

پیش‌نگری دوره‌های خشک و مرطوب متوالی در ایران مبتنی بر برون‌داد همادی مدل‌های

تصحیح شده اریبی CMIP6

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

۱. استادیار، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲. پژوهشگر پسا دکتری، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت: ۹۹/۱۲/۳، پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۳/۴)

چکیده

تغییر اقلیم می‌تواند شدت و فراوانی رخداد‌های فرین اقلیمی مرتبط با بارش را در آینده تغییر داده و فشار بیشتری بر دسترسی به منابع آب ایجاد کند. این مطالعه به پیش‌نگری بلندمدت روزهای خشک (CDD) و مرطوب (CWD) متوالی ایران پرداخته است. برای این منظور از داده‌های بارش ۴۱ ایستگاه هم‌دید کشور و برون‌داد بارش پنج مدل منتخب CMIP6 شامل GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, UKESM1-0-LL آینده (۲۰۶۰-۲۰۲۱ و ۲۰۶۱-۲۱۰۰) تحت سناریوهای مبتنی بر مسیرهای اجتماعی و اقتصادی (SSPs) استفاده شد. برای درستی‌سنجی برون‌داد بارش مدل‌های منتخب از سنجه‌های آماری r ، RMSE، MBE و جدول توافقی مهارتی (ROC) استفاده شد؛ سپس روزهای خشک و مرطوب متوالی با استفاده از شاخص‌های CDD و CWD کارگروه ETCCDI محاسبه شد. نتایج درستی‌سنجی مدل‌های منفرد نشان داد از بین پنج مدل CMIP6، مدل IPSL-CM6A-LR دارای بیشینه کم‌برآوردی و UKESM1-0-LL بیشینه بیش برآوردی برای بارش ایران است. پس از بررسی مهارت فردی مدل‌ها یک مدل همادی با به‌کارگیری روش میانگین وزنی مستقل (IWM) ارائه شد. امتیاز مهارتی پس از ایجاد مدل همادی چندگانه (MME) بهبود قابل‌ملاحظه‌ای یافت. نتایج این مطالعه شواهدی را ارائه می‌دهد که بی‌هنجاری دوره‌های خشک متوالی به‌عنوان یک نمایه استاندارد برای خشکسالی‌های کوتاه‌مدت تحت شرایط تغییر اقلیم در ایران افزایشی است. بیشترین افزایش روزهای خشک متوالی در ایران با حداکثر ۲۶/۴ روز تحت سناریوی SSP5-8.5 در دوره ۲۰۶۱-۲۱۰۰ در حوضه‌های آبخیز دریای خزر و دریاچه ارومیه خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: بارش، CMIP6، سناریوهای SSP، روزهای خشک و مرطوب متوالی.

۱. مقدمه

شاخص‌های فرین طول دوره (دوره‌های خشک و مرطوب متوالی) تأثیر بیشتری بر زندگی انسان دارند. برای درک تغییرات گذشته و آینده رخداد‌های اقلیمی در سطح جهانی و منطقه‌ای، از مدل‌های گردش کلی (GCM) به‌طور گسترده استفاده می‌شود و این مدل‌ها فراتر از نیازهای جامعه علمی حتی برای برنامه‌های عملیاتی و تصمیم‌گیری به‌کار گرفته می‌شوند (وین رایت و همکاران، ۲۰۱۹؛ راول، ۲۰۱۹)؛ بنابراین، ارزیابی جامع عملکرد آنها به‌خصوص برای مدل‌های CMIP6 بسیار حیاتی است. تجربیات انجام شده از مدل‌های CMIP5 بسیار تأثیرگذار بوده است و مطالعات بیشماری عملکرد مدل‌های CMIP5 را برای بارش در مقیاس جهانی

تغییر اقلیم با دگرگونی در الگوی بارش در سراسر جهان تغییرات قابل‌توجهی را در فراوانی، شدت و مدت‌زمان رخداد‌های بارشی به‌همراه داشته است (پاپالکسیو و مونتاناری، ۲۰۱۹). در شرایط تغییر اقلیم و با افزایش رخداد‌های فرین اقلیمی عواقب جبران‌ناپذیری بر محیط زیست و اقتصاد وارد می‌شود؛ لذا ضرورت دارد تا درکی صحیح از فراوانی، شدت و پراکنش فضایی این فرین‌ها داشته باشیم تا بتوان گام اساسی در جلوگیری از خسارت ناشی از آنها برداشت. بارش و رخداد‌های فرین مرتبط با آن، تأثیر عمیقی بر اکوسامانه‌های طبیعی و زندگی انسان دارد (میشرا و همکاران، ۲۰۱۰). در مقایسه با شاخص‌هایی که شدت و فراوانی بارش را مورد بررسی قرار می‌دهند،

اقليمی به‌ویژه خشکسالی‌های کوتاه‌مدت و سیلاب استفاده می‌شود (الکساندر و همکاران، ۲۰۰۶؛ فیلد و همکاران، ۲۰۱۲).

CDD و CWD نه‌تنها دوره‌های متوالی خشک و مرطوب را مشخص می‌کنند، بلکه با وقوع خشکسالی و سیل ارتباط نزدیکی دارند (وو و چن، ۲۰۱۹). در نتیجه تغییرات فرین‌های بارشی و به‌ویژه رخداد‌های طول دوره بارش توجهات گسترده‌ای را در بین پژوهشگران، برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیرندگان طی چند دهه گذشته به‌همراه داشته است؛ بنابراین تجزیه‌وتحلیل تغییرات و علل روزهای خشک/مرطوب متوالی برای مدیریت منابع آب و سیاست‌های سازگاری در شرایط تغییر اقلیم مفید است (سینگ و همکاران، ۲۰۱۴).

مطالعات مربوط به CDD و CWD بر اساس روش‌شناسی عمدتاً بر دو حوزه مطالعاتی تجزیه‌وتحلیل توزیع فضایی و روند استوار است؛ همچنین این مطالعات را می‌توان بر اساس عرصه جغرافیایی در چهار دسته جهانی، قاره‌ای، ملی و منطقه‌ای طبقه‌بندی کرد. گزارش‌های بسیاری از افزایش روزهای خشک متوالی در سراسر کره زمین وجود دارد به‌طوری‌که ناستوس و زرفس (۲۰۰۹) با بررسی تغییرات زمانی-مکانی روزهای متوالی خشک و مرطوب در کشور یونان با استفاده از اطلاعات ۲۷ ایستگاه طی دوره آماری ۲۰۰۷-۱۹۵۸ به این نتیجه رسیدند که CWD روند منفی معنی‌دار و CDD روند افزایشی ناچیزی دارد. براون و همکاران (۲۰۱۰) با بررسی شاخص‌های فرین برای دوره آماری ۲۰۰۵-۱۸۷۰ در ایالات متحده آمریکا روند افزایشی شاخص CDD را آشکار کردند. در همین راستا مارنگو و همکاران (۲۰۱۰) در آمریکای جنوبی یک روند افزایشی قابل‌توجه را برای CDD نشان دادند؛ به‌طوری‌که بیشینه این شاخص از ۸۰ روز به ۱۲۰ روز در دوره پیش‌نگری بر اساس پرونداد مدل GFDL در شمال آرژانتین رسید. برعکس روند افزایشی قابل‌توجه در بخش‌های بزرگی از کره زمین، در برخی از مناطق همچون غرب فلات تبت (وانگ و همکاران، ۲۰۱۳) روند

(کوترولیس و همکاران، ۲۰۱۶؛ نگوین و همکاران، ۲۰۱۷) و ایران (معصوم پورسماکوش و همکاران، ۱۳۹۶؛ احمدی و همکاران، ۲۰۲۰) تأیید کردند؛ اما هنوز درک درستی از مدل‌های CMIP6 برای بارش و شبیه‌سازی فرین‌های اقلیمی در ایران وجود ندارد.

مدل‌های اقلیمی به‌رغم توسعه همه‌جانبه‌ای که داشته‌اند، اما کماکان دارای عدم‌قطعیت بالایی هستند؛ در همین راستا روش‌های زیادی برای کاهش عدم‌قطعیت این دست از مدل‌ها پیشنهاد شده است. میانگین همادی چند مدل (MME) تمایل به شبیه‌سازی بهتر بارش نسبت به مدل‌های منفرد دارد با این حال، مدل‌های CMIP5 (خارین و همکاران، ۲۰۱۳) و حتی مدل‌های CMIP6 (آکینسانولا و همکاران، ۲۰۲۰؛ ۲۰۲۱) هنوز عدم‌قطعیت زیادی را در سطح جهانی از خود نشان می‌دهند (خارین و همکاران، ۲۰۱۳). به‌طور خاص در ایران، تجربیات مدل‌های CMIP5 نیز به‌طور کلی عملکرد خوبی را در برآورد بارش نشان دادند، اما هنوز عدم‌قطعیت مکانی و فصلی قابل‌توجهی برای این مدل‌ها در کشور وجود دارد (قهرمان و همکاران، ۱۳۹۵؛ احمدی و همکاران، ۲۰۲۰).

همان‌طور که بحث شد، مسئله اصلی این پژوهش بررسی رخداد‌های فرین و به‌طور خاص فرین‌های بارشی طول دوره است که نقش مهمی را در سیلاب و خشکسالی دارند. شاخص‌های روزهای خشک متوالی (CDD) و روزهای مرطوب متوالی (CWD) که به‌ترتیب طولانی‌ترین دوره بدون/با بارش را نشان می‌دهند، دو شاخص مهم اقلیمی برای ارزیابی طول دوره فرین‌های بارشی هستند (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۷). فریچ و همکاران (۲۰۰۴) ابتدا تعداد روزهای متوالی با بارش کمتر از ۱ میلی‌متر را به‌عنوان CDD و روزهایی با بارش برابر و بزرگ‌تر از ۱ میلی‌متر را به‌عنوان CWD تعریف کردند. این شاخص‌ها سپس توسط کارگروه تخصصی در زمینه تغییر اقلیم و شاخص‌ها (ETCCDI) به‌عنوان یکی از ۲۷ شاخص فرین اقلیمی مورد استفاده قرار گرفته است که به‌طور گسترده در شناسایی و مطالعه رخداد‌های فرین

همکاران، ۱۳۹۴)، اما این شاخص‌ها برای دوره‌های خشک و مرطوب کوتاه‌مدت توسعه داده نشدند. محدود مطالعاتی نیز دوره‌های خشک و مرطوب را بر اساس آستانه‌گذاری مورد مطالعه قرار دادند. صادقی‌نیا (۱۳۹۱) با بررسی و مقایسه دوره‌های مرطوب و خشک در بخش‌های مختلف اقلیمی طی دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۷۶ به این نتیجه رسید که در تمام ایستگاه‌ها احتمال وقوع روزهای مرطوب یک روزه بیش از دوره‌های دیگر است و هر چه مدت دوره‌های مرطوب افزایش می‌یابد، احتمال وقوع آنها کاهش می‌یابد. در مطالعه‌ای دیگر، بابایی فینی و همکاران (۱۳۹۳) با بررسی مدل HadCM3 از مدل‌های CMIP3 به این نتیجه رسیدند که طی دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ تعداد روزهای متوالی خشک در مناطق شمال‌شرقی، مرکزی و بخش‌هایی از جنوب کشور افزایش می‌یابد.

