



پیش‌نگری همادی نمایه‌های خشکسالی در ایران مبتنی بر برونداد چند مدلی CMIP5

آذر زرین^{۱*}، عباسعلی داداشی رودباری^۲

^۱استادیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲پژوهشگر پسادکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۹

چکیده

افزایش شدت و فراوانی نمایه‌های خشکسالی به دلیل گرمایش جهانی می‌تواند محیط طبیعی را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، پیش‌نگری نمایه‌های خشکسالی با استفاده از مدل‌های گردش کلی جو (GCM) به منظور ارائه پیش‌آگاهی از شرایط خشکسالی و همچنین مدیریت ریسک اقلیمی ناشی از آن ضروری است. برای این منظور از داده‌های بازتحلیل پایگاه ERA5 و برونداد مدل‌های CMIP5 استفاده گردید و سه نمایه روزهای خشک، دوره‌های خشک و شاخص خشکی مورد بررسی قرار گرفت. نه مدل از مجموعه مدل‌های CMIP5 با تفکیک افقی ۰/۵ درجه‌قوسی گزینش و با روش نگاشت چندک دلتا (QDM) تصحیح آریبی شدند. سپس با استفاده از مدل میانگین‌گیری بیزین (BMA) یک مدل همادی تولید و کارایی آن با استفاده از نمودار تیلور بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل CMIP5-MME تولید شده با روش BMA از مدل‌های نه گانه منفرد موجود بهتر عمل کرده است. مدل همادی ایجاد شده دوره خشک و روزهای خشک را دقیق‌تر از شاخص خشکی در ایران برآورده کرده است که نشان می‌دهد مدل‌های CMIP5 رخداد بارشی را بهتر از مقدار بارش برآورد می‌کنند. نتایج گویای این است که فراوانی روزهای خشک، دوره خشکی و همچنین شاخص خشکی در ایران روند افزایشی خواهد داشت. شاخص خشکی (AI) که تعادل بین عرضه و تقاضای آب را در فصل مشترک جو-زمین نشان می‌دهد حداکثر ۳/۱۵ درصد در متوسط پهنه ایران افزایش خواهد داشت. همچنین روزهای خشک و دوره خشک حداکثر به ترتیب ۷/۵۰ و ۲۸/۸۴ درصد در دهه‌های آینده افزایش دارند. نتایج نشان می‌دهد که تحت شرایط تغییر اقلیم، طول دوره خشکسالی افزایش بیشتری نسبت به شاخص خشکی خواهد داشت. این نتیجه یک تهدید جدی برای منابع آب و اکوسیستم تلقی شده و نیازمند توجه ویژه به برنامه‌های مدیریت خشکسالی (DMP) در کشور است.

واژه‌های کلیدی: نمایه‌های خشکسالی، شاخص خشکی (AI)، چند مدلی همادی، ایران.

مقدمه

شدت، فراوانی و وردایی فرین‌های اقلیمی همانند خشکسالی و سیل در آینده به دلیل گرمایش جهانی تغییر خواهد کرد (تگه و همکاران، ۲۰۲۰: ۲). توجه به این نکته حائز اهمیت است که وردایی فرین‌های اقلیمی تأثیر منفی بیشتری بر محیط طبیعی نسبت به وردایی متوسط اقلیمی دارند. بر اساس گزارش پایگاه بین‌المللی بلایای طبیعی (EM-DAT)، رخدادهای

ژئوفیزیکی ناشی از تغییر اقلیم بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷ سبب مرگ و میر ۱/۳ میلیون نفر شده است در همین مدت نیز حدود ۱/۴ میلیارد نفر نیاز به کمک اضطراری داشتند. از این آمار، ۹۱٪ مربوط به خشکسالی، سیل و سایر رخدادهای فرین اقلیمی بوده است (والماک، ۲۰۱۸: ۷). بزرگی این ارقام سبب می‌شود که بررسی رخدادهای فرین به منظور کاهش تلفات جانی و خسارات مالی آنها از اهمیت قابل توجهی برخوردار باشد. بنابراین، بررسی پیامدهای تغییر اقلیم و مطالعه رخدادهای فرین اقلیمی به‌عنوان راهکاری برای

*نویسنده مسئول: zarrin@um.ac.ir

۸۴) و کمبود آب (کالو و همکاران، ۲۰۱۰: ۲۴۸) می‌شود، بلکه فقر و توسعه نیافتگی را نیز تداوم می‌بخشد. در طول دو دهه گذشته، خشکسالی بیش از ۱/۴ میلیارد نفر را تحت تاثیر قرار داده و منجر به مرگ بیش از ۲۵۰۰۰ نفر شده است (CRED, 2020).

مدل‌های گردش کلی جو (GCM) ابزار اولیه‌ای هستند که می‌توانند برای ارائه چشم‌اندازی از اقلیم آینده استفاده شوند. تعداد GCM‌های موجود در حال افزایش است. همگام با افزایش مدل‌های در دسترس، پیشرفت‌هایی نیز در چارچوب مدل‌سازی اقلیمی فاز پنجم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP5) با مجموعه سناریوهای واداشت تابشی (RCPs) حاصل شده است (موس و همکاران، ۲۰۱۰: ۷۵۰). با این حال، علی‌رغم این پیشرفت‌ها در مدل‌های CMIP5 و حتی اخیراً در CMIP6، عدم قطعیت پیش‌نگری‌های اقلیمی از وضعیت آینده همچنان بالاست. در این زمینه، اتخاذ رویکرد همادی چند مدلی، یک رویکرد کارآمد برای کاهش عدم قطعیت‌های مربوط به GCM‌ها است. گزارشی گویای این است که تولید مدل همادی می‌تواند قابلیت اطمینان پیش‌نگری‌های اقلیمی را افزایش دهد (تگه و همکاران، ۲۰۲۰: ۵).

خشکسالی به دلیل پیامدهای گسترده‌ای که به‌خصوص بر منابع آبی و کشاورزی دارد در بسیاری از کشورهای خشک و نیمه و خشک جهان به عنوان یک مسئله جدی به آن توجه می‌شود. همین امر باعث شده است که مطالعات مربوط به خشکسالی طیف گسترده‌ای داشته باشند. این مطالعات را می‌توان در سطح جهانی (ناثومان و همکاران، ۲۰۱۸؛ مونجو و همکاران، ۲۰۲۰)، منطقه‌ای (احمدعلی پور و همکاران، ۲۰۱۹؛ موندال و همکاران، ۲۰۲۱) و حتی محلی (لینکه و همکاران، ۲۰۱۸) تقسیم بندی کرد. مطالعات بسیاری نیز به دلیل اهمیت خشکسالی به پیش‌نگری آن در مناطق مختلف جهان همانند مغولستان (هسل و همکاران، ۲۰۱۸)، چین (سان و همکاران، ۲۰۱۹)، مناطق خشک آسیا (میائو و همکاران، ۲۰۲۰)، مناطق جنوب‌غربی آمریکای شمالی (کوک و همکاران، ۲۰۲۱) و بسیاری دیگر از مناطق

بهبود درک پیامدهای گرمایش جهانی به موضوع مهمی در دهه‌های اخیر تبدیل شده است.

