

بررسی خشکسالی در ایران با کاربست شاخص کیچ - بایرام (KBDI) و ارزیابی آن با رطوبت خاک سطحی (SSM) سنجنده‌های مایکروویو فعال

کبری شجاعی زاده^۱، محمود احمدی^{۲*} و عباسعلی داداشی رودباری^۳

^۱ دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲ دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۳ پژوهشگر پسادکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۷، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۳)

چکیده

خشکسالی طی دهه‌های اخیر افزایش قابل توجهی در ایران داشته است. افزایش خشکسالی‌ها، پیامدهای منفی بسیاری در حوزه‌های مختلف کشاورزی، منابع آب و آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع دارد. هدف از این پژوهش بررسی وضعیت خشکسالی در نواحی رویشی ایران با استفاده از شاخص خشکسالی کیچ-بایرام (KBDI) است. برای این منظور از شاخص خشکسالی KBDI منتج شده از مجموعه داده مرکز پیش‌بینی میان مدت جو اروپا (ECMWF) نسخه پنجم (ERA5) با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی طی دوره آماری ۱۹۸۱-۲۰۲۰ استفاده شده است. همچنین محصول ترکیبی رطوبت خاک (SSM) از سنجنده‌های مایکروویو AMI-WS (ماهواره‌های ERS-1 و ERS-2) و ASCAT (ماهواره MetOp-A-B) با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی برای ارزیابی نتایج شاخص خشکسالی KBDI و همچنین وضعیت رطوبتی خاک استفاده شده است. نتایج نشان داد نواحی رویشی خلیج - عمانی و ایرانی - تورانی دارای رطوبت خاک بسیار پایین و خشکسالی بالایی در ایران هستند. مقدار رطوبت خاک نیز در این پهنه‌ها پایین و در متوسط پهنه‌ای به ترتیب برابر با ۱۲/۶۵ و ۱۸/۴۲ درصد است که در تمامی ماه‌ها تا حدودی ثابت بوده است به عبارت دیگر خشکی ویژگی غالب اقلیمی این مناطق است. بررسی ماهانه شاخص KBDI نشان از گسترش شدت خشکسالی به سمت غرب یعنی ناحیه رویشی زاگرس در ماه‌های گرم سال دارد. کاهش رطوبت خاک و خشکی در بخش عمده‌ای از ایران از اوایل بهار تا اواسط پاییز قابل مشاهده است. همچنین در ناحیه رویشی زاگرس از اواسط تابستان تا اواسط پاییز مقادیر افزایشی شاخص خشکسالی و کاهش رطوبت خاک قابل مشاهده است. کمینه شاخص خشکسالی در نواحی رویشی هیرکانی و ارسباران است. مطابقت نتایج شاخص‌های رطوبت خاک (SSM) محصول ماهواره‌ای و شاخص خشکسالی KBDI منتج شده از ECMWF و ERA5 نشان‌دهنده کارایی مناسب شاخص خشکسالی KBDI در شناسایی کانون‌های خشکسالی در ایران و بررسی الگوهای زمانی-مکانی رخداد خشکسالی است.

واژه‌های کلیدی: ایران، خشکسالی، رطوبت خاک، شاخص KBDI

۱ مقدمه

جریان رودخانه‌ها و افت سطح آب‌های زیرزمینی همراه است (ساتو و همکاران، ۲۰۲۲). پیامد دیگر خشکسالی‌های هواشناسی طولانی مدت، وقوع خشکسالی‌های کشاورزی است که زمانی رخ می‌دهند که رطوبت خاک در طول زمان به دلیل کمبود مداوم بارش کاهش می‌یابد (هایس و همکاران، ۲۰۰۷). سرانجام خشکسالی اقتصادی-اجتماعی پس از تداوم درازمدت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی رخ می‌دهد که تأثیرات نامطلوبی بر جامعه می‌گذارد.

تمامی انواع خشکسالی‌ها می‌توانند برای سیستم‌های طبیعی و انسانی مضر باشند. به عنوان مثال، کاهش منابع آبی در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و مخازن می‌تواند باعث کمبود آب شود که اغلب در ارتباط با افزایش تقاضای آب رخ می‌دهد. این امر همراه با کاهش آب موجود برای آبیاری و کاهش تولید محصولات زراعی به ویژه دیم رخ می‌دهد و در عین حال به اکوسیستم‌های آبی آسیب می‌رساند، زیرا باقیمانده آب قابل تخصیص برای مصارف انسانی استفاده می‌شود (دول و همکاران، ۲۰۰۹؛ ویسر و همکاران، ۲۰۱۰). علاوه بر این، تأثیرات خشکسالی با جنگل‌زدایی، تخریب زمین، تقاضای فزاینده آب و تغییر اقلیم تشدید می‌شود (ژائو و دای، ۲۰۱۵). همانطور که مشاهده می‌شود خشکسالی‌ها پیامدهای منفی گسترده‌ای را برای محیط زیست و جوامع انسانی به همراه دارند. درک پیامدهای خشکسالی اعم از محیط زیستی و یا اجتماعی-اقتصادی، به‌ویژه زمانی که چندین فصل یا سال متوالی به طول انجامیده و از شدت زیادی برخوردار باشد حائز اهمیت است (چکشی، ۱۳۸۰) و برنامه ریزان و تصمیم گیرندگان را قادر می‌سازد تا به این اثرات بهتر رسیدگی کنند و در نهایت، آمادگی خود را برای مقابله با خشکسالی بهبود بخشند.

خشکسالی یک پدیده طبیعی است که عمدتاً ناشی از بارش کمتر از مقدار نرمال در یک دوره طولانی مدت است (میشرا و سینگ، ۲۰۱۰؛ دای، ۲۰۱۳) که تقریباً در تمامی اقلیم‌ها رخ می‌دهد. از اواخر دهه ۱۹۷۰ به دلیل افزایش تبخیر (ناشی از افزایش دمای جهانی) رخداد خشکسالی در سطح جهان افزایش یافته است (شفیلد و وود، ۲۰۰۸؛ ترنبرث و همکاران، ۲۰۱۴). این پدیده به آرامی رخ می‌دهد و می‌تواند به شکل کوتاه مدت و یا طی چند ماه خاتمه یافته یا چندین سال ادامه یابد. دما، تبخیر-تعرق، تندی باد، رطوبت نسبی، زمان و ویژگی‌های بارش از جمله توزیع روزهای بارانی، شدت و مدت بارش و همچنین شروع و پایان آن نقش به‌سزایی در رخداد خشکسالی دارند (ویلهایت، ۲۰۰۰). علاوه بر این خشکسالی بر اثر تغییرات منابع آب سطحی و زیرسطحی، رطوبت خاک و غیره می‌تواند تشدید شود (کردپور و همکاران، ۱۳۹۸). برخلاف خشکی که ویژگی دائمی اقلیم است و مربوط به مناطق کم‌بارش است، در مقابل خشکسالی ویژگی موقت اقلیمی است و معمولاً با سه مشخصه اصلی شدت، مدت و فراوانی مشخص می‌شود (مرادی و عرفان زاده، ۱۳۸۰). با توجه به اینکه متغیرهای مختلفی در رخداد خشکسالی تأثیر دارند در مقایسه با سایر بلایای طبیعی توصیف زمانی-مکانی و تعیین دوره شروع و خاتمه خشکسالی دشوار است.

خشکسالی بسته به اینکه در کدام بخش از چرخه هیدرولوژیکی بیشترین تأثیر را می‌گذارد، می‌تواند اشکال مختلفی داشته باشد. به عنوان مثال، کاهش یا کمبود بارش در یک دوره زمانی طولانی (چند هفته تا چند سال) به صورت خشکسالی هواشناسی ظاهر می‌شود. با این حال، چنین خشکسالی‌هایی همواره در چرخه هیدرولوژیکی رخ می‌دهند (همارش و همکاران، ۲۰۲۲). تداوم طولانی مدت خشکسالی‌های هواشناسی منجر به خشکسالی‌های هیدرولوژیکی یا خشکسالی‌هایی می‌شود که با کاهش

اولین مطالعات آماری و کمی در این زمینه، توسط پالمردر سال ۱۹۶۵ انجام شد که خشکسالی را نتیجه کمبود بارش مستمر و غیرطبیعی دانسته است. پژوهشگرانی همچون لیتل و همکاران (۲۰۰۹) و زو و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعات مختلفی از شاخص شدت خشکسالی پالمربه ترتیب در ایالات متحده آمریکا و چین استفاده کرده و کارایی آن را تایید کردند. شاخص بارش استاندارد (SPI) به طور گسترده در پایش خشکسالی مورد استفاده قرار گرفته است (نارش کومار، ۲۰۰۹؛ استیج و همکاران، ۲۰۱۵). با این حال، SPI اثرات تغییرات دما را در نظر نمی‌گیرد. شاخص‌های خشکسالی بر اساس داده‌های سنجش از دور شامل شاخص تنش آبی (Crop Water Stress Index) (جکسون و همکاران، ۱۹۸۸)، شاخص خشکی دمایی-گیاهی (Temperature Vegetation Dryness Index) (وانگ و همکاران، ۲۰۰۴)، شاخص خشکسالی عمود اصلاح شده (Modified Perpendicular Drought Index) (گیلم و همکاران، ۲۰۰۷) و شاخص خشکسالی چندمتغیره استاندارد (Standardized Drought Index Multivariate) (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸) به طور گسترده‌ای در پایش خشکسالی کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و خشکسالی و تغییرات آن را در مناطق مختلف جهان مورد بررسی قرار داده‌اند. KBDI به عنوان یکی از پرکاربردترین شاخص‌های خشکسالی در مناطق زیادی همچون آفریقای جنوبی (وربسلت و همکاران، ۲۰۰۶)، لبنان (میتری و همکاران، ۲۰۱۵)، مالزی (آنیدین و امین، ۲۰۰۸)، هاوایی (دولینگ و همکاران، ۲۰۰۹)، کالیفرنیا (یون و همکاران، ۲۰۱۵)، غرب ایالات متحده (اباترگلو و ویلیامز، ۲۰۱۶) و جامائیکا (چارلتون و همکاران، ۲۰۲۲) استفاده شده است و کارایی آن برای شناسایی انواع خشکسالی تایید شده است.

محققان بسیاری در ایران با استفاده از شاخص پالمرب (بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۴؛ حجایی و همکاران، ۱۳۹۷)،

شاخص‌های خشکسالی برای پایش و بررسی مدت، شدت و گستره مکانی خشکسالی ارائه شده‌اند (میشرا و سینگ، ۲۰۱۰). هر شاخص به متغیرهای ورودی خاصی برای اندازه‌گیری خشکسالی نیاز دارد. متغیر بارش معمولاً به تنهایی یا در ترکیب با سایر متغیرها در این شاخص‌ها استفاده می‌شود (هیم، ۲۰۰۰). به عنوان مثال برای شاخص پالمرب (Palmer Drought Severity Index) (یو و همکاران، ۲۰۱۹) و کیچ-بایرام (Keetch-Byram drought index) (چارلتون و همکاران، ۲۰۲۲) بارش و دما متغیرهای اصلی هستند. این در حالی است که برای شاخص‌های بارش استاندارد (Standardized Precipitation Index) (لی و همکاران، ۲۰۲۰)، شاخص دهک‌ها (Deciles Index) (دیکچی و همکاران، ۲۰۲۰)، درصد نرمال بارش (Percent of Normal Index) (مرسین و همکاران، ۲۰۲۲) و بی‌هنجاری بارش (Rainfall Anomaly Index) (ناتاراجان و همکاران، ۲۰۲۳) بارش متغیر اصلی است.

در این میان شاخص‌های مختلف خشکسالی، شاخص کیچ-بایرام یکی از پرکاربردترین شاخص‌های خشکسالی جهت ارزیابی کمی و کیفی خشکسالی است. شاخص خشکسالی کیچ-بایرام (KBDI) به عنوان معیار سنجش خشکسالی هواشناسی یک شاخص عددی است که بر اساس متغیرهای دما و بارش روزانه، کمبود رطوبت در لایه‌های سطحی و زیر سطحی خاک را اندازه‌گیری می‌کند (لیتل و همکاران، ۲۰۱۶). دامنه خشکی خاک این شاخص از صفر تا ۲۰۰ متغیر است که ۲۰۰ نشان‌دهنده حداکثر کمبود رطوبت تجمعی خاک و صفر نشان‌دهنده خاک اشباع است (آندراده و بوگالو، ۲۰۲۳). شاخص KBDI از اطلاعات غیرمستقیم رطوبت خاک استفاده می‌کند (چاپارو و همکاران، ۲۰۱۸).

پژوهش‌های بسیاری در زمینه پایش خشکسالی با استفاده از یک یا چندین شاخص خشکسالی در سطح جهانی و داخلی انجام شده است.

آب محدود، ظرفیت سازگاری کم و جمعیت رو به رشد افزایش می یابد، لذا هدف تحقیق حاضر بررسی تغییرات زمانی - مکانی شاخص خشکسالی KBDI در نواحی رویشی ایران است.