مرور منابع روزهای خشک و مرطوب متوالی را به‌عنوان دو نشانگر مهم تغییر اقلیم و همچنین نمایه‌های مهمی برای خشکسالی سریع و سیلاب نشان می‌دهد. به‌رغم مطالعات خوبی که برای مدل‌های CMIP5 در ایران انجام شده است اما هنوز درک درستی از مدل‌های CMIP6 از یک طرف و همچنین پیش‌نگری CDD و CWD در ایران وجود ندارد که اهمیت این مطالعه را بیش از پیش برای ایران آشکار می‌سازد.

ایران در جنوب غربی آسیا واقع شده و دارای تغییرپذیری بالای اقلیمی است. کشور ایران با مناطق خشک وسیع داخلی، رشته‌کوه‌های بلند غربی و شمالی و مناطق مرطوب خزری مشخص می‌شود که بر این اساس مستعد خشکسالی در بخش‌های بزرگی از شرق و مرکز و سیل در شمال کشور است. در سطح جهانی پیش‌بینی می‌شود تغییر اقلیم در دسترس بودن آب را تشدید کرده و آسیب‌پذیری زیستگاه‌های طبیعی همچون تالاب‌ها و سامانه‌های انسانی متکی به آنها همانند سدسازی را تحت‌تأثیر قرار دهد. از آنجاکه چنین تغییراتی احتمالاً یک چالش اضافی برای دستیابی به اهداف مختلف توسعه پایدار (از جمله سلامتی و رفاه، انرژی پاک و ارزان، کار

کاهش ناچیزی در روزهای خشک متوالی و شدت بارش روزانه مشاهده شد. در سطح جهانی نیز الکساندر و همکاران (۲۰۰۶) روند افزایشی را برای CDD در بیشتر مناطق کره زمین گزارش کردند.

در کشور چین با توجه به مناطق خشک و نیمه‌خشک گسترده‌ای که دارد مطالعات بسیاری به آشکارسازی تغییرات روزهای خشک و مرطوب متوالی آن پرداختند. به‌طوری‌که دوآن و همکاران (۲۰۱۷) تغییرات روزهای خشک متوالی چین را با استفاده از داده‌های ۷۱۸ ایستگاه طی دوره ۲۰۱۲-۱۹۶۰ مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که در فصل گرم روزهای متوالی خشک در چین ۶۷ درصد افزایش می‌یابد. شی و همکاران (۲۰۱۸) با بررسی روند فرین‌های بارشی و دمایی در چین طی دوره آماری ۲۰۱۵-۱۹۶۱ به این نتیجه رسیدند که CWD با نرخ ۰/۱ روز در هر دهه در حال کاهش است و در مقابل CDD در چندین منطقه از چین روند افزایشی دارد. در یکی از جدیدترین این مطالعات وانگ و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی روند روزهای خشک و مرطوب در مناطق ساحلی چین با استفاده از اطلاعات ۱۵۶ ایستگاه هواشناسی به این نتیجه رسیدند که CDD و CWD به‌ترتیب حداکثر ۴/۵ روز افزایش و ۰/۷ روز کاهش خواهند داشت. در سطح منطقه‌ای نیز مطالعات زیادی تغییرات CDD و CWD را مورد بررسی قرار دادند. کلوتسه و همکاران (۲۰۱۸) با بررسی CDD و CWD تحت شرایط تغییر اقلیم در غرب آفریقا به این نتیجه رسیدند که روزهای خشک متوالی ۸۰ درصد در غرب گینه افزایش می‌یابد. پوترا و همکاران (۲۰۱۹) با بررسی فرین‌های بارشی جزیره جاوا با استفاده از ۲۹ مدل CMIP5 به این نتیجه رسیدند که روزهای خشک متوالی (CDD)، بیشینه دمای ماهانه (TXx) و کمینه دمای ماهانه (TNn) افزایش نسبی نسبت به دوره تاریخی را نشان می‌دهند.

در ایران مطالعات زیادی به بررسی شاخص‌های مرتبط با خشکسالی پرداختند (نصرتی، ۱۳۹۳؛ تاج‌بخش و

بستر تغییر اقلیم از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش رو در ایران است. به‌جهت اینکه روزهای خشک و مرطوب متوالی در مدیریت منابع آب و کشاورزی از اهمیت شایان‌توجهی برخوردار است در این مطالعه به بررسی این دو شاخص مهم تحت شرایط تغییر اقلیم پرداخته می‌شود. برای مقایسه بهتر روزهای خشک و مرطوب متوالی در حوضه‌های آبخیز درجه یک ایران مرز حوضه‌ها در نقشه‌های مربوطه نمایش داده شده است (شکل ۱-الف).

۲-۲. داده‌های مشاهداتی (ایستگاه‌های همدید ایران) برای درستی‌سنجی برون‌داد بارش مدل‌های CMIP6 و مقایسه روزهای خشک و مرطوب متوالی با دوره تاریخی مدل از داده‌های ایستگاه‌های همدید استفاده شد. برای انتخاب ایستگاه‌های همدید سه شرط مورد توجه قرار گرفت: ۱- دوره آماری داده‌های ایستگاهی با دوره تاریخی مدل‌های CMIP6 (۱۹۷۵-۲۰۱۴) مشترک باشد. ۲- داده گمشده از کل سری زمانی ایستگاه بیش از ۱۰ درصد نباشد (زولینا و همکاران، ۲۰۰۵)؛ و ۳- همگنی داده‌ها که با آزمون الکساندرسون (SNHT) (الکساندرسون، ۱۹۸۶) مورد بررسی و همگنی آنها در سطح ۰/۰۵ مورد تأیید قرار گرفت.

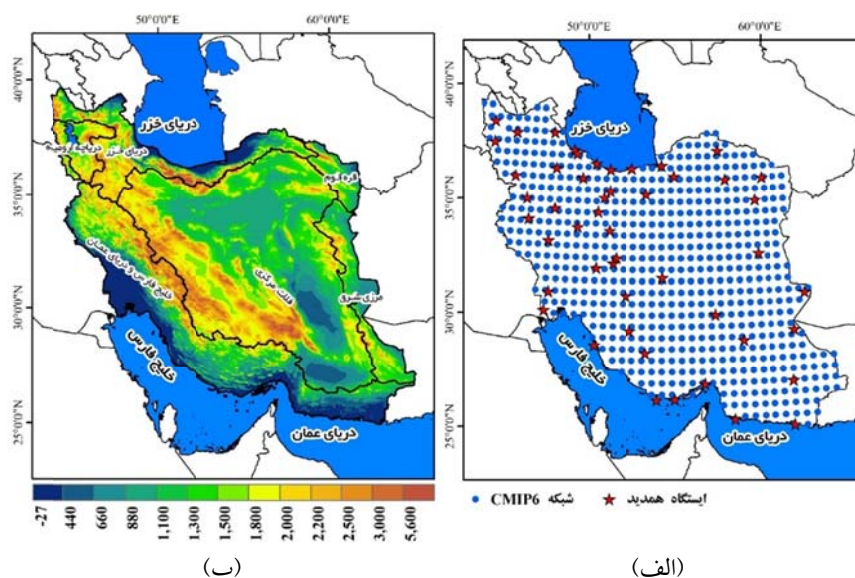
مناسب و رشد اقتصادی) در ایران خواهد بود، ارائه مطالعه‌ای همگام با نیازهای پیش‌رو کشور در حوزه تغییر اقلیم ضروری است.

همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد مطالعاتی زیادی در خصوص تغییرات زمانی-مکانی بارش و خشکسالی در مناطق مختلف ایران انجام شده است، اما به ندرت مطالعه‌ای به بررسی روزهای خشک/مرطوب متوالی در ایران انجام شده است؛ بنابراین، بررسی تغییرات روزهای خشک/مرطوب متوالی با آخرین مدل‌های در دسترس (CMIP6) ضروری است. هدف از این مطالعه تجزیه و تحلیل مشخصه‌های روزهای خشک/مرطوب متوالی طی سال‌های ۲۰۱۴-۱۹۷۵ و ۲۰۲۱-۲۰۱۰ مبتنی بر برون‌داد مدل‌های CMIP6 است. در همین راستا درستی‌سنجی مدل‌های CMIP6 نیز برای بارش ایران انجام شده است.

۲. داده و روش تحقیق

۱-۲. منطقه مورد مطالعه

ایران کشوری خشک در جنوب غربی آسیا می‌باشد (شکل ۱). بحران آب ناشی از مصرف بی‌رویه آب‌های سطحی و زیر سطحی و همچنین تغییرات آن در دهه‌های اخیر بر



شکل ۱. الف) نقاط آبی رنگ شبکه‌بندی داده‌های CMIP6 با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی و ستاره‌های قرمز موقعیت ایستگاه‌های همدید است؛ ب) مدل رقمی ارتفاع (DEM) و مرز حوضه‌های آبخیز اصلی ایران.

اصلی و بازخورد و تأثیر آنها بر تغییر اقلیم را می‌دهند. همچنین در CMIP6، چند MIP جدید برای پر کردن خلا علمی CMIP5 معرفی شده است (استوفر و همکاران، ۲۰۱۷). مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ آمده و تصحیح اریبی این داده‌ها با روش تصحیح مرتبه متوالی (SEC)، Sequential Elevation Correction (ویدون و همکاران، ۲۰۱۱) با استفاده از داده‌های واحد تحقیقات آب‌وهوایی (CRU) انجام شده است.