خشکسالی گسترده سال‌های اخیر در ایران، نمادی از رخدادهای اقلیمی فرین تحت شرایط تغییر اقلیم است که چالش‌های پیچیده تأمین آب را برای مصارف رقابتی در مناطق مختلف در زمان کمبود شدید برجسته می‌کند. نگرانی روزافزونی در خصوص ناکارآمدی شیوه‌های کنونی مدیریت خشکسالی که عمدتاً مبتنی بر مدیریت بحران است (زرین و داداشی‌رودباری، ۱۴۰۰ الف)، افزایش یافته است. با توجه به اثرات پیچیده خشکسالی و افزایش فراوانی، شدت و توالی زمانی رخدادهای خشکسالی همراه با تغییر اقلیم ضرورت دارد تا شناختی صحیح از این پدیده مخرب اقلیمی در آینده تحت سناریوهای تغییر اقلیم داشت.

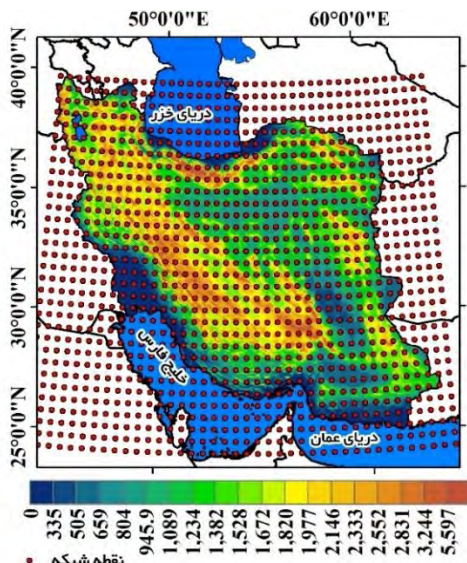
خشکسالی یک مخاطره پیچیده اقلیمی است که جامعه را به طرق مختلف تحت تأثیر قرار می‌دهد. در یک تعریف ساده بارش کمتر از نرمال به عنوان خشکسالی هواشناسی توصیف می‌شود که در صورت تداوم می‌تواند باعث کاهش منابع آب سطحی و زیرسطحی شود. خشکسالی هواشناسی منجر به خشکسالی هیدرولوژیکی و سرانجام کاهش رطوبت خاک (SM) و از بین رفتن محصولات کشاورزی می‌شود که در نتیجه آن باید شاهد خشکسالی کشاورزی بود (بوول و همکاران، ۲۰۲۰). اگر این رخدادهای تأثیر نامطلوبی بر جامعه بگذارد، خشکسالی‌های اجتماعی-اقتصادی نیز رخ خواهد داد. اخیراً حتی خشکسالی‌های اکولوژیکی (کراسبی و همکاران، ۲۰۱۷: ۲۵۴۳) و خشکسالی‌های ناگهانی (اوتکین و همکاران، ۲۰۱۸: ۹۱۱) نیز مورد بحث و بررسی قرار گرفته شده است. در نتیجه این تعاریف مختلف، مجموعه‌ای از معیارها و شاخص‌ها برای بررسی سازمان یافته از میزان و شدت این مخاطرات به منظور کاهش پیامد آن‌ها بر زندگی و معیشت انسان‌ها ایجاد شده است. امنیت غذایی مرتبط با خشکسالی پیامدهای ویرانگری بر جامعه دارد زیرا نه تنها منجر به کمبود غذا (لسک و همکاران، ۲۰۱۶:

هدف از این مطالعه بررسی نمایه‌های خشکسالی در ایران تحت شرایط تغییر اقلیم است. از آنجایی که برآورد بارش با مدل‌های اقلیمی بسیار چالش برانگیزتر از دما است، بنابراین، این مطالعه یک رویکرد همادی چند مدلی را برای پیش‌نگری نمایه‌های خشکسالی در ایران ارائه می‌دهد. پژوهش حاضر سه شاخص خشکی، روزهای خشک و دوره خشک را برای مطالعه وردایی خشکسالی در ایران مورد بررسی قرار داده است. بررسی چندین نمایه مرتبط با خشکسالی این امکان را فراهم می‌آورد تا نسبت به شرایط خشکسالی در آینده، شناخت بهتری شکل گیرد. نتایج این مطالعه کاربردهای مهمی در بخش‌های مختلف آب و کشاورزی در ایران خواهد داشت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر، کشور ایران است (شکل ۱) که در جنوب‌غربی آسیا واقع شده است. ایران از نظر جغرافیایی ایران بین ۳۲ درجه شمالی و ۵۳ درجه شرقی و بین ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و ۴۴ تا ۶۳٫۵ درجه شرقی گسترش یافته است. میانگین بلندمدت بارش سالانه ایران ۲۵۰ میلی‌متر است. اگرچه مناطقی همچون انزلی بارش بیش از ۲۰۰۰ میلی‌متر در سال را هم تجربه می‌کنند اما بارش در بخش‌های بزرگی از ایران کمتر از یک دهم مقدار یاد شده برای انزلی یا مناطق شمالی کشور است. بر این اساس روشن است که ایران به جهت اقلیمی کشوری خشک و نیمه خشک محسوب می‌شود.

