

پیش‌بینی دمای ماهانه ایران با استفاده از پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (DCPP) در دهه آینده (۲۰۲۱-۲۰۲۸)

آذر زرین^{۱*}، عباسعلی داداشی رودباری^۲ و سمیرا حسینی^۳

۱. دانشیار، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲. پژوهشگر پسا دکتری، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(دریافت: ۱۴۰۰/۵/۱۱، پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰)

چکیده

این پژوهش با هدف درستی‌سنجی و پیش‌بینی دمای ماهانه ایران با استفاده از پرونده پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (DCPP) که در پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6) مشارکت داده شده است، انجام شد. به این منظور از دو گروه داده شامل دمای ۴۲ ایستگاه همدید و پرونده دو مدل BCC-CSM2-MR و MPI-ESM1-2-HR با تفکیک افقی ۱۰۰ کیلومتر برای دوره گذشته‌نگر (۲۰۱۹-۱۹۸۰) و دوره پیش‌بینی (۲۰۲۱-۲۰۲۸) استفاده شد. برای درستی‌سنجی مدل‌ها از سنجه‌های آماری RMSE، MBE و PCC و نمودار تیلور استفاده شد. نتایج درستی‌سنجی نشان‌دهنده کارایی بهتر مدل MPI-ESM1-2-HR نسبت به مدل BCC-CSM2-MR در ایران می‌باشد. در مقابل مدل BCC-CSM2-MR به‌خصوص در سواحل شمالی و جنوبی کشور با خطای قابل توجهی همراه بوده و صرفاً در مناطق کوهستانی ایران عملکرد قابل‌قبولی را نشان داده است. نتایج بررسی دمای ماهانه دوره گذشته‌نگر با استفاده از مدل MPI-ESM1-2-HR نشان داد که این مدل به‌خوبی الگوهای دمایی کشور را به تصویر می‌کشد. پیش‌بینی دمای ایران برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۲۸ نشان داد که بی‌هنجاری دما در دهه‌ی آینده در تمامی ماه‌های سال مثبت و به‌طور متوسط ۰/۹ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. آنچه در این میان بسیار حائز اهمیت است بی‌هنجاری مثبت دمای ماه‌های مارس، آوریل، ژوئن و ژوئیه در تمامی پهنه‌های اقلیمی کشور است. بی‌هنجاری مثبت در این ماه‌ها بیش از یک درجه سلسیوس بوده که یک تهدید جدی برای محیط‌زیست و منابع آب ایران در سال‌های آینده به‌شمار می‌رود.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی دهه‌ای، پیش‌بینی نزدیک‌مدت، بی‌هنجاری دما، پروژه DCPP، ایران.

۱. مقدمه

افزایش توفان‌های گرد و غباری (داداشی رودباری و احمدی، ۲۰۲۰)، روند افزایشی دما (فلاح قاله‌ری و همکاران، ۲۰۱۹؛ زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰ الف) و افزایش شدت بارش (واقفی و همکاران، ۲۰۱۹؛ زرین و داداشی رودباری، ۲۰۲۱) روبه‌رو خواهد بود. لذا با توجه به این موضوع که بخش‌های استراتژیک و حیاتی کشور همچون منابع آب، کشاورزی و انرژی در معرض خطرات ناشی از تغییر اقلیم قرار دارند، پیش‌بینی دقیق از تغییرات دما و همچنین بارش در دهه‌های آتی می‌تواند راه‌گشای معضلاتی چون خشکسالی، سیلاب‌های ناگهانی، توفان‌های گردوغباری و بیابان‌زایی باشد.

برای آشکارسازی تغییر اقلیم طی دهه‌های آینده نیاز است که متغیرهای اقلیمی موردنظر همانند دما و بارش

تغییر اقلیم یکی از چالش‌های بزرگ قرن حاضر است که صدمات جبران‌ناپذیری را بر اکوسیستم‌ها وارد کرده است (ویسکف و همکاران، ۲۰۲۰). تغییر اقلیم که به‌دنبال گرمایش جهانی رخ داده است از جمله چالش برانگیزترین و مهم‌ترین مسایل جهان در دهه‌های اخیر به‌شمار می‌رود. تغییر اقلیم موجب تغییر الگوهای ریزش‌های جوی، آسیب به بخش کشاورزی و شیلات (فانگ و همکاران، ۲۰۲۱)، افزایش رخداد‌های فرین (کانیسکی و همکاران، ۲۰۱۶) و تغییر در زیستگاه‌ها و گونه‌های مفید شده است (هسیونگ و همکاران، ۲۰۰۶). ایران نیز از این تغییرات مستثنی نیست. بر اساس پیش‌نگری‌های انجام شده، ایران نیز با چالش‌هایی از جمله خشکسالی‌های شدید (شرافتی و همکاران، ۲۰۲۰)،

شبه‌سازی شوند. روش‌های مختلفی برای این کار وجود دارد که مدل‌های گردش کلی (GCMs) مهم‌ترین روش برای پیش‌نگری اقلیم آینده به‌شمار می‌روند (هی و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژئو و همکاران، ۲۰۲۰).

پیش‌بینی دهه‌ای (Decadal Prediction) یک اصطلاح کلی است که پیش‌بینی‌های مربوط به بازه‌های زمانی سالانه، چندساله و ده‌ساله (یا دهه‌ای) را در بر می‌گیرد که در طی سالیان گذشته، پیشرفت قابل توجهی در آنها حاصل شده است (کیم و همکاران، ۲۰۱۲؛ سوسپدرا-آلفونسو و بوئر، ۲۰۲۰). پیش‌بینی‌های اقلیمی دهه‌ای با استفاده از شرایط گذشته‌نگر (Hindcast) صورت می‌گیرد (اسمیت و همکاران، ۲۰۰۷؛ کینلیساید و همکاران، ۲۰۰۸؛ پولمن و همکاران، ۲۰۰۹؛ موجیزوکی و همکاران، ۲۰۱۰؛ بورچرت و همکاران، ۲۰۲۱). پیش‌بینی‌های اقلیمی دهه‌ای با استفاده از آخرین نسل مدل‌های اقلیمی دو دسته داده گذشته‌نگر و پیش‌بینی را ارائه می‌کنند (بوئر و همکاران، ۲۰۱۶). در کنار این پیش‌بینی‌ها و شبه‌سازی‌های دوره‌های گذشته‌نگر، این مدل‌ها اطلاعات ارزشمندی را برای درک سازوکارهای فیزیکی حاکم بر تغییر اقلیم فراهم می‌کنند که دارای ارزش افزوده بالایی می‌باشند.

با توجه به تأثیرات گسترده اجتماعی و اقتصادی تغییر اقلیم در دهه‌های آینده، آگاهی از این تغییرات احتمالی با تقاضای زیادی از سوی سیاست‌گذاران، برنامه‌ریزان و سایر ذینفعان روبه‌رو شده است (میهل و همکاران، ۲۰۱۴). در پاسخ به این تقاضا، بسیاری از گروه‌های مدل‌سازی اقلیمی به بررسی پتانسیل توسعه پیش‌بینی‌های اقلیمی دهه‌ای پرداختند (میهل و همکاران، ۲۰۱۰). از جمله این برنامه‌ها می‌توان به پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (Decadal Climate Prediction Project (DCPP)) اشاره کرد که با استفاده از چندین مدل، شرایط اقلیمی و وردایی آن را برای نخستین بار با استفاده از برون‌داد پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم (CMIP5) شبه‌سازی و پیش‌بینی کردند (بوئر و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین

اخیراً به‌منظور ارائه خدمات گسترده برای پیش‌بینی‌های دهه‌ای بر اساس توسعه مدل‌های گردش کلی جو از یک سو و توسعه قابل ملاحظه داده‌های بازتحلیل از سوی دیگر از پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز ششم (CMIP6) استفاده شده است (آیرینگ و همکاران، ۲۰۱۶). به‌عبارت دیگر پروژه DCPD یکی از پروژه‌های مشارکت یافته در فاز ششم است که بر پیش‌بینی ده‌ساله اقلیمی و سازوکارهای وردایی اقلیم بر اساس مدل‌های جفت شده مدل‌های گردش کلی تمرکز دارد (بوئر و همکاران، ۲۰۱۶). علی‌رغم استفاده از شبه‌سازی اقلیمی دهه‌ای در هر دو پروژه CMIP6 و CMIP5 رویکرد اتخاذ شده در پروژه DCPD متفاوت است. بر اساس نتایج برون‌داد CMIP5 و پیشرفت‌های بعدی در سامانه‌های پیش‌بینی، پیش‌بینی دهه‌ای CMIP6 بهبود یافته است.

با رشد و توسعه قابل توجه پیش‌بینی‌های دهه‌ای امروزه این پیش‌بینی‌ها به‌عنوان پیش‌بینی‌های اقلیمی عملیاتی توسط مراکز مختلف اجرایی و علمی در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین از این مدل‌ها در پژوهش‌های متعددی در سال‌های گذشته استفاده شده است که در ادامه به برخی از مهم‌ترین این مطالعات پرداخته می‌شود.

اولین پیش‌بینی‌های اقلیمی دهه‌ای توسط تحقیقات پیشگام اسمیت و همکاران (۲۰۰۷)، پولمن و همکاران (۲۰۰۹) و کینلیساید و همکاران (۲۰۰۸) انجام شده است. برای مثال اسمیت و همکاران (۲۰۰۷) سامانه مدل‌سازی جدیدی را با استفاده از GCM ارائه دادند و ابراز داشتند که برآورد دمای سطح در طول یک دهه به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته و بر اساس آن پیش‌بینی‌ها دقیق‌تر شده است. ژئو و همکاران (۲۰۲۰) به‌درستی سنجی پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز ششم (CMIP6) در پیش‌بینی دهه‌ای خشکسالی در حوضه‌های رودخانه‌های بزرگ در سراسر جهان پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که پیش‌بینی خشکسالی مبتنی بر برون‌داد مدل‌های CMIP6 کارایی بالاتری نسبت به CMIP5 در بیش از ۴۷ درصد از

گزارش تحقیقاتی (بابائیان و همکاران، ۱۳۹۸) برای پیش‌بینی احتمالاتی ماهانه بارش و دمای کشور برای دوره ۲۰۲۴-۲۰۲۰ و پیش‌بینی بارش ایران در دوره ۲۰۲۴-۲۰۲۰ (بابائیان و همکاران، ۱۳۹۹) می‌باشد. همچنین بابائیان و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی به پیش‌بینی چندسالانه بارش ایران با مقیاس کاهی برون‌داد مدل‌های DCPP برای دوره ۲۰۲۳-۲۰۱۹ پرداختند. برای درستی‌سنجی برون‌داد مدل از داده‌های بارش شبکه‌ای GPCP استفاده کردند. بررسی نتایج آنها نشان داد که در مجموع میانگین بارش در دوره ۲۰۲۳-۲۰۱۹ در محدوده نرمال تا کمتر از نرمال خواهد بود، به این صورت که بر اساس دو روش تصحیح اریبی و وزنی بارش در نیمه غربی و جنوب کشور بیشتر از نرمال و در شرق کشور نرمال تا کمتر از نرمال، در روش پیش‌بینی احتمالاتی بارش سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ در طبقه بیشتر از نرمال و سال‌های ۲۰۲۱، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ عمدتاً در طبقه کمتر از نرمال تا نرمال و به روش دورپیوندی در محدوده کمتر از نرمال پیش‌بینی می‌شود. با توجه به این که پیش‌بینی‌های دهه‌ای در آغاز راه می‌باشند، ضرورت دارد تا نسبت به بررسی جنبه‌های مختلف مدل‌های مذکور به‌ویژه کارایی برون‌داد مستقیم (DMO) آنها در مناطق مختلف جغرافیایی کشور اقدام کرد. علاوه بر این از آنجایی که بر اساس توصیه‌های سازمان هواشناسی جهانی (WMO)، پیش‌بینی دهه‌ای بر اساس برون‌داد مدل‌های DCPP می‌تواند به‌عنوان یک پیش‌بینی عملیاتی به کار گرفته شود؛ لذا بررسی همه‌جانبه این مدل‌ها در اولویت قرار می‌گیرد. هدف از این تحقیق درستی‌سنجی برون‌داد مستقیم (DMO) متغیر دما در عرصه‌های مختلف کشور و پیش‌بینی آن بر اساس مدل‌های در دسترس پروژه DCPP مشارکت داده شده در پروژه CMIP6 است. در این پژوهش به دلیل حفظ وردایی درونی اقلیم (Internal Climate Variability، ICV) برون‌داد مستقیم مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. چراکه روش‌های تصحیح اریبی به دلیل آسیب رساندن به مزیت‌های ذاتی مدل‌های اقلیمی با تغییر ساختار الگوهای

حوضه‌های رودخانه‌ای دارد. زی‌چن و همکاران (۲۰۲۰) به‌درستی‌سنجی توانایی مدل‌های CanESM5 و MIROC6 از سری مدل‌های CMIP6 در پیش‌بینی دهه‌ای دمای هوا در چین با استفاده از پروژه DCPP پرداختند. نتایج آنها نشان داد که مدل‌های DCPP می‌توانند تغییرات میانگین دمای سالانه و فصلی مناطق مختلف چین را به‌درستی مورد بررسی قرار دهند. همچنین آنها نشان دادند که مهارت پیش‌بینی در جنوب و غرب چین بیشتر از شمال این کشور است. بورچرت و همکاران (۲۰۲۱) نیز در پژوهشی به پیش‌بینی دهه‌ای دمای تابستانه اروپا با استفاده از پروژه DCPP از سری مدل‌های CMIP6 پرداخته و دریافتند دمای دهه‌ای تابستان در اروپا به‌میزان بسیار زیادی قابل پیش‌بینی می‌باشد که این خود مبین کارآمدی مدل‌های DCPP در پیش‌بینی‌های دهه‌ای است. در ایران تغییر اقلیم تاکنون از جنبه‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعات را می‌توان از جنبه‌های بسیاری همچون روش‌شناسی، کاربست مدل‌ها و منطقه مورد مطالعه تقسیم‌بندی کرد. تقریباً تمامی مطالعاتی که اقلیم آینده ایران را مورد بررسی قرار داده‌اند، دربرگیرنده پیش‌نگری‌های اقلیمی می‌باشند. این مطالعات بسته به نوع روش و داده مورد استفاده بسیار گسترده هستند؛ به‌طوری که تبخیر و تعرق (قهرمان و همکاران، ۱۳۹۵)، گردش‌های بزرگ مقیاس جوی و پاسخ آن به گرمایش جهانی (عالمزاده و همکاران، ۱۳۹۶)، درستی‌سنجی بارش و دما برای ایران (معصوم‌پور سماکوش و همکاران، ۱۳۹۶)، احمدی و همکاران، ۱۳۹۸)، پیش‌نگری دما (زرین و داداشی رودباری، ۱۳۹۹)؛ زرین و همکاران، ۱۴۰۰)، شدت بارش (زرین و داداشی رودباری، ۲۰۲۱) و روزهای خشک و مرطوب متوالی (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰) تقسیم‌بندی کرد.