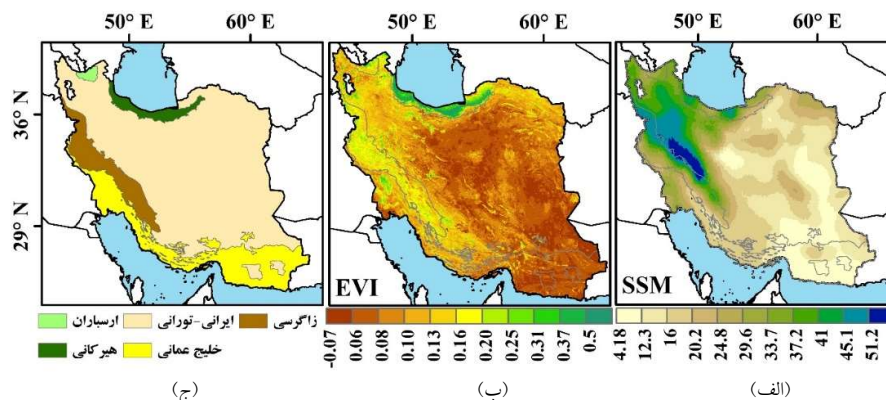
۲ روش پژوهش

۲-۱ منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، کشور ایران است. ایران کشوری با اقلیم غالب خشک و نیمه خشک است که میانگین ارتفاع آن از سطح آب‌های آزاد تقریباً ۱۳۰۰ متر است. بر اساس آخرین اعلام سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری ایران در سال ۱۳۹۹، مساحت جنگل‌های ایران ۱۷۶۴۹۸۹۰ هکتار است که حدود ۸/۸ درصد از مساحت ۱۶۴ میلیون و ۸۰۰ هزار هکتاری کل ایران را شامل می‌شود که در پنج پهنه رویشی قرار دارند (شکل ۱-ج). ۱۴ درصد جنگل‌های ایران در ناحیه رویشی هیرکانی (شمال ایران) قرار دارد. ناحیه رویشی ایرانی - تورانی با ۲۸/۲ درصد، بیشتر کویرها، بیابان‌ها، شوره‌زارها و تپه‌های شنی بخش مرکزی ایران را شامل می‌شود، ناحیه رویشی ارسباران در شمال غرب ایران واقع شده و حدود ۱/۴۰ درصد جنگل‌های ایران در آن قرار دارد. ناحیه رویشی خلیج - عمانی که حدود ۱۴/۸ درصد معادل ۲۱۱۹۰۰۰ هکتار

شاخص بارش استاندارد (فرج زاده و احمدیان، ۱۳۹۳؛ رئوف و ذبیحی، ۱۳۹۵)، درصد نرمال بارش (باروتی و همکاران، ۱۳۹۲؛ جهانگیر و همکاران، ۱۴۰۰)، دهک‌های بارندگی (حجازی زاده و همکاران، ۱۴۰۰) و بی‌هنجاری بارش (خسروی و همکاران، ۱۳۹۱) به بررسی وضعیت خشکسالی در ایران پرداخته‌اند. تمامی این مطالعات بیانگر افزایش شدت و مدت خشکسالی در ایران است. به‌رغم مطالعات فراوانی که از دیدگاه‌های مختلف به بررسی و پایش خشکسالی در ایران پرداخته‌اند، اما تاکنون با استفاده از شاخص خشکسالی KBDI پژوهش مستقلی در ایران انجام نشده است.

قرارگیری ایران در مناطق خشک و نیمه خشک جهان باعث آسیب پذیری بیشتر نسبت به خشکسالی شده است. خشکسالی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل محیط‌زیستی کشور در سال‌های اخیر بخش‌های مختلفی را تحت‌الشعاع قرار داده است. از خشکسالی و پیامدهای آن بیشتر به کشاورزی و منابع آبی (وابسته به شهرها و یا سکونتگاه‌های انسانی) توجه شده است، این در حالی است که این پدیده پیامدهای غیر قابل انکاری را نیز در بخش منابع طبیعی و بخصوص جنگل‌ها و مراتع ایران داشته است. از آنجاییکه حساسیت اکوسیستم‌های طبیعی به خشکسالی، به دلیل منابع



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه، الف) میانگین سالانه رطوبت خاک سالانه (SSM) (واحد: درصد)؛ ب) میانگین سالانه شاخص پوشش گیاهی بارزسازی شده (EVI) (واحد: بی مقیاس)؛ ج) پهنه‌های رویشی ایران.

مجموعه داده ECMWF یکی از مهم‌ترین داده‌های بازتحلیل در جهان می‌باشد که مورد توجه بسیاری از محققین قرار دارد (دی و همکاران، ۲۰۱۱). این مرکز نخستین بار داده‌های شبکه‌ای جو را در سال ۱۹۷۹ با عنوان FGGE (بنگسن و همکاران، ۱۹۸۲) آغاز کرد. پس از آن ERA-15 (گیسن و همکاران، ۱۹۹۹) را در اواسط دهه ۱۹۹۰ با تفکیک بالا برای ۳۱ تراز ارائه داده است. سومین بازتحلیل این مرکز با نام (ERA-40) (اوپالا و همکاران، ۲۰۰۵) در ۶۰ تراز با بهره‌مندی از داده‌های ماهواره‌ای از ۱۹۵۷ تا ۲۰۰۲ تولید شد. داده‌های ERA-40 نسبت به داده‌های پیشین دارای تفکیک افقی و ترازهای جوی به مراتب بیشتر بوده است. داده‌های نسل چهارم ECMWF تحت عنوان ERA-Interim از ۱۹۷۹ تا آگوست ۲۰۱۹ تولید شده است که در مقایسه با سایر داده‌های بازتحلیل، به دلیل بهبود کارایی سامانه داده‌گواری آن، برآورد بهتری را نیز برای متغیرهای جوی ارائه داده است (دی و همکاران، ۲۰۱۱). داده‌های نسل پنجم ECMWF با نام ERA5 (هرسباخ و همکاران، ۲۰۲۰) منتشر شده است. مجموعه داده ERA5 متغیرهای جوی، سطح زمین و اقیانوسی را همراه با عدم قطعیت‌ها آن‌ها از ژانویه ۱۹۵۰ تاکنون در مقیاس زمانی ساعتی، روزانه و ماهانه با تفکیک مکانی ۰/۱۲۵، ۰/۲۵ و ۰/۴ تا ۳ درجه قوسی در اختیار کاربران قرار می‌دهد. بطور کلی ERA5 در مقایسه با ERA-Interim کارایی بالاتری را در سامانه داده‌گواری، گام‌های زمانی و همچنین تفکیک افقی داشته است (کراست و همکاران، ۲۰۲۰). لذا در این پژوهش شاخص خشکسالی (KBDI) بر اساس داده‌های بازتحلیل ERA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۲-۲ محصول رطوبت خاک ماهواره‌ای

پایش پدیده‌های طبیعی، مانند خشکسالی به داده‌های مداوم

جنگل‌های ایران را به خود اختصاص داده، بخشی از جنوب غرب و تمام سواحل جنوبی ایران را در بر می‌گیرد. در تقسیم‌بندی جنگل‌های ایران، جنگل‌های زاگرس با سطحی حدود ۵ میلیون هکتار (۴۱/۹ درصد)، وسیع‌ترین رویشگاه جنگلی در ایران است که از منتهی‌الیه شمال غربی ایران آغاز و تا جنوب غرب ایران را در بر می‌گیرد (مؤذنی و همکاران، ۱۳۹۷).

۲-۲-۲ داده‌های مورد استفاده

برای بررسی وضعیت خشکسالی ایران از شاخص خشکسالی KBDI طی دوره چهل ساله (۱۹۸۱-۲۰۲۰) از داده‌های بازتحلیل نسل پنجم ECMWF موسوم به ERA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی استفاده شده است. سپس برای مقایسه و درستی نتایج شاخص KBDI از محصول ترکیبی رطوبت خاک ماهواره‌ای فعال (Active) با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی طی دوره آماری ۳۰ ساله (۲۰۲۰-۱۹۹۱) استفاده شده است (شایان ذکر است که این محصول ماهواره‌ای از ۱۹۹۱ در دسترس بوده است). علت استفاده از رطوبت خاک برای درستی نتایج شاخص KBDI به این دلیل بوده است که این شاخص وضعیت رطوبتی خاک را نشان می‌دهد؛ لذا ارائه تصویری دقیق از رطوبت خاک می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای را در درستی نتایج این شاخص ارائه دهد.

۲-۲-۱ داده‌های بازتحلیل ECMWF-ERA5

پایش خشکسالی نیازمند مجموعه داده‌ای با تفکیک زمانی-مکانی بالا است. مجموعه داده‌های بازتحلیل این الزامات را برآورده و یک جایگزین مناسب برای داده‌های مشاهداتی است. علاوه بر این، داده‌های بازتحلیل امکان کمی‌سازی بهتر برخی از متغیرهایی که بر شدت خشکسالی تأثیر می‌گذارند، فراهم آورده است (رحمتوا و همکاران، ۲۰۲۱).

در این پژوهش جهت داشتن دید کلی از وضعیت پوشش گیاهی نواحی رویشی ایران از شاخص بارزسازی شده پوشش گیاهی (EVI) Enhanced Vegetation Index)، مجموعه ۶/۱ سنجنده MODIS ماهواره TERRA محصول (MOD13A3) با تفکیک افقی ۱۰۰۰ متر طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ استفاده شده است. بکارگیری توامان پوشش گیاهی با رطوبت خاک و مقایسه نتایج این دو شاخص با وضعیت خشکسالی می‌تواند نقش تعیین کننده‌ای را در شناخت مناطق بحرانی ناشی از خشکسالی و همچنین مناطقی با آسیب پذیری بالا داشته باشد. شاخص بارزسازی شده پوشش گیاهی با بهینه‌سازی سیگنال‌های پوشش گیاهی در مناطقی با زیست توده بالا از طریق تصحیح سیگنال‌های پس زمینه خاک و تعدیل اثرات جوی توسعه یافته است (جیانگ و همکاران، ۲۰۰۸).

۲-۳ روش انجام تحقیق

۲-۳-۱ شاخص خشکسالی کیچ-بایرام (Keetch-Byram)

در این پژوهش از شاخص خشکسالی کیچ-بایرام (Keetch-Byram) که به اختصار KBDI نامیده می‌شود به عنوان یکی از رایج ترین شاخص‌های خشکسالی استفاده شده است (فیداس و همکاران، ۲۰۰۲). شاخص خشکسالی KBDI ابتدا توسط جان کیچ (John Keetch) و جورج بایرام (George Byram) در سال ۱۹۶۸ در جنوب شرق ایالات متحده معرفی شد (وارول و ارطغرول، ۲۰۱۶). این شاخص متغیرهای اقلیمی بیشینه دما، بارش ۲۴ ساعته و بارش سالانه را در نظر می‌گیرد (گالسن و سومنز، ۲۰۱۶) تا تاثیر تبخیر-تعرق و بارش را در کاهش رطوبت تجمعی لایه‌های سطحی و زیر سطحی خاک نشان دهد (آندراده و بوگالو، ۲۰۲۳). این شاخص دارای آستانه صفر تا ۲۰۰ است. آستانه صفر عدم کمبود رطوبت و حالت اشباع است. البته اشباع خاک بسته به منطقه جغرافیایی متفاوت است با

رطوبت خاک نیاز دارد، زیرا رطوبت خاک یک متغیر کلیدی در چرخه آب جهانی است. از این رو، روش‌های سنجش از دور مبتنی بر میکروویو برای برآورد و مدل‌سازی رطوبت خاک در مقیاس‌های زمانی-مکانی مختلف توسعه داده شده است (اوشنر و همکاران، ۲۰۱۳). در سال ۲۰۱۲ آژانس فضایی اروپا (ESA) اولین مجموعه داده جهانی رطوبت خاک (SM) را به عنوان بخشی از برنامه ابتکار تغییر اقلیم (CCI) منتشر کرد که محصولات مختلف رطوبت خاک شامل میکروویو فعال، غیرفعال و محصول ترکیبی میکروویو فعال و غیرفعال را ارائه داده است (زانگ و همکاران، ۲۰۱۸). روش‌های مبتنی بر سنجش از دور فعال (دورنگو و همکاران، ۲۰۱۷)، توانایی ثبت داده در هر گونه از شرایط اقلیمی را دارند. همچنین به دلیل تضاد زیاد بین خواص دی الکتریکی خاک و آب، برای برآورد شرایط رطوبتی در چند سانتی‌متر بالایی خاک مفید هستند (اولابی و همکاران، ۱۹۸۲). از محصولات رطوبت خاک برای ارزیابی کارایی شاخص‌های خشکسالی استفاده شده است و سطح اطمینان این مطالعات را افزایش داده است (ون در شریر و همکاران، ۲۰۱۳؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۷). در این پژوهش از محصول ترکیبی رطوبت خاک سطحی (SSM) سنجنده‌های میکروویو فعال (Active) AMI-WS (ماهواره‌های ERS-1 و ERS-2) (کراپولیکو و همکاران، ۲۰۱۶) و (ASCAT (ماهواره MetOp-A-B (سف و همکاران، ۲۰۱۷)) نسخه v202012.0.0 آژانس فضایی اروپا (ESA) که به شکل جهانی و در مقیاس ماهانه با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی در بازه زمانی ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ در دسترس است برای بررسی کارایی شاخص خشکسالی KBDI در نواحی رویشی ایران استفاده شده است.

