

اثرات گرمایش جهانی بر روند فرین‌های دمای روزانه در ایستگاه‌های منطقه خزری

فیروز رنجبر^۱، روح اله اوجی^{۲*}

^۱دانش آموخته دکتری اقلیم‌شناسی، پژوهشگر دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

^۲استادیار، گروه جغرافیا، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۹۹/۵/۱۰

چکیده

رویدادهای اقلیمی حدی، پدیده‌های نادری هستند که از نظر شدت و فراوانی کمیاب بوده و از آنجایی که اکوسیستم‌ها و ساختارهای فیزیکی جوامع انسانی با شرایط اقلیمی بهنجار تنظیم شده‌اند، در زمان رخداد این پدیده‌ها، به‌ندرت می‌توانند خود را تجهیز و آماده کنند، در نتیجه تغییر در زمان وقوع رویدادهای حدی اغلب می‌تواند آثار چشمگیری بر اکوسیستم‌ها و جامعه نسبت به تغییر در شرایط متوسط جوی داشته باشد. هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی روند فرین‌های دمایی ایستگاه‌های نوار شمالی کشور می‌باشد. روند فرین‌های دمایی در دو دوره مشاهداتی ۲۰۱۵-۱۹۸۲ و دوره آینده ۲۰۵۵-۲۰۲۰ استخراج شده است. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش حداقل و حداکثر دمای ثبت شده ایستگاه‌های مورد مطالعه به صورت روزانه بوده و برای دوره آینده نیز از خروجی ریزمقیاس شده مدل گردش عمومی CanESM^۲ بر اساس سناریوهای RCP ۴.۵ و RCP ۸.۵ استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان داد حداقل و حداکثر روزانه ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره آینده با افزایش مواجه می‌باشد که این افزایش بر اساس سناریوی RCP ۸.۵ با شیب بیشتری همراه است. به طور نسبی ایستگاه گرگان بیشترین افزایش دما را در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه دارا می‌باشد. بررسی آماری نشان می‌دهد در همه ایستگاه‌ها و در هر دور دوره مشاهداتی و مدل شده، شاخص‌های فرین دمایی با روند و تغییراتی همراه هستند به طوری که فرین‌های سرد (روزهای یخی ID، شب‌های سرد TN^{۱۰p}، روزهای یخبندان FD و روزهای سرد TX^{۱۰p}) با شیب کاهشی و فرین‌های گرم (روزهای تابستانی SU^{۲۵}، شب‌های حاره‌ای TR^{۲۰}، شب‌های گرم TN^{۹۰p} و روزهای گرم TX^{۹۰p}) با شیب افزایشی در هر دو دوره مشاهداتی و آینده مواجه هستند. به نظر می‌رسد شیب برخی شاخص‌های مربوط به دمای شبانه مانند شب‌های حاره‌ای و شب‌های گرم، نسبت به سایر شاخص‌ها از شدت بیشتری برخوردار است. در مجموع با توجه به روند افزایشی در فرین‌های گرم و شیب کاهشی در فرین‌های سرد، منطقه مورد مطالعه به لحاظ دمایی به سمت گرمایش پیش خواهد رفت.

واژه‌های کلیدی: فرین‌های دمایی، گرمایش جهانی، سناریو، منطقه خزری.

مقدمه

طی چند دهه اخیر، فعالیت‌های انسانی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییر در چشم‌اندازهای طبیعی و غیره، مسئله‌ای را به نام گرمایش جهانی شکل داده که هم‌اکنون یکی از موضوعات بحث‌برانگیز در تمام مجامع جهانی می‌باشد. بر اساس گزارش پنجم IPCC اغلب مدل‌های اقلیمی پیش‌بینی می‌کنند که سطح دمای جهانی دما تا پایان قرن ۲۱ نسبت به دوره ۱۸۵۰-۱۹۹۰ بیش از ۱/۵ درجه-

سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. البته با دید بدبینانه این میزان به حدود ۲ درجه خواهد رسید (سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۳). گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی جنبه‌های مختلف طبیعی و انسانی مانند کشاورزی، انرژی، اقتصاد، گردشگری، منابع آب و ... را تحت تأثیر قرار داده است. تغییرات اقلیمی و افزایش دما می‌تواند فرین‌های مرتبط با اقلیم را نیز دچار تغییر نماید. رویدادهای اقلیمی حدی، پدیده‌های نادری هستند (علیچانی و فرج‌زاده، ۱۳۹۴) که از نظر شدت و فراوانی کمیاب بوده و از آنجایی که اکوسیستم‌ها و

کاهش وجود دارد. زانگ و همکاران (۲۰۰۵)^۳ روندها در شاخص‌های حدی اقلیمی در خاورمیانه طی دوره ۱۹۵۰-۲۰۰۳ را با استفاده از داده‌های اقلیمی ۵۲ ایستگاه در ۱۵ کشور خاورمیانه (شامل ایران، عراق، ارمنستان، آذربایجان، بحرین، سوریه، ترکیه، گرجستان، فلسطین اشغالی، اردن، کویت، عمان، قطر، عربستان سعودی و قبرس) مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش حاکی از یک افزایش در دماهای کمینه و بیشینه سالانه بوده است. تعداد روزهای تابستانی نیز با افزایش مواجه بوده است. نتایج پژوهش وینسنت و همکاران^۴ (۲۰۰۵) در آمریکای جنوبی نشان داد، برای دوره ۱۹۶۰-۲۰۰۰ تغییرات قوی در دمای بیشینه مشاهده نمی‌شود اما در شاخص‌های کمینه دما یک روند قابل توجه وجود دارد و یک افزایش قابل توجه در شب‌های گرم و یک روند کاهشی در شب‌های سرد مشاهده شد. همچنین نیو و همکاران^۵ (۲۰۰۶) نشان دادند در جنوب و غرب آفریقا تعداد روزها و شب‌های سرد در حدود ۳/۷ و ۶ روز در دهه با کاهش روبرو بوده است.

مطالعات بر روی روند حدهای اقلیمی در ایران نیز همانند مطالعات جهانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و از آن جمله می‌توان به تحقیقات رنجبر (۱۳۹۵)، هدایتی (۱۳۸۲)، تقوی (۱۳۸۴)، محمدی و تقوی (۱۳۸۴)، تقوی و محمدی (۱۳۸۶)، عسگری و همکاران (۱۳۸۶)، ورشاپویان و همکاران (۱۳۹۰)، رحیم زاده و همکاران (۱۳۹۰) و اسدی و حیدری (۱۳۹۰) اشاره نمود. بررسی مطالعات حدهای اقلیمی در ایران نشان می‌دهد، روند شاخص‌های حدی دما و بارش در تمام کشور توزیع یکسانی ندارد. اما به‌طور کلی حدهای گرم دمایی دارای روند افزایشی می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد کمینه‌های دمایی نیز در بیشتر نواحی دارای شیب مثبت است.