۲-۴. سناریوهای مسیرهای مشترک اجتماعی-

اقتصادی (SSPs)

سناریوهای مختلف SSP به کار رفته در CMIP6 تغییرات اقتصادی-اجتماعی جهان را تا سال ۲۱۰۰ پیش‌نگری می‌کنند. پنج سناریو اصلی با علامت‌های اختصاری-SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0، SSP4-6.0 و SSP5-8.5 در CMIP6 به کار رفته‌اند (ریاحی و همکاران، ۲۰۱۷). در نام‌گذاری سناریوهای جدید از الگوی SSPx-y استفاده شده است. در این الگو x نشان‌دهنده گروه SSP و y نشان‌دهنده واداشت تابشی (W/m^2) در سال ۲۱۰۰ است. از زمان توافق پاریس سناریوی انتشار کم کربن مورد توجه بیشتری قرار گرفت. بنابراین اهمیت سناریوهای گروه اول SSP بر اساس مفاد توافق نامه پاریس است (کریگلر و همکاران، ۲۰۱۸). در این پژوهش از سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 برای پیش‌نگری فراوانی روزهای خشک و مرطوب متوالی تحت شرایط تغییر اقلیم استفاده شد.

۲-۳. پروژه درون مقایسه‌ای جفت-مدل-مرحله ششم (CMIP6)

پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP) با هماهنگی بین مراکز مختلف برای استانداردسازی GCM ها به‌عنوان یک داده مبنا در مطالعات مربوط به تغییر اقلیم در سطح جهان به انجام رسیده است (استولپ و همکاران، ۲۰۲۰). برای برآورده کردن نیازهای علمی و برنامه‌ریزی جامعه در حال رشد و غلبه بر اشکالات موجود در مرحله پنجم پروژه (CMIP5)، نسل جدید پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده با عنوان CMIP6 اخیراً معرفی شده است (آیرینگ و همکاران، ۲۰۱۶).

هدف اصلی CMIP6 به حداکثر رساندن ارتباط بین سوالات و پاسخ‌های مهم علمی است که می‌تواند موجب تسریع پیشرفت در علوم مرتبط با تغییر اقلیم شود (میهل و همکاران، ۲۰۲۰)؛ بنابراین برنامه تحقیقات جهانی آب‌وهوا (World Climate Research Program، WCRP) و چالش‌های علمی بزرگ (GCs)، Grand Science Challenges) به‌عنوان مراکز طراحی CMIP6 انتخاب شدند (ژو و همکاران، ۲۰۱۹). بر اساس برنامه‌های GCs، هدف اصلی CMIP6 پاسخ به سه سوال مهم مربوط به واکنش سامانه زمین به واداشت‌های مختلف، عدم قطعیت سیستماتیک مدل‌ها و برآورد کمی تغییر اقلیم است (آیرینگ و همکاران، ۲۰۱۶). بر اساس ۱۰ معیار مورد تأیید CMIP6، ۲۱ پروژه مقایسه بین مدل‌ها (MIP، Model Intercomparison Projects) توسط هیات CMIP6 و WGCM تأیید شده است. این MIP ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که امکان درک واداشت‌های

جدول ۱. مدل‌های CMIP6 منتخب در این پژوهش.

مدل	موسسه سازنده	تفکیک افقی
GFDL-ESM4	آزمایشگاه دینامیک شارهای ژئوفیزیکی آمریکا	$0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$
IPSL-CM6A-LR	موسسه پیر سیمون لاپلاس فرانسه	$0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$
MPI-ESM1-2-HR	مدل سامانه زمین موسسه ماکس پلانک آلمان	$0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$
MRI-ESM2-0	موسسه تحقیقات هواشناسی ژاپن	$0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$
UKESM1-0-LL	مرکز هدلی، اداره هواشناسی انگلستان	$0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$

۲-۵. روش‌های درستی‌سنجی مدل‌های منتخب

برای درستی‌سنجی مدل‌های منتخب از سه آماره میانگین اریبی خطا (MBE)، مجذور میانگین مربع خطا (RMSE) و ضریب همبستگی پیرسون (r) استفاده شد. آماره MBE در حقیقت اختلاف بین میانگین مقادیر مشاهده‌ای (ایستگاه‌های همدید) و مدل است و بیانگر انحراف از میانگین می‌باشد. این مقدار می‌تواند مثبت و منفی باشد که نشان‌دهنده برآورد کمتر و بیشتر از میانگین داده‌ها است. روش ریشه دوم میانگین مربع خطا یکی از آماره‌هایی است که معمولاً از آن برای بررسی دقت پیش‌بینی یک مدل در برابر داده‌های مشاهده‌ای استفاده می‌شود.

$$MBE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z^*(X_i) - Z(X_i))}{n} \quad (1)$$

$$RMSE = \frac{\frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (z^*(X_i) - Z(X_i))^2}}{n} \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲)، مقدار برآورد شده متغیر در X_i ، مقدار مشاهداتی متغیر در X_i ، n تعداد نقاط با مقدار مشاهداتی است (راوتوس-دوران و همکاران، ۲۰۱۰). با توجه استفاده مکرر پژوهش‌ها از روش همبستگی پیرسون از ارائه رابطه آن صرف‌نظر شد.

۲-۶. روش جدول توافقی امتیاز مهارتی (ROC)

مطابق با دستورالعمل سازمان هواشناسی جهانی (WMO)، یکی دیگر از روش‌های درستی‌سنجی، استفاده از جدول توافقی مهارتی (ROC) است. با استفاده از این روش می‌توان نمایه‌های پیش‌بینی صحیح و نادرست را برای هر طبقه از پیش‌بینی‌ها محاسبه کرد. مساحت زیر خم ROC به منزله یکی از نمایه‌های ارزیابی پیش‌بینی است که هرچه به ۱ نزدیک‌تر باشد به معنی عملکرد بالاتر پیش‌بینی‌ها است. در این روش اگر $AUC < 0.5$ باشد آن‌گاه پیش‌بینی مدل قابل قبول نیست و اگر $AUC > 0.5$ باشد پیش‌بینی مدل قابل قبول است (قهرمان و همکاران، ۱۳۹۵).

۲-۷. روش همادی (Ensemble) مدل‌های تصحیح شده

ارایی CMIP6

برای کاهش عدم قطعیت مدل‌ها، میانگین و یا ترکیبی از پرونداد چندین مدل در پیش‌نگری‌های اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های همادی بر این فرض اساسی استوارند که خطاها در صورت مستقل بودن، گرایش به حذف شدن دارند (تبادل و کنوتی، ۲۰۰۷). بیشاپ و آبراموویتز (۲۰۱۳) یک روش میانگین جدید وزنی با رویکرد مستقل (IWM, Independence Weighted Mean) ارائه کردند که وابستگی بین مدل‌های تعریف شده را با استفاده از کوواریانس خطاهای مدل نشان می‌دهد. در این مطالعه از IWM برای همادی مدل‌های منتخب استفاده شد. روش IWM در حقیقت ترکیب خطی یک مجموعه از شبیه‌سازی‌های مدل است که میانگین اختلاف مربع (MSD) را با توجه به مشاهدات به حداقل می‌رساند. این روش همانند رابطه (۳) محاسبه شد.

$$\sum_{j=1}^J (\mu_e^j - y^j)^2 \text{ where } \mu_e^j = w^T x^j = \sum_{k=1}^K w_k x_k^j \quad (3)$$

در رابطه (۳)، $(1, \dots, j, \dots, J)$ گام‌های زمانی مقادیر روزانه بارش و $(1, \dots, k, \dots, K)$ GCM‌های منتخب CMIP6 در این مطالعه هستند. مقدار بارش همادی شده مدل‌های چندگانه و j th گام زمانی مدل و y^j نشان‌دهنده گام زمانی داده مشاهداتی است. w وزن هر مدل از مجموعه مدل‌های همادی و در نهایت x^j ضریب مدل در ترکیب خطی است (بیشاپ و آبراموویتز، ۲۰۱۳؛ بای و همکاران، ۲۰۲۰). سپس در گام بعدی برای اطمینان از اینکه $\sum_{k=1}^K w_k = 1$ شود از ضریب لاگرانژ مطابق با رابطه (۴) استفاده شد.

$$F(w, \lambda) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J (\mu_e^j - y^j)^2 \right] - \lambda \left(\left(\sum_{k=1}^K w_k \right) - 1 \right) \quad (4)$$

در رابطه (۴) بر اساس رابطه (۵) محاسبه شد.

$$w = \frac{A^{-1}1}{1^T A^{-1}1} \quad (5)$$

۳. نتایج و بحث

۳-۱. درستی‌سنجی مدل‌های CMIP6 برای بارش سالانه ایران

درستی‌سنجی مدل‌های CMIP6 برای بارش در ایران نشان می‌دهد که این مدل‌ها دارای عملکرد مناسبی هستند (شکل ۲). نتایج نشان داد که مدل MRI-ESM2-0 دارای کمترین اریبی و خطا برای بارش کشور است که بر این اساس مدل بهینه برای بارش متوسط سالانه ایران به‌شمار می‌رود (در صورت کاربست مدل منفرد). گوسین و همکاران (۲۰۲۰) گزارش دادند که بهبود تفکیک افقی و قائم، بهبود پارامترهای میکروفیزیکی ابر، طرحواره‌های همرفتی اصلاح شده، ترکیب اثرات غیرمستقیم هواویزها در جو و برهم‌کنش آنها با ابرها و بهبود یافتن مدل اقیانوس/یخ برخی از مهم‌ترین بروز رسانی‌هایی هستند که در CMIP6 دیده می‌شود که منجر به کاهش عدم قطعیت در برون‌داد این مدل‌ها شده است.

بررسی برون‌داد بارش مدل‌های CMIP6 نشان داد مناطق شمالی، جنوبی و برخی از مناطق شمال شرقی ایران اریبی (MBE) مثبت دارند. اریبی بارش در پهنه‌های شمالی ایران بسیار بیشتر از مناطق جنوبی کشور است؛ علت این مقدار زیاد از اریبی به دلیل مقدار زیاد بارش در مناطق شمالی ایران است. از بین مدل‌های مورد مطالعه IPSL-CM6A-LR دارای بیشینه کم‌برآوردی با مقدار ۱۴/۲۵- میلی‌متر و UKESM1-0-LL با مقدار ۴۹/۱۱ میلی‌متر بیشینه بیش برآوردی را برای بارش ایران نشان دادند. مقدار متوسط اریبی بارش در کل کشور برای GFDL-ESM4 (۲/۵۶)، IPSL-CM6A-LR (۲/۲۹)، MPI-ESM1-2-HR (۲/۸۹)، MRI-ESM2-0 (۲/۱۸) و UKESM1-0-LL (۲/۵۳) میلی‌متر به‌دست آمده است. مقایسه نتایج RMSE بین بارش مدل‌ها و بارش مشاهداتی در طول سری زمانی سالانه (دوره تاریخی ۱۹۷۵-۲۰۱۴) نشان داد که بیشینه RMSE برای کلیه مدل‌ها بیش از ۷۰ میلی‌متر است. با در نظر گرفتن تمامی مدل‌ها، بیشتر مناطق ایران RMSE کمتر از ۱۰ میلی‌متر دارند. مناطق ساحلی دریای خزر و برخی

در رابطه (۵)، $1^T = [1, 1, \dots, 1]$ ، برآورد مبتنی بر نمونه کوواریانس خطاهای تصحیح‌شده اریبی بین همه اعضای مدل همادی است (بای و همکاران، ۲۰۲۰). در نهایت مقدار A نیز از رابطه (۶) محاسبه شد.

$$A = \frac{\sum_{j=1}^J (x^j - y^j)(x^j - y^j)^T}{J-1} \quad (6)$$

در این مطالعه، همان‌طور که گفته شد به پیش‌نگری روزهای خشک و مرطوب متوالی در سه دوره ۴۰ ساله مختلف بر اساس شاخص‌های فرین اقلیمی شبیه‌سازی شده با رویکرد IWM پرداخته شد. این سه دوره عبارت‌اند از: (۱) دوره تاریخی ۱۹۷۵-۲۰۱۴ (در این تحقیق از آن به‌عنوان دوره پایه یاد می‌شود)؛ (۲) دوره آینده ۲۰۶۰-۲۰۲۱ (به‌عنوان آینده نزدیک) و (۳) ۲۱۰۰-۲۰۶۱ (به‌عنوان آینده دور).