جمع‌بندی پیشینه نشان داد که علی‌رغم تحقیقات زیادی که در ارتباط با پیش‌نگری متغیرهای اقلیمی در پهنه ایران انجام شده است اما پیش‌بینی دهه‌ای تنها محدود به یک

زمانی-مکانی متغیر به دلیل نقض اصول اساسی مدل‌ها مورد انتقاد قرار می‌گیرد (اهرت و همکاران، ۲۰۱۲). از طرف دیگر، رفتار غیرخطی فرایندهای فیزیکی سازنده جو باعث می‌شود تکنیک‌های آماری به کار گرفته شده برای تصحیح اریبی چندان ارزش افزوده‌ای ایجاد نکرده و در مقابل عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها را در بیشتر مواقع افزایش می‌دهند. افزون بر آنچه که گفته شد، به نظر می‌رسد مدل‌های پیش‌بینی مبنای کارایی لازم را حتی بدون اعمال روش‌های نیز آماری داشته باشند. نتایج این مطالعه اطلاعات ارزشمندی را در خصوص پیش‌بینی‌های بلندمدت اقلیمی و کاربست مدل کارا برای ایران ارائه می‌دهد که در بخش‌های مختلف برنامه‌ریزی و مدیریت ریسک دارای اهمیتی شایان توجهی است.

۲. داده و روش تحقیق

۱-۲. منطقه مورد مطالعه

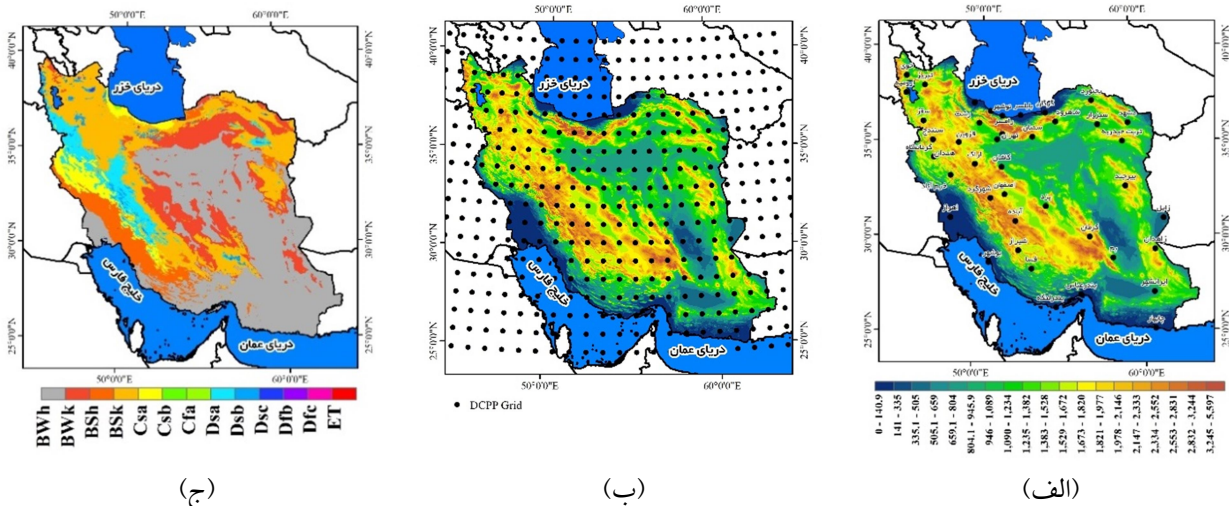
منطقه مورد مطالعه این پژوهش کشور ایران است. ارتفاع ایران از کمتر از ۲۸ متر در سواحل دریای خزر تا بیش از ۵۶۰۰ متر در قله دماوند در رشته کوه البرز در تغییر است (شکل ۱-ج). البرز در شمال و زاگرس در غرب نقش به‌سزایی در تقسیم‌بندی کشور به مناطق مختلف اقلیمی دارند. این مناطق کوهستانی همچون سدی در برابر رطوبت برای رسیدن به مناطق داخلی کشور عمل می‌کنند. بیش از ۸۰ درصد ایران در مناطق خشک و نیمه‌خشک واقع شده است (واقفی و همکاران، ۲۰۱۹). در شکل (۱-الف) ضمن ارائه طبقات ارتفاعی ایران؛ پهنه‌های اقلیمی کوپن-گایگر نیز ارائه شد که مؤید تنوع بالای اقلیمی ایران است.

۲-۲. ایستگاه‌های همدید

همان‌طور که اشاره شد هدف از این مطالعه پیش‌بینی دهه‌ای دما برای کشور مبتنی بر برون‌داد پروژه DCPD می‌باشد. به این منظور از داده‌های ۴۲ ایستگاه همدید

به‌عنوان داده‌های مشاهداتی برای درستی‌سنجی مدل‌های در دسترس پروژه DCPD استفاده شد. شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های منتخب را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که دوره گذشته‌نگر پروژه DCPD از سال ۱۹۶۰ در دسترس است اما برای بررسی کارایی این مدل‌ها در اقلیم‌های مختلف ایران چندین شرط مورد توجه قرار گرفته است که طول دوره آماری به ۴۰ سال کاهش یابد. ۱- طول دوره آماری یک دوره بهنجار بلند مدت اقلیمی باشد (استاندارد جهانی ۳۰ ساله برای مناطق با اقلیم متنوع همچون ایران)؛ ۲- داده‌های مشاهداتی بلند مدت برای درستی‌سنجی عملکرد پروژه DCPD در مناطق مختلف جغرافیایی مشارکت حداکثری داشته باشند؛ ۳- داده‌های گمشده از کل سری زمانی ایستگاهی بیش از ۱۰ درصد نباشد (زولینا و همکاران، ۲۰۰۵)؛ و ۴- همگنی داده‌ها که با آزمون الکساندرسون (SNHT) (الکساندرسون، ۱۹۸۶) مورد بررسی و همگنی آنها در سطح ۰/۰۵ مورد تأیید قرار گیرد. با در نظر گرفتن این چهار شرط ۴۲ ایستگاه با طول دوره آماری ۴۰ ساله (۲۰۱۹-۱۹۸۰) گزینش و برای درستی‌سنجی دما مورد استفاده قرار گرفتند که موقعیت آنها در شکل ۱ آمده است.

به‌منظور بررسی کارایی مدل‌های DCPD مورد مطالعه در پهنه‌های اقلیمی متنوع ایران (شکل ۱-الف)، شش ایستگاه (شکل ۱-ج) نماینده از پهنه‌هایی که نقطه شبکه‌های مدل‌های پروژه DCPD در آنها قرار گرفتند انتخاب شد. ایستگاه‌های نماینده عبارت‌اند از ۱- ایستگاه مشهد نماینده اقلیم بیابانی خشک و سرد (BWk)؛ ۲- ایستگاه زاهدان نماینده اقلیم بیابانی خشک و بسیار گرم (BWh)؛ ۳- ایستگاه شیراز نماینده اقلیم نیمه‌بیابانی خشک و سرد (BSh)؛ ۴- ایستگاه شهرکرد نماینده اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و بسیار گرم (Dsa)؛ ۵- ایستگاه تبریز نماینده اقلیم نیمه‌بیابانی خشک و سرد (BSk) و ۶- ایستگاه بابل‌سر نماینده اقلیم معتدل با تابستان‌های خشک و گرم (Csa).



شکل ۱. الف) مدل رقمی ارتفاعی به همراه موقعیت ایستگاه‌های همید (۲۰۱۹-۱۹۸۰)؛ ب) نقطه شبکه‌های مدل‌های ۱۰۰ کیلومتری پروژه DCPP و ج) پهنه‌های اقلیمی کوپن-گایگر.

می‌باشد که از سه مؤلفه تشکیل شده است. مؤلفه A (اجرای گذشته‌نگر دهه‌ای چند مدلی چند ساله) یا گذشته‌نگر (Hindcast)، شامل تجزیه و تحلیل پیش‌بینی‌های گذشته‌نگر می‌باشد که از آن به‌عنوان پایه‌ای برای پیش‌بینی بازه‌های زمانی سالانه تا ده‌ساله استفاده می‌شود. مؤلفه B (اجرای پیش‌بینی‌های دهه‌ای چند مدلی زمان واقعی) یا پیش‌بینی (Prediction)، به تولید مداوم پیش‌بینی‌های اقلیمی با استفاده از مدل‌های چندگانه می‌پردازد. خروجی عمده این دو مؤلفه به‌عنوان منبعی برای تجزیه و تحلیل، درک، و بهبود تکنیک‌های پیش‌بینی‌های نزدیک‌مدت اقلیمی حداکثر برای یک دهه مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجاکه درک فرایندهای فیزیکی حاکم بر سامانه‌های اقلیمی برای بهبود پیش‌بینی‌های دهه‌ای و ارائه پیش‌بینی‌ها با کمترین عدم قطعیت ضروری است، لذا مؤلفه C (پیش‌بینی‌پذیری، سازوکارها و مطالعات موردی) که سومین قسمت از پروژه پیش‌بینی دهه‌ای اقلیمی می‌باشد به تبیین پیش‌بینی‌پذیری مدل، سازوکارها و فرایندهای اقلیمی می‌پردازد (بوئر و همکاران، ۲۰۱۶).

پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6) از تعدادی بسیار زیر پروژه تشکیل شده است؛ یکی از جدیدترین این پروژه‌ها پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (DCPP)

۲-۳. پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (DCPP) و مدل‌های منتخب

پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (DCPP) یک پروژه چند مدلی هماهنگ برای پیش‌بینی، پیش‌بینی‌پذیری و وردایی اقلیمی دهه‌ای است که برای پیش‌بینی اقلیمی نزدیک مدت (Near Term Climate Prediction، NTCP) توسعه داده شده است. برنامه پژوهش اقلیم جهانی (World Climate Research Programme، WCRP) دارای دو کارگروه پیش‌بینی فصلی تا بین‌سالانه Working Group on Seasonal to Interannual Prediction، WGSIP) و کارگروه مدل‌سازی جفت‌شده (Interannual Prediction Working Group on Coupled، WGCM) می‌باشد. این کارگروه‌ها با مشارکت مراکز پیشگام (Lead Centers) سازمان هواشناسی جهانی (WMO) پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (DCPP) را توسعه دادند که به پیش‌بینی متغیرهای اصلی اقلیمی همچون دما و بارش می‌پردازد.

پروژه DCPP برخلاف مدل‌های گردش کلی دارای آغازگری است که این آغازگری برای اجرای هر سال یک بازه زمانی ۳ ماهه را در بر می‌گیرد (DCPP در ماه مارس هر سال به مدت یک دهه اجرا می‌شود). پروژه DCPP یکی از زیر پروژه‌های مشارکت یافته در CMIP6

هر دو نسخه مدل از نظر ساختار مشابه هستند اما بروز رسانی‌های نسخه اخیر منجر به کاهش RMSE در حدود ۱۰ درصد شده است (مولر و همکاران، ۲۰۱۸).

۴-۲. درستی‌سنجی پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای

(DCPP)

برای درستی‌سنجی مدل‌های منتخب پروژه DCPP با استفاده از داده‌های مشاهداتی (ایستگاه‌های همدید) از سه سنجه متداول آماری ضریب همبستگی (Pearson correlation coefficient, PCC)، ریشه میانگین مربعات خطا (Root Mean Square, RMSE) و میانگین اریبی خطا (Mean Bias Error, MBE) استفاده شد.

$$PCC = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2)(\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_i - o_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (O - P)}{n} \quad (3)$$

در این روابط f_i مقدار دمای دوره گذشته‌نگر مدل مورد مطالعه DCPP و o_i مقدار مشاهداتی (ایستگاه‌های همدید منتخب) است. n تعداد کل است. مقدار RMSE و MBE هرچه کمتر باشند مقدار خطا و اریبی دما مدل کمتر است و همچنین مقدار همبستگی پیرسون (PCC) هرچه به ۱ نزدیک‌تر باشد عملکرد مدل بالاتر است.

است که این پروژه نیز متشکل از مدل‌های اقلیمی گوناگونی است که بسته به تنظیم شرایط اجرای مدل انتخاب مدل‌ها محدود می‌شود. با در نظر گرفتن ارائه داده‌های روزانه و جدیدترین اجرای در دسترس برای دمای هوا دو مدل با تفکیک افقی ۱۰۰ کیلومتر برای پروژه DCPP از سری مدل‌های CMIP6 در دسترس است. این دو مدل عبارت‌اند از BCC-CSM2-MR و MPI-ESM1-2-HR که جزئیات این مدل‌ها در جدول ۱ و شرح کوتاه آنها در ادامه آمده است.