پژوهش حاضر به منظور بررسی رفتار فرین‌های دمایی ایستگاه‌های نوار شمالی کشور در دو دوره مشاهداتی و آینده صورت گرفته است. نوار شمالی

ساختارهای فیزیکی جوامع انسانی با شرایط اقلیمی بهنجار تنظیم شده‌اند، در زمان رخداد این پدیده‌ها، به‌ندرت می‌توانند خود را تجهیز و آماده کنند، در نتیجه تغییر در زمان وقوع رویدادهای حدی اغلب می‌تواند آثار چشمگیری بر اکوسیستم‌ها و جامعه نسبت به تغییر در شرایط متوسط جوی داشته باشد (تقوی، ۱۳۸۶). بنابراین رویدادهای فرین جوی به حوادث نادر و دور از شرایط بهنجار گفته می‌شود و در دنباله توزیع فراوانی و دور از نقطه تمرکز توزیع (میانگین و میانه) قرار گرفته است (عساکره، ۱۳۹۱). در یک تعریف دیگر، یک رخداد حدی اقلیمی عبارت است از وقوع بالاتر یا پایین تر یک متغیر جوی یا اقلیمی از مقادیر یک آستانه در یک دوره مشخص تعریف شده (فرانک و همکاران، ۲۰۱۵).

اهمیت شناخت رفتار فرین‌های اقلیمی از آنجا اهمیت می‌یابد که شناخت رفتار حدهای اقلیمی، امکان و فرصت مهیا شدن برای اتخاذ تدابیر مدیریتی- برنامه-ریزی و استراتژی مقابله، ترمیم، تقویت، بازسازی و یا سازگاری با این پدیده را مهیا می‌سازد (عساکره، ۱۳۹۱).

با اهمیت یافتن مطالعات تغییر اقلیم در جهان، مطالعات زیادی درباره تولید شاخص‌های اقلیمی و چگونگی تغییر و روند در فرین‌های اقلیمی به خصوص فرین‌های دمایی صورت گرفته است. مانتون و همکاران^۱ (۲۰۰۱) روند دمای حدی روزانه در جنوب شرق آسیا و جنوب اقیانوس آرام را طی دوره ۱۹۶۱-۱۹۹۸ مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج این تحقیق تعداد سالانه روزهای داغ و شب‌های گرم با افزایش و تعداد روزهای سرد و شب‌های سرد با کاهش روبرو بوده است.

کلین و کونن^۲ (۲۰۰۳) با استفاده از داده‌های اقلیمی ۱۰۰ ایستگاه هواشناسی به بررسی روند شاخص‌های حدی دما و بارش در اروپا پرداختند. بر اساس نتایج آنها در طول دوره مطالعاتی ۱۹۴۶-۱۹۹۹ در حدهای گرم دمایی افزایش و در حدهای سرد یک

۳. Zhang et al.

۴. Vincent et al.

۵. New et al.

۱. Manton et al.

۲. Klein and Konnen

داده‌ها و روش تحقیق

پژوهش حاضر به منظور بررسی روند فرین‌های دمایی در نوار شمالی کشور انجام شده است. برای استخراج روند فرین‌های دمایی در دوره مشاهداتی از داده‌های روزانه دمای حداقل و حداکثر ۵ ایستگاه سینوپتیک گرگان، رشت، رامسر، بابلسر و انزلی در دوره مشاهداتی در بازه زمانی ۱۹۸۰-۲۰۱۵ و برای دوره آینده نیز از داده‌های روزانه حداقل و حداکثر دمای مدل شده (آینده) در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۵۵ استفاده شده است.

کشور به دلیل شرایط خاص طبیعی و همچنین اثرپذیری اقتصاد منطقه از شرایط اقلیمی به لحاظ مطالعات هواشناسی و اقلیم‌شناسی دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. نوسانات دمایی و وقوع فرین‌های گرم و سرد می‌تواند شرایط زیست و اقتصاد منطقه شمالی کشور را تحت تأثیر قرار داده و در آینده نیز در صورت وقوع تغییر اقلیم و افزایش تنش‌های هواشناختی، نگاه ویژه به تغییر رفتار فرین‌های اقلیمی برای برنامه‌ریزی و کاهش خسارت‌ها از اولویت مطالعات خواهد بود.

جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه.

| ایستگاه | ارتفاع | طول جغرافیایی (E) | عرض جغرافیایی (N) |
|---------|--------|-------------------|-------------------|
| گرگان | ۱۳/۳ | ۵۴°۱۶' | ۳۶°۵۱' |
| نوشهر | -۲۰/۹ | ۵۱°۳۰' | ۳۶°۳۹' |
| بابلسر | -۲۱ | ۵۲°۳۹' | ۳۶°۴۲' |
| رامسر | -۲۰ | ۵۰°۴۰' | ۳۶°۵۴' |
| رشت | ۳۶/۷ | ۴۹°۳۹' | ۳۷°۱۲' |
| انزلی | -۲۶/۲ | ۴۹°۲۸' | ۳۷°۲۸' |

با توجه به مقیاس داده‌های مدل CanESM۲، نیاز به استفاده از روش‌های زیرمقیاس‌سازی و تبدیل آنها به داده‌های روزانه دما می‌باشد. در این پژوهش جهت ریزگردانی داده‌های مدل فوق از روش انطباق‌چندکی با برون‌یابی دلتا (کیوام‌دی)^۱ استفاده شده است.

روش ریزگردانی کیوام‌دی، بر اساس رویکردی از تصحیح اریبی روش نگاشت چندکی استوار است که گامی از روش تفکیک فضایی تصحیح اریبی است. این روش مستقیماً و بدون تفکیک مکانی و زمانی به ریزگردانی مقادیر روزانه می‌پردازد (برگر و همکاران، ۲۰۱۳). مقادیر نگاشت چندکی در یک جدول جستجو، از طریق درون‌یابی بی‌نقطه‌ای یک نمودار چندک-چندک حاصل از داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در یک دوره مشابه، استخراج می‌شوند. کیوام‌دی، روشی مستقیم برای ریزگردانی است. به نحوی که پیش‌بینی‌کننده، مقدار شبیه‌سازی

برای تولید داده‌های روزانه دما در دوره ۲۰۵۵-۲۰۲۰ از خروجی مدل گردش عمومی CanESM۲ بر اساس سناریوهای RCP ۴,۵ و RCP ۸,۵ استفاده شده است. هیات بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش پنجم ارزیابی خود (AR۵) از سناریوهای جدید RCP (Representative Concentration Pathways) به‌عنوان نماینده‌های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده است. در واقع در مدل‌های اجرا شده این گزارش از سناریوهای RCP به جای سناریوهای SRES استفاده شده است. در این سناریوها وضعیت کاربری اراضی به همراه انتشار گازهای گلخانه‌ای با وضوح مکانی ۲/۵ درجه در ۲/۵ درجه به کار گرفته شده است (ون وورن و همکاران، ۲۰۱۱). در بین سناریوهای RCP سناریوی ۸/۵ بیانگر محرکه‌های تابشی و انتشار زیاد و سناریوی ۴/۵ بیانگر حالت متوسط دارند (دشت بزرگی و همکاران، ۱۳۹۴).

۱. Quantile mapping with delta method extrapolation (QMD)

مشاهداتی تعریف می‌شود. چنانچه مقدار شبیه سازی شده، خارج از محدوده مقادیر مشاهداتی قرار گیرد، برونیابی ضرورت می‌یابد.