۲-۲-۳ شاخص بارزسازی شده پوشش گیاهی (EVI)

میلی متر (۲۰/۰ اینچ) کم می شود. چون فرض بر این است که ۵/۱ میلی متر بارش اولیه جذب زمین و پوشش گیاهی می شود. مابقی آن تحت عنوان بارش خالص در شاخص مؤثر است. در بارش بالاتر از ۵/۱ میلی متر و تبخیر کمتر از بارش مؤثر، مقدار شاخص کاهش پیدا می کند، در غیر این صورت در مقدار ۲۰۰ ثابت می ماند (تاوفیک و همکاران، ۲۰۱۵). در شاخص KBDI مقدار تبخیر-تعرق از رابطه (۲) محاسبه می گردد.

(۲)

$$E = [203 - KBDI]^{1-t} [0.4982 \exp(0.0875T + 1.552) - 4.268] \times 0.001/1 + 10.88 \exp(-0.001736R_0)$$

در این رابطه T بیانگر بیشینه دما، KBDI شاخص خشکسالی و مجموع بارش سالانه است. سپس سری زمانی متوسط پهنه‌ای شاخص در مقیاس ماهانه برای دوره ۴۰ ساله (۱۹۸۱-۲۰۲۰) تهیه شد.

۲-۳-۲ پهنه‌بندی شاخص خشکسالی براساس

روش کریجینگ

یکی از بهترین روش‌ها برای درون‌یابی و تهیه نقشه پهنه بندی داده‌های نقطه‌ای روش‌های زمین آمار هستند. یکی از مشهورترین و شناخته شده‌ترین روش‌های درون‌یابی روش زمین آمار کریجینگ است. در این روش برای هر یک از نمونه‌های اندازه گیری شده برحسب موقعیت و فاصله آن وزن آماری مشخصی در نظر گرفته می شود به گونه‌ای که بدون آریبی و با حداقل واریانس همراه باشد (ایزاکس و سرینیوستا، ۱۹۸۹). در واقع مزیت این روش نسبت به سایر روش‌های درون‌یابی این است که کمترین واریانس را دارد. کریجینگ همچنین از ترکیب خطی مقادیر معلوم، نقاط مجهول را برآورد می کند. لذا در این پژوهش برای پهنه بندی شاخص خشکسالی (KBDI) و شاخص رطوبت خاک (SSM) از روش کریجینگ استفاده شده است.

این حال در پایان یک دوره مرطوب طولانی می توان به سطح اشباع رسید (جنیس و همکاران، ۲۰۰۲). آستانه ۲۰۰ بیشینه مقدار شاخص KBDI را ارائه می دهد. این آستانه بیشینه مقدار خشکسالی ممکن را در نظر می گیرد (آستانه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است).

جدول ۱. درجه‌بندی مقادیر شاخص خشکسالی KBDI (آندراده و بوگالو، ۲۰۲۳).

KBDI	تعریف آستانه مربوطه
۵۰-۰	رطوبت خاک زیاد (اشباع) است.
۱۰۰-۵۰	لایه‌های پایینی بستر در حال خشک شدن هستند.
۱۵۰-۱۰۰	لایه‌های زیرین و عمیق خاک خشک شده‌اند.
۲۰۰-۱۵۰	اغلب با خشکسالی شدید همراه است.

شاخص KBDI با بکارگیری متغیرهای اقلیمی بارش روزانه، بیشینه دمای هوا و مجموع بارش سالانه بر اساس رابطه (۱) به شکل ماهانه محاسبه می شود (چارلتون و همکاران، ۲۰۲۲).

(۱)

$$\Delta Q = ([203 - Q][0.968 \exp(0.0875T + 1.552)] - 8.30) \Delta T \times (0.001/1 + 10.88 \exp(-0.001736M))$$

در رابطه بالا آن Q = شاخص کمبود رطوبت خاک؛ T = بیشینه دمای روزانه؛ ΔT = زمان افزایش برابر ۱ روز و M = مجموع بارش سالانه می باشد.

نقطه شروع یا صفر مهم ترین بخش محاسبه این شاخص است. به گونه‌ای که نشان‌دهنده اشباع بودن خاک است. در شاخص KBDI فرض بر این است که در دوره زمانی هفت روزه با بارش ۱۵۰ میلی متر (۶ اینچ) خاک در حالت اشباع قرار می گیرد (کیچ و بایرام، ۱۹۶۸).

برای هر روز پس از این نقطه، اگر بارش وجود داشته باشد، شاخص کاهش می یابد در غیر اینصورت افزایش می یابد. اگر یک روز بارش داشته باشد، مقدار آن از ۵/۱

۳-۳-۲ ضریب همبستگی پیرسون

در این تحقیق برای بررسی ارتباط بین شاخص خشکسالی KBDI با شاخص رطوبت سطحی خاک (SSM) و شاخص پوشش گیاهی بارزسازی شده (EVI) از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده است. ضریب پیرسون یک روش مبتنی بر آمار پارامتریک با ضریب بین +۱ و -۱ به منظور تعیین شدت، نوع و جهت رابطه بین دو متغیر فاصله‌ای یا نسبی یا یک متغیر فاصله‌ای و یک متغیر نسبی بکار برده می‌شود (کوهن و همکاران، ۲۰۰۹). به جهت سادگی این روش و پرتکرار بودن استفاده از آن رابطه مربوطه ارائه نگردید.

۳ یافته‌ها

نتایج حاصل از پایش خشکسالی براساس شاخص KBDI برای نواحی رویشی ایران در شکل (۲) و سری زمانی بلندمدت (۲۰۲۰-۱۹۸۱) ماهانه آن از ماه ژانویه تا دسامبر در شکل (۵) ارائه شده است. مقدار شاخص KBDI ماه ژانویه بین ۱۳/۵ تا ۱۳۸/۴ به ترتیب در ناحیه رویشی ارسباران تا خلیج-عمانی متغیر است. براساس آستانه‌های تعریف شده برای این شاخص، نواحی خلیج-عمانی و ایرانی-تورانی با دارا بودن مقادیر ۱۳۸/۴ و ۱۲۷/۷ دارای بیشترین مقدار شاخص هستند. کاهش رطوبت در ۱۹/۸ درصد از مساحت این نواحی باعث شده که لایه بالایی خاک در وضعیت کاملاً خشک قرار گیرد. از طرفی خشکسالی بسیار شدید در گستره‌های مرکزی، شرق، جنوب شرق، سواحل جنوبی ایران قابل مشاهده است به گونه‌ای که با ۴۳ درصد، بیشترین مساحت تحت تأثیر را به خود اختصاص داده است. در این ماه، سال ۲۰۱۱ بصورت مشترک در دو پهنه خلیج-عمانی و ایرانی-تورانی به ترتیب با مقدار ۱۸۰/۳ و ۱۵۱/۳ خشک‌ترین سال بوده که به دنبال آن، این نواحی تحت شرایط خشکسالی بسیار شدید قرار گرفته‌اند (شکل ۵). مقادیر شاخص در ارسباران (۱۳/۵)، هیرکانی (۱۷/۸) و زاگرس (۲۵/۸) نشان‌دهنده

رطوبت زیاد خاک است. اشباع بودن لایه بالایی خاک در ۲۱/۱ درصد مساحت این نواحی حاکی از بالا بودن رطوبت خاک سطحی این مناطق است که مقدار بالای پوشش گیاهی (شکل ۱-ب) نیز این نتیجه را تایید می‌کند (شکل ۳). در مقایسه با سایر مناطق واقع در ناحیه رویشی هیرکانی، جنگل‌های گلستان با قرارگیری در طبقه خشکسالی متوسط از پتانسیل بالایی برای رخداد بالای خشکسالی برخوردار هستند. از نظر پراکنش فضایی رطوبت خاک نیز بیشترین میانگین درصد حجمی رطوبت خاک در نواحی رویشی زاگرس (۴۰/۸) هیرکانی (۳۶/۶) و ارسباران (۳۴/۷) و کمترین مقدار در جنوب و جنوب غرب در خلیج-عمانی (۱۸/۵) و در مناطق مرکزی، شرق و جنوب شرقی واقع در پهنه ایرانی-تورانی (۲۱/۵) متمرکز است. این نتایج کارایی مناسب شاخص KBDI منتج شده از ECMWF-ERA5 را در شناسایی خشکسالی نشان می‌دهد (شکل ۴).

بیشینه شاخص KBDI ماه فوریه در ناحیه خلیج-عمانی (۱۲۰/۱) و پس از آن در ایرانی-تورانی (۱۱۶/۴) مشاهده شده است (شکل ۲). همچنین بالاترین سطح خشکی متوسط تا شدید، با ۷۱/۱ درصد در این نواحی دیده می‌شود (شکل ۳). این نتایج، بیانگر خشکی زیاد خاک است. نواحی مرکزی، شرق و جنوب شرق ایران به دلیل تبخیر-تعرق و دمای بالا و پوشش گیاهی بسیار کم، خشکی و پژمردگی غالب جغرافیایی آن‌ها است. مقایسه نتایج شاخص KBDI با SSM این نتیجه را تایید می‌کند. مقدار شاخص KBDI در نواحی رویشی ارسباران، هیرکانی و زاگرس کمی کاهش یافته است، به گونه‌ای که ۲۸/۱ درصد از مساحت این نواحی تحت تأثیر خشکسالی نزدیک به نرمال قرار گرفته است. باتوجه به اینکه متغیرهای بارش و دما در تغییرات این شاخص تعیین کننده هستند، این کاهش می‌تواند به علت افزایش بارش در این مناطق باشد. با این حال، سال ۲۰۱۸، ۱۹۸۴ و ۲۰۰۹ به عنوان شدیدترین سال‌های خشک به

ارسباران، هیرکانی و زاگرس به میزان ۳۲/۱ درصد است که نسبت به ماه قبل افزایش اندکی داشته است. مطابق با نقشه توزیع مکانی رطوبت خاک (شکل ۴) کمترین میزان رطوبت خاک (۱۱/۶ درصد) در پهنه رویشی خلیج-عمانی شامل مناطق مرکزی، شرق و جنوب شرق ایران مشاهده گردید، به طوریکه پایین بودن میزان بارش در این نواحی یکی از مهم ترین دلایل کاهش رطوبت خاک است. بیشینه رطوبت خاک به صورت پراکنده و نامنظم در مناطق شمالی (هیرکانی) غرب (زاگرس) و شمال غرب (ارسباران) قرار دارد. مقایسه نتایج شاخص رطوبت خاک و شاخص خشکسالی مطابقت این دو شاخص در شناسایی کانون های خشکسالی در ایران را نشان می دهد.

مقادیر KBDI در ماه آوریل کاهش یا افزایش چندانی نداشته است به گونه ای که کمینه مقدار آن مربوط به ناحیه رویشی ارسباران، زاگرس و هیرکانی به ترتیب برابر با ۲/۹، ۶/۱ و ۸/۵ است و مساحت مناطق درگیر خشکسالی نزدیک به نرمال در این نواحی به ۳۴/۱ درصد رسیده است که بیانگر اشباع بودن خاک است. بررسی وضعیت خشکسالی نواحی رویشی خلیج-عمانی و ایرانی-تورانی نشان داد، درجات متوسط تا بسیار شدید خشکسالی این مناطق را فراگرفته به گونه ای که ۶۵/۷ درصد از مساحت این نواحی را پوشش داده است. از مجموع ۶۵/۷ درصد مساحت درگیر خشکسالی در ۱۵/۴ درصد خشکسالی ها لایه های پایینی بستر در حال خشک هستند، در ۲۴/۶ درصد لایه زیرین کاملاً خشک شده و ۲۵/۶ درصد خشکی شدید، رطوبت خاک بسیار پایین مشاهده شده است که به ترتیب خشکسالی متوسط، شدید و بسیار شدید را سبب شده است (شکل ۳). سری زمانی بلند مدت شاخص خشکسالی در شکل (۵) نشان داد، سال ۲۰۰۰، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۸ به عنوان خشک ترین سال، خشکسالی های بسیار شدیدی را در پهنه رویشی خلیج-عمانی نشان داده اند. خشکسالی شدید در سال ۲۰۱۸ در پهنه ایرانی-تورانی و در سال ۱۹۸۹ در پهنه

ترتیب با مقدار میانگین ۱۷۱/۹، ۱۶۴/۸ و ۱۵۸/۶ در ناحیه رویشی خلیج-عمانی مشاهده شده است. همچنین شدیدترین دوره خشکسالی در این پهنه رویشی، مربوط به سال های ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ است. خشک ترین سال های پهنه رویشی ایرانی-تورانی نیز به مانند پهنه خلیج-عمانی در سال ۲۰۱۸ و ۲۰۰۹ به ترتیب با مقدار ۱۴۰/۸ و ۱۳۷/۶ رخ داده است (شکل ۵). مقدار بارش عاملی اثرگذار بر رطوبت سطحی خاک است. میانگین رطوبت خاک در پهنه رویشی خلیج-عمانی، ایرانی-تورانی، زاگرس، هیرکانی و ارسباران به ترتیب ۱۴/۷، ۲۱/۳، ۳۸/۱، ۳۸/۷ و ۳۴/۲ درصد است که بیشترین و کمترین مقدار رطوبت خاک به ترتیب متعلق به ناحیه هیرکانی و خلیج-عمانی است (شکل ۴). مقادیر پایین رطوبت خاک در ناحیه خلیج-عمانی و ایرانی-تورانی با پهنه های خشکسالی شناسایی شده توسط KBDI همخوانی و نشانگر کارایی این شاخص در این پهنه-هاست.