۲-۸. روزهای خشک و مرطوب متوالی (CDD & CWD)

برای مطالعه CDD و CWD می‌توان از آستانه‌های مختلف بارش برای یک روز خشک (مرطوب) استفاده کرد. این آستانه‌ها می‌توانند کمتر (بیشتر) از ۱/۱ میلی‌متر، ۱ میلی‌متر، ۱۰ میلی‌متر و... باشند (کوئیل، ۱۹۸۵). در این پژوهش، CDD و CWD با استفاده از تعاریفی که توسط کارگروه تخصصی در زمینه تغییر اقلیم و شاخص‌های فرین (ETCCDI) ارائه شده است، مورد مطالعه قرار گرفت. این دو شاخص به‌طور مشترک توسط کمیسیون اقلیم‌شناسی (CCI) و برنامه جهانی نظارت بر داده‌های اقلیمی (WCDMP) سازمان هواشناسی جهانی (WMO) و برنامه تغییرپذیری و پیش‌بینی اقلیم (CLIVAR)، برنامه جهانی تحقیقات اقلیمی (WCRP) و کمیسیون مشترک WMO-IOC برای اقیانوس‌شناسی و هواشناسی دریایی (JCOMM) ارائه شده است. CDD بیشترین تعداد روزهای متوالی با بارش روزانه‌ای است که مقدار آن کمتر از ۱ میلی‌متر است و در مقابل CWD بیشینه تعداد روزهای متوالی است که میزان بارش روزانه آنها برابر یا بیشتر از ۱ میلی‌متر در سال است.

۱۳۹۵). همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود بالاترین مقدار AUC برای بارش ایران توسط مدل MRI-ESM2-0 با مقدار ۰/۸۶ و خطای استاندارد ۰/۰۴ برآورد شده است. همانند نتایج به‌دست‌آمده برای سنج‌های RMSE و MBE، مدل IPSL-CM6A-LR با مقدار AUC، ۰/۸۰ و خطای استاندارد ۰/۰۵۰ پایین‌ترین عملکرد را برای بارش ایران دارد.

همان‌طور که دیده می‌شود هر یک از مدل‌های منفرد دارای نقاط قوت و ضعف هستند، اما مدل همادی چندگانه (MME) در مقایسه با مدل‌های منفرد بهبود قابل‌ملاحظه‌ای یافته است (مقدار AUC، ۰/۹۲ و خطای استاندارد نیز ۰/۰۲ است). لذا کلیه تحلیل‌های مربوط به روزهای خشک و مرطوب متوالی ایران طی دوره تاریخی و آینده با استفاده از برونداد مدل همادی چندگانه (MME) تولید شده مورد استفاده قرار گرفته است.

یافته‌های این پژوهش در مورد عملکرد بهینه مدل همادی ارائه شده با یافته‌های پیشین که مدل همادی را برای مدل‌های CMIP5 (سلیمان و همکاران، ۲۰۱۳) و مدل‌های CMIP6 (آکینسانولا و همکاران، ۲۰۲۰) بررسی کردند، مطابقت دارد. ذکر این نکته مهم ضرورت دارد که عدم قطعیت تقریباً در همه مطالعات مبتنی بر سناریو امری ذاتی است. عدم قطعیت ناشی از بردایی داخلی مدل، پارامترسازی و سناریوهای انتشار در GCMها بیشترین عدم قطعیت بالقوه را ایجاد می‌کند. علاوه بر این، نوع شاخص نیز بر خصوصیات دوره‌های خشک و مرطوب تأثیر می‌گذارد.

مناطق شمال غربی دارای RMSE بالایی هستند ($RMSE > 50$). در مقابل مناطق خشک داخلی ایران کمینه RMSE را نشان می‌دهند. این مقدار پایین RMSE به دلیل بارش کم در این مناطق از ایران است.

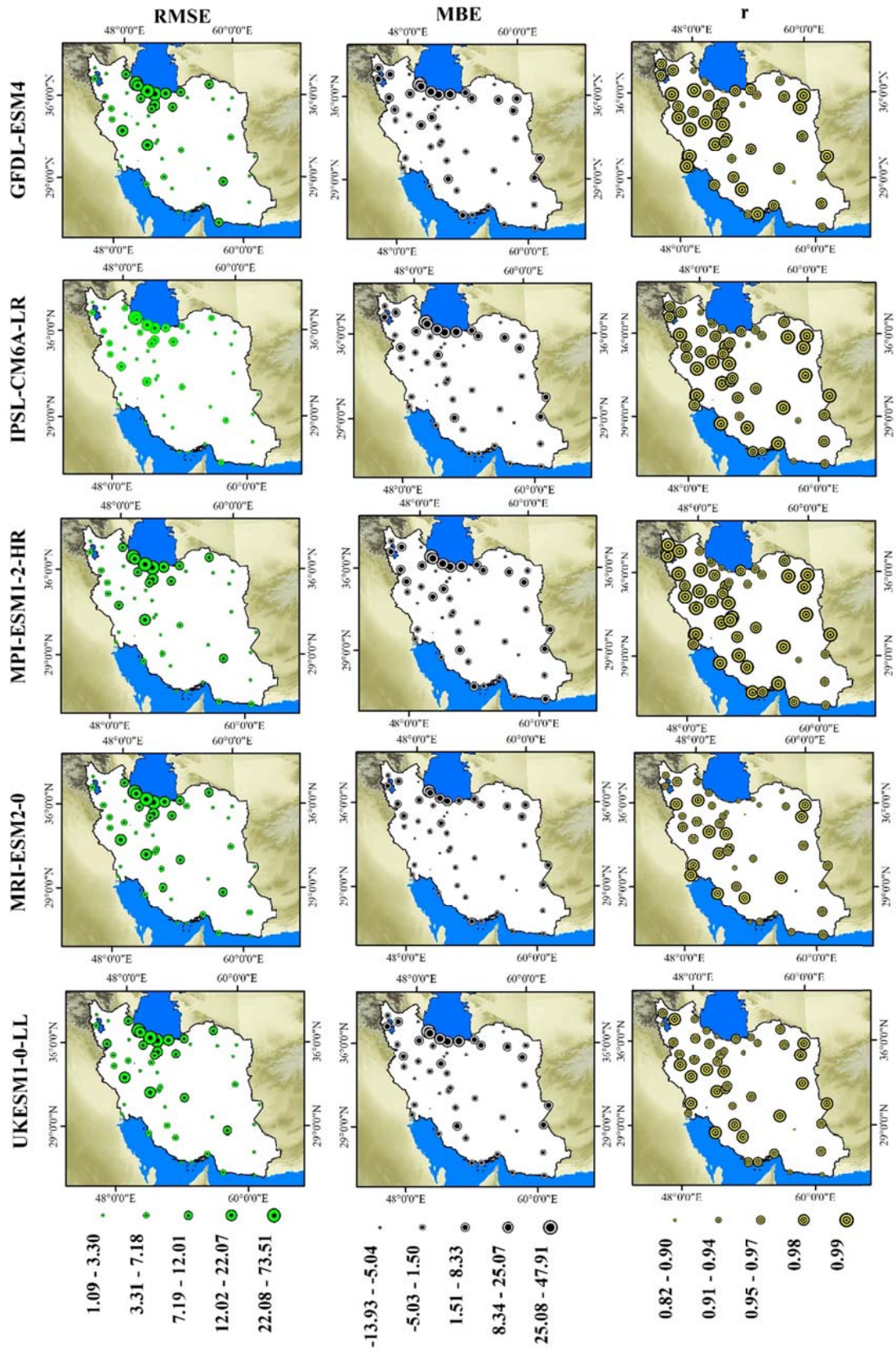
ضریب همبستگی (r) زمانی (سال به سال) بین مقادیر بارش مشاهداتی (داده‌های ایستگاه‌های همیدی) و مدل‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل نیز مشاهده می‌شود کمترین مقدار همبستگی ۰/۷۸ برای مدل MPI-ESM1-2-HR و بیشینه همبستگی با ۰/۹۹ برای مدل MRI-ESM2-0 است. اما با این حال در مدل‌ها خطای سیستماتیک به صورت کم برآوردی مقدار بارش وجود دارد که این کم برآوردی در شکل ۲ نشان داده شده است.

همان‌طور که گفته شد یکی دیگر از روش‌های مورد استفاده برای درستی‌سنجی مدل‌های منتخب منفرد و مدل همادی ایجاد شده در این پژوهش با روش IWM روش جدول توافقی امتیاز مهارتی (ROC) است. برای مقدار متوسط بارش در کل کشور برای هر یک از مدل‌های مورد مطالعه، جدول‌های توافقی تهیه و مساحت زیر خم ROC (AUC)، خطای استاندارد، فاصله اطمینان ۹۵ درصد به‌همراه سطح معنی‌داری محاسبه و در جدول ۲ ارائه شد. همانند روش به کار رفته برای همبستگی و روش RMSE برای ROC نیز از سری زمانی سالانه استفاده شد. برای تفسیر نتایج می‌توان از آستانه‌های تعریف شده استفاده کرد، به طوری که امتیاز مهارتی کمتر از ۰/۵ قابل قبول نیست و هر چه امتیاز مهارتی نزدیک عدد ۱ باشد مدل دارای کارایی مناسبی است (قهرمان و همکاران،

جدول ۲. منحنی ROC برای بارش سالانه مدل‌های تصحیح شده اریبی ایران.

