

نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال بیست و دوم، شماره ۶۶، پاییز ۱۴۰۱

شبیه سازی تغییرات دما در نیمه غربی ایران طی دوره (۱۹۶۰-۲۱۰۰) با استفاد مدل های واکاوی شده و خروجی مدل ای RCP۸/۵

دریافت مقاله: ۹۷/۸/۱۵ پذیرش نهایی: ۹۸/۲/۷

صفحات: ۱-۱۷

حسین عساکره: استاد آب وهواشناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران!

Email: asakereh1@yahoo.com

پیرو لیونلو: استاد هواشناسی، دپارتمان علوم و بیولوژی (DisTeBA) و CMCC، دانشگاه سالنتو، ایتالیا.

Email: piero.lionello@unisalento.it

سید حسین میرموسوی: دانشیار اقلیم شناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

Email: hossein.mirmousavi@znu.ac.ir

سحر صدرافشاری: دانشجوی دکتری آب وهواشناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

Email: saharsadrafshary@yahoo.com

چکیده

هدف از این پژوهش شناسایی تغییرات روند دما در نیمه غربی ایران می باشد. بدین منظور داده های دمای ماهانه ۱۵ ایستگاه همدید طی دوره آماری ۱۹۶۰-۲۰۱۰ و برای نیمه غربی ایران گردآوری و پس از بررسی توسط آزمون های پتیت، SNHT، بویشاند و وان- نیومن با داده های واکاوی شده ERA-Interim، ERA-، NCEP، 20C و CMIP5 (RCP۸/۵ برای دوره ۱۹۶۰-۲۱۰۰) مقایسه و شبیه سازی شدند. روند دمای هر یک از این ایستگاهها توسط آزمون من کندال و تخمین گر سن با ۹۵ درصد اطمینان محاسبه گردید. بر اساس نتایج به دست آمده از تمامی مدل ها، روند مثبت معنی دار در بهار، تابستان و پاییز مشاهده و تنها در فصل زمستان روند مثبت معنی دار در نتایج مدل ERA-Interim دیده شد. مدل های CMIP5 برای دوره (۲۰۵۰-۲۱۰۰) مقادیری بین ۲ تا ۴ درجه سلسیوس در صد سال را برای فصول مختلف به همراه داشته که نسبت به نتایج دیگر مدل ها برای دوره ۱۹۷۹-۲۰۱۰ کم تر می باشد. مدل های CMIP5 و میانگین آنها افزایش دمای سالانه را در کل منطقه مورد مطالعه تایید کرده و مقدار ۷ درجه سلسیوس در صد سال را برای نیمه دوم قرن ۲۱ نشان می دهند.

کلید واژگان: روند، تغییرات دما، شبیه سازی اقلیمی، CMIP5، نیمه غربی ایران.

مقدمه

از آنجا که دما از عناصر اساسی شکل‌گیری اقلیم است تغییرات آن می‌تواند ساختار آب و هوایی هر محل را دگرگون سازد. به همین دلیل، بررسی روند دما در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی بخش بزرگی از پژوهش‌های اقلیم‌شناسی را به خود اختصاص داده است (مسعودیان و همکاران، ۱۳۸۳) برای اهمیت این عنصر آب و هوایی دلایل متعددی وجود دارد: نخست اینکه دمای هوا از معدود عناصر اقلیمی است که از پیوستگی زمانی - مکانی برخوردار است. دوم اینکه این متغیر اقلیمی با سایر عناصر آب و هوایی نظیر تابش خورشید، رطوبت جو، وزش باد و بارندگی در ارتباط مستقیم یا غیر مستقیم است و نیز بسیاری فرایندهای آب و هوایی را کنترل می‌کند (رسولی، ۱۳۸۱: ۸) و خود در کنترل بسیاری از فرایندهاست. بررسی‌های پژوهشگران نشان می‌دهد که از آغاز قرن بیستم تا کنون میانگین دمای کره زمین حدود ۰/۶ درجه سلسیوس افزایش یافته است (نیکلاس و همکاران^۱، ۱۹۹۶، استرلینگ^۲ و همکاران، ۱۹۹۷، ۳۶۴-۳۶۶). این افزایش عمدتاً حاصل افزایش دماهای بیشینه بوده است (والتر^۳ و همکاران، ۲۰۰۲: ۳۸۹-۳۹۵). تغییرات یاد شده از الگوی جغرافیایی (تفاوت‌های زمانی - مکانی) برخوردارند. برای مثال نیدزویدز و همکاران (۱۹۹۶: ۷۷۰) روند دمای روزانه و شبانه را در مرکز و جنوب‌شرق اروپا بررسی کرده‌اند. گریزر^۴ و همکاران (۲۰۰۲: ۱۷۵) دمای اروپا را طی صد سال بررسی کرده و نشان داده‌اند که در غرب اروپا چرخه دمای سالانه عقب و در شرق اروپا جلو افتاده است. در شرق اروپا نوسان سالانه دما افزایش معناداری را نشان می‌دهد و تقریباً در سراسر منطقه دما روند افزایشی داشته است. کاس^۵ و فریچ (۱۹۹۵: ۲۱۵) با بررسی دامنه دمای روزانه و ابرناکی در کشورهای شمالی، مدل‌های روند دمای این منطقه را معرفی کرده و به کمک آن دمای آینده منطقه را پیش‌بینی کردند. یو^۶ و همکاران (۲۰۰۳: ۱۷) روند دمای ماهانه، فصلی و سالانه ژاپن در صد سال گذشته را بررسی کرده و نشان داده‌اند که دمای سالانه ۴۶ ایستگاه که روند آن‌ها با آزمون مان-کندال ارزیابی شده در فاصله سال‌های ۱۹۰۰ تا ۱۹۹۶ بین ۰/۵۱ تا ۲/۷۷ درجه سلسیوس افزایش یافته است. در همین دوره دمای فصلی بین ۰/۴۷ تا ۳/۶۹ درجه سلسیوس (بویژه در فصل زمستان و بهار) افزایش نشان می‌دهد. همین ویژگی در دمای ماهانه هم دیده می‌شود، اما مقدار افزایش دمای ماهانه طی دوره مورد بررسی بین ۰/۱۷ تا ۴/۱۲ درجه سلسیوس بوده است. دل ریو^۷ و همکاران (۲۰۱۱)، در مقاله‌ای به بررسی روند دما در ۴۷۳ ایستگاه هواشناسی در اسپانیا در طول دوره زمانی (۱۹۶۱-۲۰۰۶) پرداختند. بر اساس یافته‌های آن‌ها روند دما به طور معنی‌دار و در اغلب ایستگاه‌های مورد مطالعه افزایش داشته که در بیش از ۶۰٪ منطقه مورد مطالعه این روند معنی‌دار در تابستان و بهار به وقوع پیوسته است. کریستوفر^۸ و همکاران (۲۰۱۲)، به بررسی روندهای متوسط، کمینه و بیشینه دما در فلوریدا و در بازه زمانی ۱۸۹۵-۲۰۰۹ پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها تنها در طی ماه‌های

