2023. A Spatiotemporal Drought Analysis Application Implemented in the Google Earth Engine and Applied to Iran as a Case Study. *Remote*

- Sensing*, 15(9), 2218.
19. Tavousi, T., 2018. Investigating the trend of fluctuations in annual precipitation and UNEP aridity index of climatic zones in the west and northwest of Iran, *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)* 27 (105), 85-96.
 20. Tegos, A., Stefanidis, S., Cody, J., & Koutsoyiannis, D. 2023. On the Sensitivity of Standardized-Precipitation-Evapotranspiration and Aridity Indexes Using Alternative Potential Evapotranspiration Models. *Hydrology*, 10(3), 64.
 21. Ullah, S., You, Q., Sachindra, D. A., Nowosad, M., Ullah, W., Bhatti, A. S., ... & Ali, A. 2022. Spatiotemporal changes in global aridity in terms of multiple aridity indices: An assessment based on the CRU data. *Atmospheric Research*, 268, 105998.
 22. United Nation, Environment Management Group, 2011.
 23. Wang, F., & Zhang, J. 2020. Arid/humid patterns over Asia in response to national-committed emission reductions under the Paris agreement. *Progress in Earth and Planetary Science*, 7(1), 1-10.
 24. Wang, X., Jiang, D., & Lang, X. 2021. Future changes in Aridity Index at two and four degrees of global warming above preindustrial levels. *International Journal of Climatology*, 41(1), 278-294.
 25. Wu, B., Ma, Z., & Yan, N. 2020. Agricultural drought mitigating indices derived from the changes in drought characteristics. *Remote sensing of environment* 244: 111813.
 26. Wu, X., Zhang, C., Dong, S., Hu, J., Tong, X., & Zheng, X. 2023. Spatiotemporal dynamics of the aridity index in Xinjiang over the past 60 years.
 27. Yahyavi Dizaj, A., Javan, K., Khaledi, S., & Akbari Azirani, T. 2023. Evaluation of Changes in Reference Evapotranspiration in Iran Over the Last Decades. *Desert Management*, 11(1), 39-58.
 28. Zare, M., Poormohammadi, S., & Sodaizade, H. (2016). Climatic parameters Aridity indices Reference Evapotranspiration Statistical distribution Iran. *Geography and Environmental Planning*, 27(2), 103-118.
 29. Zhang, C., Ren, Y., Cao, L., Wu, J., Zhang, S., Hu, C., & Zhujie, S. 2022a. Characteristics of dry-wet climate change in China during the past 60 years and its trends projection. *Atmosphere*, 13(2), 275.
 30. Zhang, Y., Long, A., Lv, T., Deng, X., Wang, Y., Pang, N., ... & Gu, X. 2022b. Trends, Cycles, and Spatial Distribution of the Precipitation, Potential Evapotranspiration and Aridity Index in Xinjiang, China. *Water*, 15(1), 62.
 31. Zheleznova, I., Gushchina, D., Meiramov, Z., & Olchev, A. 2022. Temporal and spatial variability of dryness conditions in Kazakhstan during 1979–2021 based on reanalysis data. *Climate*, 10(10), 144.

Investigating Temporal and Spatial Variations of UNEP and De Martonne Aridity Indices in Iran From 1976 to 2020

Khadijeh Javan,* Ameneh Yahyavi Dizaj[†]

Received: 28/11/2023

Accepted: 02/03/2024

Extended Abstract

Introduction: As one of the most threatening natural hazards that has plagued humans for a long time, drought is considered a main natural disaster that affects various aspects of human life (Mishra and Sin, 2010). On the other hand, while dryness is typically associated with desert lands, little precipitation, and very thin vegetation by laymen, it refers to a kind of permanent climatic feature of a region, showing the insufficient amount of precipitation required for the growth of life in the region (Kaviani and Alijani, 2010).