جهان پرداختند. تمامی این مطالعات افزایش خشکسالی را به‌عنوان یک تهدید جدی برای مناطق یاد شده عنوان کردند. در ایران نیز خشکسالی مورد توجه پژوهش‌های زیادی بوده است (دارند، ۱۳۹۳؛ تاج‌بخش و همکاران، ۱۳۹۴، خوش اخلاق و همکاران، ۱۳۹۹؛ زرین و داداشی‌رودباری، ۱۴۰۰ الف، جوان، ۱۴۰۰) اما مطالعاتی که به بررسی نمایه‌های خشکسالی تحت شرایط تغییر اقلیم برای آینده در مقیاس ایران پرداخته باشند بسیار محدود است. در این راستا خزانه‌داری و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از مدل آماری LARS-WG به پیش‌نگری وضعیت خشکسالی ایران طی ۳۰ سال آینده پرداختند و نشان دادند که بیش‌تر نقاط کشور تا سال ۲۰۳۹ با خشکسالی شدید و بسیار شدید روبرو خواهند شد. زرین و داداشی‌رودباری (۱۴۰۰ ج) با پیش‌نگری دوره‌های خشک و مرطوب متوالی در ایران به این نتیجه رسیدند که بی‌هنجاری دوره‌های خشک متوالی به‌عنوان یک نمایه استاندارد برای خشکسالی‌های کوتاه‌مدت تحت شرایط تغییر اقلیم در ایران افزایشی است. بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که مطالعات مربوط به پیش‌نگری خشکسالی و نمایه‌های آن در ایران نیازمند بررسی دقیق‌تر و با ارائه مدلی با عدم قطعیت پایین‌تر است. لذا مطالعه‌ای با تعداد مدل‌های بیش‌تر و بررسی دقیق‌تر از نمایه‌های خشکسالی به‌عنوان یک ضرورت باید مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۱- مدل رقومی ارتفاعی ایران همراه با نقطه شبکه‌های ۵/۰ درجه قوسی پایگاه داده

بازتحلیل ERA5 و مدل‌های CMIP5

امروز (نسخه نهایی) در دسترس است. این پایگاه در واقع جایگزین پایگاه داده بازتحلیل ERA-Interim است و برآورد ساعتی از تعداد زیادی از متغیرهای جو، امواج اقیانوس و کمیت‌های سطح زمین را ارائه می‌دهد. برآورد عدم قطعیت در ERA5 توسط یک مجموعه همادی ۱۰ عضوی (Member) در فواصل سه ساعته ارائه می‌شود (هرسباخ و همکاران، ۲۰۲۰: ۲۰۰۳) که از این نظر دارای خطای کمتری نسبت به نسخه پیشین (ERA-Interim) است.

مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز پنجم (CMIP5): فاز پنجم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP5) دارای مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌های مدل‌های گردش کلی (GCMs) هماهنگ جهانی است که توسط مراکز مختلف مدل سازی اقلیمی در دنیا ایجاد شده است. در مقایسه با پروژه CMIP3، برون داد مدل‌های CMIP5 بهبود قابل توجهی یافته است (تیلور و همکاران، ۲۰۱۲: ۴۸۵). در مطالعه حاضر، تعداد نه مدل گردش کلی بر اساس در دسترس بودن آن‌ها برای سناریوهای RCP انتخاب و از هر مدل یک اجرا انتخاب شد (وارینت r1i1p1). شرح GCM‌های منتخب در جدول (۱) آورده شده است. سناریوهای واداشت تابشی توسط CMIP5 مورد استفاده قرار گرفته است. در پژوهش حاضر دو

داده‌های بازتحلیل ERA5: پایگاه‌های داده بازتحلیل (Reanalysis) مشاهداتی را از سراسر جهان جمع‌آوری و طی یک پروژه پیشرفته و پیچیده ترکیب کرده و یک مجموعه داده کامل و سازگار با داده‌های مشاهداتی با استفاده از قوانین فیزیکی جو ایجاد می‌کنند. این فرآیند که داده‌گذاری نامیده می‌شود، مبتنی بر روشی است که توسط مراکز عددی پیش‌بینی هوا استفاده می‌شود، که در آن هر چند ساعت یک بار (برای مثال هر ۱۲ ساعت در مرکز اروپایی پیش‌بینی میان مدت وضع هوا (ECMWF)) پیش‌بینی‌های قبلی با مشاهدات جدید در دسترس به روشی کارا ترکیب می‌شوند تا بهترین شبیه‌سازی از وضعیت جو، که تحلیل (Analysis) نامیده می‌شود، صادر گردد. بازتحلیل‌ها نیز به همان روش داده‌های تحلیلی تولید می‌شوند، اما با تفکیک افقی و زمانی کمتر برای مجموعه داده‌ای که چندین دهه قبل را نیز شامل می‌شود، ارائه می‌گردند (پارکر، ۲۰۱۶: ۱۵۶۵).

پایگاه داده‌های ERA5 نسل پنجم از داده‌های بازتحلیل مرکز ECMWF است که برای بررسی وضعیت جوی و اقلیمی جهانی در چهار تا هفت دهه گذشته است. در حال حاضر داده‌های ERA5 از سال ۱۹۵۰ در دسترس است. داده‌های این پایگاه در دو سری، ۱۹۵۰-۱۹۷۸ (نسخه اولیه) و از سال ۱۹۷۹ به

و اداشت تابشی W/m^2 ۸/۵ را در ۲۱۰۰ نشان می‌دهد. در اینجا دوره‌های آماری شامل یک دوره تاریخی ۲۵ ساله (۲۰۰۵-۱۹۸۱) و سه دوره پیش‌نگری (آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶)) می‌باشد.

سناریوی حد واسط و بدبینانه مورد توجه قرار گرفت. سناریوی RCP4.5 سناریوی حد واسط است که واداشت تابشی را W/m^2 ۴/۵ در سال ۲۱۰۰ تثبیت می‌کند. سناریوی RCP8.5 سناریوی رو به افزایش با انتشار گازهای گلخانه‌ای بسیار زیاد (بدبینانه) است و

جدول ۱- مدل‌های منتخب پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز پنجم (CMIP5)

نام مدل	موسسه سازنده	کشور	تفکیک افقی	واریانت
ACCESS1-0	BoM-CSIRO	استرالیا	۰/۵	rli1p1
bcc-csm1-1-m	BCC	چین	۰/۵	rli1p1
CSIRO-Mk3.6.0	BoM-CSIRO	استرالیا	۰/۵	rli1p1
GFDL-ESM2M	NOAA	آمریکا	۰/۵	rli1p1
HadGEM2-ES	UK Met Office	انگلستان	۰/۵	rli1p1
IPSL-CM5A-LR	IPSL	فرانسه	۰/۵	rli1p1
IPSL-CM5A-MR	IPSL	فرانسه	۰/۵	rli1p1
IPSL-CM5B-LR	IPSL	فرانسه	۰/۵	rli1p1
NorESM1-M	NCC	نروژ	۰/۵	rli1p1

روش با در نظر گرفتن تابع احتمال مشخص، وزن‌ها و عدم قطعیت‌های مربوط به هر مدل را برآورد می‌کند. به عبارت دیگر BMA وزن هر یک از مدل‌ها را به دست می‌آورد و در نتیجه آن، یک مدل ترکیبی (همادی) را تولید می‌کند (مسعود و همکاران، ۲۰۲۰: ۲۴۰۷). در واقع استفاده از روش BMA به عنوان یک روش مطمئن برای جایگزینی یک مدل همادی بجای گرینش یک مدل منفرد از بین تعدادی از مدل‌های منتخب است (زرین و داداشی‌رودباری، ۱۴۰۰ ب).