مقدار شاخص خشکسالی ماه مارس در نواحی رویشی ایران مقدار کاهشی را نشان داده اند. علی رغم کاهش مشاهده شده در این ماه، پهنه های رویشی خلیج-عمانی (۱۱۱/۷) و ایرانی-تورانی (۱۰۷/۳)، همچنان دارای وضعیت خشکسالی بالایی هستند که نشانگر آنست، اگر بارشی در این مناطق رخ داده به حدی نبوده که خاک را به حالت اشباع برساند، لذا نواحی ذکر شده کماکان دارای خشکی بالایی هستند (شکل ۲). این شرایط باعث شده که بیشترین سطح مناطق دارای خشکسالی متوسط تا شدید به میزان ۶۷/۷ درصد در این نواحی مشاهده شود. همانطور که از شکل (۵) مشهود است، در سال های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۸، ناحیه رویشی خلیج-عمانی با میانگین عددی ۱۶۰/۶ و ۱۵۹ شرایط خشکسالی بسیار شدید را سپری کرده است. همچنین شدیدترین خشکسالی پهنه ایرانی-تورانی در سال ۲۰۰۹ با مقدار ۱۳۲/۱ مشاهده شده است. کمترین سطح مناطق دارای خشکسالی نزدیک به نرمال در نواحی رویشی

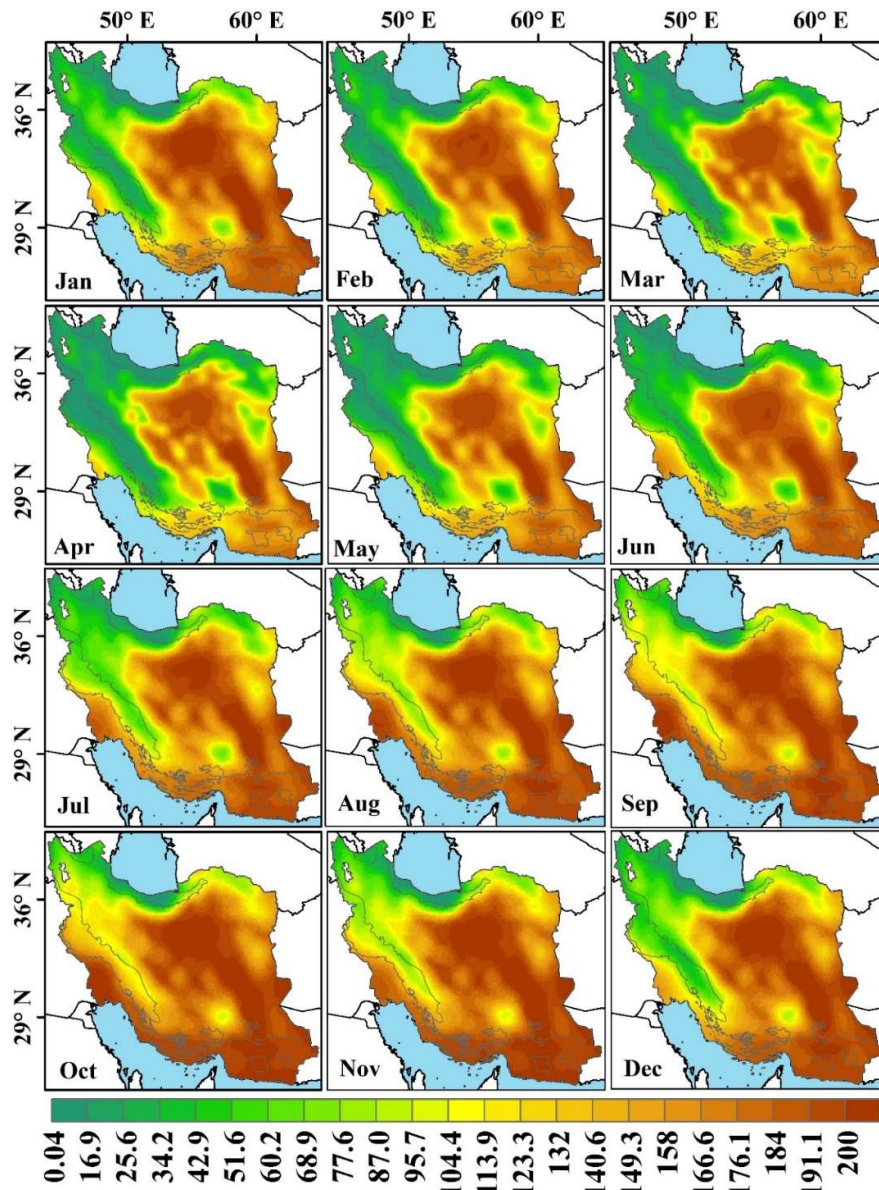
خلیج-عمانی رخ داده است. پراکنش جغرافیایی رطوبت سطحی خاک در نواحی رویشی ایران بین ۹/۹ تا ۳۳/۵ درصد متغیر است. پهنه رویشی هیرکانی با مقدار ۳۳/۵ درصد از رطوبت سطحی بیشتری نسبت به سایر نواحی رویشی ایران برخوردار است (شکل ۴).

توزیع مکانی شاخص خشکسالی ماه می نشان می‌دهد که در بین مناطق تحت تأثیر این پدیده در ایران، نواحی رویشی خلیج-عمانی و ایرانی-تورانی به ترتیب با ۱۲۵/۹ و ۱۰۳/۸ بیشترین مقدار شدت خشکسالی را دارند. حدود ۲۳/۶ درصد از این نواحی تحت تأثیر خشکسالی شدید قرار دارد، به گونه‌ای که شدیدترین خشکسالی با مقدار ۱۴۸/۷ در سال ۲۰۰۶ و طولانی‌ترین دوره خشکی از ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۶ در پهنه خلیج-عمانی و سال ۲۰۰۸ با ۱۲۸/۴ خشک‌ترین و سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۸ به عنوان طولانی‌ترین دوره در خلیج-عمانی رقم زده است. ۲۹/۲ درصد از این نواحی (شامل سواحل جنوبی، فلات مرکزی، شرق و بخش‌های از جنوب غرب) در سال‌های ۱۹۸۵-۱۹۸۴، ۱۹۸۹، ۱۹۹۴، ۲۰۰۱-۲۰۰۰، ۲۰۰۳-۲۰۰۴ تحت تأثیر خشکسالی بسیار شدید قرار گرفته است (شکل ۵). در این میان ۱۵/۸ درصد نیز در مواجهه با خشکسالی متوسط قرار دارد. بنابراین می‌توان گفت همچنان این نواحی در شرایط تداوم خشکسالی متوسط تا بسیار شدید قرار دارند.

در نواحی رویشی ارسباران، هیرکانی و زاگرس، پایین‌ترین سطح خشکسالی با پتانسیل پایین آتش‌سوزی همچنان در این نواحی مشاهده می‌شود. در این میان ۳۱/۲ درصد از مساحت این نواحی در طبقه نخست شاخص KBDI قرار می‌گیرد، بدین معنا که لایه بالایی خاک و لاشبرگ سطحی اشباع است (شکل ۳). رطوبت خاک در ناحیه رویشی ارسباران با ۳۳ درصد نسبت به سایر مناطق

بیشتر است. این افزایش حداکثری با بارش‌های بهاره این منطقه مطابقت دارد. میزان رطوبت سطحی خاک به جز ناحیه رویشی هیرکانی (۲۲ درصد) که کاهش قابل توجهی داشته، در سایر نواحی در سطح پایین باقی مانده است. نتایج شاخص رطوبت خاک در ماه‌های مارس، آوریل و می تاییدی بر کارایی مناسب شاخص خشکسالی KBDI در شناسایی کانون‌های خشکسالی در ایران است.

طبقات خشکسالی متوسط تا بسیار شدید گستره زیادی از ایران را در ماه ژوئن فرا گرفته است. به گونه‌ای که از غرب به شرق بر شدت خشکسالی‌ها افزوده می‌شود. این شرایط منجر به آن شده که به طور متوسط ۷۲/۳ درصد از ایران دارای خشکسالی متوسط، شدید و خیلی شدید شود. بخش‌هایی از جنوب غرب و غرب در ناحیه رویشی خلیج-عمانی و زاگرس با دارا بودن پوشش گیاهی مناسب در محدوده پرخطر خشکسالی قرار دارند. این نتیجه بر اهمیت پایش و پیش‌بینی دقیق خشکسالی در این مناطق تأکید دارد. در این ماه نیز تمرکز شدیدترین دوره‌های خشکسالی بر اساس آستانه شاخص KBDI در پهنه خلیج-عمانی و در سال‌های ۱۹۹۵-۱۹۹۴، ۲۰۰۴-۱۹۹۹، ۲۰۱۲-۲۰۰۸ و ۲۰۱۵-۲۰۱۸ است. همچنین رخداد خشکسالی شدید در سال ۲۰۰۸ در پهنه ایرانی-تورانی قابل مشاهده است. در ۲۷/۷ درصد از مساحت نواحی رویشی که بیشتر در ارسباران، هیرکانی و بخش‌های از زاگرس متمرکز شده است، لایه‌های بالایی خاک از آب اشباع است که این امر پتانسیل و امکان رخداد خشکسالی را پایین آورده است (شکل ۳). با افزایش دما و کاهش بارش، میانگین رطوبت سطحی خاک در نواحی رویشی ایران کاهش چشمگیری داشته که در نتیجه، احتمال رخداد خشکسالی زیاد می‌شود.



شکل ۲. پهنه بندی ماهانه شاخص خشکسالی KBDI نواحی رویشی ایران در بازه زمانی ۱۹۸۱-۲۰۲۰ منتج شده از مجموعه داده ECMWF-ERA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی (واحد: مقدار رتبه‌ای شاخص).

شمال شرق و مرکز ایران مشاهده شده است که نشان‌دهنده حاکمیت شرایط خشکسالی با درجات مختلف در این مناطق است. به گونه‌ای که ۸۸/۵ درصد از مساحت ایران را دربر گرفته‌اند. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، گستره خشکسالی بسیار شدید، ناحیه رویشی خلیج-عمانی

تغییرات میانگین شاخص خشکسالی و همچنین کاهش رطوبت تجمعی لایه‌های بالایی خاک در بیشتر گستره ایران در ماه ژوئیه همچنان قابل مشاهده است. اگرچه این تغییرات در مناطق مختلف به یک شکل و اندازه نبوده است، اما بیشترین تغییرات افزایشی در غرب، جنوب غرب، شرق،

احتمال رخداد خشکسالی‌های بسیار شدید در فصل خشک به دلیل کاهش بارش و افزایش تبخیر-تعرق وجود دارد. در این ماه، شدت و تداوم خشکسالی‌های بسیار شدید در پهنه خلیج-عمانی افزایش یافته به گونه‌ای که در سال ۲۰۰۰ (۱۹۳/۷) خشک‌ترین و شدیدترین دوره خشکسالی رخ داده است. از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۱، ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۸ در ناحیه ایرانی-تورانی و از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۰ در زاگرس دوره‌های خشکسالی شدید مشاهده شده است.

کاهش میانگین رطوبت سطحی خاک در بیشتر نواحی رویشی ایران بیانگر آنست که تغییرات رطوبت خاک به شدت تابع بارش و تبخیر در منطقه است. میانگین رطوبت خاک در این ماه بین ۱۰/۵ تا ۳۳ متغیر است. همچنان بالاترین مقدار رطوبت خاک (۳۳ درصد) در پهنه رویشی زاگرس مشاهده شده است. به صورت کلی نتایج شاخص رطوبت خاک و خشکسالی از ماه ژوئن تا آگوست نشان دهنده مطلوبیت شاخص KBDI در شناسایی کانون‌های خشکسالی بویژه در نواحی مرکزی، شرق، جنوب شرق و بخش‌های از جنوب غرب ایران است.