نام مدل	AUC	خطای استاندارد	فاصله اطمینان ۹۵٪	P-Value
GFDL-ESM4	۰/۸۳۹۴	۰/۰۴۷۶۹	۰/۹۳۲۹ تا ۰/۷۴۵۹	<۰/۰۰۰۱
IPSL-CM6A-LR	۰/۸۰۱۹	۰/۰۵۰۰۲	۰/۸۹۹۹ تا ۰/۷۰۳۸	<۰/۰۰۰۱
MPI-ESM1-2-HR	۰/۸۴۸۱	۰/۰۴۶۴۰	۰/۹۳۹۱ تا ۰/۷۵۷۲	<۰/۰۰۰۱
MRI-ESM2-0	۰/۸۶۸۸	۰/۰۴۰۵۳	۰/۹۴۸۲ تا ۰/۷۸۹۳	<۰/۰۰۰۱
UKESM1-0-LL	۰/۸۳۹۴	۰/۰۴۷۶۹	۰/۹۳۲۹ تا ۰/۷۴۵۹	<۰/۰۰۰۱
MME	۰/۹۲۴۴	۰/۰۲۹۹۷	۰/۹۸۳۱ تا ۰/۸۶۵۶	<۰/۰۰۰۱

مساحت زیر خم ROC: Area Under the Curve (AUC); مدل چندگانه همادی (MME)



شکل ۲. درستی‌سنجی مدل‌های منتخب CMIP6 برای بارش سالانه در ایران با استفاده از سنجه‌های آماری میانگین اریبی خطا (MBE)، مجذور میانگین مربع خطا (RMSE) و ضریب همبستگی پیرسون (r).

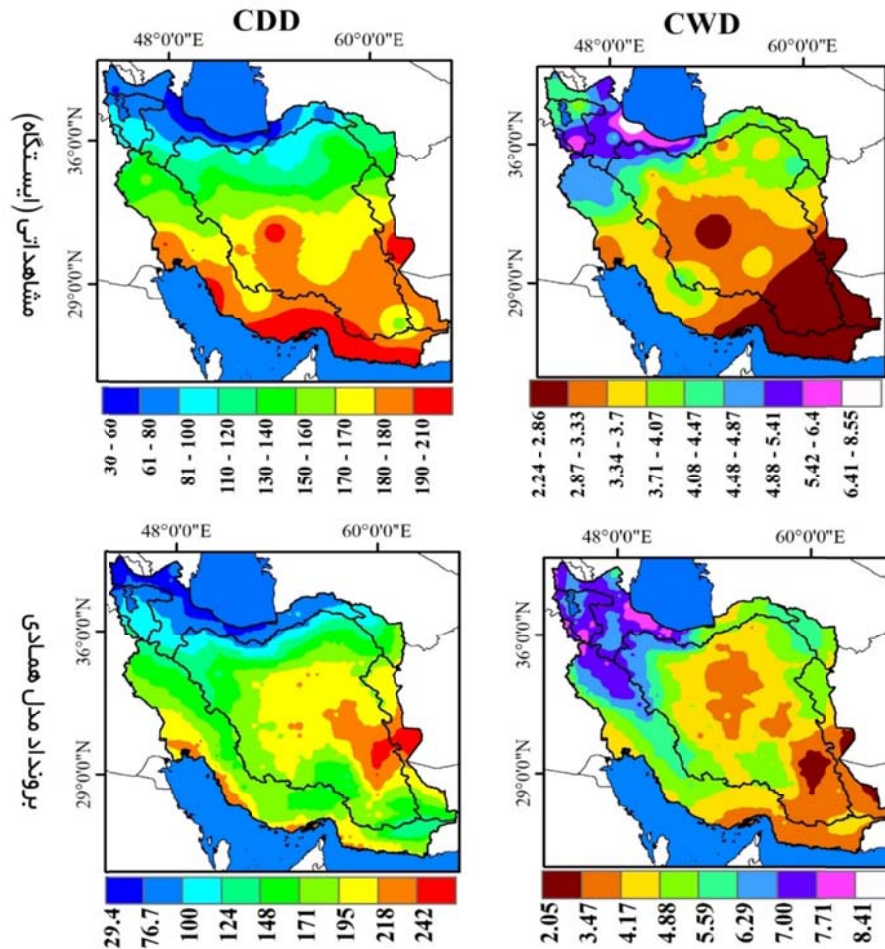
۳-۲. پراکنش فضایی روزهای خشک و مرطوب

متوالی ایران طی دوره تاریخی (۱۹۷۵-۲۰۱۴)

میانگین بلندمدت روزهای خشک متوالی (CDD) ایران طی دوره تاریخی (۱۹۷۵-۲۰۱۴) مبتنی بر برونداد مدل همدادی تغییرات زیادی برای CDD ایران نشان می‌دهد. روزهای خشک متوالی ایران مبتنی بر برونداد مدل همدادی بین یک مقدار حداقلی ۲۹/۴ روزه تا ۲۴۲ روز در نوسان است، مقایسه نتیجه به دست آمده با استفاده از داده‌های مشاهداتی (ایستگاه‌های همدیدی) نیز مورد تأیید قرار گرفته است به طوری که کمینه روزهای خشک متوالی بر اساس داده‌های مشاهداتی ۳۰ و بیشینه آن ۲۱۰ روز است. اختلاف بین مقدار بیشینه CDD بین داده‌های مشاهداتی و مدل به دلیل عدم وجود ایستگاه در مناطق خشک و کویرهای داخلی ایران است. مقایسه پراکنش فضایی CDD بین داده‌ها مشاهداتی و مدل مبین تطابق بالای این دو سری از خروجی است (شکل ۳). روزهای خشک متوالی ایران از شمال به جنوب و از غرب به شرق ایران افزایشی است. کانون اصلی CDD ایران دشت سیستان است و پس از آن دشت لوت، دشت کویر، سواحل مکران و خلیج فارس می‌باشند. اگر به جهت حوضه آبخیز بخوایم CDD ایران را مورد بحث قرار دهیم حوضه آبخیز دریای خزر را می‌توان مرطوب‌ترین حوضه ایران و حوضه مرزی شرق را خشک‌ترین حوضه ایران عنوان کرد. به طوری که متوسط روزهای خشک متوالی در حوضه مرزی شرق طی دوره تاریخی مورد بررسی ۱۸۲/۰۵ روز به دست آمده است؛ در حوضه دریای خزر این مقدار ۶۴/۲۶ روز است. بیشینه روزهای خشک متوالی ایران نیز در حوضه مرزی شرق با ۲۴۱/۹۴ روز دیده می‌شود. برعکس مقدار متوسط که حوضه دریای خزر کمینه مقدار متوسط CDD ایران را دارد اما کمترین مقدار بیشینه به دست آمده در حوضه دریاچه ارومیه ۱۰۰/۶۶ روز به دست آمده است. همین مقدار در حوضه دریای خزر ۱۱۳/۵۰ به دست آمده است. حوضه مرزی شرق حتی در حالت کمینه نیز بالاتر از ۱۰۰ روز در سال روزهای

خشک متوالی دارد. به طوری که کمینه CDD ایران در حوضه مرزی شرق ۱۰۹/۱۹ روز است. متوسط روزهای خشک متوالی به ترتیب در حوضه‌های خلیج فارس و دریای عمان، فلات مرکزی و قره قوم، ۱۵۵/۹۵، ۱۵۸/۲۸ و ۱۲۸/۰۱ روز است.

در نقطه مقابل روزهای مرطوب متوالی (CWD) برعکس CDD است. بیشینه شاخص CWD در ایران طی دوره تاریخی مبتنی بر برونداد مدل همدادی توسعه داده شده با ۸/۴۱ روز و بر اساس داده‌های مشاهداتی ۸/۵۵ روز به دست آمده که دقت بسیار بالای خروجی مدل همدادی را نشان می‌دهد. بیشینه CWD در مناطق خزر غربی، بخش‌های کوچکی از شمال حوضه دریای عمان و خلیج فارس و جنوب حوضه دریاچه ارومیه به دست آمده است. در مقابل کمینه روزهای مرطوب متوالی نیز در دشت سیستان و بیابان لوت در جنوب شرقی ایران تنها با ۲/۰۵ روز متوالی برای مدل همدادی و ۲/۸۶ روز برای داده‌های مشاهداتی در متوسط بلندمدت به دست آمده است. در حالت متوسط حوضه‌ای، حوضه آبخیز دریای خزر CWD کمتری را نسبت به حوضه دریاچه ارومیه نشان می‌دهد. این امر در نگاه اول کمی دور از انتظار به نظر می‌رسد؛ اما با توجه دقیق به مرز حوضه‌ها مشخص می‌شود که به دلیل کشیدگی حوضه دریای خزر تا خراسان شمالی و کل استان گلستان، طبیعی است که در حالت متوسط به دلیل خشکی مناطق نامبرده نسبت به خزر غربی، CWD در حالت متوسط کمتر از حوضه دریاچه ارومیه شود. متوسط بلندمدت (۱۹۷۵-۲۰۱۴) CWD در حوضه دریای خزر ۵/۹۵ روز، خلیج فارس و دریای عمان ۴/۵۷ روز، دریاچه ارومیه ۶/۵۶ روز، فلات مرکزی ۳/۹۹ روز، مرزی شرق ۳/۵۳ روز و در نهایت قره قوم ۴/۸۸ روز به دست آمده است. با در نظر گرفتن کمینه، بیشینه و میانگین روزهای مرطوب متوالی، حوضه دریاچه ارومیه دارای بیشینه شاخص CWD در ایران است؛ به طوری که کمینه این حوضه ۵/۲۴، بیشینه ۷/۴۲ و میانگین ۶/۵۶ روز می‌باشد.



شکل ۳. روزهای خشک متوالی (CDD) و مرطوب متوالی (CWD) ایران مبتنی بر پرونداد مدل همادی CMIP6 و داده‌های مشاهده‌ای (ایستگاه‌های همدید) طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۷۵).

۳-۳. پیش‌نگری روزهای خشک متوالی ایران بر اساس مدل همادی

پیش‌نگری روزهای خشک متوالی (CDD) در ایران تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 طی دو دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۶۱) با استفاده از پرونداد مدل همادی در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج این بررسی نشان داد که شاخص CDD ایران در مناطق جنوبی و شرقی ۳۲/۴ روز کاهش خواهد یافت و بیشینه روزهای خشک متوالی با ۲۶/۴ روز افزایش در مناطق شمال و شمال‌غربی ایران مشاهده شد. هر سه سناریوی مورد مطالعه افزایش قابل توجهی را برای روزهای خشک متوالی ایران در حوضه‌های دریای خزر، دریاچه ارومیه و قره قوم نشان دادند. در مقابل مناطق جنوبی ایران کاهشی بیش از ۳۰ روز را برای CDD ایران

پیش‌نگری کردند.