یکی از مدل‌های مذکور در فاز ششم، مدل BCC-CSM2-MR است. این مدل نسل دوم مدل‌های سامانه اقلیمی مرکز اقلیمی پکن است. این مدل در بسیاری از جنبه‌ها از جمله دمای هوا و گردش هوا در مقیاس جهانی و منطقه‌ای در شرق آسیا و ورودی اقلیمی در مقاطع زمانی مختلف، شبیه‌سازی دقیق‌تر بودجه انرژی در جو بالا، تغییرات درون سالی دمای سطح دریا (SST)، بهبود طرحواره بارش و وسعت و ضخامت یخ دریا پیشرفت قابل توجهی داشته است (وو و همکاران، ۲۰۱۹).

مدل MPI-ESM1-2-HR جدیدترین نسخه از مدل سامانه زمین (ESM) مؤسسه ماکس پلانک آلمان است و یکی از اصلی‌ترین مدل‌های مشارکت یافته در فاز ششم و پیش‌بینی‌های اقلیمی فصلی و دهه‌ای می‌باشد. به‌طور کلی افزایش قدرت تفکیک به‌کار رفته در نسخه اخیر منجر به بهبود حالت متوسط جو و دینامیک جو در مقایسه با MPI-ESM-LR شده است. گرچه همچنان مقدار اریبی

در متغیرهای نزدیک به سطح زمین (Near surface) در

جدول ۱. اطلاعات مدل‌های مورد مطالعه پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (DCPP).

نام مدل	نوع مدل	تفکیک افقی	گونه اجرا (variant)	متغیر مورد استفاده
MPI-ESM1-2-HR	AOGCM	۱۰۰ کیلومتر	rli1p1fl	دمای هوا
BCC-CSM2-MR				

۳. نتایج و بحث

۳-۱. درستی سنجی مدل‌های پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (DCPP)

برای درستی سنجی پیش‌بینی دهه‌ای دمای ماهانه پروژه DCPP از دو مدل BCC-CSM2-MR و MPI-ESM1-2-HR که تا زمان نگارش این پژوهش داده‌های آنها منتشر شده است، استفاده شد. از فراسنج دمای روزانه با تفکیک افقی ۱۰۰ کیلومتر برای دوره گذشته‌نگر (۲۰۱۹-۱۹۸۰) پروژه DCPP و از داده‌های ۴۲ ایستگاه همدید که در شکل ۱ آمده است، جهت درستی سنجی این داده‌ها استفاده شد.

نتایج درستی سنجی مدل‌های منتخب با استفاده از سه سنجه آماری مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای اریبی (MBE) و ضریب همبستگی (PCC) در شکل ۲ نشان داده شده است. بررسی ارتباط بین داده‌های مشاهداتی (ایستگاه) و دوره گذشته‌نگر دو مدل منتخب نشان داد که مدل BCC-CSM2-MR در مناطق کوهستانی زاگرس و البرز و مناطق خشک و نیمه‌خشک داخلی و شرقی از همبستگی بالایی برخوردار است (۰/۹۹). این در حالی است که سواحل شمالی و جنوبی کشور در این مدل مقادیر همبستگی پایین تری را نشان می‌دهند (بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۷). ضریب همبستگی پایین و بالا بودن مقدار اریبی در سواحل جنوبی دریای خزر ناشی از شرایط خاص جغرافیایی و تقابل بین خشکی و دریا در این نواحی می‌باشد. نتیجه درستی سنجی فراسنج دما برای مدل BCC-CSM2-MR در سایر مدل‌های گردش کلی نیز برای پیش‌نگری‌های اقلیمی CMIP5 (احمدی و همکاران، ۱۳۹۸) و CMIP6 (زرین و داداشی‌رودباری، ۱۴۰۰ الف) صادق است. در مقابل مدل MPI-ESM1-2-HR عملکرد بهتری در نواحی سواحل شمالی و جنوبی ایران داشته و ضریب همبستگی آن به ۰/۹۹ می‌رسد. این مقادیر بالای همبستگی در مناطق مرتفع غربی، شمالی، فلات داخلی و شرقی کشور نیز دیده می‌شود.

بررسی آماره RMSE برای مدل BCC-CSM2-MR نیز

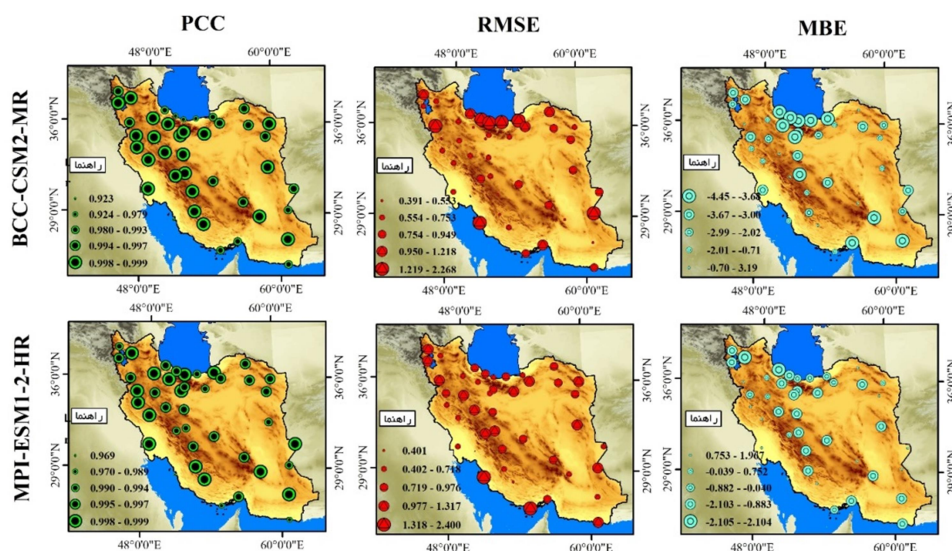
نشان دهنده بیشینه خطای مدل بین ۱/۲ تا ۲/۲ درجه سلسیوس در نواحی ساحلی کشور (دریای خزر و عمان) می‌باشد. مناطق مرتفع غربی و شمالی ایران کمینه مقادیر RMSE را در این مدل نشان می‌دهند. اریبی مدل BCC-CSM2-MR در پهنه‌های شمالی کشور نسبت به مدل MPI-ESM1-2-HR بیشتر است. با این وجود مدل MPI-ESM1-2-HR برای مناطق مرتفع زاگرس و البرز خطای اریبی بیشتری را نسبت به مدل BCC-CSM2-MR نشان می‌دهد. کمینه سنجه MBE برای مدل MPI-ESM1-2-HR در مناطق مرتفع غربی زاگرس دیده می‌شود (مقدار خطای اریبی ۰/۰۳- تا ۱/۹- درجه سلسیوس). بر اساس همین سنجه، بیشینه اریبی این مدل در نواحی زاگرس مرکزی، سواحل خزر غربی و مناطق خشک شرقی و جنوب شرقی دیده می‌شود. در مقایسه، مدل BCC-CSM2-MR بهترین عملکرد را در مناطق زاگرس مرتفع با میزان حداقل ۰/۷- درجه سلسیوس داشته و مناطق مرطوب ایران (مناطق جنوبی دریای خزر) دارای بیشینه اریبی می‌باشند. در مجموع مقدار اریبی مدل MPI-ESM1-2-HR نسبت به مدل BCC-CSM2-MR به شکل قابل توجهی کمتر است. لازم به ذکر است که هر دو مدل دارای کم برآوردی دما در متوسط کل کشور می‌باشند. مدل BCC-CSM2-MR در ۸۳/۳۴ درصد ایستگاه‌ها و مدل MPI-ESM1-2-HR در ۶۴/۲۴ درصد ایستگاه‌ها دارای کم برآوردی است. به طوری که برای متوسط کل ایران اریبی مدل MPI-ESM1-2-HR، ۰/۲۴- و برای مدل BCC-CSM2-MR، ۲/۱۲ درجه سلسیوس به دست آمده است. همان‌طور که در بخش ابتدایی این تحقیق نیز بدان اشاره شد از برونداد مستقیم مدل استفاده شد؛ لذا در صورت تصحیح اریبی شاید این مقدار خطا برای مناطق یاد شده کمتر می‌شده؛ اما باید در نظر داشت که تصحیح اریبی در ردیابی درونی اقلیم (ICV) را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد لذا تفسیر برونداد مستقیم مدل‌ها (DMO) در بسیاری از موارد از جمله کارایی مدل در مناطق مختلف جغرافیایی از اهمیت زیادی برخوردار است. بنابراین در

ساحلی و مناطق کوهستانی در مدل‌های منفرد مشهود است.

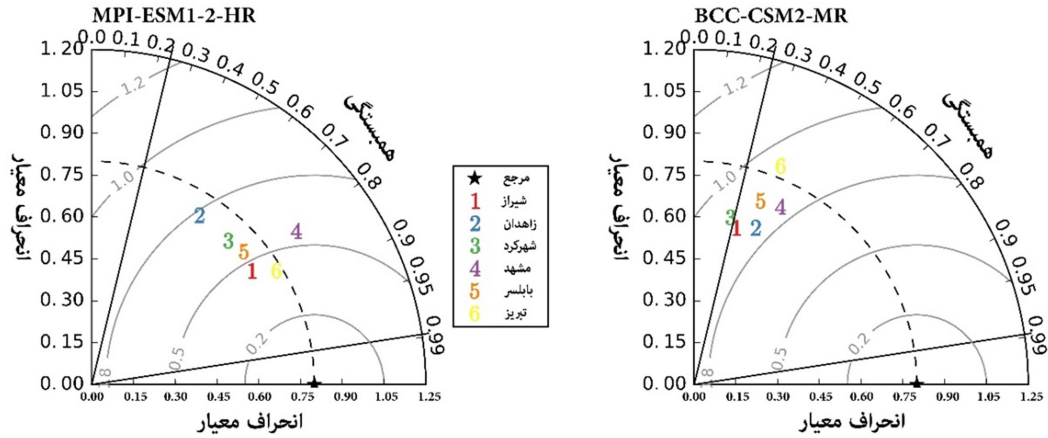
استفاده از نمودار تیلور یکی از روش‌هایی است که می‌توان به صورت بصری کارایی مدل‌های اقلیمی را سنجش کرده و با یکدیگر مقایسه کرد. همان‌طور که سنجه‌های آماری نشان دادند و در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود مدل MPI-ESM1-2-HR در مقایسه با مدل BCC-CSM2-MR در ایستگاه‌های نماینده در مجموع کارایی بهتری را نشان داده است. به‌طور کلی همبستگی مدل MPI-ESM1-2-HR با داده‌های ایستگاهی در کلیه ایستگاه‌های منتخب بالاتر از ۰/۷ است در حالی که ضریب همبستگی هیچ‌یک از ایستگاه‌های منتخب از مدل BCC-CSM2-MR از این مقدار بالاتر نیست. کمترین همبستگی‌ها برای ایستگاه‌های تبریز و شهرکرد با ضریب همبستگی کمتر از ۰/۶ است. نگاهی دقیق‌تر به نمودار تیلور نشان می‌دهد که مدل MPI-ESM1-2-HR نسبت به داده‌های مشاهداتی انحراف کمتری را دارا می‌باشد. به‌طوری‌که کلیه ایستگاه‌های نماینده در اطراف انحراف معیار پایه متمرکز شده‌اند. این در حالی است که مدل BCC-CSM2-MR به‌ویژه در ایستگاه‌های شیراز، زاهدان و شهرکرد انحراف زیادی را با داده‌های مرجع نشان داده است.

تفسیر الگوهای دمایی به‌دست آمده در مناطق خزری و پایکوه‌ای البرز و زاگرس باید احتیاط بیشتری را در نظر داشت.

در این پژوهش همان‌طور که گفته شد، درستی مدل‌های DCPD را برای میانگین دمای ماهانه با داده‌های ایستگاهی مورد مقایسه قرار داده‌ایم (شکل ۲). به‌طور کلی، مقایسه بین داده‌های مشاهداتی و مدل‌های در دسترس DCPD تأیید می‌کند که دمای فعلی مدل‌های DCPD مشارکت‌یافته در CMIP6 در بیش‌تر مناطق ایران کم‌برآوردی دارند (شکل ۲). ارزیابی منفی (کم‌برآوردی) منطقه‌ای عمدتاً در عرض‌های جغرافیایی بالا و در مناطقی با توپوگرافی پیچیده و تنوع قابل‌توجهی در پوشش سطحی و تقابل دریا و خشکی (سواحل جنوبی دریای خزر) رخ می‌دهد (شکل ۲ ستون سمت راست). با این حال، میانگین ارزیابی این مدل‌ها با یکدیگر تفاوت‌های زیادی را به‌خصوص در مناطق شمالی و مرتفع ایران نشان می‌دهد. همان‌طور که برای ارزیابی دو مدل BCC-CSM2-MR و MPI-ESM1-2-HR با داده‌های ایستگاهی ایران نشان داده شد (شکل ۲) به‌رغم پیشرفت‌های قابل‌توجه مدل‌ها در پروژه DCPD (بوئر و همکاران، ۲۰۱۶) توافق بین دو مدل یادشده کماکان نسبتاً پایین است و تضاد مشخصی در عرض‌های جغرافیایی بالا و پایین، مناطق



شکل ۲. درستی سنجی مدل‌های پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (DCPD) با استفاده از سنجه‌های آماری مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای ارزیابی (MBE) و ضریب همبستگی (PCC).



شکل ۳. نمودار تیلور مدل‌های MPI-ESM1-2-HR و BCC-CSM2-MR در ایستگاه‌های نماینده اقلیمی ایران.

کارایی پایینی در پیش‌بینی دهه‌ای دمای هوا در ایران دارد. در مقابل، مدل MPI-ESM1-2-HR کارایی قابل‌قبولی را برای دمای ایران ارائه داده است (شکل ۴).