1 Nicolas

2 Easterling

3 Walter

4 Grieser

5 Kass and Frich

6 Yue

7 Del Río

8 Christopher

اکتبر و می، روند کاهشی معنی دار در داده های بارندگی مشاهده شده است. این در حالی است که داده های دما دارای روندهای معنی دار بیشتری بوده که حداکثر مقدار آن در طی تابستان و پاییز و در کل منطقه مورد مطالعه رخ داده است. اقلیم ایران به علت اشکال پیچیده توپوگرافیک و گستردگی آن متنوع می باشد. ایران با سطحی در حدود ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع در جنوب غرب آسیا واقع شده است. البرز و زاگرس رشته کوه های مهم ایران به شمار می روند. کوه های البرز از شمال تا غرب و شرق ایران گسترده شده و کوه های زاگرس از شمال غرب تا بخش های جنوبی ایران گسترش یافته اند (دین پژوه، ۲۰۰۶، ۱۲۵). رابطه جریانات جوی با این دو رشته کوه در ایجاد تنوع اقلیمی در ایران دارای اهمیت می باشد. غرب ایران با زمستان های سرد و رخداد دماهای زیر صفر در طی ماه های دسامبر و ژانویه همراه است. در این نواحی بهار و پاییز نسبتاً معتدل بوده و تابستان ها گرم و خشک می باشند. در جنوب زمستان ها معتدل و تابستان ها بسیار گرم بوده و میانگین دمای روزانه در جولای به بیش از ۳۸ درجه سلسیوس می رسد. اقلیم ایران به استثنای سواحل شمالی، شمال غرب و بخش هایی از غرب، عمدتاً خشک و نیمه خشک بوده و بارندگی نسبت به فضا و مکان بسیار متغیر است (کوثری و همکاران، ۲۰۱۱: ۹۰۷). فصول مرطوب و خشک معمولاً به ترتیب از نوامبر تا می و ژوئن تا اکتبر رخ می دهند. بخش اعظمی از ایران بخصوص در فصول گرم، بوسیله جریان های جنب حاره ای متاثر شده و تابستان های گرم و خشکی را تجربه می کنند. بارندگی ها در نیمه غربی متاثر از توده هوای مدیترانه ای بوده و بوسیله بادهای غربی در فصل سرد وارد کشور می گردند (علیجانی، ۲۰۰۸: ۱۰۸). با توجه به این موارد لزوم دست یابی به آگاهی در مورد رفتار دما ضروری می باشد. از جمله تحقیقات داخلی صورت گرفته در این مورد می توان به این موارد اشاره نمود. کوثری و اسدی (۲۰۱۰) روند افزایش معنی داری را در میانگین و حداقل سالانه دما و از سال ۱۹۵۱ تا ۲۰۰۵ یافته و در دوره مورد نظر سیر نزولی میانگین رطوبت نسبی در ۲۶ ایستگاه سینوپتیک بخصوص در دهه های گذشته را مشاهده نمودند. طبری و همکاران (۲۰۱۱) در اکثر ایستگاه های مورد بررسی شاهد افزایش دمای میانگین سالانه، حداکثر روزانه و حداقل دما در دوره زمانی ۱۹۶۶ تا ۲۰۰۵ بوده اند. صبوحی و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی دمای ۳۵ ایستگاه سینوپتیک در ایران پرداخته و مشاهده کردند که اکثر ایستگاه ها بویژه در بخش های غربی و شرقی ایران روند افزایشی را در میانگین دمای ماهانه فصول گرم سال به نمایش می گذارند. کوثری و همکاران (۲۰۱۳) روند مثبت معنی داری را در دمای ماه های گرم بخصوص آوریل، ژوئن، جولای، آگوست و سپتامبر مشاهده کردند. مشاهدات فوق در دوره زمانی ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۵ رخ داد. زارع نیستانی و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیقی به بررسی تغییرات روند دما در ایران و برای دوره ۱۹۵۰-۲۰۰۷ پرداخته و به این نتیجه رسیدند که اقلیم ایران در بخش های وسیعی به سمت گرم شدن سیر نموده و روند آن در تابستان و بهار معنی دار و افزایشی می باشد. در مطالعه ای دیگر باروس و همکاران (۲۰۱۵)، به بررسی تغییر روند دما در آرژانتین و برای بازه زمانی ۱۹۰۰-۲۱۰۰ پرداخته و به این نتیجه رسیده اند که تا آخر قرن افزایش دما برای این منطقه در حدود ۳/۵ درجه سلسیوس می باشد. با تاکید بر مطالعاتی که روندهای گذشته را در نظر گرفته اند، از میان مطالعاتی که به بررسی تغییرات روند دما در ایران پرداخته اند تنها شمار کوچکی از آن ها به برآورد کارایی روش ها و مدل های متفاوت پرداخته اند. در این میان برخی از تحقیقات تغییرات دما را تا اواخر قرن ۲۱ در نظر گرفته اند که می توان به موارد ذیل اشاره

نمود: سبزی پرور و همکاران (۱۳۹۲)، در تحقیقی به تحلیل روند دما در مناطق خشک و نیمه خشک ایران پرداختند. آن‌ها ۱۰ ایستگاه سینوپتیک را در بازه زمانی ۱۳۳۵-۱۳۸۴ در نظر گرفته و به این نتیجه رسیدند که دما در بیشتر ایستگاه‌های انتخابی به طور معنی داری روند مثبت معنی دار بوده است. طاووسی و همکاران (۱۳۹۳)، به منظور بررسی روند دمای حداکثر و حداقل فصلی و سالانه استان فارس از روش‌های ناپارامتری بهره گرفتند. بدین منظور ۶ ایستگاه همدیدی و بازه زمانی ۱۹۸۹-۲۰۱۰ در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج آن‌ها بیشینه و کمینه دما دارای روند صعودی می‌باشد. ظهراپی و همکاران (۱۳۹۵)، به شناسایی روند تغییرات دما و بارش سالانه در حوضه آبریز کرخه پرداخته‌اند. بدین منظور ۲۲ ایستگاه باران سنجی، تبخیر سنجی و سینوپتیک و برای دوره آماری ۱۹۷۱-۲۰۱۱ انتخاب شد. نتایج آن‌ها برای سری‌های زمانی دما و بارش سالانه به ترتیب روند افزایشی و کاهش‌ی با سطوح معنی داری بالای ۹ و ۵ درصد را برای اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داد. ساعی محمدی و همکاران (۲۰۱۷) برای تمام ایران از مدل‌های HadeM3 و SDSM با سناریوی A2 استفاده کرده‌اند. در تحقیقی دیگر عساکره و اکبرزاده (۱۳۹۶)، تغییرات دما و بارش ایستگاه تبریز را برای دوره زمانی ۲۰۱۰-۲۱۰۰ شبیه‌سازی کردند. بدین منظور از مدل SDSM و خروجی مدل CanESM2 برای RCP های مختلف بهره گرفتند. بر اساس نتایج آن‌ها در طول بازه مورد مطالعه دما افزایش و بارندگی کاهش خواهد داشت. اکثر این پژوهش‌ها حاکی از افزایش دما تا میانه قرن ۲۱ است، ولی از آنجا که هیچ‌یک از این مطالعات ارقام مشابهی از افزایش دما را در ایستگاه‌های انتخابی را ارائه ننموده‌اند، تنها می‌توان به اشتراک نتایج آن‌ها در روند افزایشی دما اشاره نمود.

در مطالعه حاضر نیمه غربی ایران با مساحتی در حدود ۴۰۰۰۰۰ کیلومتر مربع مورد بررسی قرار گرفته است. این منطقه در موقعیت جغرافیایی ۳۰ تا ۴۰ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا ۵۲ درجه طول شرقی واقع شده و حدود ۱۵ استان در این محدوده قرار گرفته‌اند (شکل ۱). با بررسی و مطالعه بسیاری از منابع داخلی و خارجی که به برخی از آنها نیز در بالا اشاره شد مشاهده گردید که تاکنون مطالعه جامع و کاملی که روند تغییرات اقلیمی ناحیه غرب ایران را بویژه از منظر روند تغییرات میانگین دما براساس روش‌های ناپارامتریک و نیز در تلفیق با فرایندهای احتمالاتی - تصادفی ارائه دهد انجام نشده است. همچنین می‌دانیم که هیات بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC) جهت پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم سناریوهای مختلفی ارائه کرده است. جدیدترین سناریوهای منتشر شده در گزارش ارزیابی پنجم (AR5) آمده است. سناریوهای جدید (RCP) سیر تکوین غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای را بیان می‌کنند که براساس میزان واداشت تابشی در سال ۲۱۰۰ دارای چهار خط سیر کلیدی به نام‌های RCP2.6, RCP4.5, RCP6, RCP8.5 و RCP8.5 می‌باشند (صادقی و همکاران، ۱۳۹۷). لذا در این پژوهش منظور فهم بهتر چگونگی تکوین رفتار دما در آینده از داده‌های ایستگاهی و بازکاوی شده در کنار سناریوهای CMIP5 بهره گرفته می‌شود. با توجه به اینکه RCP8.5 بیشترین میزان انتشار گاز گلخانه‌ای را در نظر می‌گیرد، در پژوهش حاضر برای توصیف روند گذشته دما و پیش‌بینی رفتار آینده آن در نیمه غربی ایران مورد استفاده قرار گرفت تا با توجه به آن، شدیدترین روند دما در مطالعه لحاظ گردد (IPCC، ۲۰۱۴). بدین منظور از داده‌های ایستگاهی و واکاوی شده متفاوت شامل: ERA-Interim (۱۹۷۹-۲۰۱۰)، ERA-20C، NCEP (۱۹۶۰-۲۰۱۰) و داده‌های CMIP5- RCP8.5 (در این تحقیق از آن‌ها با عنوان CLM-ENS نام