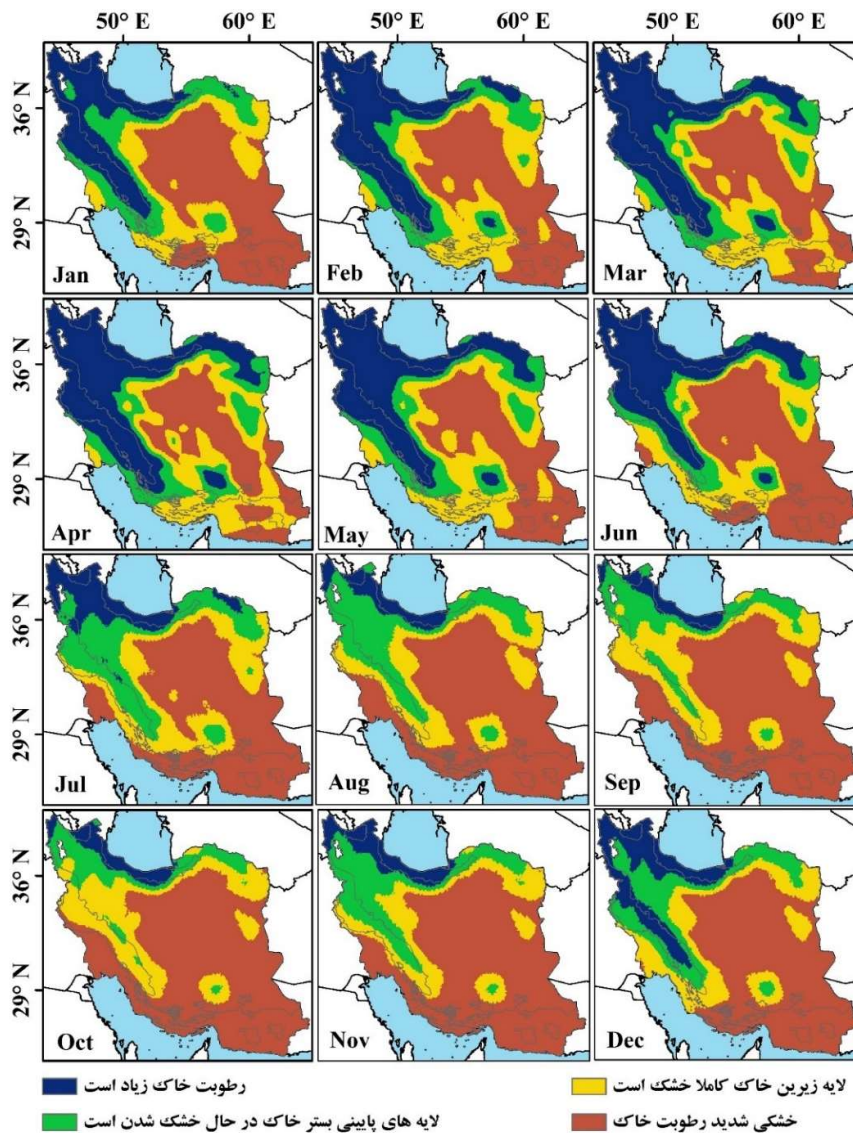
بررسی وضعیت خشکسالی نواحی رویشی ایران در ماه سپتامبر نشان داد که میانگین مقادیر KBDI در نواحی رویشی خلیج-عمانی، ایرانی-تورانی و زاگرس بالای مقدار عددی ۱۰۰ است که بیانگر شرایط بحرانی رطوبت خاک بوده است. استمرار خشکسالی با طبقات متوسط تا بسیار شدید در گستره بزرگی از ایران (۹۵/۴ درصد) در این ماه قابل مشاهده است. شکل (۵) بیانگر آنست که در ماه سپتامبر در پهنه خلیج-عمانی، شدت و تداوم دوره‌های خشکسالی بسیار شدید و در پهنه زاگرس، خشکسالی شدید قابل مشاهده است. سال ۲۰۱۸ (۱۹۶/۸) در پهنه خلیج-عمانی و سال ۲۰۰۸ در پهنه ایرانی-تورانی و زاگرس (۱۶۱/۶) و (۱۲۷/۱) خشک‌ترین سال‌های به ثبت رسیده در این پهنه‌ها بود. در ۴/۶ درصد از پوشش جنگلی کشور در شمال و شمال غرب ایران به واسطه اشباع بودن خاک پتانسیل پایینی

را پوشش داده است. سال ۲۰۰۰ با مقدار ۱۸۸/۳ به عنوان خشک‌ترین سال این پهنه ثبت شده است که بیانگر خشکسالی‌های بسیار شدید در این پهنه است. تداوم خشکسالی‌های شدید در پهنه ایرانی-تورانی در سال ۲۰۰۸ همچنان قابل شده است. ناحیه رویشی هیرکانی و ارسباران نیز دارای روند افزایشی شاخص KBDI بوده‌اند. ولی این تغییرات منجر به رخداد خشکسالی در این مناطق نشده است. قرارگیری جنگل‌های گلستان در طبقه خشکسالی متوسط می‌تواند به علت پایین بودن مقدار بارش، افزایش سطح دمای منطقه و نزدیکی به مناطق خشک شمال شرق ایران باشد. لذا با توجه به اینکه در این منطقه لایه‌های پایینی بستر خاک در حال خشک شدن هستند، امکان رخداد خشکسالی با شدت بالا وجود دارد. کما اینکه این منطقه جز کانون‌های مهم رخداد خشکسالی در شمال کشور محسوب می‌شود و در سال‌های گذشته نیز خشکسالی‌های بسیاری را تجربه کرده است. همان‌طور که در شکل (۴) قابل مشاهده است، متوسط رطوبت خاک این منطقه، تغییرپذیری بیشتری نسبت به سایر نواحی رویشی هیرکانی دارد. در این ماه، رطوبت خاک در پهنه زاگرس تغییرات روشنی نشان می‌دهد، به گونه‌ای که بیشینه رطوبت خاک با ۳۱ درصد در این پهنه مشاهده شده است.

شاخص KBDI ماه آگوست نه تنها شدت بیش‌تری داشته است؛ بلکه نواحی دارای خشکسالی نیز بیشتر شده است (شکل ۲). طبقات متوسط تا بسیار شدید خشکسالی بیش‌تر مناطق ایران را در نواحی رویشی خلیج-عمانی، ایرانی-تورانی و زاگرس فراگرفته است. به گونه‌ای که ۵۳/۷ درصد مساحت ایران درگیر خشکسالی بسیار شدید، ۱۹/۶ درصد درگیر خشکسالی شدید و ۲۰/۶ درصد تحت تأثیر خشکسالی متوسط قرار گرفته است و تنها ۵/۹ درصد مساحت ایران در بخش‌های از نواحی رویشی هیرکانی و ارسباران، دارای خشکسالی نزدیک به نرمال به واسطه داشتن رطوبت زیاد خاک هستند؛ لذا افزایش

افزایش یافته است. تداوم کاهش میانگین رطوبت خاک در سایر نواحی همچنان قابل مشاهده است. پراکندگی جغرافیایی شاخص KBDI در ماه اکتبر، با شدت‌های متفاوت در نواحی رویشی ایران در شکل (۲) نشان داد که در این ماه همچنان تمرکز و پایداری کانون‌های خشکسالی در نواحی مرکزی، شرقی، جنوب و

برای رخداد خشکسالی دارد. تنها در جنگل‌های گلستان، احتمال رخداد خشکسالی با طبقه متوسط و یا بیشتر وجود دارد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۴)، میانگین رطوبت خاک در ناحیه رویشی هیرکانی (۳۰ درصد) و در ناحیه رویشی زاگرس (۳۳ درصد) به صورت پراکنده



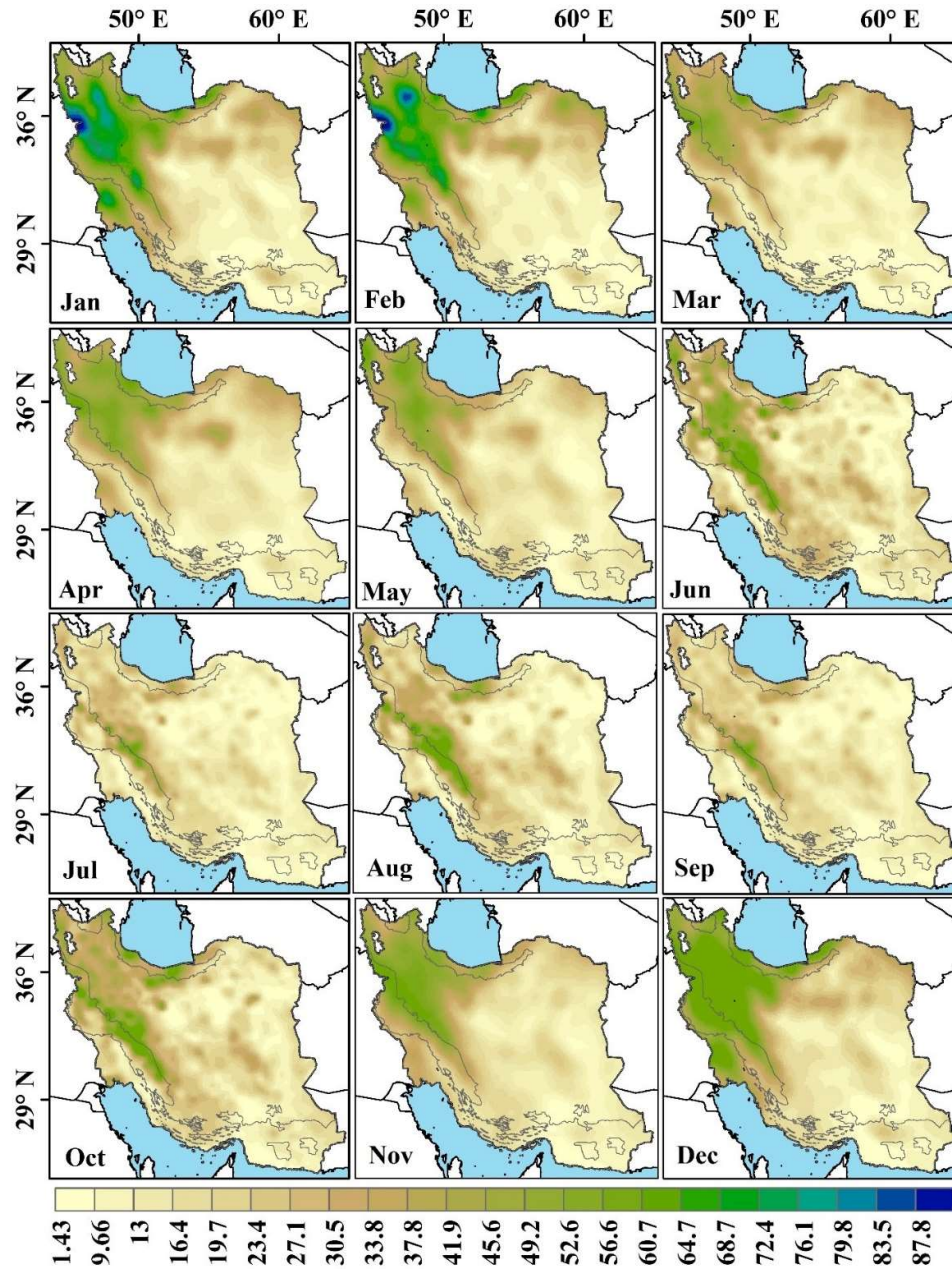
شکل ۳. پهنه بندی ماهانه شاخص خشکسالی KBDI نواحی رویشی ایران در باز زمانی ۲۰۲۰-۱۹۸۱ منتج شده از مجموعه داده ECMWF-ERA5 با تفکیک

افقی ۰/۲۵ درجه قوسی.

جنوب شرق و گسترش آن‌ها به سمت نواحی شمال و شمال غرب قابل مشاهده است. بیشینه میانگین این پدیده در نواحی رویشی خلیج-عمانی، ایرانی-تورانی و زاگرس به ترتیب با مقدار عددی ۱۸۷/۸، ۱۴۹/۸ و ۱۲۴/۸ رخ داده به گونه‌ای که طبقات خشکسالی متوسط، شدید و بسیار شدید در ۹۴/۸ درصد این نواحی گسترش یافته است. این نتایج آسیب‌پذیری عرصه‌های طبیعی و مرتعی این نواحی به‌ویژه ناحیه رویشی زاگرس را که دارای پوشش گیاهی مناسبی در این ماه است، را نسبت به روند خشک شدن لایه‌های تجمعی خاک نشان می‌دهد. خشکسالی در نواحی رویشی ایران افزایش چشمگیری بویژه در پهنه خلیج-عمانی داشته است، به گونه‌ای که دوره‌های خشکسالی بسیار شدید با توالی و مقادیر زیاد در این پهنه همچنان ادامه دارد. فراگیرترین خشکسالی این پهنه در سال ۲۰۰۰ با مقدار ۱۹۷/۵ رخ داده است. دوره‌های خشکسالی بلندمدت در مقیاس شدید در پهنه ایرانی-تورانی و زاگرس قابل مشاهده است. در هر دو پهنه، به صورت مشترک سال ۲۰۰۸ خشک‌ترین سال بوده است. همچنین دوره‌های خشکسالی بسیار شدید در پهنه ایرانی-تورانی از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱ رخ داده است (شکل ۵). کاهش شاخص خشکسالی در شاخص KBDI تنها زمانی رخ می‌دهد که بارش از ۱/۵ میلی‌متر بیشتر شده باشد. افزایش بارش در نواحی رویشی هیرکانی و ارسباران باعث اشباع شدن خاک در سطحی به مساحت ۵/۲ درصد گردید. علی‌رغم کاهش دما و افزایش نسبی بارش، همچنان مقادیر رطوبت خاک در مناطق شمالی و جنوبی ایرانی تفاوت قابل توجهی دارد. بیشترین میانگین رطوبت خاک (۳۴ درصد) در نواحی شمالی، شمال غربی و بخش‌های از غرب مشاهده شده است (شکل ۴).