شده توسط مدل گردش عمومی در نزدیکترین نقطه شبکه‌بندی شده به ایستگاه مورد نظر به‌عنوان متغیر پیش‌بینی شونده می‌باشد. نگاشت چندکی، بر روی دامنه‌ای از مقادیر تاریخچه‌ای مدل گردش عمومی و

جدول ۲: شاخص‌های دمایی مورد مطالعه.

| واحد | توضیحات | نوع شاخص | شاخص | ردیف |
|------|--|--------------|--------------------|------|
| °C | شاخص دامنه تغییرات شبانه روزی دما | | DTR | ۱۰ |
| روز | تعداد روزهای یخبندان، حداقل دما کمتر از صفر درجه سانتی گراد. | آستانه‌ای | FD | ۱۱ |
| روز | تعداد روزهای یخی، حداکثر دمای روزانه کمتر از صفر درجه سانتی گراد. | آستانه‌ای | ID | ۱۲ |
| % | شبه‌های سرد، درصد روزهایی با دمای حداقل کمتر از صدک دهم. | مبتنی بر صدک | TN ^{۱۰} p | ۱۵ |
| % | روزهای سرد، درصد روزهایی با حداکثر دمای کمتر از صدک دهم. | مبتنی بر صدک | TX ^{۱۰} p | ۱۶ |
| روز | تعداد روزهای تابستانی، حداکثر دمای روزانه بیشتر از ۲۵ درجه سانتی گراد. | آستانه‌ای | SU ^{۲۵} | ۱۷ |
| روز | شبه‌های حاره‌ای، حداقل دمای روزانه بالاتر از ۲۰ درجه سانتی گراد. | آستانه‌ای | TR ^{۲۰} | ۱۸ |
| % | شبه‌های گرم، درصد روزهایی با دمای حداقل بالاتر از صدک ۹۰ ام. | مبتنی بر صدک | TN ^{۹۰} p | ۲۱ |
| % | روزهای گرم، در صد روزهایی با حداکثر دمای بالاتر از صدک ۹۰ ام. | مبتنی بر صدک | TX ^{۹۰} p | ۲۲ |

منبع: زانگ و همکاران (۲۰۰۵)

مقادیر بزرگ مقیاس شبیه‌سازی شده را در سی‌دی‌اف تاریخچه‌ای، به تصویر می‌کشد و با استفاده از روندزایی به حل این مسئله می‌پردازد (فرج‌زاده و همکاران، ۲۰۱۵؛ اوجی، ۱۳۹۷). برای بررسی شرایط فرین دمایی از شاخص‌های تیم کارشناسی شاخص‌ها و آشکارسازی و نمایش تغییر اقلیم (ETCCDI)^۳ استفاده شده است. ETCCDI به صورت مشترک به وسیله کمیون اقلیم‌شناسی، سازمان جهانی هواشناسی و برنامه جهانی دیدبانی داده‌ها، تغییرپذیری و پیش‌بینی اقلیم (CLIVAR)، حمایت می‌شود (سیلمن و روکنر، ۲۰۰۸). شاخص‌ها در ۵ گروه شاخص‌های بر پایه صدک‌ها، شاخص‌های دوره‌ای، شاخص‌های مطلق، شاخص‌های آستانه‌ای و سایر شاخص‌ها (مانند تغییرات شبانه‌روزی دما) تقسیم‌بندی می‌شوند (رنجبر، ۱۳۹۵؛ علیجانی و فرج‌زاده، ۱۳۹۴). جهت

روشی ساده برای استخراج داده از روش "تغییر دلتا"^۱ هملت و همکاران^۲ (۲۰۱۰) به عاریه گرفته شده است. جهت برونیابی تغییرات دما، بواسطه حالت افزایشی آن، مقدار تغییرات، با داده‌های شبیه‌سازی شده جمع زده می‌شود. بمنظور جلوگیری از برونیابی تکراری، تغییرات زمانمند سناریوهای آتی مدل گردش عمومی جو، با روند زدایی قبل از نگاشت چندکی و افزایش روند مقادیر اولیه به مقدار شبیه سازی شده، حفظ می‌گردد. روش نگاشت چندکی قادر به ایجاد چندک‌های محلی خارج از محدوده مشاهدات تاریخچه‌ای نیست. این می‌تواند یکی از مسائل بحث بر انگیز در متون ریزگردانی باشد. لذا در روش کیوام‌دی بعنوان یکی از روش‌ها توسعه یافته این مدل، به طرق مختلف در پی فائق آمدن بر این مشکل می‌باشد. در این روش، بمنظور مقایسه و هماهنگی چندک‌ها، فقط

۳. Expert Team on Climate change Detection, Monitoring and Indices

۱. Delta change

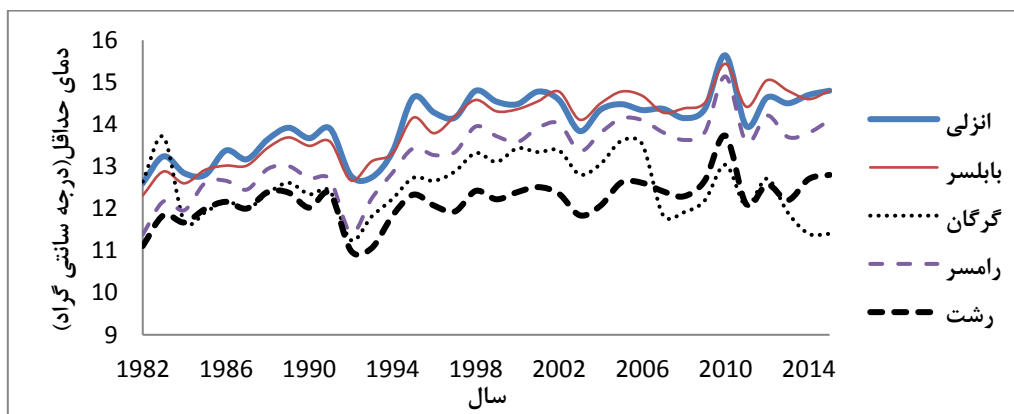
۲. Hamlet et al.

نظر دمای حداقل، در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه کمترین دما مربوط به ایستگاه رشت به میزان ۱۲/۱ درجه سانتی‌گراد و بیشترین دما نیز مربوط به ایستگاه انزلی به میزان ۱۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. از نظر اختلاف دمای حداقل و حداکثر، مقادیر این اختلاف در ایستگاه‌های غربی کمتر از ایستگاه‌های شرقی است. کمترین اختلاف دمای حداقل و حداکثر مربوط به ایستگاه انزلی به میزان ۵ درجه سانتی‌گراد و بیشترین مقادیر نیز مربوط به ایستگاه گرگان به میزان ۱۰/۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. از این بحث می‌توان نتیجه گرفت ایستگاه‌های غربی منطقه خزری از اعتدال دمایی بیشترین نسبت به ایستگاه‌های شرقی برخوردار هستند. شکل ۱ و ۲ مقادیر حداقل و حداکثر دمای ایستگاه‌های مورد مطالعه را در دوره مشاهداتی نشان می‌دهد.