برده شده) برای دوره ۱۹۶۰-۲۱۰۰ بهره گرفته شده است. علاوه بر این در این مقاله نگاهی دقیق تر به نتیجه فردی هر یک از مدل ها شده تا بدین صورت چگونگی ارزیابی آن ها و داده های ایستگاهی از تغییرات دما بیان شود. در نهایت عدم قطعیت های به دست آمده با در نظر گرفتن تک تک مدل های مورد استفاده که برخی دارای بیش برآورد و یا کم برآورد بودند ارزیابی گردید تا بدین صورت متوسط ترین برآورد ممکن از میزان احتمالی افزایش دما در نیمه غربی ایران در بازه زمانی مورد مطالعه تعیین گردد.

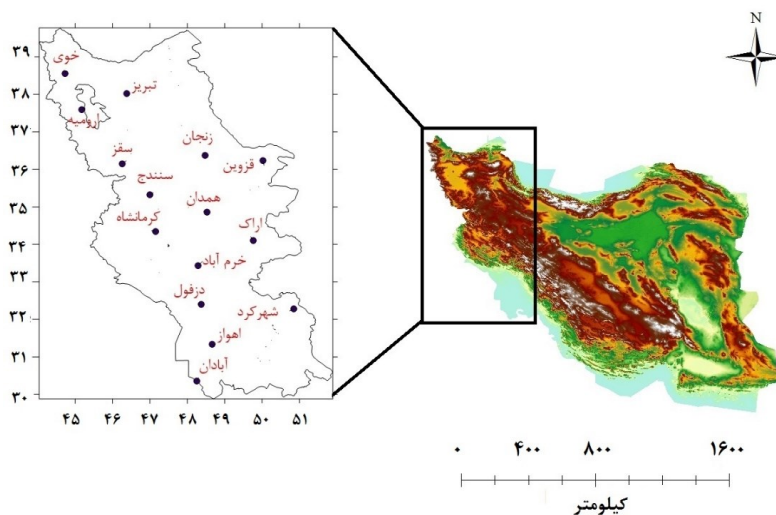
شایان توجه و تاکید است که تمامی یافته های پژوهش حاضر به مثابه یک پژوهش علمی حاوی ویژگی هایی است که «صحت مطلق» و «دقت کامل» را محدود می سازد. برای مثال معایب نمونه گیری، محدودیت در ابزار و محدودیت ابزارها، ضعف و نقص روش های پژوهش، محدودیت زمانی و محدودیت های حاصل از زمان و تفاوت های مکانی موجب اختلاف را می توان در زمره این ویژگی ها دانست. علاوه بر این، توجه کنید که جو زمین «دستگاه (سامانه) پویای غیرخطی»^۱ بشمار می آید. از این رو شناخت آن به شکل قطعی میسر نیست. بدین دلیل یافته های پژوهش حاضر را هیچگاه نمی توان با یقین و قطعیت کامل تلقی کرد. از این رو لازم است که در یافته ها عدم قطعیت در نظر گرفته شود. در نتیجه روش هایی که این عدم قطعیت را در نظر بگیرند، روش هایی کارآمدتر برای انجام پژوهش بشمار می آیند. روش های آماری - احتمالاتی روش هایی مفید و ضروری برای شناخت، بازآفرینی، برآورد و پیش بینی رفتار اقلیم از طریق مطالعه عناصر اقلیمی بشمار می آیند. با عنایت به آنچه که گفته شد و نیز به منظور بیان عدم قطعیت، «فرض های آماری»^۲ مربوط به هر بخش از تحلیل ها به لحاظ «معنی داری آماری»^۳ مورد بررسی قرار گرفت.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

داده های دمای ماهانه ۱۵ ایستگاه سینوپتیک واقع در نیمه غربی ایران و برای دوره مطالعاتی ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۰ توسط اداره هواشناسی کشوری (IRIMO) گردآوری شدند شکل (۱) و جدول (۱). ایستگاه های انتخابی دارای طول مدت اندازه گیری مناسب (حداقل ۵۰ سال) بوده و از پراکندگی مکانی خوبی برخوردار بوده اند. ارزیابی های کیفی و آماری توسط آزمون های پتی (پتی، ۱۹۷۹: ۱۲۶)، SNHT (پوهلرت، ۲۰۱۵: ۶۰۰)، بویشانند (بویشانند، ۱۹۸۲: ۱۱) و وان-نیومن (بارتلت، ۱۹۸۴: ۳۰۰) انجام گرفت. بر اساس این آزمون ها، چندین جهش در داده های دما در ایستگاه های انتخابی مشاهده گردید (در حدود دهه ۹۰).

1- Nonlinear Dynamic System
2- Statistical Hypothesises
3 - Statistical Significant



شکل (۱). موقعیت ایستگاه های انتخاب شده در منطقه مورد مطالعه

جدول (۱). ایستگاه های سینوپیک استفاده شده در این تحقیق

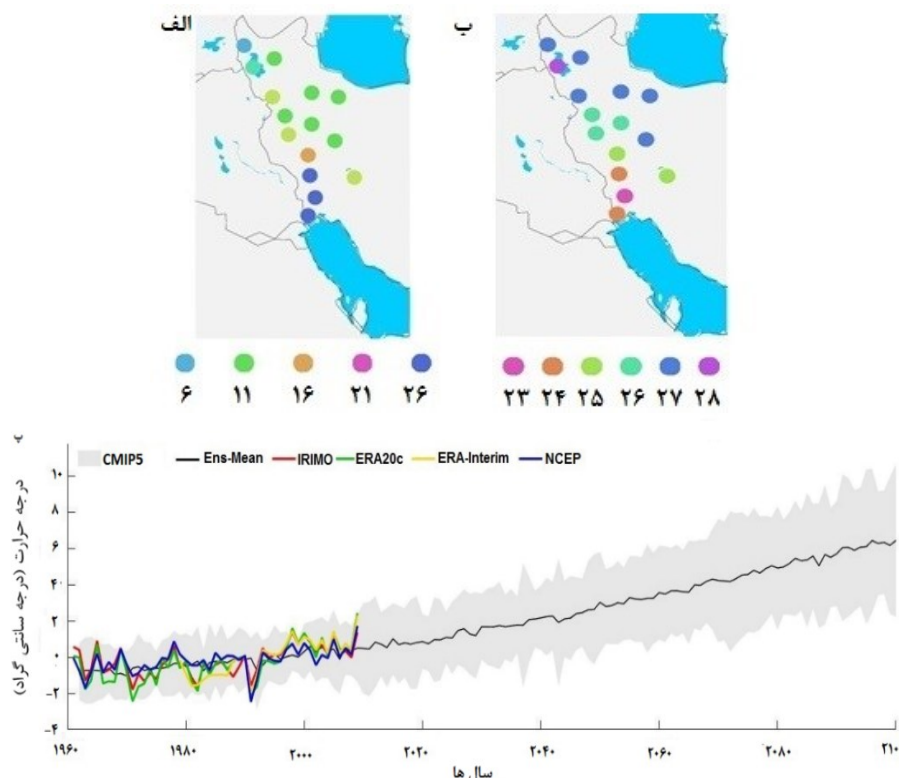
ردیف	ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع به متر
۱	خوی	۳۸° ۳۳'	۴۴° ۵۸'	۱۱۰۳
۲	ارومیه	۳۷° ۳۲'	۴۵° ۰۵'	۱۳۱۶
۳	تبریز	۳۸° ۰۵'	۴۶° ۱۷'	۱۳۶۱
۴	سقز	۳۶° ۱۵'	۴۶° ۱۶'	۱۵۲۳
۵	زنجان	۳۶° ۴۱'	۴۸° ۲۹'	۱۶۶۳
۶	قزوین	۳۶° ۱۵'	۵۰° ۰۳'	۱۲۷۹
۷	سنندج	۳۵° ۲۰'	۴۷° ۰۰'	۱۳۷۳
۸	همدان	۳۵° ۱۲'	۴۸° ۴۳'	۱۶۸۰
۹	کرمانشاه	۳۴° ۲۱'	۴۷° ۰۹'	۱۳۱۹
۱۰	اراک	۳۴° ۰۶'	۴۹° ۴۶'	۱۷۰۸
۱۱	خرم آباد	۳۳° ۲۶'	۴۸° ۱۷'	۱۱۴۸
۱۲	شهرکرد	۳۲° ۱۷'	۵۰° ۵۱'	۲۰۴۹
۱۳	دزفول	۳۲° ۰۴'	۴۸° ۳۸'	۱۴۳
۱۴	اهواز	۳۱° ۲۰'	۴۸° ۴۰'	۲۳
۱۵	آبادان	۳۱° ۱۱'	۵۲° ۴۰'	۲۰۲۰