همان‌طور که در نقشه پهنه‌بندی شاخص خشکسالی ماه نوامبر مشخص است، قسمت اعظم مساحت ایران (۷۵/۶ درصد) در نواحی رویشی خلیج-عمانی، ایرانی-تورانی و بخش‌های اندکی از زاگرس، در طبقات شدید و بسیار

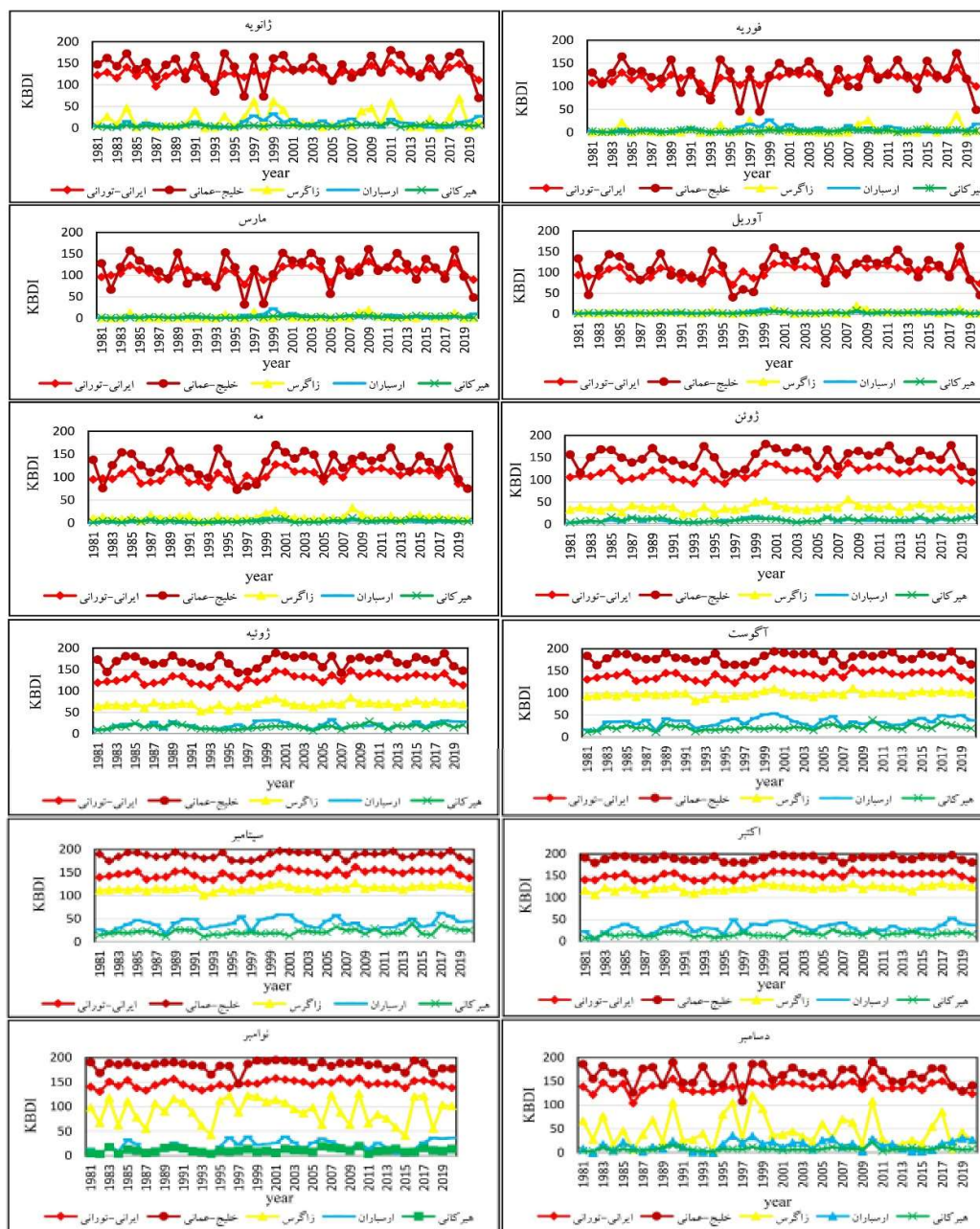
شدید خشکسالی قرار گرفته که نشان‌دهنده کمبود رطوبت در لایه‌های بالایی خاک است. همچنان که نقشه رطوبت سطحی خاک نیز کمبود میانگین رطوبت خاک را در این مناطق نشان می‌دهد. مساحت طبقه دارای رطوبت زیاد خاک نسبت به سایر طبقات کمتر است و در ۷ درصد مساحت ایران واقع در نواحی رویشی ارسباران و هیرکانی قرار گرفته است (شکل ۳). نکته قابل توجه آنست که جنگل گلستان تقریباً در ۶ ماه از سال دارای پتانسیل خشکسالی بیشتری نسبت به سایر بخش‌های هیرکانی است. میانگین رطوبت خاک در این منطقه نسبت به سایر نواحی رویشی هیرکانی که بالاترین میانگین رطوبت خاک را دارا هستند، در وضعیت پایینی قرار دارد. اگرچه در این ماه، بالاترین دوره‌های خشک متوالی مربوط به خلیج-عمانی و ایرانی-تورانی است اما تغییرات دوره‌های خشک در پهنه رویشی زاگرس نسبت به ماه قبل کمتر شده است به گونه‌ای که در بیشتر سال‌های مورد مطالعه خشکسالی متوسط را تجربه کرده و از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۲ دوره‌های خشکسالی شدید رخ داده است. سال ۲۰۰۱ در پهنه خلیج-عمانی، ایرانی-تورانی به ترتیب با ۱۹۵ و ۱۵۷/۵ و سال ۲۰۱۰ با مقدار ۱۲۶/۵ در پهنه زاگرس خشک‌ترین سال‌های ثبت شده هستند. بالاترین مقادیر رطوبت خاک در نواحی شمال، شمال غرب و غرب ایران (۳۹ درصد) مشاهده شده است به سمت نواحی مرکزی و جنوبی از مقادیر آن کاسته می‌شود. نتایج بررسی شاخص KBDI در ماه دسامبر نشان داد که حدود ۵۰/۱ درصد از مساحت ایران در معرض خشکسالی بسیار شدید قرار گرفته است که عمدتاً در نواحی مرکزی، شرق، جنوب شرق واقع در ناحیه رویشی خلیج-عمانی و سواحل جنوبی ناحیه خلیج-عمانی گسترده شده‌اند. عموماً نواحی با بارش و رطوبت نسبی کمتر دارای خشکسالی‌های بیشتری هستند. ۱۸/۳ درصد مساحت ایران به‌صورت پراکنده و نامنظم درگیر خشکسالی‌های شدید هستند که خشک بودن لایه زیرین خاک در این مناطق



شکل ۴. پهنه بندی ماهانه شاخص رطوبت خاک (SSM) نواحی رویشی ایران در بازه زمانی ۲۰۲۰-۱۹۹۱ با استفاده از محصول ترکیبی سنجنده‌های مایکروویو فعال با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی (واحد: درصد).

جدول ۲. همبستگی شاخص خشکسالی (KBDI) با شاخص‌های رطوبت سطحی خاک (SSM) و شاخص بازسازی شده پوشش گیاهی (EVI) در نواحی رویشی ایران.

شاخص	ایرانی-تورانی	خلیج-عمانی	هیرکانی	ارسباران	زاگرس
SSM	-۰/۷۵	-۰/۷۰	-۰/۶۶	-۰/۶۱	-۰/۷۰
EVI	-۰/۵۳	-۰/۸۵	-۰/۷۷	-۰/۵۱	-۰/۵۷



شکل ۵. سری زمانی ماهانه شاخص خشکسالی (KBDI) در نواحی رویشی ایران طی دوره ۱۹۸۱-۲۰۲۰.

مساحت ایران در ارسباران، زاگرس و هیرکانی به صورت اشباع بوده که دارای وضعیت خشکسالی نزدیک به نرمال هستند (شکل ۳). شدیدترین دوره‌های خشکسالی در این ماه محدود به دو پهنه رویشی خلیج-عمانی و ایرانی-

احتمال رخداد خشکسالی را افزایش داده است. خشکسالی‌های متوسط در شمال شرق، جنگل‌های گلستان، فارس، کرمانشاه و کردستان، ۱۷/۱ درصد را به خود اختصاص داده است. لایه‌های خاک در ۱۴/۳ درصد از

خشکسالی است. در مجموع ناحیه ریشی خلیج-عمانی دارای رطوبت خاک و پوشش گیاهی پایین و در نتیجه شدت خشکسالی بالایی است.

۴ نتیجه‌گیری

شناسایی وضعیت خشکسالی در گام نخست و پیش‌بینی آن در گام‌های بعدی در حوزه‌های مختلفی از جمله کشاورزی، منابع آب و آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع بسیار حائز اهمیت است. در این پژوهش از شاخص خشکسالی KBDI منتج شده از ECMWF-ERA5 برای بررسی رخداد خشکسالی در نواحی ریشی ایران طی دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۸۱ استفاده شده است. از آنجاییکه شاخص KBDI وضعیت رطوبتی خاک را برای رخداد خشکسالی مورد بررسی قرار می‌دهد جهت مقایسه نتایج این شاخص و درستی نتایج آن در پهنه‌های مختلف ریشی ایران از محصول ترکیبی سنجنده‌های میکروویو فعال استفاده شده است.

توزیع زمانی شاخص KBDI در نواحی ریشی ایران نشان داد، مقادیر کاهش این شاخص در ماه‌های فصل زمستان و بهار و مقادیر افزایشی آن در ماه‌های فصل تابستان و پاییز مشاهده گردید. همچنین توزیع مکانی آن از منطقه‌ای به منطقه دیگر به دلیل تفاوت متغیرهای اقلیمی دما و بارش، متفاوت است. به گونه‌ای که بخش‌های از غرب، جنوب غرب، شرق، جنوب شرق و مرکز ایران شرایط خشکی متوسط تا شدید را در ماه‌های مختلف تجربه می‌کنند. در حالی که وضعیت خشکسالی در شمال و شمال غرب ایران متغیرتر و پیچیده‌تر است. در ماه‌های گرم سال (ژوئن، ژوئیه و آگوست) هم‌زمان با افزایش دما، کاهش بارش و افزایش خشکی در اکثر مناطق ایران، مقادیر شاخص خشکسالی افزایش یافته است. افزایش مقادیر KBDI ماه‌های سپتامبر، اکتبر و نوامبر نشان‌دهنده افزایش طول دوره خشکی است، همچنین این افزایش بیشتر

تورانی است. در پهنه خلیج-عمانی از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۱ خشکسالی‌های بسیار شدیدی رخ داده که سال ۲۰۱۰ با ۱۸۰/۸ خشک‌ترین سال در این پهنه است. همچنین پهنه ایرانی-تورانی دوره‌های خشک متوالی زیادی را تجربه کرده و سال ۲۰۱۰ با ۱۵۶/۷ خشک‌ترین سال در این پهنه است (شکل ۵).

تغییرات میانگین رطوبت سطحی خاک نواحی ریشی ایران در این ماه در نواحی شمال، شمال غرب و غرب افزایشی بوده و میزان این افزایش در ناحیه ریشی زاگرس با مقدار عددی ۴۱/۸ بیشینه است. تغییر اندک مقادیر رطوبت خاک در نواحی ریشی خلیج-عمانی (۱۸/۲ درصد) و ایرانی-تورانی (۲۲ درصد) نشان داد، این نواحی تحت تأثیر بارش‌های این مناطق قرار نگرفته است. نتایج شاخص رطوبت خاک در ماه‌های سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر کارایی بالای شاخص خشکسالی KBDI را در شناسایی کانون‌های خشکسالی و کارایی آن را نشان می‌دهد.