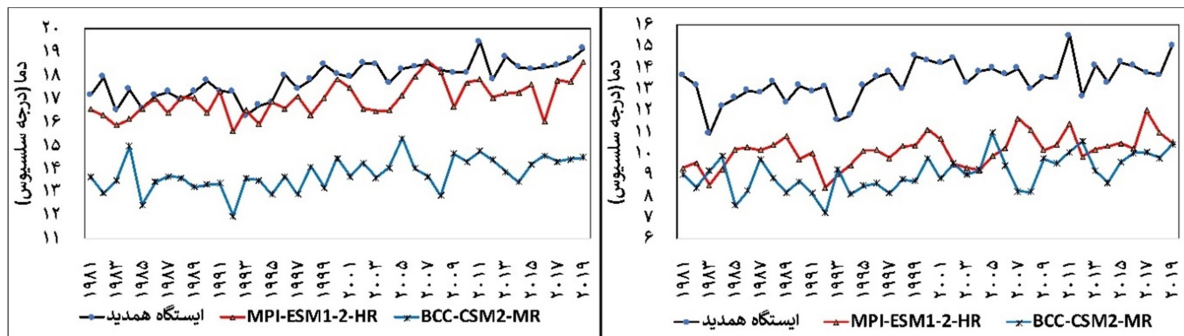
۲-۳. میانگین دمای ماهانه با استفاده از برونداد مدل MPI-ESM1-2-HR طی دوره گذشته‌نگر (۲۰۱۹-۱۹۸۰)

چنان‌که پیشتر گفته شد، مدل MPI-ESM1-2-HR به‌عنوان مدل کارا جهت بررسی تغییرات میانگین دمای ماهانه طی دوره گذشته‌نگر (۲۰۱۹-۱۹۶۰) کشور انتخاب شد. بررسی برونداد این مدل توانایی آن در به تصویر کشیدن الگوهای دمایی کشور را به‌خوبی نشان می‌دهد (شکل ۵). در فصل زمستان کمینه دما در ماه ژانویه با ۶/۲- درجه سلسیوس نخست در شمال غرب ایران و سپس با ۱/۰۳- درجه سلسیوس در مناطق مرتفع زاگرس مشاهده می‌شود. نواحی مرتفع شمال شرق در ماه‌های ژانویه و فوریه دمای کمتر از ۲/۶- درجه سلسیوس را تجربه می‌کنند. علت این توزیع ناهمگن دما را در درجه نخست می‌توان در توپوگرافی پیچیده کشور و سپس نفوذ پرفشار سیبری در منطقه شمال شرق و ورود سامانه‌های جبهه‌ای و امواج غربی از ناحیه غرب و شمال غرب جست‌وجو کرد. بیشینه دما در فصل زمستان با ۲۳/۶- درجه سلسیوس در سواحل جنوبی ایران (عمان و خلیج فارس) مشاهده می‌شود (شکل ۳). چنان‌که

برای نمایش بهتر کارایی مدل‌های MPI-ESM1-2-HR و BCC-CSM2-MR در مناطق مختلف کشور، دمای سالانه دوره گذشته‌نگر دو مدل مذکور با داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌های همدید نماینده اقلیمی ایران مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، به‌غیر از زاهدان (۴-ج) و شهرکرد (۴-د) که دمای دو مدل مذکور بیش‌برآوردی دارند، در سایر ایستگاه‌های نماینده اقلیمی ایران دارای کم‌برآوردی هستند. اختلاف سری زمانی ۴۰ ساله در دوره گذشته‌نگر (۲۰۱۹-۱۹۸۰) برای مدل BCC-CSM2-MR تا ۴ درجه سلسیوس نیز در برخی از سال‌ها برای مناطق سردسیر ایران همچون تبریز دیده می‌شود. نکته قابل‌ذکر آن‌که تبریز به وجود آن‌که بیشترین را نسبت به داده‌های مشاهداتی در کل سری زمانی مورد بررسی دارد؛ اما بررسی نوسانات بین سالانه دما انطباق خوبی را بین برونداد مدل و داده‌های ایستگاه نشان می‌دهد. همین امر سبب شده که بالاترین همبستگی بین دمای سالانه مدل و ایستگاه با ضریب همبستگی حدود ۰/۹ مربوط به ایستگاه تبریز باشد. در مقابل، ایستگاه شهرکرد علی‌رغم اختلاف بین سالانه ناچیز بین دو سری از برونداد مدل و ایستگاه، ضریب همبستگی و در نتیجه انطباق کمتری نسبت به تبریز دارد. لذا همان‌طور که در بخش پیشین برای سنجه‌های مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای اریبی (MBE) و ضریب همبستگی (PCC) نیز گفته شد، مدل BCC-CSM2-MR

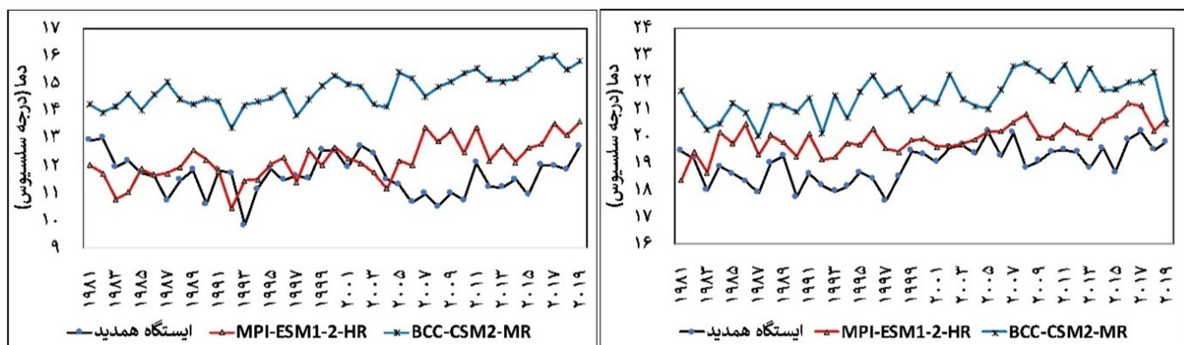
با پایکوه‌های البرز و زاگرس هم‌دما می‌باشد. در ماه فوریه و مارس نیز این منطقه هم‌دمایی خود را با پایکوه‌های زاگرس و البرز حفظ کرده و به ترتیب به ۳/۷ و ۱۰/۴ درجه سلسیوس می‌رسد. کمینه دما در ناحیه خزری، با ۳/۱۲ درجه سلسیوس در ماه ژانویه دیده می‌شود (شکل ۵).

مشاهده می‌شود در ماه مارس مناطقی با دمای بیشتر از ۲۰ درجه سلسیوس از سواحل جنوبی و جنوب شرق به سمت مناطق داخلی ایران کشیده شده و دمای هوای ایران مرکزی در ماه ژانویه با ۹/۲ درجه سلسیوس به ۱۵/۷ درجه سلسیوس در ماه مارس افزایش یافته است. ناحیه خزری در ماه ژانویه با ۵/۶ درجه سلسیوس



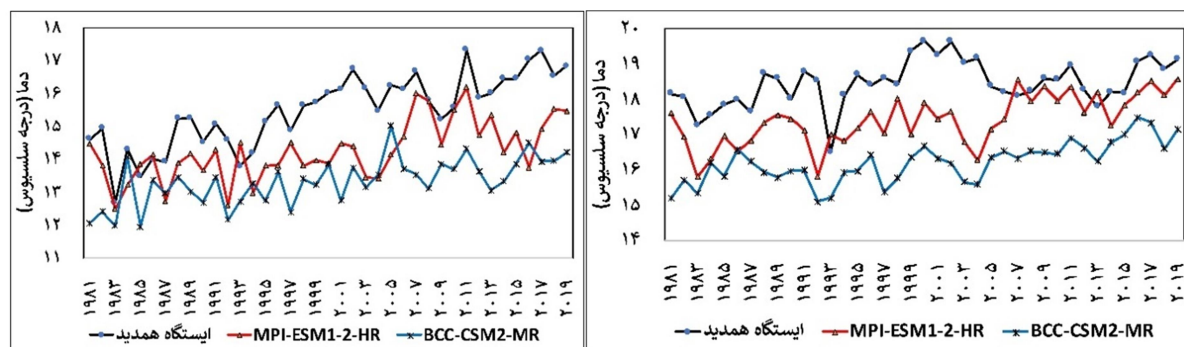
(ب)

(الف)



(د)

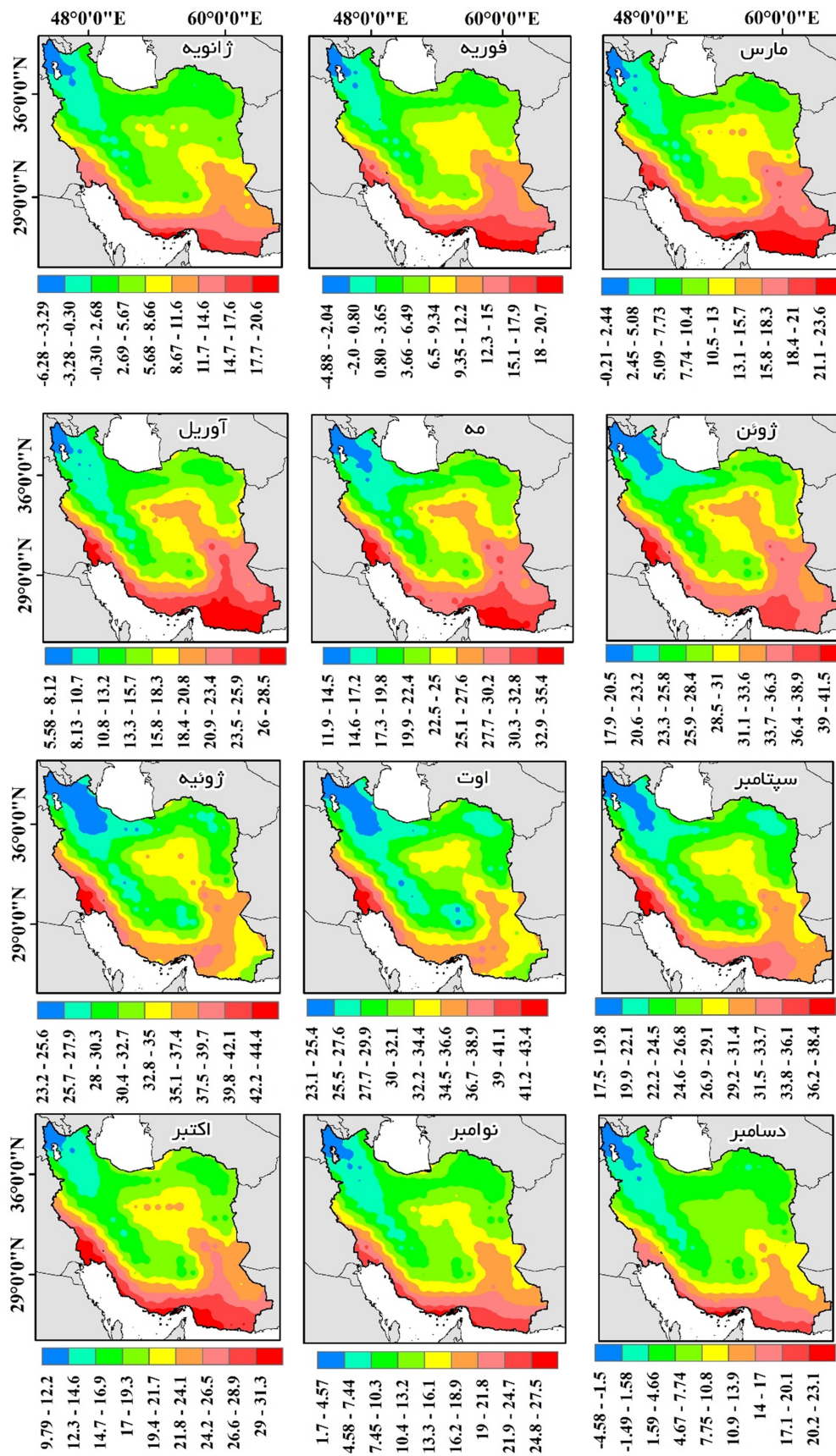
(ج)



(ی)

(ه)

شکل ۴. سری زمانی پرونداد مدل‌های MPI-ESM1-2-HR و BCC-CSM2-MR و ایستگاه‌های نماینده اقلیمی ایران. الف) تبریز؛ ب) بابلسر؛ ج) زاهدان؛ د) شهرکرد؛ ه) شیراز؛ ی) مشهد.



شکل ۵. میانگین بلند مدت دمای ماهانه ایران مبتنی بر پرونده پروژه DCPP مدل MPI-ESM1-2-HR طی دوره گذشته‌نگر (۲۰۱۹-۱۹۸۰).

به‌طور کلی، دما در ایران تحت تأثیر عرض جغرافیایی، ارتفاع و رطوبت جوی می‌باشد و ناهمواری‌ها منجر به تغییرات محسوس دما در کشور می‌شوند. با شروع فصل بهار روند افزایشی دما در ایران محسوس‌تر می‌شود. با توجه به این موضوع کلی که با کاهش عرض جغرافیایی دما در ایران افزایش می‌یابد می‌توان انتظار داشت که در این فصل کرانه‌های مکران و جنوب شرقی ایران بالاترین دماها را در کشور تجربه کنند. بررسی نقشه‌های هم‌دما برای دو ماه نخست فصل بهار نیز مؤید همین نکته است. در ماه آوریل روند افزایشی در کمینه دما نسبت به ماه‌های فصل زمستان مشهود است. کمینه دما در شمال غرب در ماه‌های می و ژوئن به $11/9$ و $17/9$ درجه سلسیوس و بیشینه دما به ترتیب در همین ماه‌ها به $35/4$ و $41/5$ درجه سلسیوس می‌رسد (شکل ۵). اما در ماه‌های ژوئن تا سپتامبر الگوی دمایی به‌دست آمده نشان می‌دهد که جنوب غربی ایران با این که در عرض جغرافیایی بالاتری نسبت به جنوب شرقی ایران قرار گرفته است دماهای بالاتری را نسبت به سواحل جنوبی کشور تجربه می‌کند. به‌طوری که بیشینه دما در ماه آوریل و مه، برای جلگه خوزستان و سواحل مکران به ترتیب بیش از $28/5$ و $35/4$ درجه سلسیوس دیده می‌باشد.