در این تحقیق داده های ایستگاهی با سری های زمانی حاصل از پایگاه های متفاوت مانند NCEP (بازه زمانی ۲۰۱۵ - ۱۸۷۱ و توان تفکیک ۲۷۸ کیلومتر (کومپو و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۶۰))، ERA20C (بازه زمانی

۲۰۱۰-۱۹۰۰ با توان تفکیک ۱۲۵ کیلومتر (پولی و همکاران^۱، ۲۰۱۶: ۴۰۹۰)، ERA-Interim (بازه زمانی ۱۹۷۹ تاکنون و با تفکیک ۸۰ کیلومتر) و در نهایت مدل های CMIP5 (RCP8.5) (این مدل ها انتشار گازهای گلخانه ای و نیروهای تابشی را تا سال ۲۱۰۰ در حد w/m^2 ۸/۵ در نظر می گیرد) مورد مقایسه قرار گرفتند. تمامی این داده ها به صورت شبکه بندی شده و برای کل کره زمین در دسترس می باشند. سری های مورد نیاز برای هر یک از ایستگاه های انتخابی بوسیله درون یابی استخراج شدند. در ادامه به محاسبه ضریب همبستگی پیرسون و اریبی بین داده های ایستگاهی و هر یک از این مدل ها پرداخته شد. برای بررسی رفتار دما، روندهای آن ها بوسیله آزمون من کندال و تخمین گر سن (با درجه اعتماد ۹۵ درصد) برآورد شد (سن^۲، ۱۹۶۸: ۸۰). این آزمون روند، به دلیل این که توزیع آزاد بوده و حساسیت کم نسبت به جهش های محتمل در سری های زمانی دارد، انتخاب گردید (جاگوس، ۲۰۰۶: ۷۸). تحلیل ها برای داده های سالانه و فصلی صورت پذیرفته است. برای تحلیل آماری و انتخاب مناسب ترین الگو از دیاگرام تیلور، مجذور میانگین مربعات خطا و نسبت واریانس استفاده شد. لذا پارامترهای استفاده شده شامل همبستگی پیرسون، خطای RMS و انحراف معیار می باشند.

نتایج

میانگین دمای سالانه در نیمه غربی ایران دارای نوساتی در حد ۶ تا ۲۶ درجه سلسیوس بوده و به سمت جنوب نیمه غربی ایران افزایش می یابد. دامنه چرخه سالانه دما رفتاری متضاد داشته و در جنوب نسبت به شمال کمتر و در بین ۲۳ تا ۲۸ درجه سلسیوس می باشد (شکل ۲، الف و ب). شکل ۲ (پ) رفتار بلند مدت دما را بر اساس نتایج مدل های متفاوت نشان می دهد. هر یک از خطوط ناهنجاری دما برپایه هنجار دوره ۱۹۷۹-۲۰۱۰ می باشند. با توجه به این نمودارها افزایش دما (همراه با کاهش ناگهانی دما همزمان با فوران آتشفشان پیناتو در سال ۱۹۹۳) در طول قرن بیستم قابل مشاهده بوده است. درحالی که این افزایش با نزدیک تر شدن به سال ۲۱۰۰ با شیبی تندتر رخ داده است.

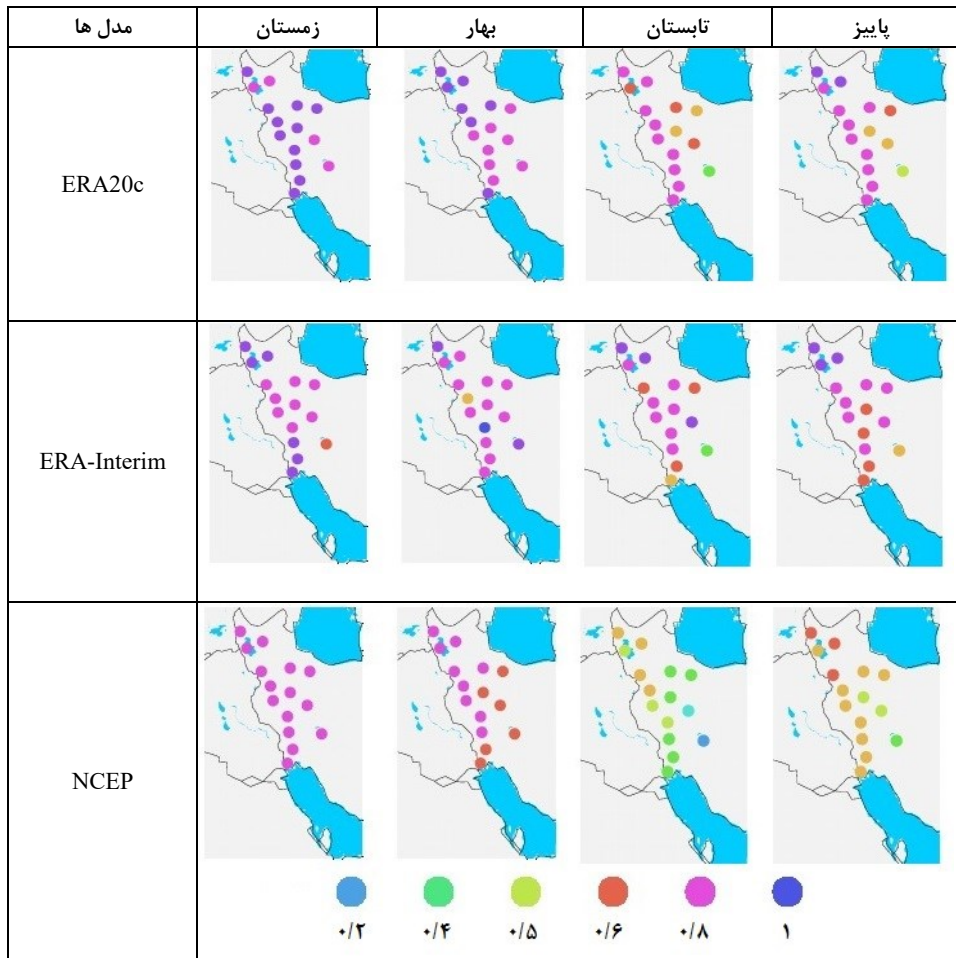


شکل (۲). متوسط دمای سالانه در نیمه غربی ایران به درجه سلسیوس (الف)؛ دامنه چرخه دمای سالانه (تفاوت گرمترین و سردترین ماه) (ب). تصویر (پ) تکامل دما در منطقه مورد مطالعه می باشد.