Materials and methods: To analyze the temporal and spatial variations of UNEP and De Martonne aridity indices in Iran throughout the study period (1976-2020), this study collected the data of forty synoptic stations in terms of the maximum and minimum temperatures (°C), average relative humidity (%), wind speed (m/s), and sunshine hours (h) using the information published by the Iranian meteorological organization. Then, different regions of Iran were classified in terms of UNEP and De Martonne aridity indices. Moreover, to investigate the influence of the factors involved in those indices such as precipitation, temperature, and reference evapotranspiration, the factors were zoned. Finally, the trend of changes in dryness indices was analyzed using the Mann-Kendall test.

Results: The results of the UNEP aridity index classification indicated that from among the forty stations investigated in this study, fourteen stations had a very dry climate. Moreover, ten stations were found to have been located in dry areas and eight in semi-arid regions. On the other hand, more than three-quarters of the stations with very dry, dry, and semi-arid climates were identified as the most susceptible areas to desertification. On the other hand, the results of the De Martonne aridity index analysis confirmed the results found for the analysis of the UNEP index. As for the spatial distribution of the aforementioned indices, it was found that very dry, dry, semi-dry, and Mediterranean classes were located in the southwestern, southern, southeastern, central, northwestern, western, and northeastern regions. The results also revealed that the northern regions, central Alborz highlands, and northern coasts had semi-humid, humid, and very humid climates.

On the other hand, the results of the investigation of precipitation, temperature, and reference evapotranspiration suggested that in arid regions, the plants' demand for water was increased and the soil moisture was decreased due to the decrease in precipitation and the increase in temperature and reference evapotranspiration. Moreover, the results of the Mann-Kendall test for the UNEP and De Martonne indices showed a significant decreasing trend in the confidence level by 99%, 95%, and 90% in more than half of the studied stations, indicating a main challenge in arid and semi-arid regions worldwide, especially in Iran.

This study highlighted the fact that most of Iran's regions were subject to dryness, being placed in severe and

1. Associate Professor of Geography, Faculty of literature and humanities, Urmia University, Urmia, Iran; kh.javan@urmia.ac.ir

2. Ph.D Student in Climatology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

very severe desertification risk classes. Therefore, considering the significance of the subject and the necessity of its investigation in arid and semi-arid regions of the world, especially Iran, where water stress is high and water resources are critically limited, it is suggested that for more proper agricultural management, further studies be conducted on the distribution of aridity in the growing season in terms of UNEP and De Martonne aridity indices.

Discussion and Conclusion: This study sought to investigate the temporal and spatial variations of UNEP and De Martonne aridity indices in Iran using the data collected from forty synoptic stations concerning maximum and minimum temperature rates ($^{\circ}\text{C}$), average relative humidity (%), wind speed (m/s), and sunshine hours (h). The study also tried to classify the Iranian climate in terms of such aridity indices. To this end, the factors affecting the indices such as precipitation, temperature, and reference evapotranspiration were zoned, and the trend of changes in aridity indices was analyzed using the Mann-Kendall test. The results of the UNEP index showed that more than three-quarters of the stations have a very dry, arid, semi-arid, and Mediterranean climate and in terms of spatial distribution, they are spread in the southwest, south, southeast, center, northwest, west, and northeast regions of the country, which are prone to the occurrence of desertification in terms of climate.

Moreover, the study found that less than a quarter of the stations with semi-humid, humid, and very humid climates were located in the northern regions, central Alborz highlands, and northern coasts. Also, the results of the De Martonne aridity index were reported as consistent with the UNEP index. On the other hand, the results of the investigation of precipitation, temperature, and reference evapotranspiration revealed that in dry areas, the decrease in precipitation and increase in temperature and reference evapotranspiration rates caused an increase in the plants' demand for water and a decrease in soil moisture. Moreover, the results of the Mann-Kendall test indicated a significant decrease in the confidence level by 99%, 95%, and 90% in more than half of the stations.

Keywords: Iran, UNEP Index, De Martonne Index, Trend, Mann-Kendall Test.