رکورد دما در فصل بهار در ماه ژوئن تنها معطوف به جلگه خوزستان با دمای $41/5$ درجه سلسیوس می‌باشد. این الگوی دمایی بیشینه طی ماه‌های فصل تابستان به ترتیب در ژوئیه، اوت و سپتامبر نیز دیده می‌شود (به ترتیب با $44/4$ ، $43/4$ و $38/4$ درجه سلسیوس). یکی از مهم‌ترین دلایل این افزایش دما را می‌توان در نقش سامانه‌های هم‌دیدی موجود در منطقه جنوب غرب کشور جست‌وجو کرد. به‌طوری که در فصل تابستان با شکل‌گیری یک کم‌فشار حرارتی روی عربستان، جنوب غرب ایران منجر به شکل‌گیری یک هسته داغ و ایجاد یک گردش چرخندی گرم بر روی خوزستان می‌شود. همچنین در ترازهای میانی جو استقرار پرفشار ایران بر روی منطقه بر تداوم بیشینه دما افزوده است (زرین و همکاران، ۲۰۱۰).

در مقابل در جنوب شرقی ایران به‌دلیل وجود سازوکارهای نسیم دریا در سواحل دریای عمان و ارتباط گسترده با آب‌های بین‌المللی و همچنین سامانه‌های مونسون نقش تعیین‌کننده‌ای را در کاهش دمای این مناطق علی‌رغم عرض جغرافیایی پایین‌تر دارند.

ماه ژوئیه گرم‌ترین ماه کشور است که برون‌داد پروژه DCPD نیز بر این نکته تأکید دارد. این ماه بالاترین دمای بیشینه را در کشور به خود اختصاص می‌دهد. به‌طوری که دمای فلات مرکزی و بخش‌های داخلی ایران از 35 درجه سلسیوس در ماه ژوئن به $42/1$ درجه سلسیوس در ماه ژوئیه می‌رسد. کوهپایه‌های شرقی در این ماه دماهای بالاتر از 30 درجه سلسیوس را نشان می‌دهند که مؤید افزایش قابل توجه دما در ایران است. این افزایش دما به دلیل حاکمیت پرفشار جنب حاره در طول فصل تابستان است که باعث جوی پایدار و آسمان صاف و بدون ابر در ایران می‌شود و بر همین اساس بیشینه دما در بخش‌های بزرگی از ایران در این ماه به‌شکل معناداری افزایش یافته است. چنان که اشاره شد، ناحیه جنوب غرب ایران گرم‌ترین دماهای سالانه خود را در این ماه با بیش از $44/4$ درجه سلسیوس تجربه می‌کند. همچنین کمینه میانگین دما در شمال غرب و قسمت‌هایی از زاگرس مرتفع در ماه ژوئیه با $27/9$ و در ماه‌های اوت و سپتامبر به ترتیب با $27/6$ و $22/1$ درجه سلسیوس بالاترین مقادیر کمینه میانگین دما را در بین ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهند (شکل ۳). هرچه به سمت فصل پاییز پیش می‌رویم، روند کاهش دمای بیشینه و کمینه قابل مشاهده است. چنان که بیشینه دما در دو ماه باقی مانده از فصل تابستان در کرانه‌های عمان و خلیج فارس و شمال غرب به ترتیب به $43/4$ و $38/4$ درجه سلسیوس می‌رسد. در ارتباط با ناحیه خزری، با توجه به ظرفیت گرمایی ویژه آب، این منطقه بالاترین دماهای خود را با کمی تأخیر در ماه اوت تجربه کرده و دمای آن از $27/9$ درجه سلسیوس در ماه جولای به $29/9$ درجه سلسیوس در ماه اوت می‌رسد. کاهش ناگهانی 7 درجه‌ای دما در این ناحیه با شروع ماه سپتامبر قابل مشاهده است.

(Evaporative Fraction, EF) (بخشی از انرژی موجود در سطح مورد استفاده برای تبخیر آب) است که بیشتر توسط شار گرمای نهان (Latent Heat Flux, LH) کنترل می‌شود. هرچه EF کوچک‌تر باشد، تأثیر تغییرات تابش خالص موجود بر دما بیشتر می‌شود، زیرا تابش بیشتر به‌جای گرمای نهان به گرمای محسوس تبدیل می‌شود و باعث افزایش دما می‌شود. لذا از آنجایی که مقدار EF بالفعل در مناطق داخلی ایران کمتر از مناطق شمالی و شمال‌غربی ایران است شاهد دمای بالاتری در مناطق خشک کشور به نسبت مناطق یاد شده هستیم.

۳-۳. ارتباط بین ارتفاع از سطح دریا، طول و عرض

جغرافیایی با دما در ایران

جدول ۲ همبستگی دمای ماهانه ایران با ارتفاع از سطح دریا، طول و عرض جغرافیایی را ارائه داده است. همان‌طور که پیداست بیشینه ضریب همبستگی به‌دست آمده بین مؤلفه‌های جغرافیایی مکان با دمای ایران متعلق به ارتفاع و پس از آن عرض جغرافیایی و سپس طول جغرافیایی است. همبستگی دما با ارتفاع و عرض جغرافیایی منفی و در سطح ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد ($\alpha=0/05$). همبستگی دما با طول جغرافیایی در تمامی ماه‌های سال مثبت و مستقیم و در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است. همبستگی بین دما و عرض جغرافیایی در ایران دارای یک رابطه معکوس قوی است و همان‌طور که گفته شد در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است. به‌عبارت دیگر دما در ایران با افزایش عرض جغرافیایی کاهش می‌یابد. این کاهش برای ماه‌های سرد سال و به‌خصوص فصل زمستان محسوس‌تر از ماه‌های گرم سال است. کمینه همبستگی به‌دست آمده برای دما و عرض جغرافیایی در فصل تابستان با مقادیر ۰/۰۶، -۰/۵ و -۰/۶ به‌ترتیب برای ماه‌های ژوئیه، اوت و سپتامبر به‌دست آمده است. این کاهش در مقدار همبستگی می‌تواند در نتیجه افزایش یکپارچه دما در کشور به‌دلیل حاکمیت پرفشار جنب حاره و پایداری هوا باشد. بررسی نتایج به‌دست آمده با سنج

الگوی تغییرات دما در فصول مختلف سال در ایران نشان می‌دهد که تغییرات جوی در مقیاس منطقه‌ای عامل مهمی در تغییر دمای هوا است. این امر تأیید می‌کند که تغییرات مشاهده شده در دمای ماهانه ایران عمدتاً به وردایی درونی اقلیم (ICV) مرتبط است. هنگامی که تغییرات دما در تغییر واداشت‌های تابشی و شار گرمای نهان را در تابستان برای ایران مقایسه می‌کنیم، دو رژیم متمایز برای تغییرات دما قابل تشخیص است. افزایش قابل توجه در شار گرمای نهان و سازوکار خشک‌شدن خاک در مناطق شمالی و شمال‌غربی و همچنین مناطق کوهستانی ایران یک عامل مهم در افزایش دمای این مناطق در فصل تابستان می‌تواند باشد؛ چراکه از دست دادن رطوبت خاک یک عامل مهم در تغییر دما است. در مقابل، در مناطق خشک داخلی کشور سازوکارهای مهم دیگری در افزایش دما تسلط دارند؛ چراکه با توجه به ماهیت خشک این مناطق شار گرمای نهان در این مناطق اندک است.

روند کاهشی دما در ماه‌های مختلف سال در فصل پاییز نیز همچنان ادامه دارد. به‌طوری‌که در ماه اکتبر کمینه دما در شمال غرب و مناطق مرتفع با یک جهش ناگهانی از ۹/۷۹ درجه سلسیوس به ۱/۷ درجه سلسیوس در ماه نوامبر و در نهایت به ۴/۵۸- درجه سلسیوس در ماه دسامبر افت می‌کند. بیشینه دما، نیز همانند دمای کمینه از اکتبر تا دسامبر کاهشی است به‌طوری‌که در ماه دسامبر دماهای بالای ۲۰ درجه سلسیوس تنها محدود به نوار ساحلی جنوب کشور می‌شود (شکل ۵).

تغییرات دمای هوا در ایران از دیدگاه محلی، می‌تواند با نوسانات تابش پایین‌رو (شامل شار طول‌موج کوتاه و بلند دریافتی در سطح زمین) در ارتباط باشد؛ چراکه تغییرات تابش به‌عنوان یک عامل مستقیم جوی در تغییرات دما نقش آفرینی می‌کند و تعیین می‌کند چه مقدار انرژی در سطح موجود است. البته باید توجه داشت که پوشش ابر تابش را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد که آن نیز توسط فرایندهای بزرگ مقیاس جوی تعیین می‌شود. دومین پارامتر مهم در تغییرات دمای هوا کسر تبخیر

افزایش دمای غرب به شرق ایران نقش آفرینی می‌کنند (جدول ۲). به‌طور کلی غرب ایران با وجود ارتفاعات آذربایجان و زاگرس نسبت به شرق کشور مرتفع‌تر است و همچنین توده‌های هوای مهاجر از روی اروپا بیشتر به این منطقه می‌رسند و بنابراین انتظار می‌رود دما از غرب به شرق افزایش یابد.

۳-۴. پیش‌بینی دمای ماهانه با استفاده از برون‌داد مدل

MPI-ESM1-2-HR طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۲۸

همان‌طور که بحث شد این پژوهش در سه بخش سازماندهی شد؛ ۱- درستی سنجی دمای کشور در پروژه DCPP؛ ۲- تغییرات زمانی-مکانی دما طی دوره گذشته‌نگر (۲۰۱۹-۱۹۸۰) و ۳- پیش‌بینی دمای هوا در ایران مبتنی بر برون‌داد مدل کارا طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۲۸. برای درک بهتر تغییرات دمای پیش‌بینی شده در ایران، به‌جای پهنه‌بندی دما طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۲۸ بی‌هنجاری دما نسبت به دوره بلندمدت ۴۰ ساله (۱۹۸۰-۲۰۲۱) محاسبه شد.

آمارای ضریب تعیین (R^2) نیز نتایج سنجه ضریب همبستگی پیرسون (PCC) را تأیید کرده است. همبستگی بین ارتفاع از سطح دریا و دمای کشور نشان می‌دهد که مقدار ضریب همبستگی به‌دست آمده بین ارتفاع از سطح دریا و دمای کشور در تمامی ماه‌ها ۰/۶- است. به‌طور کلی با افزایش از سطح دریا میانگین دمای ماهانه کاهش می‌یابد که این کاهش چندان دور از انتظار نبوده است. نگاهی دقیق‌تر به‌دست آمده برای تمامی ماه‌ها نشان می‌دهد که تفاوت چندانیتی بین افت‌آهنگ دما در ماه‌های مختلف مشاهده نمی‌شود و صرفاً در ماه‌های تابستانه مقدار این افت‌آهنگ به‌شکل جزئی افزایش یافته است.

همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد ارتباط بین دما و طول جغرافیایی در ایران مثبت و در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است. ضریب همبستگی به‌دست آمده بین حداقل ۰/۲ در ماه اوت تا ۰/۵ در ماه فوریه در تغییر است. در تفسیر نتایج حاصل از همبستگی بین طول جغرافیایی و دما می‌توان گفت که دو عامل محلی ارتفاع و گردش منطقه‌ای جو در

جدول ۲. ضریب همبستگی و ضریب تعیین دما طی دوره گذشته‌نگر با ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی در متوسط پهنه‌ای ایران.

ماه	طول جغرافیایی		عرض جغرافیایی		ارتفاع از سطح دریا	
	R^2	PCC	R^2	PCC	R^2	PCC
ژانویه	۰/۲	۰/۴	۰/۶	-۰/۸	۰/۳	-۰/۶
فوریه	۰/۲	۰/۵	۰/۶	-۰/۸	۰/۳	-۰/۶
مارس	۰/۲	۰/۵	۰/۶	-۰/۸	۰/۳	-۰/۶
آوریل	۰/۲	۰/۵	۰/۶	-۰/۷	۰/۴	-۰/۶
مه	۰/۲	۰/۵	۰/۶	-۰/۷	۰/۳	-۰/۶
ژوئن	۰/۲	۰/۴	۰/۵	-۰/۷	۰/۳	-۰/۶
ژوئیه	۰/۰۹	۰/۳	۰/۳	-۰/۶	۰/۴	-۰/۶
اوت	۰/۰۵	۰/۲	۰/۳	-۰/۵	۰/۴	-۰/۶
سپتامبر	۰/۰۸	۰/۲	۰/۴	-۰/۶	۰/۴	-۰/۶
اکتبر	۰/۱	۰/۳	۰/۵	-۰/۷	۰/۴	-۰/۶
نوامبر	۰/۲	۰/۴	۰/۶	-۰/۷	۰/۴	-۰/۶
دسامبر	۰/۲	۰/۴	۰/۶	-۰/۷	۰/۴	-۰/۶

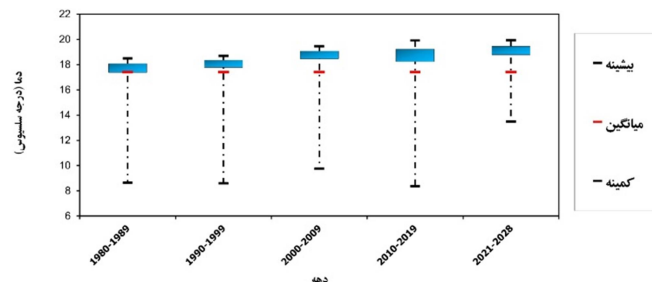
PCC ضریب همبستگی پیرسون؛ R^2 ضریب تعیین است.
سطح معنی‌داری $\alpha = ۰/۰۵$ با مقادیر پررنگ نشان داده شد.