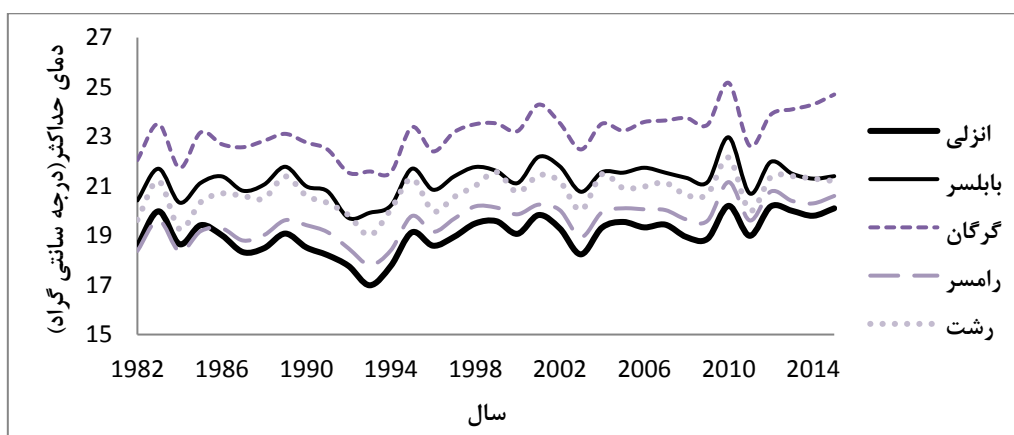
محاسبه و آشکارسازی روند شاخص‌های حدی دمایی از نرم‌افزار RClimDex استفاده شده است. این نرم افزار برای محاسبه روند شاخص‌های حدی دما و بارش توسعه یافته است (زانگ و یانگ، ۲۰۰۴؛ زانگ و همکاران، ۲۰۰۵).

یافته‌های پژوهش

تغییرات دما: در دوره مشاهداتی ۱۹۸۲-۲۰۱۵ بیشترین میزان حداکثر دما در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه مربوط به ایستگاه گرگان به مقدار ۲۳/۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بعد از ایستگاه گرگان ایستگاه بابلسر با دمای حدود ۲۱/۲ درجه سانتی‌گراد بالاترین مقادیر دمای حداکثر را دارا است. از نظر دمای حداکثر، ایستگاه انزلی با ۱۹ درجه سانتی‌گراد، کمترین مقدار را در بین سایر ایستگاه‌ها دارا است. از



شکل ۱: دمای حداقل دوره مشاهداتی ۱۹۸۲-۲۰۱۵.



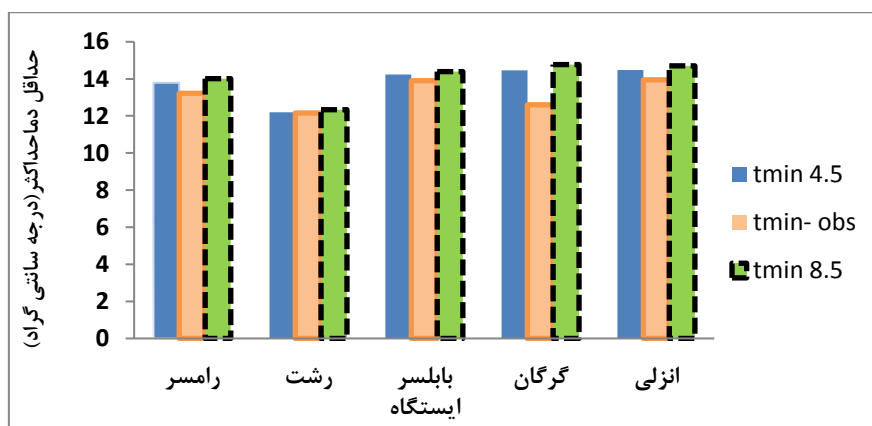
شکل ۲: دمای حداکثر دوره مشاهداتی ۱۹۸۲-۲۰۱۵.

سناریوی ۴٫۵ RCP حدود ۱/۸۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. کمترین تغییرات نیز مربوط به ایستگاه رشت به میزان ۰/۰۴ درجه سانتی‌گراد در سناریوی ۴٫۵ RCP و حدود ۰/۱۸ درجه سانتی‌گراد در سناریوی RCP ۸٫۵ می‌باشد (جدول ۳).

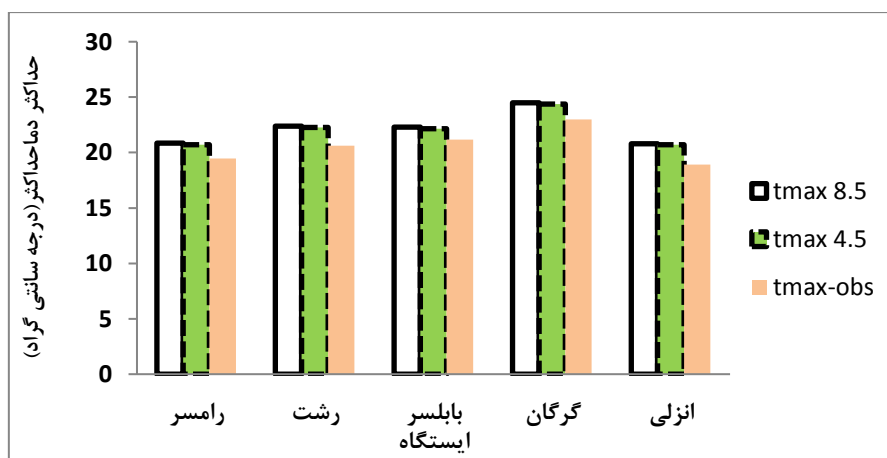
بر اساس خروجی سناریوهای مورد نظر، دمای حداقل و حداکثر در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه با روند افزایشی مواجه است که این تغییرات برای همه ایستگاه‌ها یکسان نمی‌باشد. بیشترین تغییرات افزایشی مربوط به ایستگاه گرگان در دمای حداقل به ترتیب سناریوی ۸٫۵ RCP حدود ۲/۱۷ درجه سانتی‌گراد و

جدول ۲: میزان تغییرات دمای حداقل و حداکثر دوره ۲۰۱۵-۱۹۸۰ نسبت به دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۵.

| ایستگاه | RCP ۸٫۵ | | RCP ۴٫۵ | |
|---------|------------|-------------|------------|-------------|
| | دمای حداقل | دمای حداکثر | دمای حداقل | دمای حداکثر |
| رامسر | ۰/۷۹ | ۱/۳۸ | ۰/۵۷ | ۱/۳۵ |
| رشت | ۰/۱۸ | ۱/۷۷ | ۰/۰۴ | ۱/۶۴ |
| بابلسر | ۰/۵۰ | ۱/۱۱ | ۰/۳۴ | ۰/۹۷ |
| گرگان | ۲/۱۷ | ۱/۵۱ | ۱/۸۶ | ۱/۳۸ |
| انزلی | ۰/۷۵ | ۱/۸۷ | ۰/۵۳ | ۱/۷۹ |



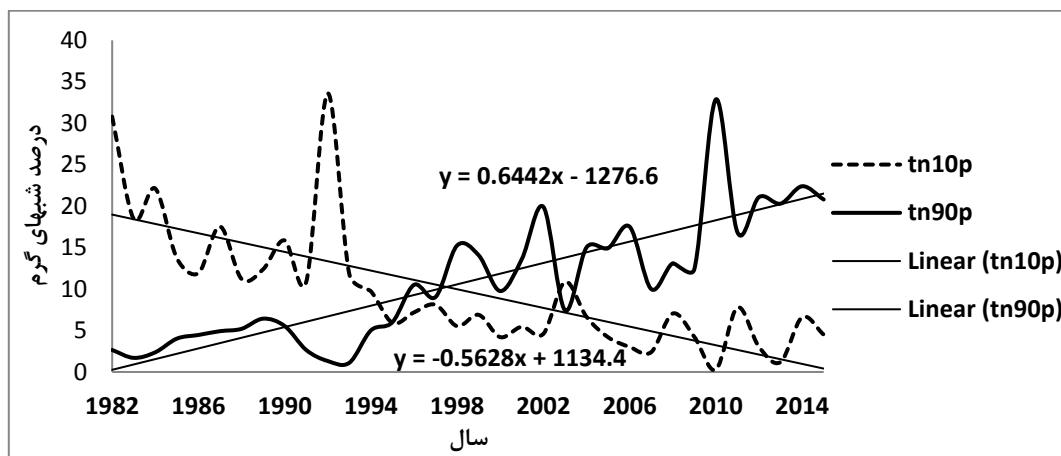
شکل ۳: تغییرات دمای حداقل ایستگاه‌های مورد مطالعه برای دوره‌های مشاهداتی و تولید شده.