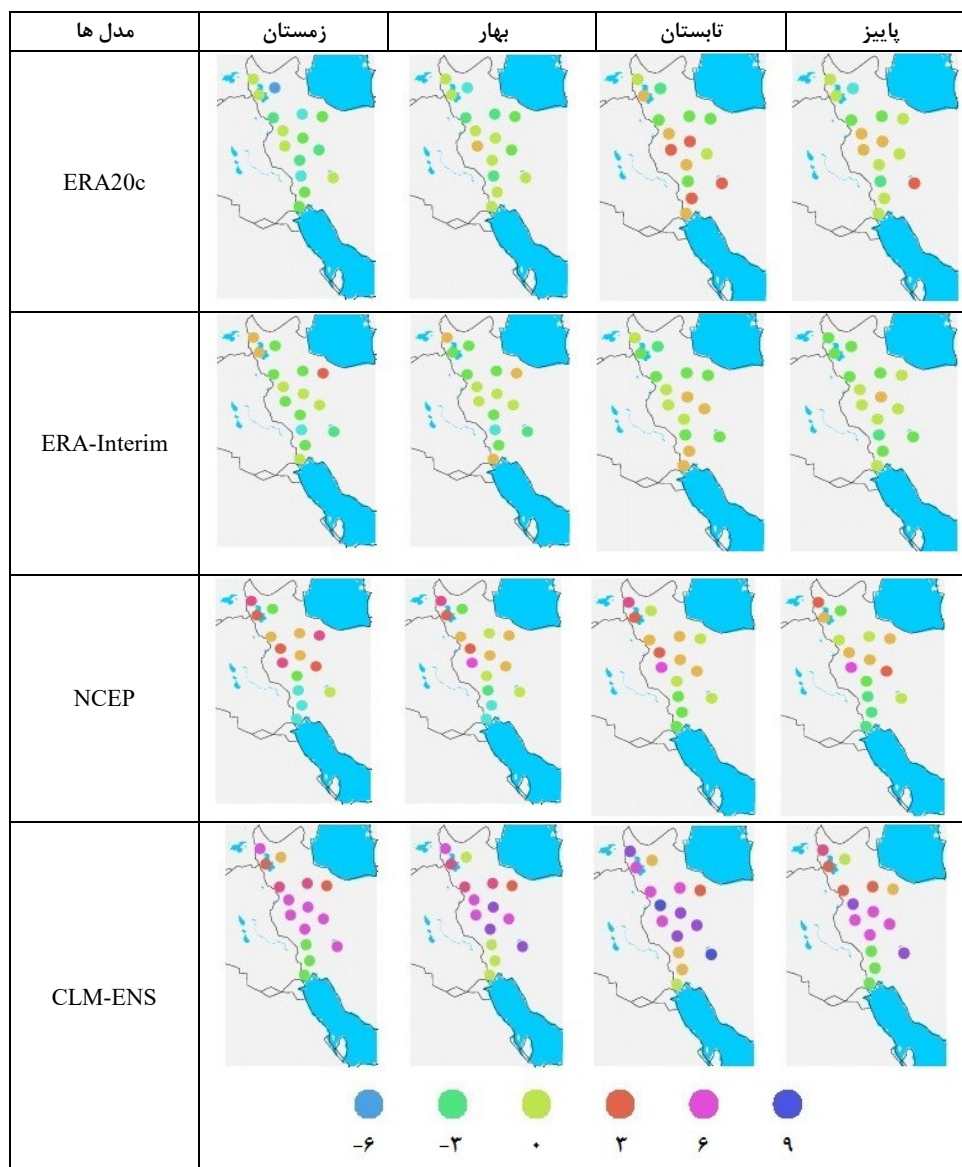
مقادیر متفاوتی از ارزیابی بین مدل های مورد استفاده با داده های ایستگاهی حاصل گردید. در این میان ERA-Interim و ERA20c از انحراف کمتری نسبت به مقادیر مشاهداتی برخوردار می باشند شکل (۳). NCEP و CLM-ENS بیشترین مقدار ارزیابی را در بر می گیرند که هر دو در بخش های مرکزی یا جنوبی منطقه مورد مطالعه به ترتیب به تخمین های بیشتر و کمتری دست یافته اند. چنین به نظر می رسد که این دو مدل به دلیل توان تفکیک خود در تشریح شیو دمایی در این منطقه از ضعف هایی برخوردارند. دو مدل دیگر ارزیابی کمتری داشته و این به معنی نزدیکی بیشتر با داده های واقعی می باشد. همبستگی بین داده های ایستگاهی با مدل های مختلف در تمام فصول بالا بوده و تنها NCEP مقادیر کمتری را در طی تابستان و پاییز نشان می دهد شکل (۴). نتایج به دست آمده از محاسبه روندها نشان دهنده تشابه نتایج همه آن ها (به جز NCEP) در وجود روند مثبت معنی دار در بهار، تابستان و پاییز می باشد. تنها در فصل زمستان روند مثبت معنی دار در نتایج مدل ERA-Interim دیده شد. نقاط سیاه نشان دهنده ایستگاه هایی با روندهای غیر معنی دار هستند. فصل بهار و تابستان بیشترین میزان روندهای معنی دار را به خود اختصاص داده و تنها ERA-Interim زمستان روند معنی دار قابل ملاحظه را به نمایش می گذارد. مدل های CMIP5 برای دوره (۲۰۵۰-۲۱۰۰)

مقادیری بین ۲ تا ۴ درجه سلسیوس در صد سال را برای فصول مختلف به همراه داشته است که نسبت به نتایج دیگر مدل ها برای دوره ۱۹۷۹-۲۰۱۰ کمتر می باشد شکل (۵).

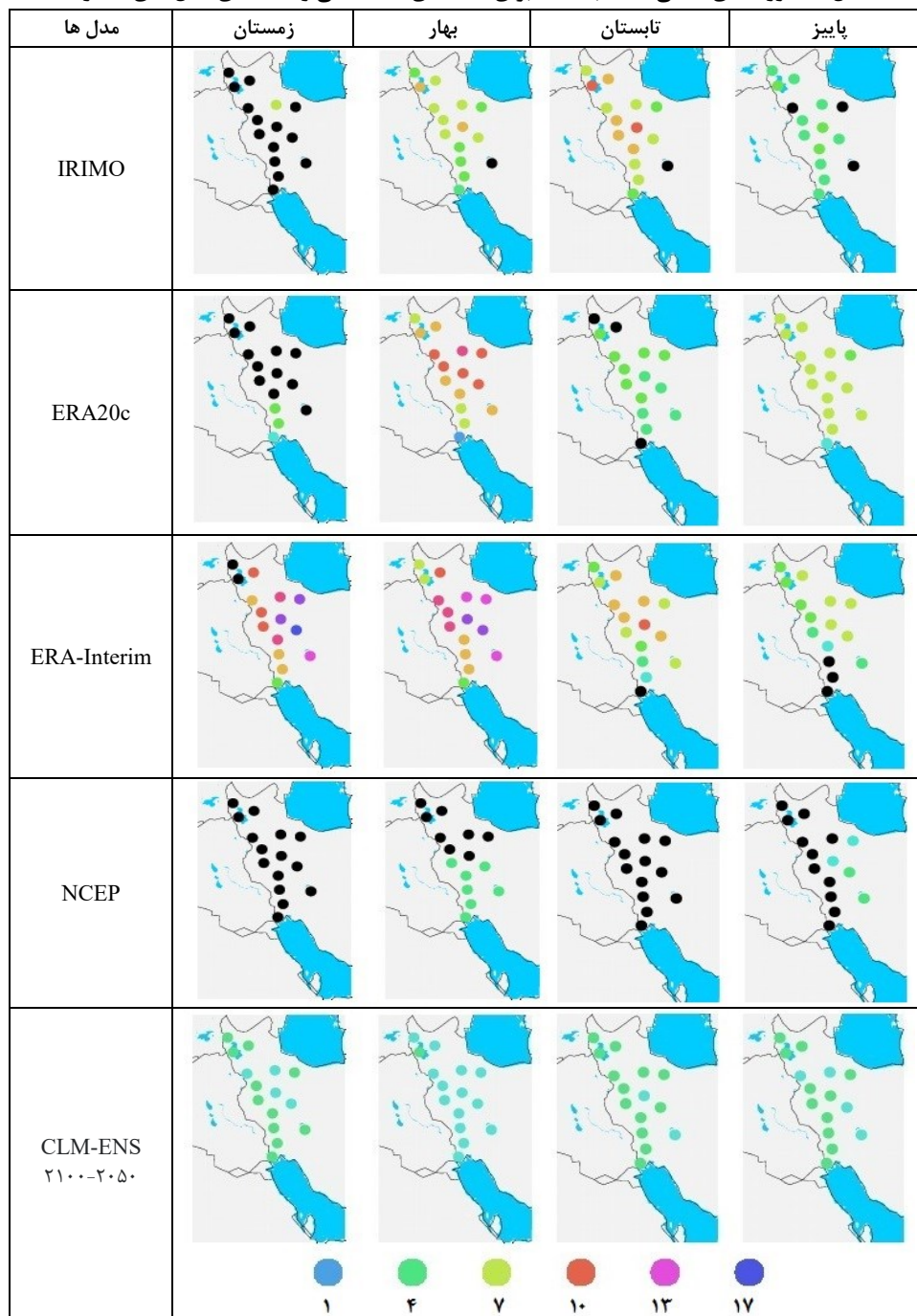
شکل (۳). اریبی های فصلی محاسبه شده بین داده های مشاهداتی و داده های مدل های متفاوت