برای تولید CMIP5-MME معیار اطلاعات بیزین (BIC) برای احتمالات مدل پسین (Posterior) و عدم قطعیت که در مورد متغیر بارش باید در مدل گنجانده شود، محاسبه شد. سپس استقلال ساختاری نه مدل مورد بررسی با استفاده از پنجره Occam's حفظ نموده و یک مدل همادی بر اساس نه مدل ارائه شده در جدول (۱) تولید و نمایه‌های خشکسالی بر اساس آن محاسبه شد.

کارایی مدل‌های گردش کلی مبتنی بر نمودار تیلور: برای بررسی کارایی شبیه‌سازی‌های GCM‌ها از نمودار تیلور (Taylor) استفاده می‌شود. این نمودار با نمایش همبستگی، اختلاف RMS مرکزی و انحراف

تصحیح اریبی مدل‌های گردش کلی: تطابق بین متغیرهای مشاهداتی و مدل‌سازی شده اقلیمی ضروری است. بر این اساس، برون‌داد مستقیم (DMO) مدل‌های CMIP5 با روش نگاشت چندک دلتا (QDM^۱) (سویتانک و همکاران، ۲۰۱۷: ۶۹۳۸) با استفاده از داده‌های پایگاه ERA5 تصحیح شدند. در این روش تصحیح اریبی هر مقدار کمی از توزیع سری زمانی برون‌داد مستقیم مدل (DMO) با توجه به توزیع سری زمانی مشاهداتی (با باز تحلیل) در نظر گرفته شده و سرانجام اریبی را از سری‌های زمانی مدل‌سازی شده کم می‌کند (شرح کامل این روش توسط کانن و همکاران (۲۰۱۵) ارائه شده است).

مدل میانگین گیری بیزین (BMA): مدل میانگین گیری بیزین (Bayesian Model Average (BMA)) یک میانگین چند مدلی از وزن مدل‌های کارا را ایجاد می‌کند. بر این اساس از این روش برای کاهش عدم قطعیت مدل‌ها و اعضای آن نیز استفاده می‌شود (زرین و داداشی‌رودباری، ۱۴۰۰ ج). روش BMA با سایر روش‌های میانگین گیری تفاوت دارد؛ چرا که این

1. Quantile Delta-Mapping (QDM)

ایران استفاده شد (جدول ۲). شاخص خشکی (AI) از نسبت تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) به بارش (Pre) محاسبه می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۲۰). در این روش ابتدا ET_0 و Pre روزانه محاسبه شده و سپس در مقیاس‌های زمانی سالانه، فصلی یا ماهانه برای محاسبه AI تبدیل می‌شود. در این مطالعه، از روش Penman-Monteith FAO 56 برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) استفاده شد.

استاندارد متغیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، به صورت گرافیکی نشان می‌دهد که مشخصه‌های متغیر شبیه‌سازی شده چقدر با مشخصه‌های متغیر مشاهداتی مطابقت دارد (تیلور، ۲۰۰۱: ۷۱۸۳).

نمایه‌های خشکسالی: درک تغییرات آینده از ویژگی‌های خشکسالی برای سازگاری با تغییر اقلیم و کاهش پیامدهای خشکسالی بسیار مهم است. برای این منظور از سه شاخص روزهای خشک، دوره خشک و خشکی به عنوان سه نمایه مهم از خشکسالی در

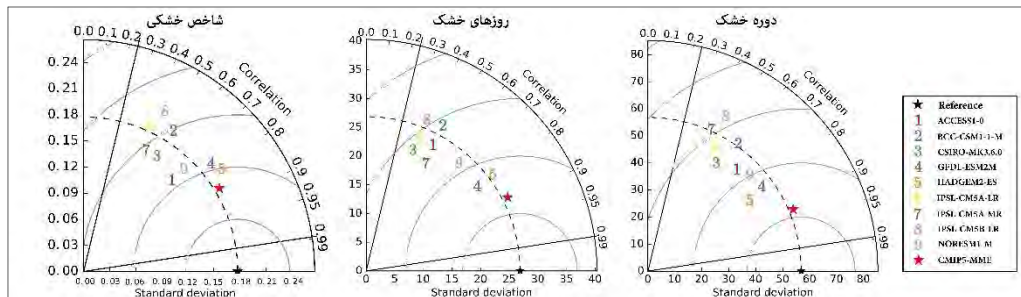
جدول ۲- نمایه‌های خشکسالی مورد استفاده در این پژوهش

نام نمایه	تعریف	واحد
روزهای خشک	تعداد روزهایی در یک سال که مجموع بارش روزانه از ۲ میلی متر تجاوز نمی‌کند.	روز
دوره خشک	روزهای خشک متوالی در هر روز از سال تعیین شده و سپس میانگین این مقادیر روزانه در طول سال در نظر گرفته می‌شود.	روز
شاخص خشکی	تبخیر و تعرق بالقوه ماهانه تقسیم بر میانگین بارش ماهانه (میانگین در طول سال)	بی‌مقیاس

نتایج

درستی سنجی مدل‌های تصحیح شده اریبی CMIP5 و مدل همادی در متوسط پهنه‌ای ایران: همبستگی و انحراف معیار هر GCM با رویکرد تصحیح اریبی QDM، مبتنی بر کارایی مهارتی نمودار تیلور و مدل همادی تولید شده با روش BMA در شکل (۲) نشان داده شده است. برای سه نمایه خشکسالی مورد بررسی در برابر داده‌های ERA5، نمره مهارتی تیلور بیش‌ترین کارایی را به مدل HadGEM2-ES و کمترین کارایی را به مدل IPSL-CM5B-LR اختصاص داده است. بر اساس نمودار تیلور در شکل (۲)، مشاهده می‌شود که مدل IPSL-CM5B-LR دارای کمترین ضریب همبستگی و اختلاف RMS است که با داده‌های ERA5 تفاوت زیادی دارد. در همین حال، بیشترین ضریب همبستگی > 0.8 برای مدل HadGEM2-ES برای شاخص خشکی، روزهای خشک و دوره خشک به دست آمده است. انحراف معیار سه نمایه خشکسالی شبیه‌سازی شده توسط مدل GFDL-ESM2M نیز به انحراف معیار داده‌های ERA5 نسبتاً نزدیک است (شکل ۲).