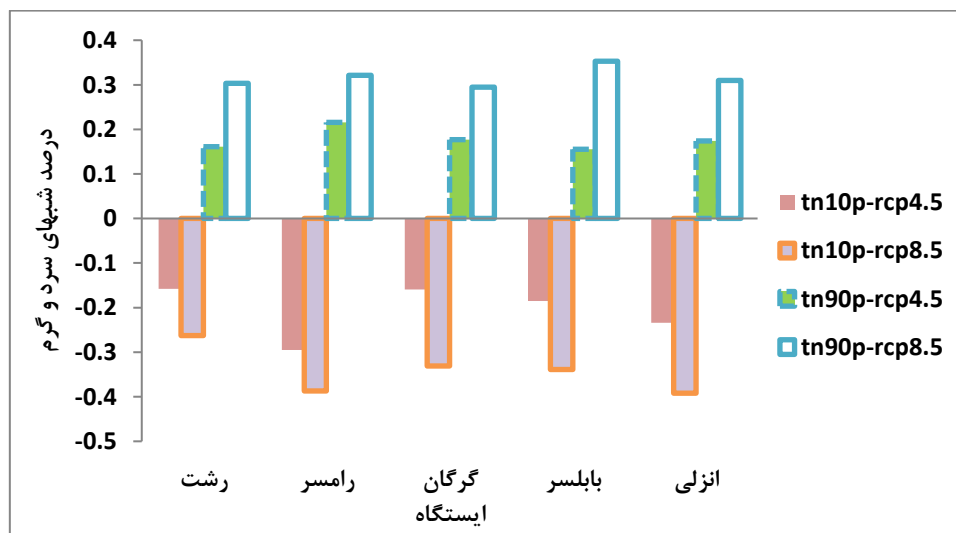
شکل ۴: تغییرات دمای حداکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه برای دوره‌های مشاهداتی و تولید شده.

طرف دیگر شاخص شب‌های گرم ($Tn_{ij} > Tn_{in90}$) در همه ایستگاه‌ها با روند افزایشی مواجه می‌باشد. بیشترین میزان افزایش در شاخص شب‌های گرم مربوط به ایستگاه رامسر به مقدار ۰/۶۲ درصد (شکل ۵) در دهه و پس از ایستگاه رامسر نیز ایستگاه بابلسر با ۰/۶۱ درصد در دهه با افزایش شاخص شب‌های گرم مواجه است.

روند شاخص‌های حدی دما: بررسی آماری در دوره مشاهداتی نشان می‌دهد شاخص شب‌های سرد ($Tn_{ij} < Tn_{in10}$) و شب‌های گرم با یک شیب ملایم در حال کاهش می‌باشد. مقدار این روند کاهش در ایستگاه رشت حدود ۰/۲۸-، ایستگاه رامسر ۰/۶۲-، ایستگاه گرگان ۰/۰۵-، ایستگاه بابلسر ۰/۶۱- و ایستگاه انزلی حدود ۰/۴۱- درصد در دهه می‌باشد. از



شکل ۵: روند شب‌های گرم و سرد ایستگاه رامسر در دوره مشاهداتی.



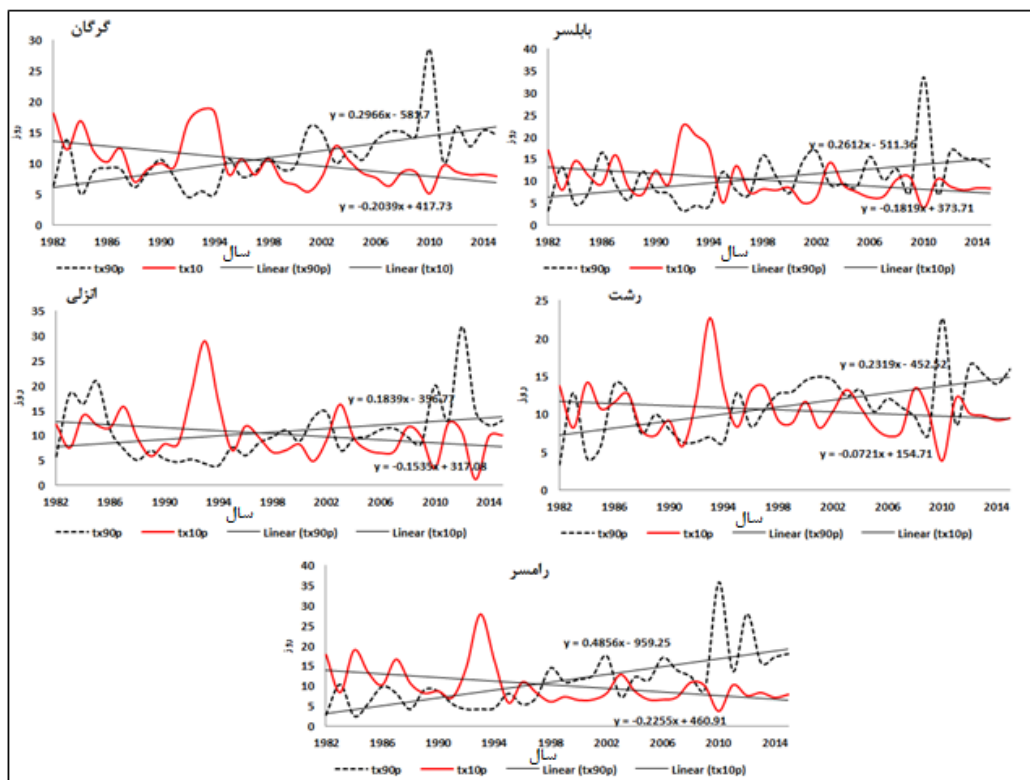
شکل ۶: مقادیر روند شب‌های سرد و گرم در دوره آینده.

شدیدتر است. مقدار روند در شاخص شب‌های سرد بر اساس RCP ۴,۵ برای ایستگاه رشت حدود ۰/۱۵- و بر اساس سناریوی RCP ۸,۵ ۰/۲۶- درصد در دهه است. بر اساس سناریوهای مورد نظر بیشترین روند کاهش شب‌های سرد مربوط به ایستگاه رامسر به

همچنین بر اساس داده‌های مدل شده برای دوره ۲۰۵۵-۲۰۲۰ شاخص شب‌های گرم و شب‌های سرد مانند دوره مشاهداتی با روند همراه است که این روند برای شب‌های سرد کاهشی و برای شب‌های گرم افزایشی بوده که در سناریوی RCP ۸,۵ این روند

ایستگاه رامسر با مقدار ۰/۲۱۶ درصد افزایش (Pvalue= ۰/۰۲۵) در دهه بوده و براساس سناریوی RCP ۸,۵ ایستگاه بابلر با مقدار ۰/۳۵ درصد در دهه (Pvalue= ۰) بیشترین روند افزایشی را تجربه کرده است. شکل ۶ مقادیر روند شاخص شب‌های گرم و سرد را برای دوره حاضر و آینده نشان می‌دهد.