غرب با $0/71$ درجه سلسیوس و در ماه مارس در سواحل خزر و مناطق مرتفع البرز شمالی با $1/51$ درجه سلسیوس مشاهده می‌شود. به جهت مکانی، بیشینه بی‌هنجاری دما در مناطقی با عرض جغرافیایی بالا و مناطق مرتفع ایران دیده می‌شود.

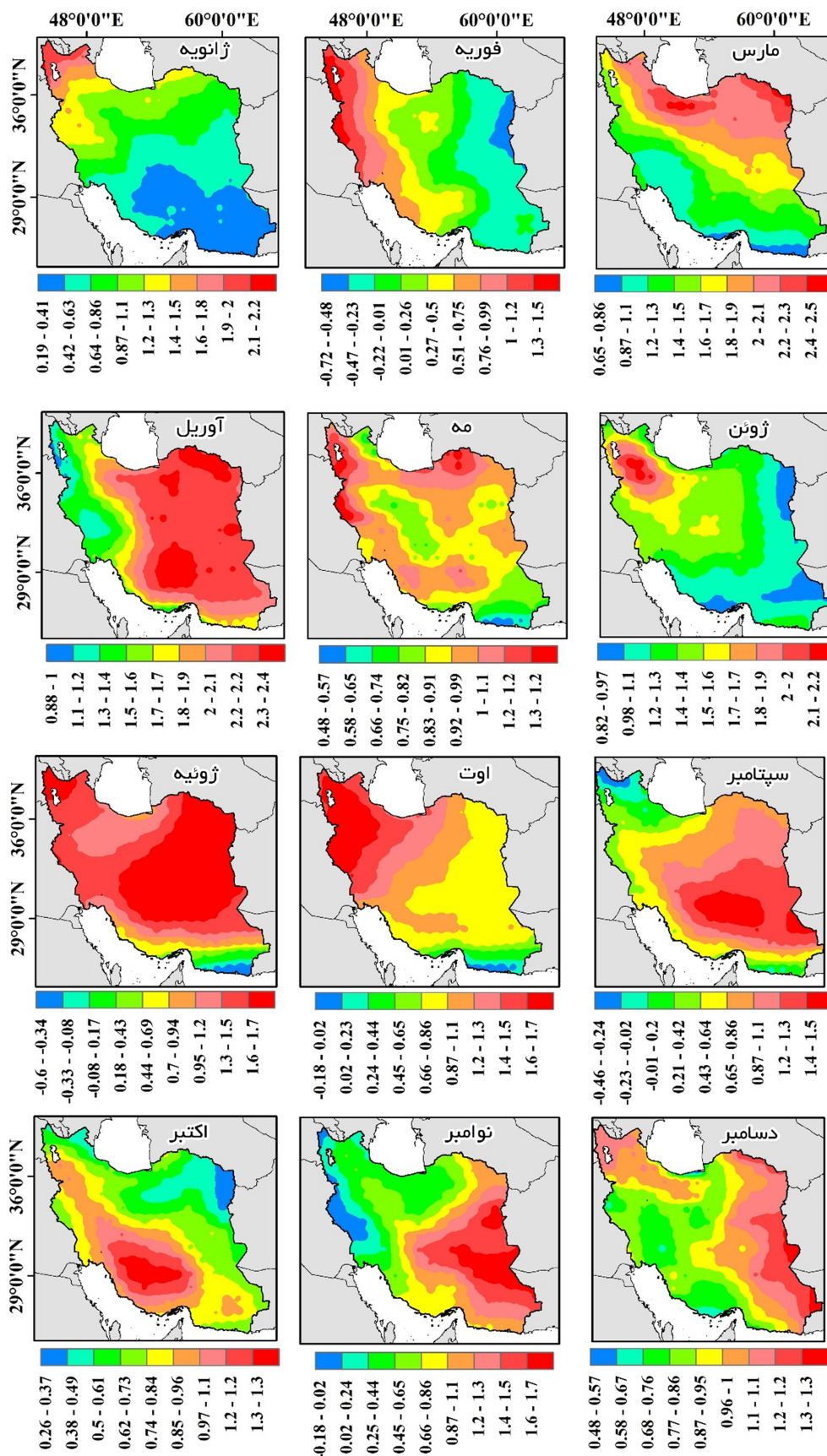
با گذر از فصل زمستان و آغاز فصل بهار در ماه آوریل، پیش‌بینی دما نشان می‌دهد که منطقه شمال شرق کشور بیشینه بی‌هنجاری مثبت دما را در کل کشور تجربه می‌کند. بی‌هنجاری متوسط کل کشور در این ماه $1/9$ درجه سلسیوس به دست آمده است که بیشترین میزان افزایش دما را بین ماه‌های مختلف سال دارا است. افزایش قابل توجه دما در ماه آوریل یک تهدید جدی برای منابع آب ایران است به طوری که ذخیره گاه‌های برف که به عنوان منابع آب شیرین ایران برای رودخانه‌ها به حساب می‌آیند سریع‌تر ذوب می‌شوند. در ماه آوریل تقریباً نیمی شرقی و به خصوص شمال شرق کشور افزایش دمای زیادی را تجربه می‌کنند (بیشینه بی‌هنجاری دما $2/4$ درجه سلسیوس می‌باشد) که این افزایش از نظر مکانی قابل توجه است. همچنین کمترین افزایش دما در این ماه در شمال غرب و جنوب غرب با 1 درجه سلسیوس می‌باشد. کمینه بی‌هنجاری دما در ماه مه ($0/48$ درجه سلسیوس) و ژوئن ($0/82$ درجه سلسیوس) به ترتیب در جنوب شرق، سواحل مکران و قسمت‌هایی از خلیج فارس دیده می‌شود. افزایش قابل توجه دما در ماه‌های بعدی فصل بهار یعنی مه و ژوئن نیز دیده می‌شود به طوری که بی‌هنجاری دمای متوسط کل کشور به ترتیب $0/91$ و $1/26$ درجه سلسیوس می‌باشد. به جهت مکانی بیشینه بی‌هنجاری دما در شمال غرب و غرب کشور اتفاق می‌افتد (شکل ۷).

برای درک بهتر تغییرات دما در ایران طی دهه‌های گذشته و در دوره پیش‌بینی شده ($2021-2028$) از نمودار جعبه‌ای استفاده شد (شکل ۶). همان‌طور که در شکل ۵ نیز نشان داده شده است متوسط دمای ایران طی دوره گذشته نگر $17/40$ درجه سلسیوس می‌باشد. میانگین دما در دهه اول ($1980-1989$) منطق بر چارک اول ($Q1$) نمودار است ($17/40$ درجه سلسیوس). اما در دهه‌های بعدی به ترتیب این مقدار $17/8$ ، $18/5$ و $18/2$ در دوره پیش‌بینی شده به $18/8$ درجه سلسیوس رسیده است. اگر چارک اول دمایی را مناطق سرد ایران در نظر بگیریم، می‌توان اظهار داشت که آستانه دما در مناطق سرد و کوهستانی در ۴ دهه گذشته افزایش داشته است. به همین ترتیب دما در چارک سوم ($Q3$) نیز در ایران افزایش داشته است. این مقدار در دهه اول $18/5$ ، دوم $18/7$ ، سوم $19/4$ ، چهارم $19/7$ و در نهایت در دوره پیش‌بینی شده به $19/9$ درجه سلسیوس می‌رسد.

بررسی متوسط بی‌هنجاری دمای ماهانه برای کل ایران در دوره پیش‌بینی شده نسبت به دوره بهنجاری طی دوره گذشته نگر ($1980-2019$) نشان داد (شکل ۷) که بی‌هنجاری دمای ماهانه کل کشور نسبت به دوره بهنجاری در تمامی ماه‌های سال مثبت می‌باشد. این مقدار برای متوسط کل کشور $0/99$ درجه سلسیوس می‌باشد؛ به عبارت دیگر دمای کشور نسبت به دوره بلندمدت ۴۰ ساله گذشته ($1980-2019$) برای دوره پیش‌بینی شده ($2021-2028$) حدود یک درجه افزایش خواهد یافت. بین تمامی ماه‌ها، ماه فوریه از فصل زمستان کمینه بی‌هنجاری دما را با مقدار $0/16$ درجه سلسیوس دارد. همچنین در فصل زمستان بیشینه افزایش دما در ماه ژانویه، در قسمت‌هایی از شمال



شکل ۶. نمودار جعبه‌ای دمای ایران بر اساس برونداد مدل MPI-ESM1-2-HR پروژه DCPP



شکل ۷. بی‌هنجاری دمای ایران مبتنی بر برون‌داد پروژه پیش‌بینی اقلیمی ده‌های (DCPP) مدل MPI-ESM1-2-HR طی دوره پیش‌بینی شده (۲۰۲۱-۲۰۲۸) نسبت به دوره بهنجار.

نزدیک باشد (شکل ۷).

در ماه اکتبر بیشینه افزایش دما با $1/3$ درجه سلسیوس در مناطق جنوبی و سپس رشته کوه زاگرس مشاهده می‌شود. در ماه نوامبر جنوب شرق، شرق و چاله‌های مرکزی بیشینه بی‌هنجاری دما را با مقدار $1/7$ درجه سلسیوس نشان می‌دهند (شکل ۷). کمینه افزایش دما نیز برای ماه‌های یاد شده به ترتیب در شمال غرب (به‌غیر از ماه دسامبر که این منطقه بی‌هنجاری $1/2$ درجه سلسیوس را نشان داده است)، شمال شرق (اکتبر) و نوار مرزی غرب (نوامبر) پیش‌بینی می‌شود. افزایش دما در مناطق مرتفع ایران هم راستا با نتایج اسکرین و سیمونز (۲۰۱۱) است که اظهار داشتند به‌طور کلی مناطق کوهستانی و با عرض‌های جغرافیایی بالا بیشترین مقدار افزایش دما را دارند.

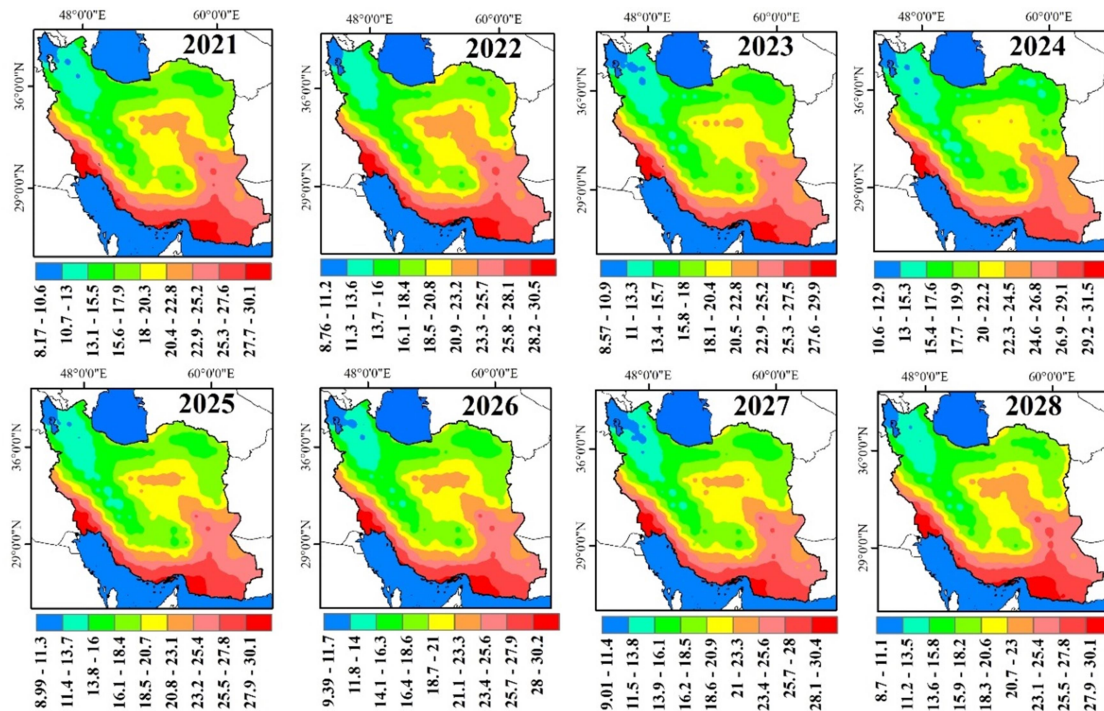
به‌طور کلی نتایج حاصل از پیش‌بینی دهه‌ای در ایران بر افزایش دما در دهه آینده (۲۰۲۱-۲۰۲۸) با میانگین دمای متوسط سالانه $0/99$ درجه سلسیوس برای کل کشور به‌ویژه در ماه‌های انتقالی دلالت دارد.

بررسی بین سالانه دمای پیش‌بینی شده مبتنی بر پرونداد پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (DCPP) مدل MPI-ESM1-2-HR نشان می‌دهد که در سال‌های آتی دمای هوا به‌رغم افت‌ها و خیزهایی که دارد الگوی کلی دما در کشور تغییرات زیادی را نشان نمی‌دهد (شکل ۸). در طی دوره مورد بررسی کمینه میانگین دمای سالانه کشور $8/17$ درجه سلسیوس در سال ۲۰۲۱ و بیشینه آن $31/5$ درجه سلسیوس در سال ۲۰۲۴ به‌دست آمده است. به‌طور کلی در شمال‌غرب ایران که پایین‌ترین دماهای سالانه را در کل کشور دارد، در طی دهه آینده حداکثر بیشینه دما به $10/6$ درجه سلسیوس خواهد رسید. در مقابل بالاترین میانگین‌های دمای سالانه کشور در سواحل مکران و خلیج فارس در جنوب غربی ایران دیده می‌شود.