پیش‌نگری بی‌هنجاری CDD نشان می‌دهد که میانگین فراوانی روزهای خشک متوالی بیشتر در شمال و شمال غربی تحت هر سه سناریو افزایش می‌یابد. حوضه‌های آبخیز شمال غربی ایران (دریای خزر و دریاچه ارومیه) در پایان قرن حاضر افزایشی برابر با ۱۶/۴۷، ۲۳/۲۳ و ۲۶/۴۰ روز برای میانگین CDD به ترتیب در سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 خواهند داشت. بر این اساس حوضه‌های دریاچه ارومیه، دریای خزر و حوضه قره‌قوم در آینده خشکسالی‌های بیشتری را تجربه خواهند کرد. پیش‌نگری فراوانی روزهای خشک متوالی نشان می‌دهد که بالاترین مقدار بی‌هنجاری CDD با ۲۶/۶۴ روز تحت سناریو SSP5-8.5 در حوضه دریاچه ارومیه رخ خواهد داد. در مقابل در حوضه مرزی شرق، حوضه

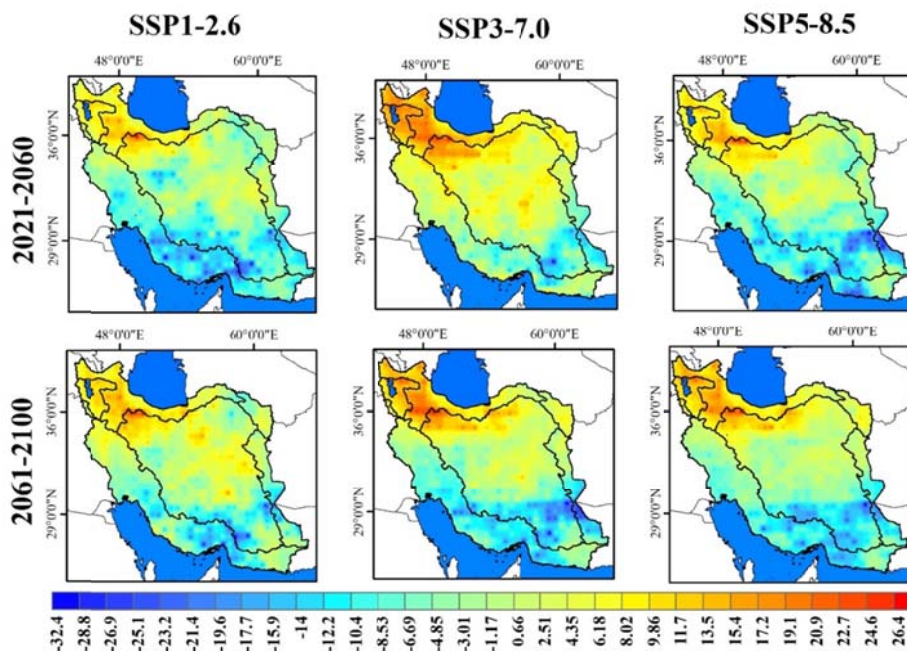
۳-۴. پیش‌نگری روزهای مرطوب متوالی ایران با استفاده از مدل همادی

پراکنش فضایی بی‌هنجاری CWD سالانه در طی دو دوره مورد بررسی آینده نزدیک (۲۰۶۰-۲۰۲۱) و دور (۲۱۰۰-۲۰۶۱) نشان می‌دهد که بیشینه بی‌هنجاری CWD در جنوب غربی، جنوب شرقی و سواحل جنوبی کشور دیده می‌شود. از طرف دیگر، بیشینه کاهش CWD در مناطق شمالی ایران (حوضه آبخیز دریای خزر)، شمال غربی (حوضه آبخیز دریاچه ارومیه) و شمال شرقی (حوضه آبخیز قره قوم) دیده می‌شود (شکل ۵).

الگوی تغییرات CWD و مقدار قابل توجه آن در مناطق شمالی و غربی ایران به دلیل جهت قرارگیری رشته کوه‌های زاگرس و البرز در غرب و شمال ایران، که مانعی برای ورود جریان‌های باران‌زا به نواحی داخلی کشور هستند، به خوبی قابل تفسیر است. روزهای مرطوب متوالی ایران تحت شرایط تغییر اقلیم آینده حداکثر ۰/۹۶ روز در دوره ۲۰۶۱-۲۱۰۰ تحت سناریو SSP5-8.5 در ایران افزایش خواهند داشت. این افزایش از روزهای مرطوب متوالی بیشتر در مناطق جنوب شرقی و جنوبی ایران است.

دریای عمان و خلیج فارس (فقط مناطق ساحلی جنوب) و مناطق جنوبی فلات مرکزی واقع در استان‌های کرمان، سیستان و بلوچستان و فارس روزهای خشک متوالی کاهش حداکثر ۳۲/۴ روزه را تجربه خواهند کرد. بیشینه مقدار کاهش CDD برای سناریو SSP3-7.0 و دوره آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۶۱) است.

به طور کلی، شرایط خشکسالی با کاهش بارندگی، افزایش دما و تبخیر و تعرق تسریع می‌شود. تغییرات روزهای خشک متوالی در شکل ۴ نشان داده شده است. تحت هر سه سناریو SSP، افزایش شاخص در شمال غرب و کاهش آن در جنوب شرق (شکل ۴) به طور عمده دیده می‌شود. میزان افزایش شاخص در سناریو SSP5-8.5 بیشتر است؛ در حالی که میزان کاهش شاخص در SSP1-2.6 بیشتر است. تسریع دو دوره‌های خشک متوالی به احتمال زیاد در شمال غربی و شمال ایران، با کاهش بارش و افزایش شدید دما و تبخیر و تعرق در این مناطق دیده می‌شود. مناطق بیشتر نگران‌کننده دامنه‌های جنوبی البرز، سواحل خزر و حوضه دریاچه ارومیه هستند؛ جایی که افزایش بسیار قابل توجهی در روزهای خشک متوالی دیده می‌شود.

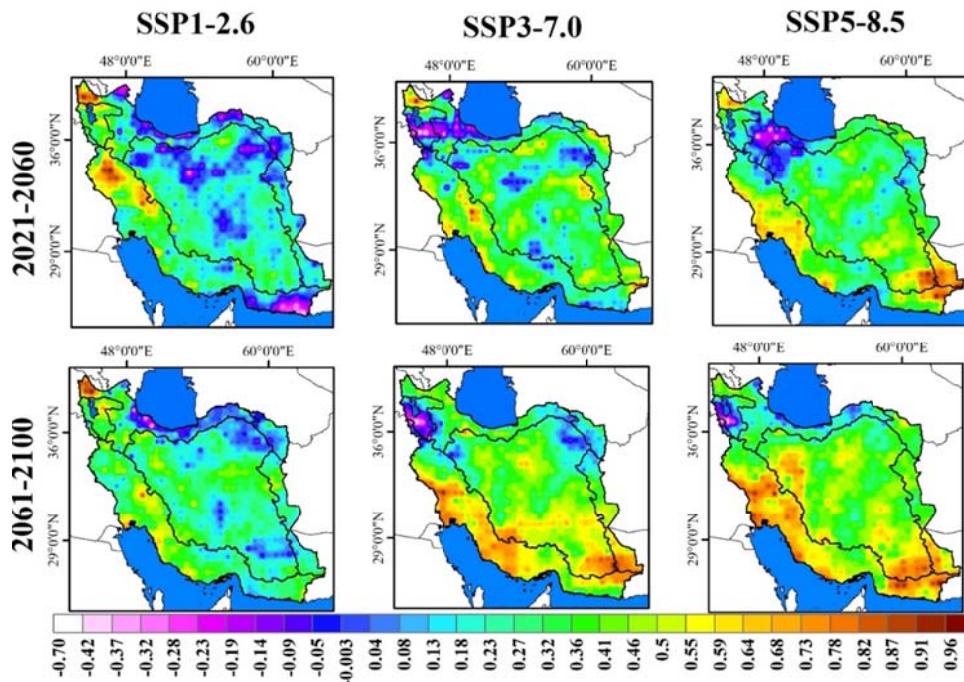


شکل ۴. بی‌هنجاری روزهای خشک متوالی (CDD) ایران مبتنی بر پروتوداد مدل همادی تصحیح‌شده اریبی CMIP6 طی دوره‌های آینده ۲۰۶۰-۲۰۲۱ و ۲۱۰۰-

۲۰۶۱ تحت سناریوهای SSP.

داشت. تغییرات پیش‌نگری شده برای CWD (شکل ۵) از نظر توزیع فضایی متنوع است. تحت هر سه سناریو SSP، کاهش نزدیک به یک روزه در شمال و شمال غربی دیده می‌شود، در حالی که افزایش حدود یک روزه برای روزهای مرطوب متوالی در جنوب شرقی کشور محتمل است. بر این اساس، شرایط خشکسالی آینده به احتمال زیاد در شمال و شمال غربی کشور به‌طور چشم‌گیری افزایش خواهد یافت، به‌خصوص اگر شرایط سناریو بدبینانه (SSP5-8.5) غالب شود. مناطق دیگر به‌خصوص مناطق خشک داخلی ایران نسبتاً پایدار هستند و فقط در شرایط سناریو بدبینانه SSP5-8.5 اندکی کاهش (افزایش) را نشان می‌دهند. تغییرات در CWD (شکل ۵) کاملاً برعکس شاخص CDD است زیرا همه مناطقی که CWD افزایشی دارند طبیعتاً CDD کاهشی دارند و برعکس. افزایش بین نیم تا یک روزه در تعداد روزهای مرطوب متوالی در سواحل خلیج فارس و دریای عمان مشاهده می‌شود که برعکس CDD است.