میزان ۰/۲۹- در صد (Pvalue=۰) سناریوی RCP ۴,۵ و حدود ۰/۳۸- درصد (Pvalue= ۰/۰۰۱) سناریوی RCP ۸,۵ می‌باشد. در دوره آینده شاخص شب‌های گرم نیز همچون شب‌های سرد دارای روند و تغییراتی بوده که این روند با یک شیب افزایشی برای همه ایستگاه‌ها همراه است. بر اساس سناریوی RCP ۴,۵ بیشترین روند افزایشی در شب‌های گرم مربوط به



شکل ۷: روند شاخص روزهای سرد و روزهای گرم در دوره مشاهداتی ۲۰۱۵-۱۹۸۲.

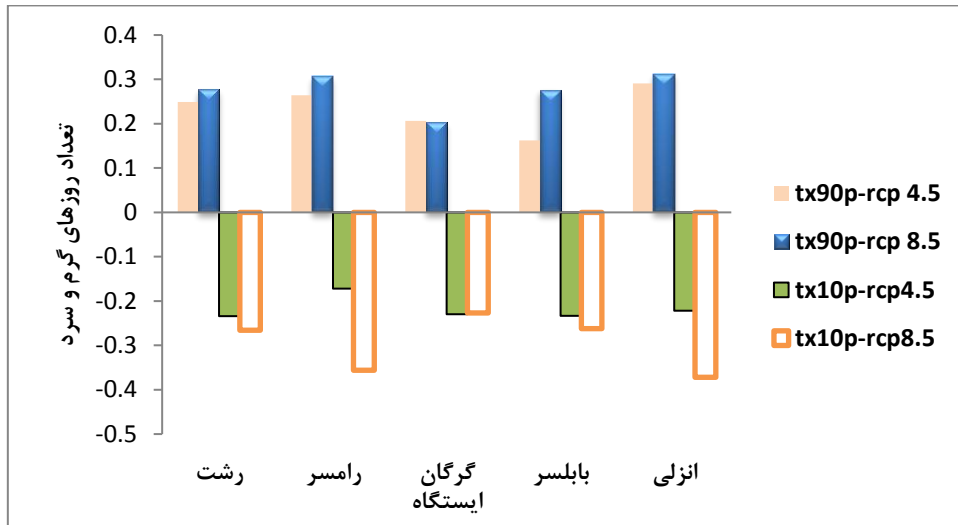
برخوردار است. مقدار کاهش روزهای سرد در ایستگاه رامسر ۰/۲۵- روز در دهه و در ایستگاه گرمان ۰/۲۳ روز در دهه است. کمترین مقدار کاهش در روزهای سرد نیز به مقدار ۰/۰۷۴- روز در دهه مربوط به ایستگاه رشت می‌باشد. در طول دوره مورد مطالعه، سال ۲۰۱۰ بالاترین رکورد مثبت روزهای گرم و سال ۱۹۹۳ بیشترین روزهای سرد را دارا می‌باشد (شکل ۷).

روند شاخص روزهای سرد و روزهای گرم در دوره آینده نیز همچون دوره حاضر می‌باشد به طوریکه شاخص روزهای سرد در همه ایستگاه‌ها با کاهش و روزهای گرم نیز با افزایش مواجه است. بر اساس

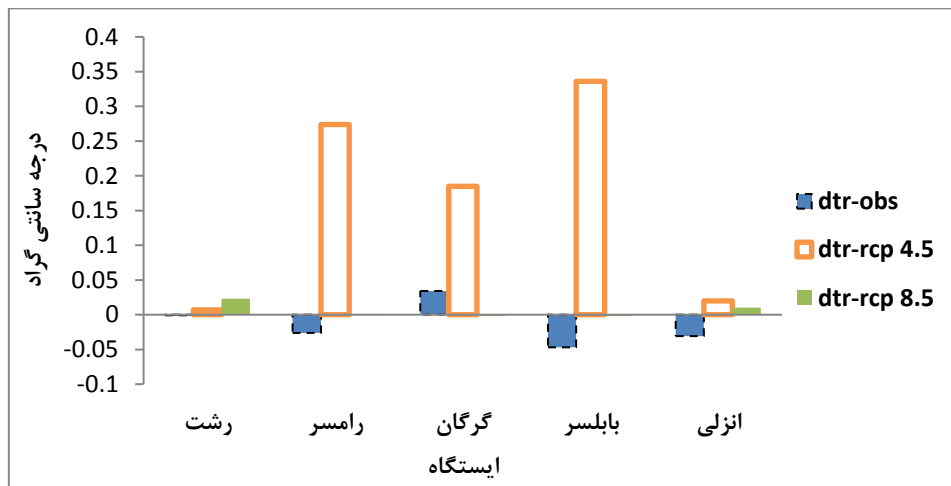
شاخص روزهای سرد ($Tx_{ij} < Tx_{i10}$) و روزهای گرم ($Tx_{ij} > Tx_{i90}$) در هر دو دوره مشاهداتی و آینده با روند و تغییراتی مواجه می‌باشد. در همه ایستگاه‌ها شاخص روزهای سرد با کاهش و شاخص روزهای گرم با افزایش مواجه است. در دوره حاضر بیشترین مقادیر افزایشی روزهای گرم مربوط به ایستگاه رامسر به میزان ۰/۵۱ روز در دهه و بوده و بعد از این ایستگاه نیز ایستگاه گرگان به میزان ۰/۳۳ روز در دهه بیشترین روند افزایشی را در این شاخص دارد. در شاخص روزهای سرد نیز ایستگاه رامسر بیشترین روند کاهشی را در بین ایستگاه‌های دیگر

ایستگاه‌ها کاهش بوده و بیشترین روند نیز مربوط به ایستگاه بابلسر (P value=۰/۰۰۲) رشت (P value=۰/۰۰۴) به میزان ۰/۲۳- در دهه است. مقادیر روند روزهای سرد طبق سناریوی RCP ۸,۵ بیشتر از سناریوی RCP ۴,۵ می‌باشد به طوریکه بیشترین مقادیر کاهش روزهای سرد در ایستگاه انزلی و رامسر به ترتیب ۰/۳۷- و ۰/۳۶- روز دهه است.

سناریوی RCP ۴,۵ در ایستگاه انزلی بیشترین افزایش در روزهای گرم مشاهده می‌شود که این مقدار حدود ۰/۲۹ روز در دهه (Pvalue= ۰/۰۰۱) است. بعد از ایستگاه انزلی نیز ایستگاه رامسر با ۰/۲۶ روز در دهه (P value=۰) در بین سایر ایستگاه‌ها بیشترین روند افزایشی را در شاخص روزهای گرم دارد. روند شاخص روزهای سرد بر اساس شاخص RCP ۴,۵ در همه



شکل ۸: مقادیر روند شاخص روزهای سرد و روزهای گرم در دوره آینده ۲۰۲۰-۲۰۵۵.



شکل ۹: روند شاخص دامنه تغییرات شبانه روزی دما در دوره حاضر و آینده.