بررسی همبستگی بین مقادیر شاخص رطوبت سطحی خاک (SSM) و شاخص بارزسازی شده پوشش گیاهی (EVI) با شاخص خشکسالی (KBDI) بیانگر آن است که همبستگی در تمامی نواحی ریشی منفی است که نشان از کمبود رطوبت خاک دارد. به گونه‌ای که با کاهش رطوبت خاک مقادیر شاخص خشکسالی افزایش می‌یابد. بیشینه همبستگی شاخص خشکسالی (KBDI) با رطوبت سطحی خاک متعلق به ناحیه ریشی ایرانی-تورانی با مقدار ۰/۷۵- و پس از آن ناحیه خلیج-عمانی و زاگرس با مقدار ۰/۷۰- است. این نتایج آسیب‌پذیری این مناطق را نسبت به خشکسالی نشان می‌دهد. همچنین ضریب همبستگی شاخص KBDI با شاخص EVI در تمامی نواحی ریشی ایران معکوس است که بیشینه آن با مقدار ۰/۸۵- در پهنه ریشی خلیج-عمانی مشاهده شده است. این همبستگی بیانگر کاهش مقدار شاخص EVI با افزایش مقدار

تحت تأثیر متغیر بارش است. زیرا بارش تنها عاملی است که می‌تواند مقادیر KBDI را کاهش دهد. همچنانکه بررسی شاخص خشکسالی KBDI در آنتالیا توسط وارول و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که مقادیر این شاخص در ماه اکتبر و نوامبر افزایش یافته است.

درجات پایین تا بسیار شدید خشکی لایه‌های بالایی خاک، بسیاری از عرصه‌های طبیعی و مرتعی مورد مطالعه را فراگرفته به گونه‌ای که در ۸۱/۲۴ درصد از مساحت عرصه‌های رویشی ایران لایه‌های بالایی خاک شرایط خشکی متفاوتی را تجربه و تنها ۱۸/۵۵ درصد دارای رطوبت زیاد خاک است. از مجموع ۸۱/۲۴ درصد خشکی خاک ۱۵/۷۵ درصد لایه‌های خاک در حال خشک شدن، ۲۱/۴۰ درصد لایه‌های خاک کاملاً خشک و در ۴۴/۰۸ درصد، خشکی شدید رطوبت خاک مشاهده گردید. تغییرات لایه‌های بالایی خاک در طول ماه‌های فصل زمستان تنوع کمتری داشت که با نتایج پژوهش ووس و همکاران (۲۰۱۵) مبنی بر اینکه رطوبت خاک در فصل زمستان در جنگل‌ها و مراتع ایالات متحده تغییرات کمتری داشته، همخوانی دارد.

شدیدترین و طولانی‌ترین دوره‌های خشکسالی طی دوره بلند مدت (۲۰۲۰-۱۹۸۱) از اواخر دهه ۹۰ و سراسر دهه ۲۰۰۰ بویژه در پهنه رویشی خلیج-عمانی و ایرانی-تورانی رخ داده است. شدیدترین خشکسالی رخ داده براساس شاخص KBDI، در ماه اکتبر سال ۲۰۰۰ با مقدار ۱۹۷/۵ بوده است که در پهنه رویشی خلیج-عمانی مشاهده شده است.

پراکنش زمانی-مکانی رطوبت خاک نشان داد، بالاترین میانگین ماهانه رطوبت خاک در ماه دسامبر در ناحیه رویشی زاگرس و کمترین مقدار میانگین ماهانه نیز در ماه می در ناحیه رویشی خلیج-عمانی مشاهده شد. این امر زمان بازیابی خشکسالی را طولانی‌تر و اثرات خشکسالی را بر اکوسیستم و منابع طبیعی تشدید می‌کند. در نتیجه،

تغییرات رطوبت خاک و خشکسالی می‌تواند رخداد آتش‌سوزی را نیز افزایش دهد. نتایج شاخص رطوبت خاک همچنین نشان داد که شاخص خشکسالی KBDI در شناسایی کانون‌های خشکسالی بویژه در مناطق مرکزی، شرق، جنوب شرق و بخش‌های از غرب و جنوب غرب ایران کارایی مناسبی ارائه داده و پهنه‌های رطوبتی را به شکل مناسبی نشان داده است.

خشکسالی مکرر با شدت کم ممکن است به نفع گونه‌های مقاوم‌تر به خشکی باشد و جنگل‌ها و مراتع را بدون نیاز به اقدامات مدیریتی با شرایط آینده سازگار کند. در مقابل، خشکسالی شدید به‌ویژه در ترکیب با آتش-سوزی، ممکن است تغییرات بزرگی را ایجاد کند که اقدامات مدیریتی قابل توجهی را ایجاب می‌کند. باتوجه به اینکه نواحی رویشی مختلف ایران در برابر خشکسالی آسیب‌پذیر هستند و با افزایش شدت، فراوانی یا طول دوره خشکسالی تغییرات قابل توجهی را تجربه می‌کنند. لذا باید رویکرد مدیریت یکپارچه آتش‌سوزی جنگل که شامل ارزیابی‌های اجتماعی، اقتصادی، فرهنگی و زیست‌محیطی با هدف به حداقل رساندن آسیب و به حداکثر رساندن فواید آتش‌سوزی است، ترویج شود. همچنین برنامه‌های اقدام با خشکسالی باید به‌عنوان بخش مهمی از مدیریت پایدار جنگل‌ها و مراتع ترویج شود و به‌ویژه استفاده از زیست‌توده جنگل باید در سیاست‌های جنگلی کشور ادغام و ترویج شود. افزون بر این ایجاد پایگاه‌های اطلاعاتی دقیق در مورد خشکسالی در نواحی جنگلی، بهبود و توسعه سامانه‌های رتبه‌بندی ریسک رخداد خشکسالی برای شناسایی مناطق پرخطر استفاده شود.

منابع

باروتی، خانه، ذوالفقاری، مریم و سلیمان پور، سید مسعود. (۱۳۹۲). مقایسه شاخص‌های PNPI و SPI در پایش و

- کردپور، ایمان. (۱۳۹۸). تلفیق مشاهدات هواشناسی با مشاهدات ماهواره GRACE جهت بررسی خشکسالی در ایران. به راهنمایی سعید فرزانه و رضا شاه حسینی. تهران: دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی.
- مرادی، حمیدرضا و عرفان زاده، رضا. (۱۳۸۰). بررسی روند خشکسالی ها و ترسالی ها در حوضه رود هراز. اولین کنفرانس ملی بررسی راهکارهای مقابله با بحران آب، زابل.
- مصطفی‌زاده، رئوف و ذبیحی، محسن. (۱۳۹۵). تحلیل و مقایسه شاخص‌های SPI و SPEI در ارزیابی خشکسالی هواشناسی با استفاده از نرم‌افزار R (بررسی موردی: استان کردستان). فیزیک زمین و فضا، ۴۲ (۳)، ۶۳۳-۶۴۳.
- مودنی، نیلوفر. (۱۳۹۷). پهنه‌بندی ریسک آتش‌سوزی جنگل در بیوم زاگرس (مطالعه موردی استان کردستان). به راهنمایی رومینا سیاح‌نیا و حسن اسماعیل زاده. تهران: دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده علوم محیطی.
- Abatzoglou, J. T., & Williams, A. P. (2016). Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(42), 11770-11775.
- Ainuddin, N. A., & Ampun, J. (2008). Temporal analysis of the keetch-byram drought index in Malaysia: implications for forest fire management. *Journal of Applied Sciences*, 8(21), 3991-3994.
- Andrade, C., & Bugalho, L. (2023). Multi-Indices Diagnosis of the Conditions That Led to the Two 2017 Major Wildfires in Portugal. *Fire*, 6(2), 56.
- Bengtsson, L., Kanamitsu, M., Kallberg, P., & Uppala, S. (1982). FGGE 4-dimensional data assimilation at ECMWF (weather forecasts). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63, 29-43.
- Chaparro, D., Vall-Llossera, M., Piles, M., Camps, A., Rüdiger, C., & Riera-Tatché, R. (2016). Predicting the extent of wildfires using پهنه‌بندی روند خشکسالی در استان قزوین. پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران.
- بذرافشان، جواد، شهبازی، سمیرا، ایران نژاد، پرویز و سهرابی، تیمور. (۱۳۹۴). واسنجی شاخص شدت خشکسالی پالمیر تحت شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک مناطق غرب و جنوب غرب ایران. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۲ (۵)، ۲۳-۴۴.
- جهانگیر، محمد حسین، حسین دوست، محمد صادق و ارست، مینا. (۱۴۰۰). ارزیابی وضعیت خشکسالی استان گیلان با استفاده از شاخص کیچ-بایرام (KBDI) در انطباق با شاخص درصد نرمال بارندگی (PNPI). مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۱ (۴)، ۵۷-۶۷.
- چکشی، بهاره. (۱۳۸۰). بررسی جنبه‌های زیست‌محیطی پدیده خشکسالی و سیل، اولین کنفرانس ملی بررسی راهکارهای مقابله با بحران.
- حجابی، سمیه، ایران نژاد، پرویز و بذرافشان، جواد. (۱۳۹۷). تعدیل شاخص شدت خشکسالی پالمیر (PDSI) بر مبنای طرحواره برهمکنش جو-سطح خشکی (ALSIS) در حوضه آبریز کرخه. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴ (۳)، ۱۷۰-۱۸۳.
- حجازی زاده، زهرا، پژوه، فرشاد، و شکیب، هانیه. (۱۴۰۰). واکاوی و مقایسه ی چند شاخص خشکسالی اقلیمی و تعیین بهترین شاخص در جنوب شرق ایران. جغرافیا، ۱۹ (۶۸)، ۵-۲۱.
- خسروی، محمود، زهرایی، اکبر، حیدری، حسین و بنی نعیمه، سارا. (۱۳۹۱). تعیین مناطق هم خشکسالی استان گیلان با استفاده از شاخص ناهنجاری بارش. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱ (۳)، ۱-۲۰.
- فرج زاده، منوچهر و احمدیان، کلثوم. (۱۳۹۳). تحلیل زمانی و مکانی خشکسالی با استفاده از شاخص SPI در ایران. مخاطرات محیط طبیعی، ۳ (۴)، ۱-۱۶.

- remotely sensed soil moisture and temperature trends. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 9(6), 2818-2829.
- Charlton, C., Stephenson, T., Taylor, M. A., & Campbell, J. (2022). Evaluating Skill of the Keetch–Byram Drought Index, Vapour Pressure Deficit and Water Potential for Determining Bushfire Potential in Jamaica. *Atmosphere*, 13(8), 1267.
- Charlton, C., Stephenson, T., Taylor, M. A., & Campbell, J. (2022). Evaluating Skill of the Keetch–Byram Drought Index, Vapour Pressure Deficit and Water Potential for Determining Bushfire Potential in Jamaica. *Atmosphere*, 13(8), 1267.
- Crapolicchio, R., A. Bigazzi, G. De Chiara, X. Neyt, A. Stoffelen, M. Belmonte, W. Wagner, C. Reimer (2016) The scatterometer instrument competence centre (SCIRoCCo): Project's activities and first achievements, Proceedings European Space Agency Living Planet Symposium 2016, 9-13 May 2016, Prague, Czech Republic, 9-13.
- Crossett, C. C., Betts, A. K., Dupigny-Giroux, L. A. L., & Bomblies, A. (2020). Evaluation of daily precipitation from the ERA5 global reanalysis against GHCN observations in the northeastern United States. *Climate*, 8(12), 148.
- Cohen, I., Huang, Y., Chen, J., Benesty, J., Benesty, J., Chen, J., ... & Cohen, I. (2009). Pearson correlation coefficient. Noise reduction in speech processing, 1-4.
- Dai, A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature climate change*, 3(1), 52-58.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., & Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656), 553-597
- Dikici, M. (2020). Drought analysis with different indices for the Asi Basin (Turkey). *Scientific Reports*, 10(1), 20739.
- Döll, P., Fiedler, K., & Zhang, J. (2009). Global-scale analysis of river flow alterations due to water withdrawals and reservoirs. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(12), 2413-2432.
- Dolling, K., Chu, P. S., & Fujioka, F. (2009). Natural variability of the Keetch–Byram drought index in the Hawaiian Islands. *International journal of wildland fire*, 18(4), 459-475.
- Dorigo, W., Wagner, W., Albergel, C., Albrecht, F., Balsamo, G., Brocca, L., & Lecomte, P. (2017). ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: State-of-the art and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 203, 185-215.
- Ghulam, A., Qin, Q., Teyip, T., & Li, Z. L. (2007). Modified perpendicular drought index (MPDI): a real-time drought monitoring method. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 62(2), 150-164.
- Gibson, J. K., Kållberg, P., Uppala, S. M., Hernandez, A., Nomura, A., & Serrano, E. (1999). ECMWF re-analysis project report 1, ERA-15 description (version 2). Technical Report, ECMWF, Reading, UK.
- Gülşen, K. U. M., & SÖNMEZ, M. (2016). Determination of meteorological forest fire risks in mediterranean climate of Turkey. *KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi*, 19(2), 181-192.
- Hamarash, H., Hamad, R., & Rasul, A. (2022). Meteorological drought in semi-arid regions: A case study of Iran. *Journal of Arid Land*, 14(11), 1212-1233.
- Hayes, M. J., Alvord, C., & Lowrey, J. (2007). Drought indices. *Intermountain west climate summary*, 3(6), 2-6.
- Heim Jr, R. R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1149-1166.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- H-SAF (2017): ASCAT Surface Soil Moisture CDR2014 Time Series 12.5 km Sampling - Metop, EUMETSAT SAF on Support to Operational Hydrology and Water Management.
- Isaaks E. H., and Srinivasta R. M (1989). *Applied Geostatistics*. Oxford University Press:Oxford
- Jackson, R. D., Kustas, W. P., & Choudhury, B. J. (1988). A reexamination of the crop water stress index. *Irrigation science*, 9, 309-317.
- Janis, M. J., Johnson, M. B., Forthun, G. 2002. NearReal Time Mapping of Keetch–Byram Drought Index in the South-Eastern United