شکل (۴). همبستگی فصلی محاسبه شده بین داده های مشاهداتی و داده های مدل های متفاوت



شکل (۵). روندهای فصلی محاسبه شده برای داده های مشاهداتی و داده های مدل های متفاوت



جدول (۲) مقادیر روند محاسبه شده برای هر یک از مدل ها را در کل نیمه غربی ایران به نمایش می گذارد. برای درک بهتر نتایج، محاسبه روندها برای ۳ صدک ۵، ۵۰ و ۹۵ انجام گرفت. مدل ERA-Interim مقادیر

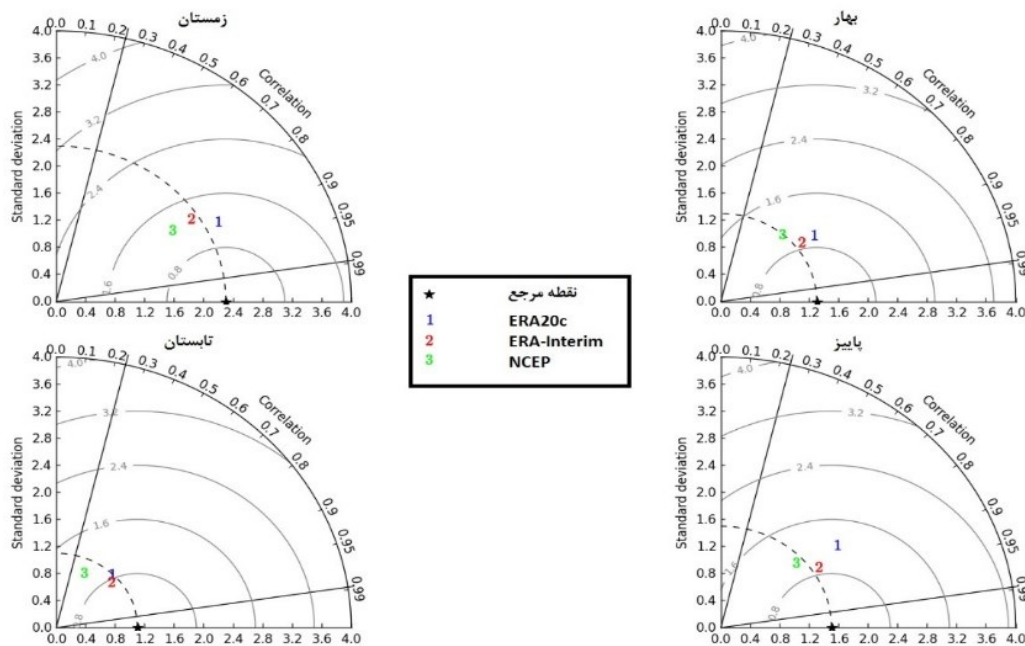
بزرگتری (در حدود ۹ درجه سلسیوس) داشته است. این مقدار به دلیل پراکندگی مقادیر آن بین صدک پنجم و صدک ۹۵ می باشد و با روندهای به دست آمده برای ERA20c و داده های مشاهداتی نزدیک تر است. در حالی که NCEP مقادیر کمتری (۲ درجه سلسیوس) را نشان می دهد. ERA20c و داده های مشاهداتی در مورد شدت بیشتر گرمایش در طی دوره ۱۹۷۹-۲۰۱۰ نسبت ۱۹۶۰-۲۰۱۰ به یکدیگر نزدیک ترند. برای دوره ۲۰۱۰-۱۹۶۰ مقداری تقریباً برابر با ۳ درجه سلسیوس در صد سال بیان کننده هماهنگی بین مشاهدات، ERA-Interim و CMIP5 ها می باشد. نتایج به دست آمده از CMIP5 ها و میانگین آنها افزایش دما در منطقه مورد مطالعه را تایید کرده و مقدار ۷ درجه سلسیوس در صد سال را برای نیمه دوم قرن ۲۱ نشان می دهند.

جدول (۲). روند داده های حاصل از سازمان هواشناسی، داده های تحلیل شده و مدل های اقلیمی برای میانگین دمای سالانه بر حسب سلسیوس در قرن با در نظر گرفتن مقادیر میانگین برای تمام نیمه غربی ایران. به این منظور سه دوره زمانی ۲۰۱۰-۱۹۶۱، ۲۰۱۰-۱۹۷۹ و ۲۰۱۰-۲۰۵۰ در نظر گرفته شدند. برای هر دوره مقادیر ۵، ۵۰ و ۹۵ درصدی گزارش شدند. ستاره ها اشاره به معنی داری آماری در سطح یقین ۹۵ درصدی دارند.

روند دما (سانتیمتر در قرن)									مدل ها
۲۰۵۰-۲۰۱۰			۱۹۷۹-۲۰۱۰			۱۹۶۱-۲۰۱۰			
۹۵	۵۰	۵	۹۵	۵۰	۵	۹۵	۵۰	۵	
-	-	-	*۸/۳	*۵/۷	*۲/۹	*۴/۷	*۳	*۱/۶	IRIMO
-	-	-	*۹/۲	*۶/۴	*۳	*۶/۲	*۴/۶	*۲/۸	ERA20C
-	-	-	*۱۲/۱	*۹/۱	*۶/۳	-	-	-	ERA-Interim
-	-	-	*۴/۲	*۱/۹	*۰/۸	*۳/۴	*۲/۳	*۱/۳	NCEP
*۷/۴	*۶/۵	*۵/۶	*۷	*۵/۳	*۲/۸	*۴/۸	*۳/۶	*۲/۴	ACCESS1
*۷/۲	*۶/۲	*۵/۲	*۶/۹	*۴/۳	*۱/۹	*۴/۸	*۳/۷	*۲/۸	Bcc-Csm1-lm
*۶/۶	*۵/۶	*۴/۷	*۷/۳	*۴/۷	*۲/۶	*۵	*۴	*۲/۹	Bcc-Csm1-1
*۷/۶	*۶/۵	*۵/۲	*۴/۵	*۲/۴	*۰	*۳/۶	*۲/۶	*۱/۵	Bnu-Esm
*۸/۲	*۷/۴	*۶/۷	*۶/۹	*۵	*۲/۷	*۵/۱	*۴/۲	*۳/۲	CanEsm2
*۶/۸	*۶	*۵	*۵/۹	*۴/۲	*۲/۴	*۴/۶	*۳/۶	*۲/۶	CCSM4
*۹/۳	*۴/۸	*۷/۴	*۳/۱	۱	*-۱/۸	*۳/۱	*۲/۱	*۱/۱	Cmcc-Csm
*۸/۱	*۷/۴	*۶/۴	*۵/۶	*۳/۶	*۱/۶	*۳/۱	*۲/۱	*۱/۲	CSIRO-MK3
*۹/۷	*۸/۶	*۷/۴	*۵/۹	*۳/۹	*۱/۹	*۳/۹	*۲/۹	*۱/۸	HadGEM2-CC
*۸/۲	*۷	*۵/۸	*۳/۲	*۰/۵	*-۱/۹	*۳/۲	*۲	*۰/۸	IPSL-CM5A-LR
*۱۰/۱	*۹	*۷/۹	*۴/۵	*۳/۳	*۱/۹	*۳/۱	*۲/۴	*۱/۶	MIROC-ESM-CHEM
*۱۱/۳	*۱۰/۵	*۹/۶	*۴/۹	*۳/۲	*۱/۵	*۳/۳	*۲/۳	*۱/۳	MIROC-ESM
*۱۱/۳	*۱۰/۵	*۹/۶	*۷	*۴/۹	*۳/۱	*۴/۶	*۳/۶	*۲/۴	MPI-ESM
*۷/۱	*۶/۴	*۵/۷	۳	۱/۴	۰	*۳/۱	*۲/۳	*۱/۴	NorESM1-M
۷/۸	*۷/۶	۷/۳	۳/۹	۳/۳	۲/۷	۳/۲	۲/۹	۲/۶	ENS-Mean