به‌طور کلی همبستگی به‌دست آمده بین مدل‌های منتخب و ERA5، برای سه نمایه خشکسالی مورد بررسی بین ۰/۴ تا ۰/۸ برای متوسط پهنه‌ای ایران در تغییر است. علاوه بر این، رویکرد همادی چند مدلی با روش BMA همبستگی هر سه نمایه روزهای خشک، دوره‌های خشک و شاخص خشکی را بیش از ۰/۹ برآورد کرده است. بر این اساس مدل همادی نسبت به مدل‌های نه‌گانه منفرد همبستگی بیش‌تری را برای نمایه‌های خشکی نشان می‌دهد. بر اساس نتایج بدست از مدل همادی، بالاترین کارایی بین نمایه‌های خشکسالی مربوط به شبیه‌سازی دوره خشک است. در مقابل، شاخص خشکی کارایی کمتری را نسبت به دوره‌های خشک و حتی روزهای خشک در ایران نشان داده است. بر این اساس مدل همادی تولید شده برای نمایه‌های خشکسالی در ایران طول دوره خشکسالی را نسبت به شاخص خشکی و حتی روزهای خشک بهتر برآورد می‌نماید. مدل‌های تصحیح شده اریبی CMIP5 با روش QDM احتمال رخداد بارش را بهتر از مقدار بارش می‌توانند شبیه‌سازی کنند (شکل ۲).



شکل ۲- درستی سنجی مدل‌های تصحیح شده اریبی CMIP5 و مدل همادی تولید شده با روش BMA برای نمایه‌های خشکسالی شاخص خشکی، روزهای خشک و دوره خشک با داده‌های ERA5 برای متوسط پهنه‌ای ایران

۲۵ ساله، روزهای خشک در ایران حداقل ۱۳۷ و حداکثر ۳۳۵ روز بوده است (شکل ۳). فراوانی روزهای خشک در مناطق شرقی و داخلی ایران بسیار زیاد بوده و این افزایش روزهای خشک به دلیل آستانه بارش دو میلی‌متر برای این شاخص است.

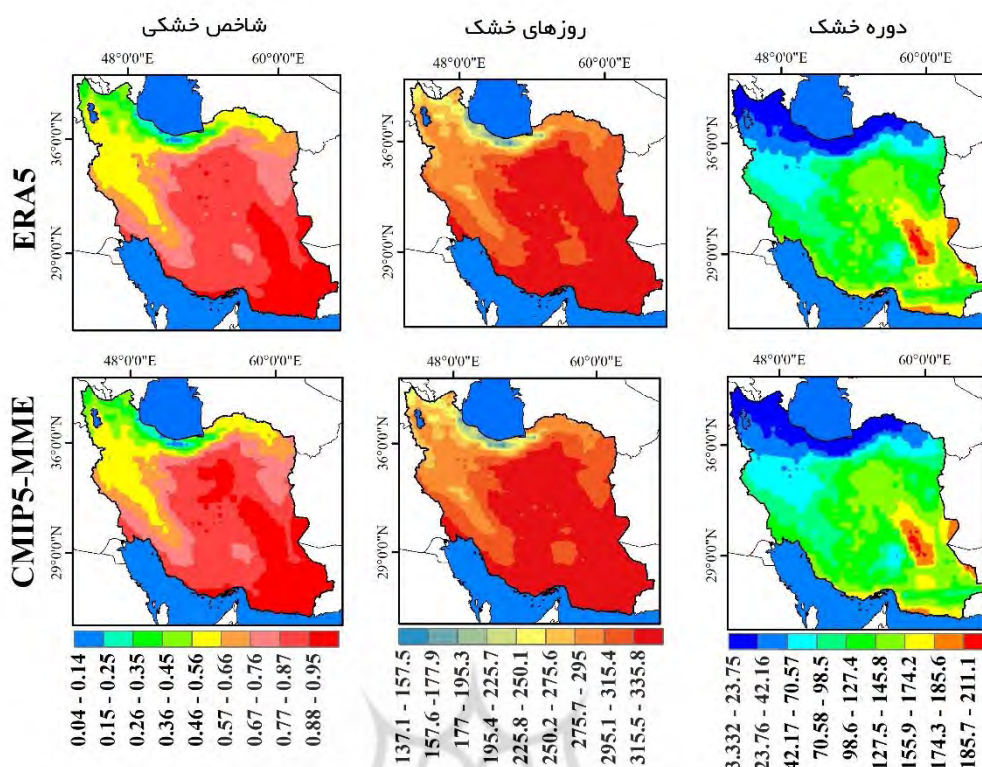
با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۳)، دوره خشک در ایران حداقل ۳ روز و حداکثر ۲۱۱ روز در تغییر بوده است. در مناطق بالاتر از مدار ۳۶ درجه شمالی دوره خشک کمتر از ۵۰ روز در سال است. در مقابل جنوب شرقی ایران، سواحل جنوبی و دشت لوت بالاترین مقدار دوره خشکی را با مقدار قابل توجه ۲۱۱/۱ روز در سال دارند. مقدار قابل توجه شاخص خشکی برای مناطق شرقی، مرکزی و جنوب شرقی (مانند، دشت لوت و کویر) و همچنین در مناطقی با شاخص خشکی و روزهای خشک کم مناطق شمالی یافته‌های قبلی همانند نتایج زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰ج) را تایید می‌کند.

محرک‌های تغییر خشکی و سهم نسبی دما، رطوبت نسبی و بارش در تغییر خشکی و پیامدهای آن را می‌توان با بررسی شکل (۳) ملاحظه کرد. همانطور که دیده می‌شود در عرض‌های جغرافیایی جنوبی کشور همراه با افزایش دما شاخص خشکی نیز افزایش می‌یابد. سهم رطوبت نسبی در مقایسه با دما و بارش برای شدت خشکی در ایران اندک است. با در نظر گرفتن این تغییرات نسبی، مشاهده می‌شود که بارش بیش‌ترین تغییر را در وردایی خشکی ایجاد می‌کند، در حالی که تغییر دما منجر به افزایش تبخیر و تعرق می‌شود.