افزایش روزهای مرطوب متوالی به معنی بهبود شرایط بارشی نخواهد بود، بلکه این افزایش در مناطق خشک می‌تواند باعث ایجاد سیلاب‌های فراگیر شود. برای نمونه سیلاب دی ماه ۱۳۹۸ در استان سیستان و بلوچستان در نتیجه یک رخداد بارشی ۱۸۶ میلی‌متری در نیکشهر طی یک دوره ۲۴ ساعته بوده است. واقفی و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای بر روی فرین‌های اقلیمی ایران با استفاده از داده‌های CMIP5 نشان دادند که پیشینه خطر افزایش سیل در مناطق خشک جنوبی کشور اتفاق می‌افتد. در این مناطق علی‌رغم کاهش بارندگی، دوره‌های مرطوب متوالی و خطر سیل در آینده افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست آمده مبتنی بر برون‌داد همادی مدل‌های CMIP6 نیز نتایج واقفی و همکاران (۲۰۱۹) را تأیید می‌کند. لذا می‌توان اذعان داشت که افزایش روزهای مرطوب متوالی که به رنگ قهوه‌ای در مناطق جنوبی ایران دیده می‌شوند (شکل ۵) را می‌توان به‌عنوان مناطق مستعد بروز سیلاب در ایران برشمرد. در مقابل روزهای مرطوب متوالی حداکثر ۰/۷۰ روز در مناطق شمالی به‌خصوص در حوضه سفید رود و حوضه دریاچه ارومیه بی‌هنجاری منفی خواهند



شکل ۵. بی‌هنجاری روزهای مرطوب متوالی (CWD) ایران مبتنی بر برون‌داد مدل همادی تصحیح‌شده اریبی CMIP6 طی دوره‌های آینده ۲۰۶۰-۲۰۲۱ و ۲۱۰۰-۲۰۶۱ تحت سناریوهای SSP.

۴. بحث و نتیجه گیری

این مطالعه پیش‌نگری وضعیت روزهای خشک و مرطوب متوالی را در ایران مورد توجه قرار داده است. برای این منظور از پنج مدل CMIP6 تحت سه سناریو SSPs برای ایجاد یک مدل همادی چندگانه (MME) استفاده شد. مدل همادی CMIP6 عملکرد بالایی در برآورد بارش داشته و نتایج رضایت‌بخشی از مشخصه‌های روزهای خشک و مرطوب متوالی را در ایران به تصویر کشیده است.

نتایج درستی‌سنجی بارش طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۷۵) نشان داد که با توجه به داده‌های مشاهداتی، مدل‌های CMIP6 عملکرد بالایی در برآورد بارش در ایران دارند. با این حال، علی‌رغم عدم قطعیت مدل‌ها برای بارش، نتایج مربوط به CMIP6 شواهدی را ارائه می‌دهد که بی‌هنجاری دوره‌های خشک متوالی به‌عنوان یک نمایه استاندارد برای خشکسالی‌های کوتاه‌مدت تحت شرایط تغییر اقلیم در ایران افزایشی است. نتایج این مطالعه نشان داد که CDD/CWD در اکثر مناطق ایران با دما ارتباط دارد اما باید توجه داشت که دما به تنهایی یک عامل اصلی تلقی نمی‌شود. برای مثال، مناطق داخلی و شرقی ایران دارای اقلیمی خشک و کم‌بارش است و این شرایط اقلیمی نقش مؤثری در افزایش روزهای خشک متوالی دارد. وانگ و همکاران (۲۰۱۸) نیز ارتباط بین روزهای خشک و مرطوب را با دما تأیید کردند.

سایر شرایط اقلیمی همانند دمای بالا، تابش شدید خورشید و تبخیر و تعرق زیاد تأثیرات مثبتی بر روزهای خشک متوالی در مناطق داخلی و شرقی ایران دارند. وو و چن (۲۰۱۹) نیز ارتباط بین عوامل اقلیمی نامبرده را به همراه ظرفیت رطوبتی خاک را در افزایش روزهای خشک متوالی مناطق ساحلی جنوب غربی چین تأیید کردند. یوان و همکاران (۲۰۱۷) نیز ابراز داشتند که عوامل اقلیمی محلی مانند بارش، ساعات آفتاب و رطوبت نسبی بر شرایط خشک و مرطوب به‌طور قابل‌توجهی تأثیر می‌گذارند، همچنین آنها تأیید کردند که دما عامل اصلی

تأثیرگذار بر وضعیت خشک/مرطوب نمی‌باشد. این نتیجه در ایران نیز قابل تأیید است به‌طوری‌که شیراز با دمای بالا در جنوب ایران روزهای مرطوب متوالی حدود ۴/۵ روزه را در سال دارد.

پراکنش فضایی CDD و CWD در ایران به‌ترتیب یک رابطه منفی و مثبت را با بارش نشان می‌دهد. بارش در بخش‌های بزرگی از مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، به‌ویژه در مناطق شرقی ایران دارای بی‌نظمی زمانی بالایی است که این امر می‌تواند تأثیر مشخصی بر مدت‌زمان دوره‌های خشک داشته باشد، که پیش‌تر توسط مطالعات زیادی در سایر مناطق جهان مورد تأیید گرفته است (وو و چن، ۲۰۱۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۱). در حالی که برای CWD همان‌طور که در ایران نیز دیده شد، یک رابطه مثبت و معنادار جهانی بین بارش و CWD وجود دارد (والدس و آبلان و همکاران، ۲۰۱۷؛ شارما و همکاران، ۲۰۲۰)، این بدان معنی است که بارش به روشنی وقوع روزهای مرطوب متوالی را در مناطق شمالی و شمال‌غربی ایران را تقویت می‌کند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که بارش عامل اصلی تغییرات محلی در طول دوره‌های مرطوب متوالی در مناطق شمالی و شمال‌غربی ایران است. روزهای خشک متوالی افزایش قابل‌توجهی در شمال و شمال‌غربی ایران در آینده دارد. در این مناطق، افزایش دما که توسط زرین و داداشی رودباری (۱۳۹۹) با استفاده از مدل‌های CMIP6 نشان داده شد، منجر به افزایش تبخیر می‌شود که در نتیجه به کاهش رطوبت خاک کمک کرده و شرایط اقلیمی خشکی را ایجاد می‌کند. سان و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که کاهش رطوبت خاک به دلیل تبخیر زیاد باعث ماندگاری بیشتر خشکسالی می‌شود. برونداد مدل‌های CMIP6 نشان می‌دهد که افزایش دما (زرین و داداشی رودباری، ۱۳۹۹) در منطقه نامبرده (شمال و شمال‌غربی ایران) ممکن است باعث افزایش تبخیر و تعرق گیاهان شده که منجر به تشدید خشکسالی می‌شود.

بیشینه تغییرات مربوط به شاخص‌های CDD و CWD

داخلی را تحت‌تأثیر قرار دهد. از سوی دیگر کاهش کشاورزی و رشد روزافزون جمعیت کشور ممکن است خطر جدی برای امنیت غذایی در مناطق شمالی و شمال‌غربی ایران که قطب کشاورزی هستند، داشته باشد.

مراجع

بابایی‌فینی، ا.، قاسمی، ا. و فتاحی، ا. ۱۳۹۳، بررسی اثر تغییر اقلیم بر روند نمایه‌های حدی بارش ایران زمین، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال ۱، شماره ۳، ۱۰۳-۸۵.

تاج‌بخش، س.، عیسی‌خانی، ن. و فضل‌کاظمی، ا. ۱۳۹۴، ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی در ایران با استفاده از شاخص «استانداردشده بارش و تبخیر-تعرق (SPEI)»، م. فیزیک زمین و فضا، ۴۱(۲)، ۳۱۳-۳۲۱.

زرین، آ. و داداشی رودباری، ع. ۱۳۹۹، پیش‌نگری چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر برون‌داد پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6)، فیزیک زمین و فضا، ۴۶(۳)، ۵۸۳-۶۰۲.

صادقی‌نیا، ع. ۱۳۹۱، بررسی و مقایسه دوره‌های تر و خشک در بخش‌های مختلف اقلیمی ایران، جغرافیای طبیعی، دوره ۵، شماره ۱۸، صص ۹۱-۸۱.

قهرمان، ن.، بابائیان، ا. و طباطبایی، م. ۱۳۹۵، ارزیابی پس‌پردازش برون‌دادهای دینامیکی مدل‌های اقلیمی در برآورد تغییرات تبخیر-تعرق پتانسیل تحت سناریوهای واداشت تابشی (بررسی موردی: دشت مشهد)، م. فیزیک زمین و فضا، ۴۲(۳)، ۶۸۷-۶۹۶.

معصوم پورسماکوش، ج.، میری، م. و پورکمر، ف. ۱۳۹۶، ارزیابی داده‌های مدل‌های اقلیمی CMIP5 در مقابل داده‌های مشاهده‌ای ایران، م. ژئوفیزیک ایران، ۱۱(۴)، ۴۰-۵۳.

نصرتی، ک. ۱۳۹۳، ارزیابی شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) جهت شناسایی خشکسالی در اقلیم‌های مختلف ایران، فصلنامه علوم محیطی، ۱۲(۴)، ۷۴-۶۳.

تحت سناریوی SSP5-8.5 مشاهده می‌شود، در حالی که کمترین فراوانی برای هر دو شاخص تحت سناریو SSP1-2.6 می‌باشد. بررسی بی‌هنجاری CDD و CWD نشان داد که حتی در سناریو خوش‌بینانه (SSP1-2.6)، واکنش‌های خشکسالی به تغییر اقلیم قابل‌توجه است. بدون در نظر گرفتن اقدامات سازگاری، شرایط کشور به‌ویژه در حوضه دریای خزر و دریاچه ارومیه در آینده نامناسب خواهد بود. کاملاً روشن است که تشدید خشکسالی در آینده در ایران با افزایش تبخیر و تعرق همراه است. بنابراین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر تبخیر و تعرق برای توصیف مخاطره خشکسالی مورد استفاده قرار گیرند. از آنجا که در این مطالعه شدت خشکسالی در نظر گرفته نشده است، طول مدت دوره‌های خشک متوالی نشانگر آن است که خشکسالی شدید ممکن است پیامدهای بیشتری در ایران به‌همراه داشته باشد.

از آنجا که دوره‌های خشک متوالی در اکثر مناطق شمالی، شمال غربی و شمال شرقی ایران افزایشی است فوریت در نظر گرفتن این تغییرات در چرخه هیدرولوژیکی به‌عنوان ابزاری برای بهبود مدیریت آب به‌ویژه در مناطق شمالی و شمال غربی ایران ضروری است. همچنین در برخی مناطق همچون جنوب شرق و سواحل خلیج فارس کاهش قابل‌توجهی در دوره‌های خشک متوالی دیده می‌شود که این امر نشان‌دهنده افزایش وردایی بارش در مقیاس‌های فصلی و بین‌سالانه در آینده است.