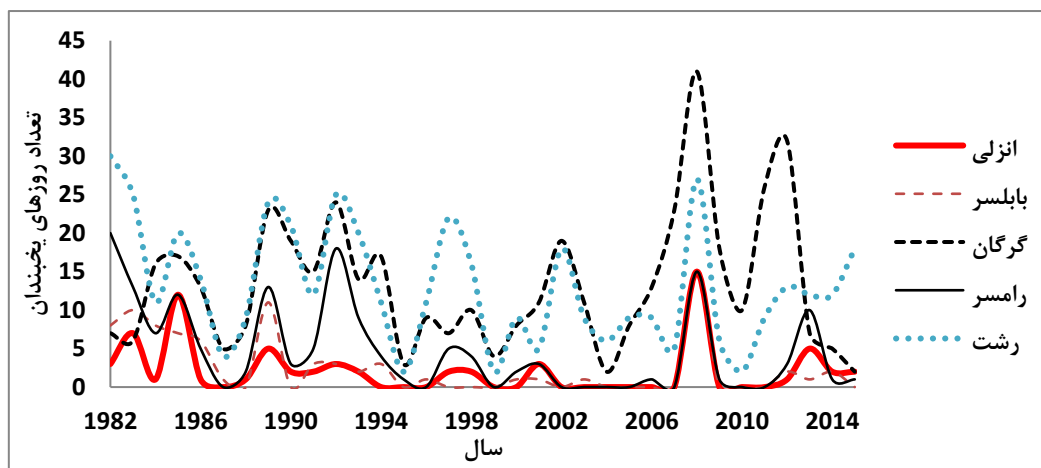
ایستگاه بابلسر ۰/۴۷- درجه سانتی‌گراد در دهه می‌باشد. بر اساس سناریوی RCP ۴,۵ و با توجه به تعدیل در فعالیت‌های بشر مانند انتشار کمتر گازهای گلخانه‌ای و دستکاری کمتر در کاربری اراضی، این

شاخص دامنه تغییرات شبانه روزی دما (DTR) در دوره حاضر در همه ایستگاه‌ها روند کاهشی با شیب بسیار ملایم را نشان می‌دهد. مقدار این روند در ایستگاه رامسر ۰/۲۶-، ایستگاه گرگان ۰/۳۴- و

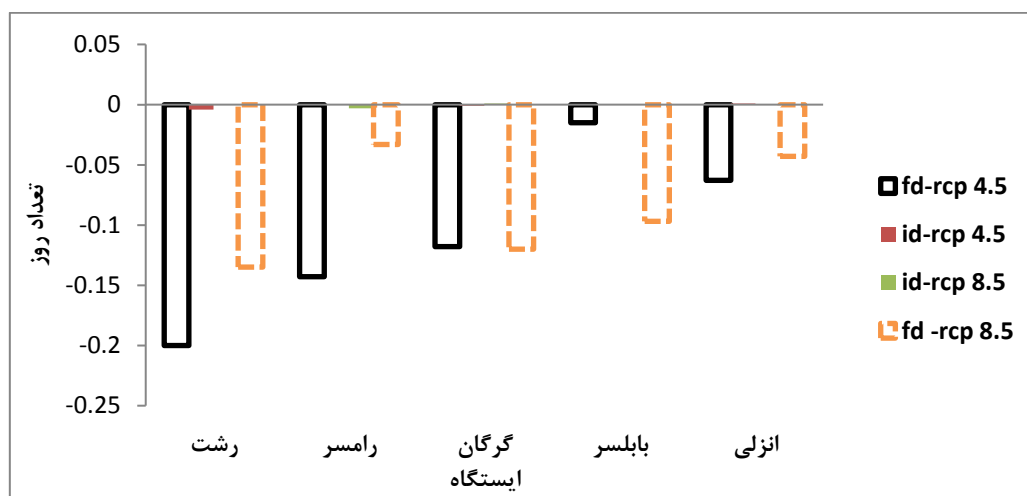
مورد مطالعه وقوع روزهای یخی ($T_{xij} < 0^{\circ}C$) بسیار اندک بوده و حتی در اکثر ایستگاه‌ها در طول دوره آماری مورد مطالعه این شاخص رخ نداده است. به لحاظ رخداد روزهای یخبندان ($T_{nij} < 0^{\circ}C$) نیز در بسیاری از سال‌ها دمای صفر و زیر صفر ثبت نشده است. در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه ایستگاه گرگان و رشت بیشترین رخداد روزهای یخبندان را تجربه کرده‌اند. در ایستگاه‌های انزلی، رامسر و بابلسر به طور میانگین رخداد روزهای یخبندان کمتر از ۵ روز بوده است. به لحاظ سالانه، سال ۲۰۰۸ در تمامی ایستگاه‌ها بیشترین روزهای یخبندان ثبت شده و در سال‌های ۱۹۹۵ و ۱۹۹۹ نیز کمترین رخداد روزهای یخبندان گزارش شده است (شکل ۱۰).

روند معکوس و افزایشی می‌باشد. در سناریوی RCP ۸.۵ همانند دوره حاضر روند شاخص دامنه تغییرات شبانه روزی دما کاهشی بوده که این به دلیل دستکاری بیشتر بشر و انتشار گازهای گلخانه‌ای خواهد بود.

کاهش در دامنه تغییرات شبانه روزی دما مطابق با افزایش بیشتر حداقل دما نسبت به حداکثر دما می‌باشد (الکساندر و همکاران، ۲۰۰۶). در واقع کاهش خروج انرژی شبانه به دلیل وجود گازهای گلخانه‌ای همراه با افت دامنه تغییرات شبانه روزی دما است. شکل زیر روند دامنه تغییرات شبانه روزی دما را در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. آمارهای ثبت شده نشان می‌دهد در ایستگاه‌های



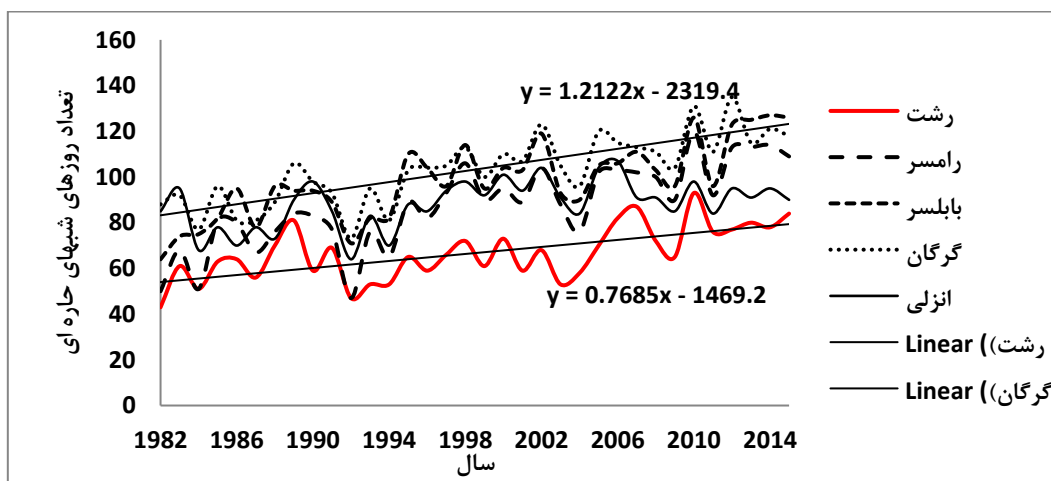
شکل ۱۰: میانگین تعداد روزهای یخبندان در دوره حاضر.