پایش نمایه‌های خشکسالی مبتنی برونداد داده‌های ERA5 و مدل CMIP5-MME:

خشکسالی یک پدیده پیچیده اقلیمی است و بر این اساس شاخص‌های بسیاری برای شناخت آن توسعه داده شده است. در این پژوهش سه نمایه روزهای خشک، دوره خشک و خشکی برای دوره تاریخی ۲۵ ساله (۲۰۰۵-۱۹۸۱) بر اساس داده‌های ERA5 و CMIP5-MME مورد بررسی قرار گرفت. علت استفاده از داده‌های ERA5 در کنار مدل‌های CMIP5 به دو دلیل است. نخست آنکه از داده‌های ERA5 به دلیل سامانه داده‌گذاری پیشرفته‌ای که دارند (داده‌های ماهواره‌ای و مشاهداتی زمینی در این سری از داده‌ها سهم چشمگیری دارند) برای درستی سنجی داده‌های CMIP5 استفاده شد. در گام بعدی برای اینکه نشان داده شود مدل CMIP5-MME تا چه میزان توانسته است الگوهای مکانی نمایه‌های خشکسالی به درستی نشان دهد از این پایگاه داده استفاده شد.

شاخص خشکی بر اساس داده‌های ERA5 و CMIP5-MME در ایران حداقل ۰/۰۴ و حداکثر ۰/۹۵ بدست آمده است. مدل همادی تولید شده CMIP5-MME تنش خشکی را بیش‌تر از پایگاه ERA5 در ایران برآورد کرده است. همانطور که پیداست مدل CMIP5-MME تنش خشکی در دشت کویر را با دشت لوت در یک پهنه قرار است در صورتی که ERA5 چنین برآوردی از تنش خشکی ایران نداشته است. همچنین مدل CMIP5-MME منطقه خزر شرقی را خشک‌تر از پایگاه ERA5 نشان داده است. بر اساس نتایج به دست آمده در میانگین



شکل ۳- نمایه‌های خشکسالی شاخص خشکی، روزهای خشک و دور خشک، مبتنی بر برون داد پایگاه باز تحلیل ERA5 و مدل همادی CMIP5-MME برای دوره تاریخی (۱۹۸۱-۲۰۰۵)

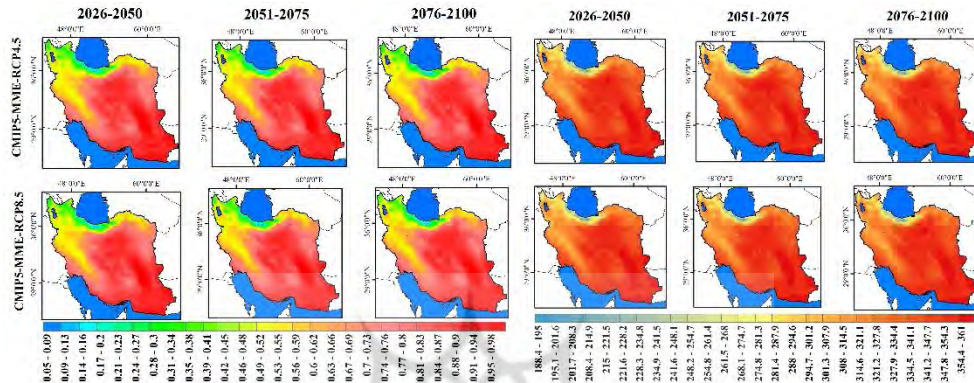
سناریوی RCP8.5 است. به طور کلی، این نتیجه بیانگر افزایش خطر خشکسالی در ایران به طور بالقوه در آینده است و این امر بهره‌وری کشاورزی و منابع آب را در کشور تهدید می‌کند.

پارادایم «خشک، خشک‌تر می‌شود و مرطوب، مرطوب‌تر می‌شود» (DDWW) یک فرضیه مهم در تغییر اقلیم است. نتایج این پژوهش گویای این است که افزایش شاخص خشکی و روزهای خشک یک روند غالب افزایشی در طول دوره پیش‌نگری نسبت به دوره تاریخی است. به طوری که بیشینه روزهای خشک و دوره خشک بر اساس سناریوی بدبینانه RCP8.45 در آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) نسبت به دوره تاریخی به ترتیب ۷/۵۰ و ۲۸/۸۴ درصد افزایش خواهند داشت. شاخص خشکی نیز در آینده نسبت به دوره تاریخی ۳/۱۵ درصد افزایش خواهد داشت. علاوه بر این، باید توجه داشت که روند خشکی مناطق غربی، شمال غربی و حتی مناطق شمالی بیشتر از روند خشکی مناطق داخلی و مرکزی ایران است. شایان ذکر است که

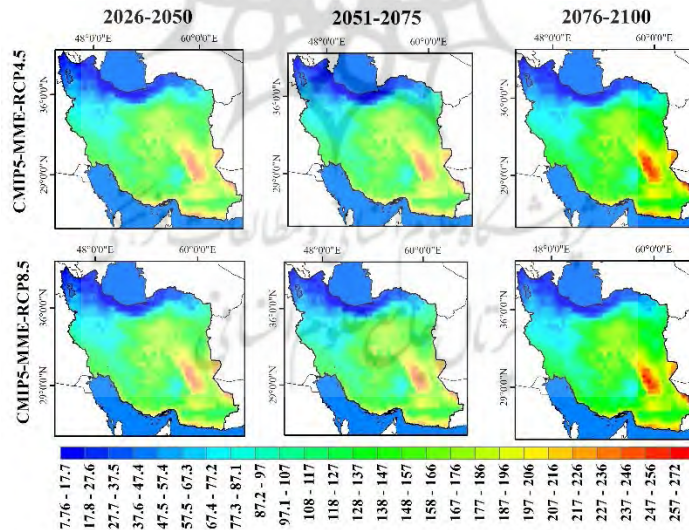
پیش‌نگری نمایه‌های خشکسالی مبتنی بر برون داد مدل CMIP5-MME: پراکنش فضایی نمایه‌های شاخص خشکی، روزهای خشک و دوره خشک محاسبه شده برای سه دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) در شکل‌های (۴) و (۵) ارائه شده است. بررسی سه نمایه خشکسالی مورد بررسی نشان می‌دهد که در آینده تحت سناریوهای حد واسط (RCP4.5) و بدبینانه (RCP8.5) تعداد روزهای خشک و دوره خشک به همراه شاخص خشکی نسبت به دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۸۰) افزایش خواهند یافت. افزایش روزهای خشک و دوره خشک در بخش‌های شمالی، غربی و شمال غربی ایران در مقایسه با سایر مناطق کشور چشمگیر است. شاخص خشکی با افزایش ۰/۳ نسبت دوره تاریخی نیز گویای افزایش چشمگیر تبخیر و تعرق به دلیل افزایش دما و کاهش بارش در دوره‌های آینده است. بیشینه افزایش نمایه‌های خشکسالی برای دوره آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) تحت

سطحی هستند (مثلاً زمین‌های خشک)، حفظ رطوبت نسبی در ترازهای پایین در شرایط گرمایش جهانی دشوار است. لذا شاید بخش نخست این پارادایم که «خشک، خشک‌تر می‌شود» برای ایران صادق باشد و در مقابل بخش دوم این پارادایم که مناطق مرطوب، مرطوب‌تر می‌شوند باید با احتیاط استفاده شود، به ویژه در مناطقی که دو پیش شرط صادق نباشد.