نمودار تیلور بر اساس داده های مشاهداتی و ۳ مدل ERA20c، ERA-Interim و NCEP و به شکل فصلی ترسیم شده است (شکل ۶). در این نمودار همبستگی، انحراف معیار داده ها و ریشه میانگین مربع خطا محاسبه

ومدل های مختلف با شماره هایی نمایش داده می شوند. با توجه به این نمودار کمترین همبستگی مربوط به فصل تابستان بوده و بیشترین میزان همبستگی به فصل زمستان مربوط می باشد. داده های واکاوی شده دمایی فصلی در تابستان نسبت به سایر فصول از کمترین انطباق برخوردار بوده و این امر برای داده های NCEP قابل توجه تر می باشد.



شکل (۶). نمودار تیلور توصیف کننده روابط بین مجموعه داده های متفاوت و دمایی فصلی.

نتیجه گیری

دما از عناصر اساسی آب و هوا بوده و تغییرات آن می تواند ساختار آب و هوایی هر منطقه ای را دگرگون سازد، لذا بررسی روند دما در مقیاس های مختلف زمانی و مکانی از اهمیت بسیاری برخوردار می باشد. بدین منظور ۱۵ ایستگاه سینوپتیک در نیمه غربی ایران و برای دوره ۱۹۶۰-۲۰۱۰ انتخاب گردید. سری های زمانی دما بعد از آزمون های مختلف با داده های حاصل از مدل های ERA-Interim، ERA-20C، ERA- و NCEP، داده های سری های زمانی با داده های مشاهداتی به محاسبه اریبی میان آن ها پرداخته شد. بر این اساس ERA-Interim و ERA20c از انحراف کمتری نسبت به داده های مشاهداتی برخوردار بودند در حالیکه بیشترین میزان اریبی به NCEP و داده های CMIP5 مربوط می شود که هر دو در بخش های مرکزی یا جنوبی منطقه مورد مطالعه به ترتیب به تخمین های بیشتر و کمتری دست یافته اند. دو مدل دیگر یعنی ERA-Interim و ERA-20C اریبی های کمتری داشته و این به معنی نزدیکی بیشتر با داده های واقعی می باشد. همبستگی بین داده های ایستگاهی با مدل های مختلف در تمام فصول بالا بوده و تنها NCEP مقادیر کمتری را در طی تابستان و پاییز نشان می دهد. در نهایت نتایج حاصل از محاسبه روندها نشان دهنده تشابه نتایج همه آن ها

(به جز NCEP) در وجود روند مثبت معنی دار در بهار، تابستان و پاییز می باشد. تنها در فصل زمستان روند مثبت معنی دار در نتایج مدل ERA-Interim دیده شد. برای نمایش ایستگاه های بدون روند معنی دار از نقاط سیاه رنگ استفاده شد. مدل های CMIP5 برای دوره (۲۰۵۰-۲۱۰۰) مقادیری بین ۲ تا ۴ درجه سلسیوس در صد سال را برای فصول مختلف به همراه داشته که نسبت به نتایج دیگر مدل ها برای دوره ۱۹۷۹-۲۰۱۰ کمتر می باشد. برای درک بهتر نتایج، به محاسبه روند هر یک از مدل های انتخابی برای کل محدوده مورد مطالعه پرداخته شد. محاسبه روندها برای ۳ صدک ۵، ۵۰ و ۹۵ انجام گرفت. مدل ERA-Interim مقادیر بزرگتری (۹ درجه سلسیوس در صد سال) داشته که این مقدار به دلیل پراکندگی آن بین صدک پنجم و صدک ۹۵ می باشد. در حالی که NCEP مقادیر کمتری (۲ درجه سلسیوس در صد سال) دارد. نتایج به دست آمده از CMIP5 ها و میانگین آن ها افزایش دما در منطقه مورد مطالعه را تایید کرده و مقدار ۷ درجه سلسیوس در صد سال را برای نیمه دوم قرن ۲۱ (۲۰۵۰-۲۱۰۰) برآورد می نماید. برای بررسی وضعیت هر یک از مدل های ERA-Interim، ERA-20C و NCEP در تبیین دما در نیمه غربی ایران و در فصول مختلف از نمودار تیلور استفاده شد. بر اساس این نمودار کمترین همبستگی مربوط به فصل تابستان بوده و بیشترین میزان همبستگی به فصل زمستان مربوط می باشد. NCEP نسبت به دو مدل دیگر از هماهنگی کمتری با داده های ایستگاهی برخوردار می باشد.

بیان مقادیر قطعی میزان تغییرات روند پارامترهای آب و هوایی که تا حد زیادی وابسته به قابلیت و توان تفکیک هر یک از مدل های مورد استفاده است، ممکن نمی باشد. با این حال با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق، دیگر مطالعات و همچنین گزارش های IPCC می توان نتیجه گرفت که دو برابر شدن افزایش دما در منطقه مورد مطالعه در نیمه دوم قرن ۲۱ محتمل و غیر قابل اجتناب خواهد بود. همانطور که قویدل و همکاران (۱۳۸۴)، در مقاله ایی به بررسی تغییر اقلیم پرداخته و به این نتیجه رسیده اند که در شرایط دو برابر شدن CO2 مدت و شدت دوره های سرد و یخبندان کاهش یافته و همچنین از میزان بارش های بهار و زمستانی کاسته شده و بارش های زمستانی از برف به باران تغییر پیدا خواهند کرد، علاوه بر این در این مقاله به افزایش دما و به طبع آن خشکی بیشتر هوا نیز اشاره شده است. در مقاله ایی دیگر قویدل و همکاران (۱۳۹۲) به این نتیجه رسیده اند که با در نظر گرفتن افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه ایی، افزایش دما در ایران مملوس بوده که در بخش های مرکز و جنوب شرقی مشهود تر خواهد بود. با توجه به تمام موارد ذکر شده مهم است که درک و آگاهی درستی از تغییرات دما در مناطق خشک و نیمه خشک کشور داشته باشیم که همواره از کمبود آب رنج می برند. نکته مهم در تغییرات منطقه ای بارش و دما، منطبق بودن بیشترین کاهش بارش و بیشترین افزایش دما بر روی منطقه زاگرس و پس از آن در منطقه شمال غرب است مناطقی که هم اکنون درگیر مشکلات زیست محیطی مانند وقوع گرد و خاک، خشکسالی های گسترده، آتش سوزی و خشک شدن درختان جنگلی، کاهش شدید سطح آب دریاچه ارومیه و حذف برخی اکوسیستم های طبیعی می باشند. ادامه چنین وضعیتی موجب تشدید مشکلات زیست محیطی در مناطق یادشده می گردد. لذا باید برنامه ای جامع برای کاهش اثرات تغییر اقلیم در مناطق غربی کشور تدوین و حتی در برخی برنامه های توسعه کشاورزی و منابع آب آن تجدید نظر صورت پذیرد (سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۶).