- States. *International Journal of Wildland Fire*, 11, 281–289.
- Jiang, Z., Huete, A. R., Didan, K., & Miura, T. (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote sensing of Environment*, 112(10), 3833-3845.
- Keetch, J. J., & Byram, G. M. (1968). A drought index for forest fire control (Vol. 38). US Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station.
- Li, L., She, D., Zheng, H., Lin, P., & Yang, Z. L. (2020). Elucidating diverse drought characteristics from two meteorological drought indices (SPI and SPEI) in China. *Journal of Hydrometeorology*, 21(7), 1513-1530.
- Littell, J. S., McKenzie, D., Peterson, D. L., & Westerling, A. L. (2009). Climate and wildfire area burned in western US ecoprovinces, 1916–2003. *Ecological Applications*, 19(4), 1003-1021.
- Littell, J. S., Peterson, D. L., Riley, K. L., Liu, Y., & Luce, C. H. (2016). A review of the relationships between drought and forest fire in the United States. *Global change biology*, 22(7), 2353-2369.
- Liu, M., Xu, X., Xu, C., Sun, A. Y., Wang, K., Scanlon, B. R., & Zhang, L. (2017). A new drought index that considers the joint effects of climate and land surface change. *Water Resources Research*, 53(4), 3262-3278.
- Mersin, D., Gulmez, A., Safari, M. J. S., Vaheddoost, B., & Tayfur, G. (2022). Drought Assessment in the Aegean Region of Turkey. *Pure and Applied Geophysics*, 179(8), 3035-3053.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of hydrology*, 391(1-2), 202-216.
- Mitri, G., Jazi, M., & McWethy, D. (2015). Assessment of wildfire risk in Lebanon using geographic object-based image analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81(6), 499-506.
- Naresh Kumar, M., Murthy, C. S., Sessa Sai, M. V. R., & Roy, P. S. (2009). On the use of Standardized Precipitation Index (SPI) for drought intensity assessment. *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling*, 16(3), 381-389.
- Natarajan, N., Vasudevan, M., Ashash Raja, S., Mohanpradaap, K., Sneha, G., & Joshna Shanu, S. (2023). An assessment methodology for drought severity and vulnerability using precipitation-based indices for the arid, semi-arid and humid districts of Tamil Nadu, India. *Water Supply*, 23(1), 54-79.
- Ochsner, T. E., Cosh, M. H., Cuenca, R. H., Dorigo, W. A., Draper, C. S., Hagimoto, Y., ... & Zreda, M. (2013). State of the art in large-scale soil moisture monitoring. *Soil Science Society of America Journal*, 77(6), 1888-1919.
- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological drought* (Vol. 30). US Department of Commerce, Weather Bureau.
- Rakhmatova, N., Arushanov, M., Shardakova, L., Nishonov, B., Taryannikova, R., Rakhmatova, V., & Belikov, D. A. (2021). Evaluation of the perspective of ERA-Interim and ERA5 reanalyses for calculation of drought indicators for Uzbekistan. *Atmosphere*, 12(5), 527.
- Satoh, Y., Yoshimura, K., Pokhrel, Y., Kim, H., Shioyama, H., Yokohata, T., ... & Oki, T. (2022). The timing of unprecedented hydrological drought under climate change. *Nature communications*, 13(1), 3287.
- Sheffield, J., & Wood, E. F. (2008). Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate dynamics*, 31, 79-105.
- Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Gudmundsson, L., Van Loon, A. F., & Stahl, K. (2015). Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, 35(13), 4027-4040.
- Trenberth, K. E., Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4(1), 17-22.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., & Fung, A. K. (1982). *Microwave remote sensing: Active and passive. Volume 2-Radar remote sensing and surface scattering and emission theory*.
- Uppala, S. M., Kållberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., Bechtold, V. D. C., Fiorino, M., ... & Woollen, J. (2005). The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, 131(612), 2961-3012.
- van der Schrier, G., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (2013). A scPDSI-based global data set of dry and wet spells for 1901–2009. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(10), 4025-4048.
- Varol, T., & Ertuğrul, M. (2016). Analysis of the forest fires in the Antalya region of Turkey

- using the Keetch–Byram drought index. *Journal of Forestry Research*, 27, 811-819.
- Verbesselt, J., Jonsson, P., Lhermitte, S., van Aardt, J., & Coppin, P. (2006). Evaluating satellite and climate data-derived indices as fire risk indicators in savanna ecosystems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(6), 1622-1632.
- Vose, J. M., Clark, J. S., Luce, C. H., & Patel-Weyand, T. (2015). Effects of drought on forests and rangelands in the United States: a comprehensive science synthesis.
- Wang, C., Qi, S., Niu, Z., & Wang, J. (2004). Evaluating soil moisture status in China using the temperature–vegetation dryness index (TVDI). *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(5), 671-679.
- Willhite, D. A. (2000). Drought preparedness and response in the context of Sub-Saharan Africa. *Journal of contingencies and crisis management*, 8(2), 81-92.
- Willhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10, 111-120.
- Wisser, D., Fekete, B. M., Vörösmarty, C. J., & Schumann, A. H. (2010). Reconstructing 20th century global hydrography: a contribution to the Global Terrestrial Network-Hydrology (GTN-H). *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(1), 1-24.
- Yoon, J. H., Wang, S. Y. S., Gillies, R. R., Hipps, L., Kravitz, B., & Rasch, P. J. (2015). 2. Extreme fire season in California: A glimpse into the future?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), S5-S9.
- Yu, H., Zhang, Q., Xu, C. Y., Du, J., Sun, P., & Hu, P. (2019). Modified palmer drought severity index: model improvement and application. *Environment international*, 130, 104951.
- Zhang, Q., Li, Q., Singh, V. P., Shi, P., Huang, Q., & Sun, P. (2018). Nonparametric integrated agrometeorological drought monitoring: Model development and application. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(1), 73-88.
- Zhang, X., Chen, B., Zhao, H., Li, T., & Chen, Q. (2018). Physical-based soil moisture retrieval method over bare agricultural areas by means of multi-sensor SAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 39(12), 3870-3890.
- Zhao, T., & Dai, A. (2015). The magnitude and causes of global drought changes in the twenty-first century under a low–moderate emissions scenario. *Journal of climate*, 28(11), 4490-4512.
- Zhou, Y., Zhou, P., Jin, J., Wu, C., Cui, Y., Zhang, Y., & Tong, F. (2022). Drought identification based on Palmer drought severity index and return period analysis of drought characteristics in Huaibei Plain China. *Environmental Research*, 212, 113163.
- References (in Persian)
- Barouti, Hananeh, Zulfiqari, Maryam., & Suleimanpour, Seyyed Massoud. (2012). Comparison of PNPI and SPI indices in monitoring and zoning the drought trend in Qazvin province. The 5th Iran Water Resources Management Conference, Tehran. [In Persian]
- Bazrafshan, J., & Bazrafshan, J. (2015). Palmer Drought Severity Index's calibration under the climatic conditions of arid and semiarid regions of the West and South West of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(5), 23-44. [In Persian]
- Chakshi, spring, 2018, investigation of the environmental aspects of drought and flood phenomenon, the first national conference on crisis coping strategies. [In Persian]
- Farajzadeh, M., & Ahmadian, K. (2014). Temporal and Spatial Analysis of Drought with use of SPI Index in Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 3(4), 1-16. [In Persian]
- Hejabi, S., Irannejad, P., & Bazrafshan, J. (2018). Modification of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) based on Atmosphere–Land Surface Interaction Scheme (ALSI) in Karkheh River Basin. *Iran-Water Resources Research*, 14(3), 170-183. [In Persian]
- Hejazi zadeh, Pazhoh, Farshad, & shakiba, haniyeh. (2021). Analysis and comparing several climate droughts indicators and determine the best index in southeast of Iran. *GEOGRAPHY*, 19(68), 5-21. [In Persian]
- Jahangir, M. H., Hosseindoost, M. S., & Arast, M. (2021). Assessment of drought condition in Guilan Province using the Keetch–Byram Drought Index (KBDI) in accordance with the Percent of Normal Precipitation Index (PNPI). *Water and Soil Management and Modelling*, 1(4), 57-67. [In Persian]
- Khosravi, M., Zahraei, A., Heydari, H., & Bani naimeh, S. (2012). Designated drought regions of Gilan using rainfall anomaly index. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 1(3), 1-20. [In Persian]

- Kordpour, Iman. (2018). Combining meteorological observations with GRACE satellite observations to investigate drought in Iran. under the guidance of Saeed Farzaneh and Reza Shah Hosseini. Tehran: University of Tehran, Faculty of Mapping and Geospatial Information Engineering.[In Persian]
- Moradi, Hamidreza., & Erfanzadeh, Reza. (2008). Investigating the trends of droughts and droughts in the Haraz river basin. The first national conference on solutions to deal with the water crisis, Zabul. [In Persian]
- Mostafazadeh, R., & Zabihi, M. (2016). Comparison of SPI and SPEI indices to meteorological drought assessment using R programming (Case study: Kurdistan Province). Journal of the Earth and Space Physics, 42(3), 633-643. [In Persian]
- Mozni, Nilofer. (2017). Forest fire risk zoning in Zagros biome (Kurdistan province case study). under the guidance of Romina Sayahnia and Hassan Ismailzadeh. Tehran: Shahid Beheshti University, Research Institute of Environmental Sciences.[In Persian]

Investigating drought in Iran using Keetch-Byram drought index (KBDI) and evaluating it with surface soil moisture (SSM) of active microwave sensors

Kobra Shojaeizadeh¹, Mahmoud Ahmadi^{2*} and Abbasali Dadashi-Roudbari³

¹ Ph.D. student in Climatology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

² Associate Professor of Climatology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

³ Postdoctoral Research Associate of Climatology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(Received: 27 March 2023, Accepted: 13 May 2023)

Summary

Drought is a natural phenomenon that is mainly caused by less than normal precipitation over a long period that occurs in almost all climates. Since the late 1970s, the occurrence of drought has increased globally due to increased evaporation (caused by global warming). This phenomenon occurs slowly and can be short-term or terminated within a few months or continue for several years. Drought has increased significantly in Iran in recent decades. The increase in droughts has many negative consequences in different areas of agriculture, water resources, and wildfire. The purpose of this study is to investigate the drought situation in the vegetation areas of Iran using the Keetch-Byram drought index (KBDI). For this purpose, the KBDI drought index derived from the data set of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) fifth edition (ERA5) with a horizontal resolution of 0.25° during the period of 1981-2020 has been used. Also, the combined product of surface soil moisture (SSM) from microwave sensors AMI-WS (ERS-1 and ERS-2 satellites) and ASCAT (MetOpA-B satellite) with a horizontal resolution of 0.25° to evaluate the KBDI drought index results as well as the moisture condition. The results showed that the Khaliq-Omani and Irani-Turani vegetation areas have very low soil moisture and high drought in Iran. The amount of soil moisture in these areas is low and the area-averaged is equal to 12.65% and 18.42%, respectively, which has been somewhat constant in all months, in other words, dryness is the predominant climate feature of these areas. The monthly analysis of the KBDI index shows the spread of drought severity towards the west, i.e., the vegetation area of Zagros, in the hot months of the year. A decrease in soil moisture and dryness can be observed in a major part of Iran from early spring to mid-autumn. Also, in the Zagros region, from mid-summer to mid-autumn, increasing values of the drought index and decreasing soil moisture can be observed. The minimum drought index is in the vegetation areas of Hyrkani and Arsbaran. The correspondence between the results of the surface soil moisture (SSM) of the satellite product and the KBDI drought index obtained from ECMWF-ERA5 shows the appropriate efficiency of the KBDI drought index in identifying drought centers in Iran and investigating the spatio-temporal patterns of drought occurrence. Frequent low-intensity drought may favor more drought-tolerant species and adapt forests and grasslands to future conditions without the need for management measures.

Keywords: Iran, drought, soil moisture, KBDI index