پارادایم DDWW به دو پیش شرط نیاز دارد: اول: گردش کلی جو سرعت پایینی داشته باشد و دوم: مقدار رطوبت نسبی در ترازهای پایین تغییر نکند. لذا، در مناطقی که الگوی گردش کلی جو یا رطوبت نسبی ترازهای پایین تغییر نکند، این پارادایم چندان قابل بحث نیست (شف و فریسون، ۲۰۱۲). از آنجایی که بسیاری از مناطق داخلی و شرقی ایران فاقد آب



شکل ۴- شاخص روزهای خشک (شکل سمت راست) و شاخص شاخص خشکی (شکل سمت چپ) مبتنی بر برونداد همادی چند مدلی CMIP6 بر اساس سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 طی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰)



شکل ۵- همانند شکل ۴ اما برای دوره خشک پیش‌نگری شده با CMIP5-MME

افزایش مقدار همبستگی بین برونداد مدل و ERA5 بهتر از مدل‌های منفرد عمل می‌کند. در واقع، بکارگیری مدل‌های منفرد به دلیل دو جنبه واداشت سیگنال (Signal Forcing) و وردایی درونی اقلیم

نتیجه‌گیری

این مطالعه، از یک رویکرد همادی برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر نمایه‌های خشکسالی ایران استفاده کرده است. نتایج نشان داد که رویکرد همادی در

CMIP5-MME با روش BMA در این است که مدل - های مورد بررسی در شبیه سازی دوره‌های خشک و روزهای خشک نسبت به شاخص خشکسالی کارآمدتر هستند. این امر گویای این است که مدل‌های CMIP5 و مدل همادی تولید شده رخداد (Event) بارش را صحیح‌تر از مقدار (Value) بارش شبیه‌سازی می‌کنند. بر این اساس، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در نظر گرفتن نمایه‌های خشکسالی مختلف در یک رویکرد همادی می‌تواند عدم قطعیت در بررسی اثرات تغییر اقلیم بر فرین‌های اقلیمی بخصوص خشکسالی را تا حد زیادی کاهش دهد.

تحلیل نمایه‌های خشکسالی در ایران با رویکرد همادی بیانگر اثر تغییر اقلیم بر تشدید فرین‌های اقلیمی یا افزایش بی‌هنجاری منفی بارش و روند افزایشی دما است. نتیجه به‌دست آمده در تایید پژوهش زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰ج) مبنی بر افزایش دوره‌های خشک متوالی تا پایان قرن حاضر در ایران است. همگام با افزایش نمایه‌های مبتنی بر طول خشکی، شاخص خشکی نیز به مقدار قابل توجهی در ایران افزایش خواهد یافت. لذا لزوم توجه بیش از پیش به تدوین برنامه‌های سازگاری با تغییر اقلیم و برنامه‌های مدیریت خشکسالی (DMP) در کشور احساس می‌شود.

(Internal Variability) در هر یک از مدل‌ها مورد بحث است.

وردایی درونی را می‌توان نادیده گرفت چرا که وردایی ذات اقلیم است در حالی که واداشت سیگنال را می‌توان با تولید مدل همادی کاهش داد و یا از بین برد. لذا، مدل همادی می‌تواند واداشت سیگنال را بهتر از هر یک از مدل‌های منفرد منعکس کند (ریچلر و کیم، ۲۰۰۸). همانطور که در نتایج مربوط به درستی سنجی مدل‌های تصحیح شده اریبی نیز نشان داده شد، مدل‌های HadGEM2-ES و GFDL-ESM2M بیشترین کارایی را در متوسط پهنه‌ای ایران برای نمایه‌های خشکسالی نشان می‌دهند. در حالی که کارایی مدل IPSL-CM5B-LR نسبت به سایر مدل‌ها پایین است. این نتیجه نشان می‌دهد که صرفنظر از روش به کار رفته برای تصحیح اریبی مدل‌ها، ساختار و پیچیدگی متفاوت مدل‌ها اعم از طرحواره‌های فیزیکی به کار گرفته شده، در شبیه‌سازی دقیق متغیرهای مورد نظر موثر است. چرا که هر نه مدل CMIP5 با استفاده از روش QDM و بر مبنای داده‌های ERA5 تصحیح شده‌اند. در مقایسه با مدل‌های منفرد، CMIP5-MME کارایی بالاتری در شبیه سازی نمایه‌های خشکسالی در ایران دارد. نکته مهم دیگر در خصوص مدل همادی تولید شده

منابع

۱. تاج بخش، سحر. عیسی خانی، نسرين و فضل کاظمی، امین. (۱۳۹۴). ارزیابی خشکسالی هواشناسی در ایران با استفاده از شاخص «استانداردشده بارش و تبخیر- تعرق (SPEI)». فیزیک زمین و فضا، ۴۱(۲)، ۳۱۳-۳۲۱.
۲. جوان، خدیجه. (۱۴۰۰). بررسی خشکسالی هواشناسی در ایستگاه ارومیه با استفاده از شاخص SPI تحت سناریوهای تغییر اقلیم (RCP). پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۵(۲)، ۸۱-۹۴.
۳. خزانه‌داری، لیلی. زابل عباسی، فاطمه. قندهاری، شهرزاد. کوهی، منصوره و ملبوسی، شراره. (۱۳۸۸). دورنمایی از وضعیت خشکسالی ایران طی سی سال آینده. جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، ۷(۱۲)، ۸۳-۹۹.
۴. خوش اخلاق، فرامرز. کریمی احمدآباد، مصطفی. جاسمی، سید میثم و کاکي، سیفاله. (۱۳۹۹). واکاوی آماری - همدید تغییرپذیری آب و هواشناختی رژیم بارش غرب میانی ایران با تاکید بر رخداد خشکسالی‌های شدید. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۱(۱)، ۶۳-۸۲.
۵. دارنده، محمد. (۱۳۹۳). پایش خشکسالی ایران به کمک شاخص شدت خشکسالی پالم و ارتباط آن با الگوهای پیوند از دور جوی- اقیانوسی. فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی. ۲۹ (۴)، ۸۲-۶۷.
۶. زرین، آذر و داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۰الف). مدیریت ریسک خشکسالی در شرایط تغییر اقلیم: نقش سیاست‌های ملی و برنامه مدیریت خشکسالی (DMP). آب و توسعه پایدار، ۸(۱)، ۱۰۷-۱۱۲.