منابع

- خورشیددوست، علی محمد. قویدل، یوسف. (۱۳۸۵). شبیه سازی آثار دو برابر شدن دی اکسید کربن جو بر تغییرات اقلیم تبریز با استفاده از مدل آزمایشگاهی پویایی سیالات ژئوفیزیکی (GFDL). مجله محیط شناسی، ۹: ۱-۱۰.
- رسولی، اکبر (۱۳۸۱). تحلیل مقدماتی سری های زمانی دمای هوای شهر تبریز. نیوار، ۴۶ و ۴۷. ۲۶-۷.
- سبزی پرور، علی اکبر. سیف، زهرا. قیامی، فرشته، (۱۳۹۲). تحلیل روند دما در برخی از ایستگاه های مناطق خشک و نیمه خشک کشور. ۱۱(۱۱): ۱۱۷-۱۳۸.
- سازمان هواشناسی کشور (۱۳۹۶). آشکارسازی، ارزیابی اثرات و چشم انداز تغییر اقلیم در ایران طی قرن بیست و یکم. دفتر مرجع ملی هیات بین الدولی تغییر اقلیم (IPCC) پژوهشکده اقلیم شناسی - مشهد.
- طاوسی، تقی. رخشانی، زینب. فیروزی، فاطمه (۱۳۹۳). تحلیل روند تغییرات بیشینه و کمینه دمای فصلی و سالانه استان فارس با استفاده از روشهای ناپارامتری. مجله علمی و ترویجی نیوار. ۸۶ (۸۷)، ۲۹-۳۸.
- ظهرایی، نرگس. مساح بوانی، علیرضا. گودرزی، الهه، حیدر نژاد، محمد (۱۳۹۵). شناسایی روند تغییرات دما و بارش سالانه در حوضه آبریز کرخه. فصلنامه علمی پژوهشی اکویولوژی تالاب- دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز. ۸۲ (۸۸).
- عساکره، حسین. اکبرزاده، یونس، (۱۳۹۶). شبیه سازی تغییرات دما و بارش ایستگاه سینوپتیک تبریز طی دوره (۲۰۱۰-۲۱۰۰) با استفاده از ریزمقیاس نمایی آماری (SDSM) و خروجی مدل CanESM. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۶ (۲۱): ۱۷۴-۱۵۳.
- قویدل، یوسف. فرج زاده، منوچهر. صالحیان، مسعود. (۱۳۹۷). تحلیل نقش گاز دی اکسید کربن در نوسانات دمای حداکثر فصلی ایران. جغرافیا و برنامه ریزی. ۲۲ (۶۳): ۲۰۳-۲۲۳.
- مسعودیان، سید ابوالفضل. (۱۳۸۳). بررسی روند دمای ایران در نیم سده گذشته. مجله جغرافیا و توسعه.
- Alijani, B. O'Brien, J. Yarna, B. (2008). **Spatial analysis of precipitation intensity and concentration in Iran**. *Theor. Appl. Climatol.* 94: 107-124.
- Barros, Vicente Ricardo., Boninsegna, José Armando., Camilloni, Inés Angela., Chidiak, Martina., Magrín, Graciela Odilia., Rusticucci, Matilde. (2015). **Climate change in Argentina: trends, projections, impacts and adaptation**. *WIREs Clim Change* 2015, 6:151-169.
- Buishand TA (1982). **Some Methods for Testing the Homogeneity of Rainfall Records**. *Journal of Hydrology*, 58, 11-27.
- Bartels, Robert. (1984). **The Rank von Neumann Test as A Test for Autocorrelation in Regression Models**. *Communication in Statistics- Theory and Methods*. 300pp. DOI: 13. 2495-2502. 10.1080/03.
- Christopher J. Martinez., Jerome J. Maleski., Martin F. Miller. (2012). **Trends in precipitation and temperature in Florida, USA**. *Journal of Hydrology* 452(453). 259-281.
- Compo, G P. Whitaker, J S. Sardeshmukh, P D. Matsui, N. Allan, R J. Yin, X. Brönnimann, S. (2011). **The twentieth century reanalysis project**. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(654). 160-170. 1-28.
- Dinpashoh, Y. (2006). **Study of reference crop evapotranspiration in I. R. of Iran**. *Agricultural Water Management*. 84, 123-129.

- Del Río, S., Herrero, L., Pinto-Gomes, C., Penas, A. (2011). **Spatial analysis of mean temperature trends in Spain over the period 1961–2006**. *Global and Planetary Change* 78, 65–75.
- Easterling, D. R., B. Horton, P. D. Jones, T. C. Peterson, T. R. Karl, D. E. Parker, M. J. Saliger, V. Razuvayev, N. Plummer, P. Jamason, and C. K. Folland., (1997). **Maximum and minimum temperature trends for the globe**. *Science*, 277, 364-366.
- Grieser J., S. Tromel, C.D. Schonwiese (2002). **Statistical time series decomposition into significant components and application to European temperature**, *Theor. Appl. Climatol.* 71, PP. 171-183.
- IPCC. (2014). **Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2014**. [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jaagus, J. (2006). **Climatic changes in Estonia during the second half of the 20th century in relationship with changes in large-scale atmospheric circulation**. *Theoretical and Applied Climatology*. 83, 77–88.
- Kass E, Frich P (1995). **Daily temperature range and cloud cover in the Nordic countries: observed trends and estimates for the future**. *Atmos Res* 37: 211–228
- Kousari MR, Asadi Zarch MA. (2011). **Minimum, maximum, and mean annual temperatures, relative humidity, and precipitation trends in arid and semi-arid regions of Iran**. *Arab J Geosci*. 907–914 pp. DOI: 10.1007/s12517-009-0113-6.
- Kousari, Mohammad Reza. Ekhtesasi, Mohammad Reza. Tazeh, Mehdi. Saremi Naeini, Mohammad Ali. Asadi Zarch, Mohammad Amin. (2011). **an investigation of the Iranian climatic changes by considering the precipitation, temperature, and relative humidity parameters**. *Theor Appl Climatol.* 103, 321–335.
- Kousari, Mohammad Reza. Ahani, Hossein, Hendi-zadeh, Razieh. (2013). **Temporal and spatial trend detection of maximum air temperature in Iran during 1960–2005**. *Global and Planetary Change*. 111, 97–110.
- Niedzwiedz T, Ustrnul Z, Szalai S, Weber RO (1996). **Trends of maximum and minimum daily temperatures in central and southeastern Europe**. *Int J Climatol* 16:765– 782.
- Nicolas, N., G. Gruza, J. Jouzel, T. Carl, L. Ogallo, and D. Parker. (1996). **Observed climate variability and change**. In: **IPCC 1995**. The Second IPCC scientific assessment of climate change. J. Houghton & L. Meira Filho, eds. Cambridge Univ. Press.
- Pettitt, AN. (1979). **A non-parametric approach to the change-point problem**. *Appl. Statist.*, 28, 126–135.
- Pohlert, Thorsten. (2015). **Trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection**. R package version 0.0.1. 600pp. DOI:10.13140/RG.2.1.2633.4243.
- Poli, P. Hersbach, H. Dee, D P. Berrisford, P. Simmons, A J. Vitart, F. Trémolet, Y. (2016). **ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century**. *Journal of Climate*. 29(11): 4083-4097.
- Sen, P.K. (1968). **Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau**. *Journal of the American Statistical Association*. 63 (324). 80.
- Saboohi, R., Soltani, S., Khodagholi, M. (2012) **Trend analysis of temperature parameters in Iran**. *Theor. Appl. Climatol.* 109 (4), 529–547.
- Saymohammadi, Samireh. Zarafshani, Kiumars. Tavakoli, Mohsen. Mahdizadeh, Hossien. Amiri, Farzad. (2017). **Prediction of Climate Change Induced Temperature & Precipitation: The Case of Iran**. *Sustainability*. 9-146; DOI: 10.3390/su9010146.

- Tabari, H. Somee, Behzad. Rezaeian Zadeh, Mehdi, Hossein. (2011). **Testing for long-term trends in climatic variables in Iran** Atmospheric Research 100. 132-140.
- Walter, G.R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesean, T. J. Beebee, J. M. Formentin, O. Hoegh-Guldberg, and F. Bairlein., 2002. **Ecological responses to recent climate change.** Nature 416, 389-395.
- Yue S., M. Hashino (2003). **Temperature trends in Japan: 1900-1996.** Theor. Appl. Climatol. 75, 15-27.
- Zarenistanak, Mohammad. Dhorde, Amit G. Kripalani, R H. (2014). **Trend analysis and change point detection of annual and seasonal precipitation and temperature series over southwest Iran.** Earth Syst. Sci. 2, 281-295.