از نظر پراکندگی مکانی ایران در فصل تابستان بی‌هنجاری دمای یکنواخت‌تری را تجربه می‌کند. تابستان تنها فصلی است که شاهد بی‌هنجاری منفی دما در کشور هستیم. در ماه‌های ژوئیه تا سپتامبر در باریکه ساحلی جنوب شرقی ایران در سواحل دریای عمان دما در ماه‌های ژوئیه، اوت و سپتامبر به ترتیب $0/60$ ، $0/18$ و $0/46$ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد (شکل ۷). این کاهش دما در سواحل جنوب شرقی ایران شاید به دلیل کم‌برآوردی مدل MPI-ESM1-2-HR باشد. همچنین فعالیت مونسون نیز در این فصل در مناطق جنوب شرقی ایران احتمالاً از دیگر دلایل بی‌هنجاری منفی دما در این منطقه از کشور می‌باشد.

متوسط بی‌هنجاری دما در ماه ژوئیه در کل کشور $1/226$ درجه سلسیوس می‌باشد که نسبت به دو ماه اوت ($0/97$ درجه سلسیوس) و سپتامبر ($0/79$ درجه سلسیوس) بیشینه بی‌هنجاری فصل تابستان را دارا است. به‌جز ماه سپتامبر کانون اصلی بیشینه بی‌هنجاری دما در فصل تابستان متمرکز بر ناحیه شمال غرب کشور می‌باشد. مقادیر بی‌هنجاری دما در ماه اوت در پهنه وسیعی از کشور از جمله نواحی مرکزی، نواحی سواحل جنوبی، شمال شرق، شرق و جنوب غرب کشور مشاهده می‌شود.

با شروع فصل پاییز یکپارچگی بی‌هنجاری دما که در فصول قبل دیده شد از بین می‌رود. متوسط بی‌هنجاری دما در این فصل همانند سه فصل پیشین برای کل کشور مثبت است و به ترتیب $0/76$ ، $0/80$ و $0/93$ درجه سلسیوس از اکتبر تا دسامبر افزایش می‌یابد. افزایش بی‌هنجاری دما در ماه‌های پایانی هر فصل همانند مارس، ژوئن و دسامبر به ترتیب با $2/50$ ، $2/20$ و $1/30$ درجه سلسیوس می‌باشد که دارای اهمیت ویژه‌ای است. افزایش دما می‌تواند نشانگری برای جابه‌جایی فصول اقلیمی در ایران از یک سو و کاهش دوره سرد و افزایش دوره گرم طی دوره آینده



شکل ۸. دمای پیش‌بینی شده سالانه کشور مبتنی بر برآورد پروژۀ پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (DCPP) مدل MPI-ESM1-2-HR.

رکوردهای افزایش دما را در بین ماه‌های سال در کشور دارند، می‌تواند باعث کوتاه‌تر شدن دوره سرد سال و از دست رفتن ذخیره‌گاه‌های برف در کشور شود. اهمیت این امر از آنجایی قابل‌توجه است که سه پهنه اقلیمی نامبرده ۷۹/۹۱ درصد از مساحت کل کشور را در بر می‌گیرند. همچنین افزایش دما در کلیه پهنه‌های اقلیمی حتی در اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و بسیار گرم (Dsb)، اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و گرم (Dsa) و اقلیم معتدل با تابستان‌های خشک و گرم (Csa) نیز دیده می‌شود. نگاهی به فراوانی ماه‌های همراه با بی‌هنجاری مثبت دمای بیش از یک درجه سلسیوس، نشان می‌دهد که به ترتیب اقلیم‌های معتدل با تابستان‌های خشک و گرم (Csa)، اقلیم نیمه‌بیابانی خشک و سرد (BSk) و اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و بسیار گرم (Dsa) بیشترین مقدار افزایش دما را در دهه آینده نسبت به دوره بهنجار خواهند داشت.

۳-۵. بررسی دمای آینده در پهنه‌های اقلیمی ایران
 بررسی بی‌هنجاری دمای میانگین دهه آینده (۲۰۲۸-۲۰۲۱) نسبت به دمای میانگین دوره بهنجار، تفاوت‌های آشکاری در پهنه‌های مختلف اقلیمی و ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهد (جدول ۳). با این وجود به جز فوریه که در دو پهنه BWh و BWk بی‌هنجاری دمای منفی بسیار کوچکی (۰/۰۷- درجه سلسیوس) مشاهده می‌شود در تمامی ماه‌ها و پهنه‌های اقلیمی بی‌هنجاری دمای میانگین دهه آینده مثبت است. نکته بسیار مهم در خصوص بی‌هنجاری به‌دست آمده این است که در تمامی پهنه‌های اقلیمی بی‌هنجاری مثبت دمای ماه‌های مارس، آوریل، ژوئن و ژوئیه بیش از یک درجه سلسیوس بوده که یک تهدید جدی برای محیط‌زیست و منابع آب ایران به‌شمار می‌رود. به‌طوری‌که بی‌هنجاری‌های بسیار زیاد دما (بیش از ۲ درجه سلسیوس در پهنه‌های اقلیمی BSk، BWh و BWk) در دو ماه مارس و آوریل که بالاترین

جدول ۳. بی‌هنجاری میانگین دمای دهه آینده نسبت به دوره بهنجار در پهنه‌های اقلیمی مختلف ایران (بر حسب درجه سلسیوس).

ماه	BSh	Bsk	BWh	BWk	Csa	Dsa	Dsb
ژانویه	۰/۶	۰/۹	۰/۵	۰/۶	۱	۱/۱	۰/۸
فوریه	۰/۵	۰/۳	-۰/۰۷	-۰/۰۷	۰/۸	۰/۸	۰/۴
مارس	۱/۱	۱/۷	۱/۹	۱/۷	۱/۴	۱/۲	۱/۷
آوریل	۱/۶	۲	۲	۲/۱	۱/۴	۱/۲	۱/۹
مه	۰/۹	۰/۹	۰/۸	۰/۹	۱	۰/۹	۰/۹
ژوئن	۱/۲	۱/۴	۱/۱	۱/۲	۱/۳	۱/۵	۱/۵
ژوئیه	۱/۱	۱/۴	۱/۱	۱/۴	۱/۳	۱/۳	۱/۲
اوت	۱/۱	۱/۱	۰/۷	۰/۹	۱/۳	۱/۴	۱/۲
سپتامبر	۰/۶	۱/۳	۰/۸	۱	۰/۴	۰/۶	۰/۸
اکتبر	۰/۹	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۰/۹
نوامبر	۰/۳	۰/۷	۱	۰/۹	۰/۱	۰/۲	۰/۶
دسامبر	۰/۷	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۸	۰/۸	۰/۹
فراوانی بالاتر از ۱ درجه سلسیوس	۵	۶	۵	۵	۷	۶	۵

۴. نتیجه‌گیری

است. نخست آن‌که روش‌های تصحیح اریبی چنان‌که در بررسی مربوط به پیش‌نگری‌ها کاربرد دارد مزیت‌های ذاتی مدل‌های اقلیمی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (اهرت و همکاران، ۲۰۱۲). از طرف دیگر فراسنج دما نسبت به بارش دقت بیشتری دارد که آن را بی‌نیاز از تصحیح اریبی می‌کند (بوئر و همکاران، ۲۰۱۶).

در این پژوهش برای اولین بار پیش‌بینی دهه‌ای دمای ماهانه ایران با استفاده از خروجی دو مدل BCC-CSM2-MR و MPI-ESM1-2-HR در دسترس از پروژه DCPP مشارکت یافته در پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز ششم (CMIP6) انجام شد. درستی سنجی مدل‌ها با استفاده از سه سنج آماری RMSE، MBE و PCC نشان داد که مدل BCC-CSM2-MR در مناطق ساحلی ایران (خزر و عمان) کمترین و در مناطق مرتفع ایران بیشترین کارایی را داراست. در همین راستا زرین و داداشی رودباری (۱۳۹۹) و فلاح قاله‌ری و همکاران (۲۰۱۹) دریافتند که مدل‌های CMIP5 و CMIP6 در پهنه‌های اقلیمی خیلی مرطوب و مرتفع ایران همراه با کوهپایه‌های زاگرس و البرز بیشترین مقدار اریبی را دارند نتیجه این تحقیق نیز این یافته‌های

اصطلاح «پیش‌بینی دهه‌ای» همان‌طور که در این پژوهش استفاده شد، شامل پیش‌بینی‌های مربوط به بازه‌های زمانی سالانه، چند ساله و دهه‌ای است. امکان انجام پیش‌بینی‌های ماهانه در چنین بازه‌های زمانی و توانایی انجام این کار، با استفاده از بررسی‌های پیش‌بینی و پیش‌بینی‌های گذشته‌نگر (پیش‌بینی‌های انجام شده) و آخرین نسل مدل‌های اقلیمی در دسترس (CMIP6) صورت می‌گیرد. پیش‌بینی دهه‌ای پارامترهای مربوط به اقلیم، یک تحول کلیدی از سوی برنامه جهانی تحقیقات اقلیمی (WCRP) است که در سال‌های اخیر رشد و توسعه قابل توجهی یافته است. این پژوهش با هدف بررسی کارایی مدل‌های پیش‌بینی دهه‌ای (DCPP) در اقلیم ایران برای یک دوره بهنجار بلندمدت (۲۰۱۹-۱۹۸۰) گذشت‌نگر و پیش‌بینی آن برای دوره در دسترس (۲۰۲۸-۲۰۲۱) مدل منتخب انجام شده است. همچنین به دلیل حفظ وردایی درونی اقلیم (ICV) برون‌داد مستقیم مدل‌های DCPP مورد استفاده قرار گرفت؛ این امر به دو دلیل از سوی توسعه دهندگان پروژه DCPP انجام شده

فوق را تأیید می‌کند. در پاسخ به چرایی بالا بودن مقدار اریبی مدل در این مناطق می‌توان به توپوگرافی پیچیده، تضاد دریا-خشکی، تفکیک افقی پایین (یانگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ زرین و همکاران، ۱۴۰۰) و نوع پیکربندی مدل با توجه به متفاوت بودن مراکز توسعه دهنده آنها (عباسی و اثمیری، ۱۳۹۰؛ وی و همکاران، ۲۰۱۹) اشاره کرد. به‌رغم آن که هر دو مدل نشان‌دهنده اریبی منفی (کم‌برآوردی دما) در بیشتر ایستگاه‌ها و متوسط کل کشور می‌باشند، اما مدل MPI-ESM1-2-HR به جهت داشتن خطای اریبی کمتر (متوسط اریبی کل کشور ۰/۲۴- درجه سلسیوس) نسبت به مدل BCC-CSM2-MR (متوسط اریبی کل کشور ۲/۱۲- درجه سلسیوس) برای پیش‌بینی دهه‌ای دمای ایران مدلی کارا تر است.

برونداد مدل MPI-ESM1-2-HR طی دوره گذشته‌نگر (۲۰۱۹-۱۹۸۰) نشان دهنده کارآمدی این مدل در تعیین الگوهای دمایی کشور است. کمینه دمای ایران بر اساس برونداد این مدل در ماه ژانویه و با مقدار ۶/۲۸- درجه سلسیوس می‌باشد. بیشینه دما نیز با ۴۴/۴ درجه سلسیوس در ماه ژوئیه مشاهده می‌شود. بررسی برونداد دما برای دوره گذشته‌نگر مدل MPI-ESM1-2-HR نشان داد که دما در ایران تحت تأثیر توپوگرافی، عرض جغرافیایی و سامانه‌های همدیدی قرار دارد. به‌طور کلی دما در تمامی فصول و مناطق بر توپوگرافی منطبق است. فصل بهار سرآغاز افزایش دمای بیشینه در اکثر نقاط کشور می‌باشد. این روند افزایشی در تابستان با حاکمیت پرفشار جنب حاره به اوج خود می‌رسد. روند کاهشی دما از سپتامبر آغاز شده و در ماه نوامبر از نظر بیشینه دما، افت محسوسی در تمامی نقاط کشور مشاهده می‌شود. به طوری که در ماه دسامبر دماهای بالای ۲۰ درجه سلسیوس تنها محدود به نوار ساحلی جنوبی کشور می‌شود. بررسی بی‌هنجاری دمای پیش‌بینی شده (۲۰۲۸-۲۰۲۱) نسبت به دوره بهنجار بلند مدت (۲۰۱۹-۱۹۸۰) نشان می‌دهد که متوسط بی‌هنجاری کل کشور برای ماه‌های مختلف سال طی ۲۰۲۸-

۲۰۲۱ نسبت به دوره بهنجار بلند مدت، ۰/۹۹ درجه سلسیوس افزایش داشته است. این یافته هم‌راستا با سایر نتایج پیش‌نگری‌های اقلیمی دمای ایران است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۴؛ زرین و داداشی رودباری، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰). بی‌هنجاری دما در فصول انتقالی سال بیشتر از سایر فصول است و این نتیجه نشان می‌دهد که در آینده شاهد جابه‌جایی فصول اقلیمی در ایران و کاهش طول دوره سرد سال و افزایش طول دوره گرم در آینده نزدیک خواهیم بود.

علاوه بر این، در تمامی پهنه‌های اقلیمی بی‌هنجاری مثبت دو درجه سلسیوس دمای ماه‌های مارس و آوریل یک تهدید جدی برای محیط‌زیست و منابع آب ایران به‌شمار می‌رود. این امر می‌تواند سبب کوتاه‌تر شدن دوره سرد سال و از دست رفتن ذخیره‌گاه‌های برف در کشور شود. پیش‌بینی دمای کشور برای دوره ۲۰۲۸-۲۰۲۱ نشان داد که افزایش دما در ایران یک امر قطعی است. همچنین نتایج مناطق مرتفع و در عرض‌های جغرافیایی بالا نسبت به تغییر اقلیم حساس‌تر هستند. تغییر در میانگین دمای هوا ممکن است فرین‌های اقلیمی مرتبط با دما را تشدید کند. بنابراین، استراتژی‌های مناسب سازگاری برای کاهش اثرات مخاطرات اقلیمی باید برنامه‌ریزی شوند. بررسی دقیق‌تر تکنیک‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی‌های اقلیمی نزدیک مدت اعم از تصحیح اریبی، پیش‌بینی‌های احتمالاتی، همادی کردن و مقایسه نتایج مدل‌های مختلف پیش‌بینی و تجزیه و تحلیل آنها بر اساس تعداد مدل‌های بیشتر می‌تواند منجر به پیش‌بینی‌های دقیق‌تری شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از داوران محترم نشریه فیزیک زمین و فضا که سبب ارتقای کیفی این پژوهش شدند، ابراز نمایند.