۷. زرین، آذر و داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۰). پیش‌نگری شدت بارش در ایران با بکارگیری رویکرد همادی چند مدلی با استفاده از داده‌های مقیاس کاهی شده NEX-GDDP. مجله ژئوفیزیک ایران، پذیرفته شده برای چاپ.
۸. زرین، آذر و داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۰). پیش‌نگری دوره‌های خشک و مرطوب متوالی در ایران مبتنی بر برون‌داد همادی مدل‌های تصحیح شده اریبی CMIP6. فیزیک زمین و فضا، ۴۷(۳)، ۵۶۱-۵۷۸.
9. Ahmadalipour, A., Moradkhani, H., Castelletti, A., and Magliocca, N. (2019). Future drought risk in Africa: Integrating vulnerability, climate change, and population growth. *Science of the Total Environment*, 662, 672-686.
10. Bowell, A., Salakpi, E.E., Guigma, K., Muthoka, J.M., Mwangi, J., and Rowhani, P. (2021). Validating commonly used drought indicators in Kenya. *Environmental Research Letters*, 16(8), 084066.
11. Calow, R.C., MacDonald, A.M., Nicol, A.L., and Robins, N.S. (2010). Ground water security and drought in Africa: linking availability, access, and demand. *Groundwater*, 48(2), 246-256.
12. Cannon, A.J., Sobie, S.R., and Murdock, T.Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938-6959.
13. Cook, B.I., Mankin, J.S., Williams, A.P., Marvel, K.D., Smerdon, J.E., and Liu, H. (2021). Uncertainties, limits, and benefits of climate change mitigation for soil moisture drought in Southwestern North America. *Earth's Future*, 9(9), e2021EF002014.
14. Crausbay, S.D., Ramirez, A.R., Carter, S.L., Cross, M.S., Hall, K.R., Bathke, D.J., ... and Sanford, T. (2017). Defining ecological drought for the twenty-first century. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(12), 2543-2550.
15. CRED, U. (2020). Human Cost of Disasters. An Overview of the last 20 years: 2000–2019. *CRED, UNDRR, Geneva*.
16. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... and Thépaut, J.N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
17. Hessel, A.E., Anchukaitis, K.J., Jelsema, C., Cook, B., Byambasuren, O., Leland, C., ... and Hayles, L.A. (2018). Past and future drought in Mongolia. *Science Advances*, 4(3), e1701832.
18. Lesk, C., Rowhani, P., and Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529(7584), 84-87.
19. Li, M., Chu, R., Islam, A.R.M., Jiang, Y., and Shen, S. (2020). Attribution analysis of long-term trends of aridity index in the Huai River basin, eastern China. *Sustainability*, 12(5), 1743.
20. Linke, A.M., Witmer, F.D., O'Loughlin, J., McCabe, J.T., and Tir, J. (2018). Drought, local institutional contexts, and support for violence in Kenya. *Journal of Conflict Resolution*, 62(7), 1544-1578.
21. Massoud, E.C., Lee, H., Gibson, P.B., Loikith, P., and Waliser, D.E. (2020). Bayesian model averaging of climate model projections constrained by precipitation observations over the contiguous United States: *Journal of Hydrometeorology*, 21(10), 2401-2418.
22. Miao, L., Li, S., Zhang, F., Chen, T., Shan, Y., and Zhang, Y. (2020). Future drought in the dry lands of Asia under the 1.5 and 2.0 C warming scenarios. *Earth's Future*, 8(6), e2019EF001337.
23. Mondal, S.K., Huang, J., Wang, Y., Su, B., Zhai, J., Tao, H., ... and Jiang, T. (2021). Doubling of the population exposed to drought over South Asia: CMIP6 multi-model-based analysis. *Science of The Total Environment*, 771, 145186.
24. Monjo, R., Royé, D., and Martin-Vide, J. (2020). Meteorological drought lacunarity around the world and its classification. *Earth System Science Data*, 12(1), 741-752.
25. Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., Van Vuuren, D.P., ... and Wilbanks, T.J.

- Drought occurring with hot extremes: Changes under future climate change on Loess Plateau, China. *Earth's Future*, 7(6), 587-604.
32. Switanek, M.B., Troch, P.A., Castro, C.L., Leuprecht, A., Chang, H.I., Mukherjee, R., and Demaria, E. (2017). Scaled distribution mapping: a bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(6), 2649-2666.
33. Taylor, K.E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7192.
34. Taylor, K.E., Stouffer, R.J., and Meehl, G.A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American meteorological Society*, 93(4), 485-498.
35. Tegegne, G., Melesse, A.M., and Worqlul, A.W. (2020). Development of multi-model ensemble approach for enhanced assessment of impacts of climate change on climate extremes. *Science of the Total Environment*, 704, 135357.
36. Wallemacq, P. (2018). *Economic losses, poverty & disasters: 1998-2017*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, CRED.
- (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756.
26. Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R.A., Carrao, H., ... and Feyen, L. (2018). Global changes in drought conditions under different levels of warming. *Geophysical Research Letters*, 45(7), 3285-3296.
27. Otkin, J.A., Svoboda, M., Hunt, E. D., Ford, T.W., Anderson, M.C., Hain, C., and Basara, J.B. (2018). Flash droughts: A review and assessment of the challenges imposed by rapid-onset droughts in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(5), 911-919.
28. Parker, W.S. (2016). Reanalyses and observations: What's the difference?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(9), 1565-1572.
29. Reichler, T., and Kim, J. (2008). How well do coupled models simulate today's climate?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(3), 303-312.
30. Scheff, J., and Frierson, D.M. (2015). Terrestrial aridity and its response to greenhouse warming across CMIP5 climate models. *Journal of Climate*, 28(14), 5583-5600.
31. Sun, C.X., Huang, G.H., Fan, Y., Zhou, X., Lu, C., and Wang, X.Q. (2019).