نتایج این مطالعه پیامدهای مهمی برای مدیریت منابع آب در شرایط تغییر اقلیم دارد. افزایش فراوانی دوره‌های خشک متوالی و کاهش دوره‌های مرطوب متوالی رطوبت خاک را تشدید کرده که در نتیجه نقش مؤثری بر چرخه هیدرولوژیکی خواهند داشت. افزایش وقوع دوره‌های خشک متوالی مکرر باعث کاهش حاصلخیزی خاک می‌شود که به نوبه خود باعث کاهش تولیدات کشاورزی می‌شود. از آنجا که ایران بیشتر به تولیدات کشاورزی دیم وابسته است این تغییرات ممکن است تولید ناخالص

- Ahmadi, H., Rostami, N. and Dadashi-roudbari, A., 2020, Projected climate change in the Karkheh Basin, Iran, based on CORDEX models. *Theoretical and Applied Climatology*, 142(1), 661-673.
- Akinsanola, A. A., Kooperman, G. J., Reed, K. A., Pendergrass, A. G. and Hannah, W. M., 2020, Projected changes in seasonal precipitation extremes over the United States in CMIP6 simulations. *Environmental Research Letters*, 15(10), 104078.
- Akinsanola, A. A., Ongoma, V. and Kooperman, G. J., 2021, Evaluation of CMIP6 models in simulating the statistics of extreme precipitation over Eastern Africa. *Atmospheric Research*, 105509.
- Alexander, L.V., Zhang, X., Peterson, T.C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A.M.G., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F. and Tagipour, A., 2006, Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D5).
- Alexandersson, H., 1986, A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of climatology*, 6(6), 661-675.
- Bai, H., Xiao, D., Wang, B., Liu, D. L., Feng, P. and Tang, J., 2020, Multi-model ensemble of CMIP6 projections for future extreme climate stress on wheat in the North China Plain. *International Journal of Climatology*.
- Bishop, C. H. and Abramowitz, G., 2013, Climate model dependence and the replicate Earth paradigm. *Climate dynamics*, 41(3-4), 885-900.
- Brown, P. J., Bradley, R. S. and Keimig, F. T., 2010, Changes in extreme climate indices for the northeastern United States, 1870–2005. *Journal of Climate*, 23(24), 6555-6572.
- Duan, Y., Ma, Z. and Yang, Q., 2017, Characteristics of consecutive dry days variations in China. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(1-2), 701-709.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J. and Taylor, K. E., 2016, Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958.
- Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F. and Dahe, Q. (Eds.), 2012, *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.
- Gusain, A., Ghosh, S. and Karmakar, S., 2020, Added value of CMIP6 over CMIP5 models in simulating Indian summer monsoon rainfall. *Atmospheric Research*, 232, 104680.
- Huang, J., Chen, X., Xue, Y., Lin, J. and Zhang, J., 2017, Changing characteristics of wet/dry spells during 1961–2008 in Sichuan province, southwest China. *Theoretical and Applied Climatology*, 127(1-2), 129-141.
- Khari, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X. and Wehner, M., 2013, Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Climatic change*, 119(2), 345-357.
- Klutse, N.A.B., Ajayi, V.O., Gbobaniyi, E.O., Egbeyi, T.S., Kouadio, K., Nkrumah, F., Quagraine, K.A., Olusegun, C., Diasso, U., Abiodun, B.J. and Lawal, K., 2018, Potential impact of 1.5 C and 2 C global warming on consecutive dry and wet days over West Africa. *Environmental Research Letters*, 13(5), 055013.
- Koutroulis, A. G., Grillakis, M. G., Tsanis, I. K. and Papadimitriou, L., 2016, Evaluation of precipitation and temperature simulation performance of the CMIP3 and CMIP5 historical experiments. *Climate Dynamics*, 47(5), 1881-1898.
- Kriegler, E., Luderer, G., Bauer, N., Baumstark, L., Fujimori, S., Popp, A., Rogelj, J., Strefler, J. and Van Vuuren, D.P., 2018, Pathways limiting warming to 1.5° C: a tale of turning around in no time?. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2119), 20160457.
- Kutieli, H., 1985, The multimodality of the rainfall course in Israel, as reflected by the distribution of dry spells. *Archives for meteorology, geophysics, and bioclimatology, Series B*, 36(1), 15-27.
- Marengo, J. A., Rusticucci, M., Penalba, O. and Renom, M., 2010, An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: part 2: historical trends. *Climatic Change*, 98(3), 509-529.
- Meehl, G.A., Senior, C.A., Eyring, V., Flato, G., Lamarque, J.F., Stouffer, R.J., Taylor, K.E. and Schlund, M., 2020, Context for interpreting equilibrium climate sensitivity and transient climate response from the CMIP6 Earth system models. *Science Advances*, 6(26), eaba1981.
- Mishra, A. K., Singh, V. P. and Jain, S. K., 2010, Impact of global warming and climate change on social development. *Journal of Comparative Social Welfare*, 26(2-3), 239-260.
- Nastos, P. T. and Zerefos, C. S., 2009, Spatial and temporal variability of consecutive dry and wet days in Greece. *Atmospheric Research*,

- 94(4), 616-628.
- Nguyen, P., Thorstensen, A., Sorooshian, S., Zhu, Q., Tran, H., Ashouri, H., Miao, C., Hsu, K. and Gao, X., 2017, Evaluation of CMIP5 model precipitation using PERSIANN-CDR. *Journal of Hydrometeorology*, 18(9), 2313-2330.
- Papalexiou, S. M. and Montanari, A., 2019, Global and regional increase of precipitation extremes under global warming. *Water Resources Research*, 55(6), 4901-4914.
- Putra, I. D. G. A., Rosid, M. S., Sopaheluwakan, A., Ulina, Y. C., Harsa, H., Permana, D. S. and Cho, J., 2019, November. Projected extreme climate indices in the java island using cmip5 models. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 363, No. 1, p. 012022). IOP Publishing.
- Raventos-Duran, T., Camredon, M., Valorso, R., Mouchel-Vallon, C. and Aumont, B., 2010, Structure-activity relationships to estimate the effective Henry's law constants of organics of atmospheric interest. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 10(16).
- Riahi, K., Van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B.C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O. and Lutz, W., 2017, The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168.
- Rowell, D. P., 2019, An observational constraint on CMIP5 projections of the East African long rains and southern Indian Ocean warming. *Geophysical Research Letters*, 46(11), 6050-6058.
- Sharma, S., Khadka, N., Hamal, K., Baniya, B., Luintel, N. and Joshi, B. B., 2020, Spatial and temporal analysis of precipitation and its extremities in seven provinces of Nepal (2001–2016). *Applied Ecology and Environmental Sciences*, 8(2), 64-73.
- Shi, J., Cui, L., Wen, K., Tian, Z., Wei, P. and Zhang, B., 2018, Trends in the consecutive days of temperature and precipitation extremes in China during 1961–2015. *Environmental research*, 161, 381-391.
- Singh, D., Tsiang, M., Rajaratnam, B. and Diffenbaugh, N. S., 2014, Observed changes in extreme wet and dry spells during the South Asian summer monsoon season. *Nature Climate Change*, 4(6), 456-461.
- Solman, S.A., Sanchez, E., Samuelsson, P., da Rocha, R.P., Li, L., Marengo, J., Pessacg, N.L., Remedio, A.R.C., Chou, S.C., Berbery, H. and Le Treut, H., 2013, Evaluation of an ensemble of regional climate model simulations over South America driven by the ERA-Interim reanalysis: model performance and uncertainties. *Climate Dynamics*, 41(5-6), 1139-1157.
- Stolpe, M. B., Cowtan, K., Medhaug, I. and Knutti, R., 2020, Pacific variability reconciles observed and modelled global mean temperature increase since 1950. *Climate Dynamics*, 1-22.
- Stouffer, R. J., Eyring, V., Meehl, G. A., Bony, S., Senior, C., Stevens, B. and Taylor, K. E., 2017, CMIP5 scientific gaps and recommendations for CMIP6. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 95-105.
- Sun, F., Mejia, A., Zeng, P. and Che, Y., 2019, Projecting meteorological, hydrological and agricultural droughts for the Yangtze River basin. *Science of the Total Environment*, 696, 134076.
- Tebaldi, C. and Knutti, R., 2007, The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philosophical transactions of the royal society A: mathematical, physical and engineering sciences*, 365(1857), 2053-2075.
- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H. and Abbaspour, K. C., 2019, The future of extreme climate in Iran. *Scientific reports*, 9(1), 1-11.
- Valdes-Abellan, J., Pardo, M. A. and Tenza-Abril, A. J., 2017, Observed precipitation trend changes in the western Mediterranean region. *International Journal of Climatology*, 37, 1285-1296.
- Wainwright, C. M., Marsham, J. H., Keane, R. J., Rowell, D. P., Finney, D. L., Black, E. and Allan, R. P., 2019, 'Eastern African Paradox' rainfall decline due to shorter not less intense Long Rains. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2(1), 1-9.
- Wang, S., Zhang, M., Wang, B., Sun, M. and Li, X., 2013, Recent changes in daily extremes of temperature and precipitation over the western Tibetan Plateau, 1973–2011. *Quaternary International*, 313, 110-117.
- Wang, X., Hou, X. and Zhao, Y., 2021, Changes in consecutive dry/wet days and their relationships with local and remote climate drivers in the coastal area of China. *Atmospheric Research*, 247, 105138.
- Wang, Z., Zhong, R., Lai, C., Zeng, Z., Lian, Y. and Bai, X., 2018, Climate change enhances the severity and variability of drought in the Pearl River Basin in South China in the 21st century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 149-162.
- Weedon, G.P., Gomes, S., Viterbo, P., Shuttleworth, W.J., Blyth, E., Österle, H., Adam, J.C., Bellouin, N., Boucher, O. and

- Best, M., 2011, Creation of the WATCH forcing data and its use to assess global and regional reference crop evaporation over land during the twentieth century. *Journal of Hydrometeorology*, 12(5), 823-848.
- Wu, J. and Chen, X., 2019, Spatiotemporal trends of dryness/wetness duration and severity: The respective contribution of precipitation and temperature. *Atmospheric Research*, 216, 176-185.
- Yuan, Q., Wu, S., Dai, E., Zhao, D., Zhang, X. and Ren, P., 2017, Spatio-temporal variation of the wet-dry conditions from 1961 to 2015 in China. *Science China Earth Sciences*, 60(11), 2041-2050.
- Zhou, T., Chen, X. and Wu, B., 2019, Frontier issues on climate change science for supporting Future Earth. *Chinese Science Bulletin*, 64(19), 1967-1974.
- Zolina, O., Simmer, C., Kapala, A. and Gulev, S., 2005, On the robustness of the estimates of centennial-scale variability in heavy precipitation from station data over Europe. *Geophysical Research Letters*, 32(14).