مراجع

احمدی، م.، داداشی رودباری، ع.، اکبری ازیرانی، ط. و کرمی، ج.، ۱۳۹۸، کارایی مدل HadGEM2-ES در

- جغرافیای طبیعی، ۵۳(۱)، ۷۵-۹۰.
- زرین، آ. و داداشی رودباری، ع.، ۱۴۰۰، پیش‌نگری دوره‌های خشک و مرطوب متوالی در ایران مبتنی بر برون‌داد همادی مدل‌های تصحیح شده اریبی CMIP6. فیزیک زمین و فضا، پذیرفته شده برای چاپ.
- زرین، آ.، داداشی رودباری، ع. و صالح آبادی، ن.، ۱۴۰۰، بررسی بی‌هنجاری و روند دمای ایران در پهنه‌های مختلف اقلیمی با استفاده از مدل‌های جفت شده پروژه مقایسه متقابل مرحله ششم (CMIP6). مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۵(۱)، ۳۵-۵۴.
- عالم‌زاده، ش.، احمدی گیوی، ف.، محب‌الحجه، ع. و یازجی، د.، ۱۳۹۶، ساختار هندسی جت آفریقا-آسیا در وردسپهر زبرین و پاسخ آن به گرمایش زمین در مدل‌های CMIP5. مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۱(۳)، ۱-۲۱.
- عباسی، ف.، و اثمیری، م.، ۱۳۹۰، پیش‌بینی و ارزیابی تغییرات دما و بارش ایران در دهه‌های آینده با الگوی MAGICC - SCENGEN. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵(۱)، ۷۰-۸۳.
- 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). 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. مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۱(۴)، ۴۰-۵۳.
- Alexandersson, H., 1986, A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of climatology*, 6(6), 661-675.
- Boer, G.J., Smith, D.M., Cassou, C., Doblas-Reyes, F., Danabasoglu, G., Kirtman, B., Kushnir, Y., Kimoto, M., Meehl, G.A., Msadek, R. and Mueller, W.A., 2016, The decadal climate prediction project (DCPP) contribution to CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(10), 3751-3777.
- ارزیابی نابهنجاری فصلی دمای ایران تحت سناریوهای واداشت تابشی. فیزیک زمین و فضا، ۴۵(۳)، ۶۲۵-۶۴۴.
- بابائیان، ا.، مدیریان، ر.، کریمیان، م. و جوانشیری، ز.، ۱۳۹۸، پیش‌بینی احتمالاتی ماهانه بارش و دمای کشور برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۲۴ بر اساس پروژه DCPP سازمان جهانی هواشناسی. گزارش تحقیقاتی پژوهشکده اقلیم‌شناسی (مشهد)، گروه پژوهشی مدل‌سازی و پیش‌آگاهی اقلیمی، سازمان هواشناسی کشور.
- بابائیان، ا.، مدیریان، ر.، کریمیان، م. و جوانشیری، ز.، ۱۳۹۹، یافته‌های پروژه جدید پیش‌بینی چند سالانه سازمان جهانی هواشناسی DCPP برای پیش‌بینی بارش ایران در دوره ۲۰۲۰-۲۰۲۴. هشتمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران، ۲۷ و ۲۸ بهمن، دانشگاه فردوسی مشهد. مشهد.
- بابائیان، ا.، مدیریان، ر.، کریمیان، م. و جوانشیری، ز.، ۱۴۰۰، پیش‌بینی چندسالانه بارش ایران با مقیاس‌گاهی برون‌داد مدل‌های DCPP. مطالعه موردی: دوره ۲۰۱۹-۲۰۲۳. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی. پذیرفته شده برای انتشار.
- 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.
- زرین، آ. و داداشی رودباری، ع.، ۱۴۰۰، پیش‌نگری دمای ایران در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) بر اساس رویکرد همادی چند مدلی CMIP6. پژوهش‌های
- Borchert, L. F., Koul, V., Menary, M. B., Befort, D. J., Swingedouw, D., Sgubin, G. and Mignot, J., 2021, Skillful decadal prediction of unforced southern European summer temperature variations.
- Dadashi-Roudbari, A. and Ahmadi, M., 2020, Evaluating temporal and spatial variability and trend of aerosol optical depth (550 nm) over Iran using data from MODIS on board the Terra and Aqua satellites. *Arabian Journal of*

- Geosciences, 13(6), 1-23.
- Ehret, U., Zehe, E., Wulfmeyer, V., Warrach-Sagi, K. and Liebert, J., 2012, "HESS Opinions" Should we apply bias correction to global and regional climate model data?". *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 9(4).
- 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.
- Fallah-Ghalhari, G., Shakeri, F. and Dadashi-Roudbari, A., 2019, Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(3), 1539-1562.
- He, S., Yang, J., Bao, Q., Wang, L. and Wang, B., 2019, Fidelity of the observational/reanalysis datasets and global climate models in representation of extreme precipitation in East China. *Journal of Climate*, 32(1), 195-212.
- Hsiung, W. and Sunstein, C. R., 2006, Climate change and animals. *U. Pa. L. Rev.*, 155, 1695.
- Keenlyside, N. S., Latif, M., Jungclaus, J., Kornblueh, L. and Roeckner, E., 2008, Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector. *Nature*, 453(7191), 84-88.
- Kim, H. M., Webster, P. J. and Curry, J. A., 2012, Evaluation of short-term climate change prediction in multi-model CMIP5 decadal hindcasts. *Geophysical Research Letters*, 39(10).
- Konisky, D. M., Hughes, L. and Kaylor, C. H., 2016, Extreme weather events and climate change concern. *Climatic change*, 134(4), 533-547.
- Meehl, G. A., Goddard, L., Boer, G., Burgman, R., Branstator, G., Cassou, C., Corti, S., Danabasoglu, G., Doblas-Reyes, F., Hawkins, E. and Karspeck, A., 2014, Decadal climate prediction: an update from the trenches. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(2), 243-267.
- Meehl, G. A., Hu, A. and Tebaldi, C., 2010, Decadal prediction in the Pacific region. *Journal of Climate*, 23(11), 2959-2973.
- Mochizuki, T., Ishii, M., Kimoto, M., Chikamoto, Y., Watanabe, M., Nozawa, T., Sakamoto, T.T., Shiogama, H., Awaji, T., Sugiura, N. and Toyoda, T., 2010, Pacific decadal oscillation hindcasts relevant to near-term climate prediction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(5), 1833-1837.
- Müller, W. A., Jungclaus, J. H., Mauritsen, T., Baehr, J., Bittner, M., Budich, R., Bunzel, F., Esch, M., Ghosh, R., Haak, H. and Ilyina, T., 2018, A higher-resolution version of the Max Planck institute earth system model (MPI-ESM1. 2-HR). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(7), 1383-1413.
- Phung, M. L., Truong, D. T. and Pham, T. T. T., 2021, The Impact of Extreme Events and Climate Change on Agricultural and Fishery Enterprises in Central Vietnam. *Sustainability*, 13(13), 1-17.
- Pohlmann, H., Jungclaus, J. H., Köhl, A., Stammer, D. and Marotzke, J., 2009, Initializing decadal climate predictions with the GECCO oceanic synthesis: Effects on the North Atlantic. *Journal of Climate*, 22(14), 3926-3938.
- Screen, J. A. and Simmonds, I., 2011, Erroneous Arctic temperature trends in the ERA-40 reanalysis: A closer look. *Journal of Climate*, 24(10), 2620-2627.
- Sharafati, A., Nabaei, S. and Shahid, S., 2020, Spatial assessment of meteorological drought features over different climate regions in Iran. *International Journal of Climatology*, 40(3), 1864-1884.
- Smith, D. M., Cusack, S., Colman, A. W., Folland, C. K., Harris, G. R. and Murphy, J., M. 2007, Improved surface temperature prediction for the coming decade from a global climate model. *science*, 317(5839), 796-799.
- Sospedra-Alfonso, R. and Boer, G. J., 2020, Assessing the impact of initialization on decadal prediction skill. *Geophysical Research Letters*, 47(4), e2019GL086361.
- 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.
- Wei, L., Xin, X., Xiao, C., Li, Y., Wu, Y. and Tang, H., 2019, Performance of BCC-CSM models with different horizontal resolutions in simulating extreme climate events in China. *Journal of Meteorological Research*, 33(4), 720-733.
- Weiskopf, S. R., Rubenstein, M. A., Crozier, L. G., Gaichas, S., Griffis, R., Halofsky, J. E., Hyde, K. J., Morelli, T. L., Morissette, J. T., Muñoz, R. C. and Pershing, A. J., 2020, Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of the Total Environment*, 733, 137782.
- Wu, T., Lu, Y., Fang, Y., Xin, X., Li, L., Li, W., Jie, W., Zhang, J., Liu, Y., Zhang, L. and

- Zhang, F., 2019, The Beijing Climate Center climate system model (BCC-CSM): The main progress from CMIP5 to CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 12(4), 1573-1600.
- Yang, X., Wood, E. F., Sheffield, J., Ren, L., Zhang, M. and Wang, Y., 2018, Bias correction of historical and future simulations of precipitation and temperature for China from CMIP5 models. *Journal of Hydrometeorology*, 19(3), 609-623.
- Zarrin, A. and Dadashi-Roudbari, A., 2021, Projection of future extreme precipitation in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Theoretical and Applied Climatology*, 144(1), 643-660.
- Zarrin, A., Ghaemi, H., Azadi, M. and Farajzadeh, M., 2010, The spatial pattern of summertime subtropical anticyclones over Asia and Africa: A climatological review. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 30(2), 159-173.
- Zhu, E., Yuan, X. and Wu, P., 2020, Skillful decadal prediction of droughts over large-scale river basins across the globe. *Geophysical Research Letters*, 47(17), e2020GL089738.
- Zi-Chen, T. A. N. G., Qing-Quan, L. I., Li-Juan, W. A. N. G. and Li-Quan, W. U., 2020, Evaluation of CanESM5 and MIROC6 models' ability in predicting air temperature over China based on CMIP6 decadal experiment. *Advances in Climate Change Research*, 1, 147-153.
- 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).

Near term (2021-2028) climate prediction of monthly temperature in Iran using Decadal Climate Prediction Project (DCPP)

Zarrin, A.^{1*}, Dadashi-Roudbari, A. A.² and Hassani, S.³

1. Associate Professor, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2. Post-Doc Researcher, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3. M.Sc. Graduated, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(Received: 2 Aug 2021, Accepted: 10 Jan 2022)

Summary

Decadal prediction is a general term that encompasses predictions for annual, interannual, and decadal periods in which significant progress has been made over the years. Decadal climate prediction is made using a hindcast and the latest generation of climate models. It provides two categories of hindcast and prediction data. The purpose of this study is to evaluate the temperature from the DCPP and its prediction in Iran based on the available models of the DCPP project contribution to the CMIP6 project.

The study area of this research is Iran. As mentioned, the purpose of this study is to predict the near-term temperature based on the output of the DCPP project. For this purpose, daily temperature from 42 synoptic stations was used as observation to evaluate the available models of the DCPP project. Unlike general circulation models (GCMs), the DCPP project has an initialization that includes a three-month time step for implementation of each year. Air temperature of two models BCC-CSM2-MR and MPI-ESM1-2-HR with a horizontal resolution of 100 km is available for the DCPP project from the CMIP6 series. Three statistics, Pearson correlation coefficient (PCC), root mean square error (RMSE) and mean bias error (MBE), were used to evaluate the selected models of the DCPP project using observational data (synoptic stations).

In the study of the relationship between observation and hindcast of the two selected models, it is found that the BCC-CSM2-MR model shows a high correlation (0.99) in the mountainous areas of Zagros and Alborz and arid and semi-arid regions of the inland and east of Iran. However, the northern and southern coasts show a weak correlation (between 0.92 and 0.97). Examination of RMSE statistics for the BCC-CSM2-MR model also shows the maximum error between 1.2 to 2.2° in the coastal areas of the country (the Caspian Sea and the Oman Sea). The western and northern mountains of Iran show the minimum RMSE.

The BCC-CSM2-MR model shows more bias than the MPI-ESM1-2-HR model in the northern regions of the country. Examination of the average monthly temperature anomaly across Iran in the predicted period compared to the hindcast period (1980-2019) showed that the monthly temperature anomaly is positive across the country compared to the normal period in all months of the year. This value is 1.03 degrees Celsius for the country-wide average. In other words, the temperature in Iran will increase by one degree for the bear term period (2021-2028) compared to the long-term period of the last 40 years (1980-2019).

In this study, for the first time, a decadal climate prediction of Iran's monthly temperature is assessed using the output of two available models BCC-CSM2-MR and MPI-ESM1-2-HR from the DCPP contribution to the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). The evaluation of the models using three statistical measures RMSE, MBE and PCC showed that the BCC-CSM2-MR model has the lowest performance in the coastal areas of Iran (the Caspian and the Oman Sea) and the highest performance in the highlands of Iran. The output of the MPI-ESM1-2-HR model during the hindcast period (1980-2019) show good performance of this model in determining the temperature patterns of the country. The minimum temperature is based on the output of this model in January with a value of -6.28°. Examination of the predicted temperature anomaly (2021-2028) compared to the hindcast period (1980-2019) shows that the average anomaly across the country for different months of the year during 2021-2028 compared to the hindcast period is 0.99°.

Keywords: Decadal Prediction, Temperature Anomaly, DCPP Project, Iran.

* Corresponding author:

zarrin@um.ac.ir