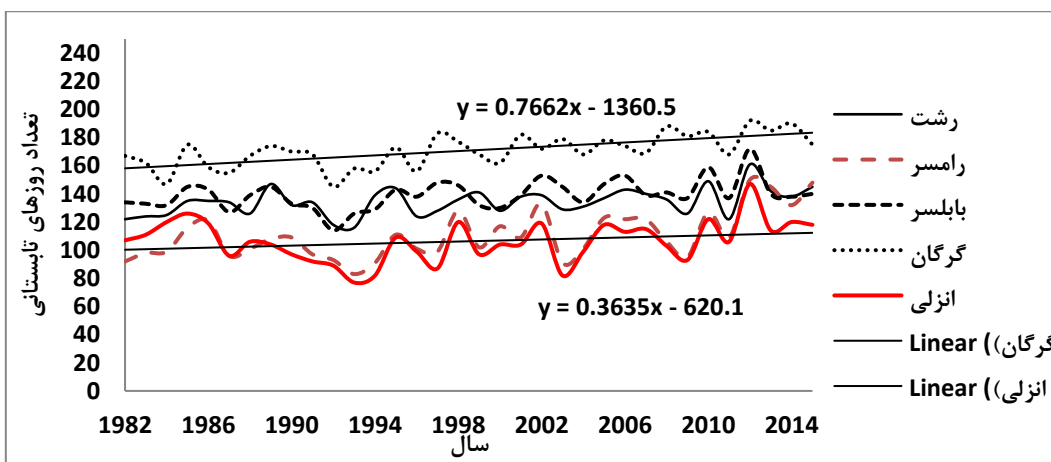
شکل ۱۱: روند روزهای یخبندان و روزهای یخی در دوره آینده ۲۰۲۰-۲۰۵۵.

نشان می‌دهد در دوره حاضر یک شیب قابل ملاحظه افزایشی در این شاخص وجود دارد. در واقع شاخص شب‌های حاره‌ای در بین سایر شاخص‌ها بیشترین روند را دارد که این روند در تمام ایستگاه‌ها افزایشی می‌باشد. مقدار روند افزایشی شاخص شب‌های حاره در ایستگاه بابلسر حدود ۱/۳، ایستگاه رامسر ۱/۵ (P value=۰)، ایستگاه انزلی ۱/۲ (P value=۰) و ایستگاه رشت حدود ۰/۷۲ (P value=۰/۱۱) روز در دهه است. کمترین مقادیر روند مربوط به ایستگاه گرگان به میزان ۰/۶۲ روز در دهه می‌باشد. شاخص روزهای تابستانی ($T_{xij} > 25^{\circ}C$) نیز همچون شاخص شب‌های حاره‌ای، با روند افزایشی در دوره حاضر مواجه است که این افزایش نیز نسبت به سایر شاخص‌ها شیب شدیدتری را نشان می‌دهد.

روند شاخص روزهای یخبندان در دوره آینده نشانگر کاهش در این شاخص همانند دوره حاضر می‌باشد که این روند بر اساس سناریوی ۴،۰ RCP با شیب ملایمتری نسبت سناریوی ۸،۰ RCP اتفاق می‌افتد. شاخص روزهای یخی (ID) به دلیل رخداد اندک در دوره حاضر و آینده روند مشخصی را نشان نمی‌دهد. آنچه مشخص است، با افزایش دمای کمینه در ایستگاه‌های مورد مطالعه رخداد دماهای صفر و کمتر با کاهش مواجه خواهد همچنان که در دوره حاضر ۲۰۲۰-۱۹۸۲ با یک روند کاهشی مواجه است. میزان کاهش روزهای یخبندان در ایستگاه رشت حدود ۰/۳۸- روز در دهه و در ایستگاه رامسر حدود ۰/۳۳- روز در دهه است. روند شاخص شب‌های حاره‌ای ($T_{nij} > 20^{\circ}C$)



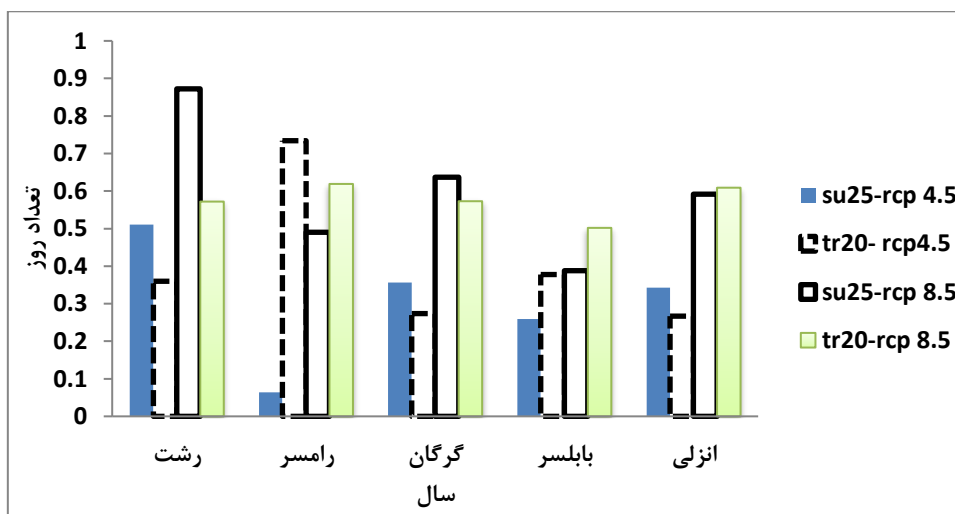
شکل ۱۲: روند تغییرات شب‌های حاره‌ای در دوره حاضر.



شکل ۱۳: روند تغییرات روزهای تابستانی در دوره حاضر.

افزایشی شب‌های حاره در ایستگاه رشت بر اساس سناریوی ۴,۵ RCP حدود ۰/۳۶ روز و بر اساس سناریوی ۸,۵ RCP حدود ۰/۸۷ روز در دهه است (شکل ۱۴). در مجموع می‌توان گفت شاخص شب‌های حاره ای در دوره حاضر و آینده نسبت به شاخص روزهای تابستانی شیب بیشتری دارد که این امر به دلیل اثر گلخانه ای و افزایش دمای شبانه به خصوص در محیط‌های دستکاری شده و مصنوعی می‌باشد.

روند شاخص‌های شب‌های حاره‌ای و روزهای تابستانی در همه ایستگاه‌ها برای دوره آینده مانند دوره حاضر با روند افزایشی مواجه است. البته این نکته قابل ذکر است که میزان شیب این دو شاخص بر اساس سناریوی های مورد نظر ملایمتر از شیب دوره حاضر می‌باشد. میزان تغییرات شاخص روزهای تابستانی در ایستگاه رشت بر اساس سناریوی ۴,۵ RCP حدود ۰/۵۱ روز و بر اساس سناریوی ۸,۵ RCP حدود ۰/۸۷ روز در دهه است. میزان روند



شکل ۱۴: روند تغییرات روزهای تابستانی و شب‌های حاره‌ای در دوره آینده.

قرار گرفت. بررسی‌های آماری نشان می‌دهد کمینه و بیشینه دما در دوره آینده تحت دو سناریوی مورد نظر با افزایش مواجه است. از طرف دیگر بررسی فرینهای دمایی بیانگر تغییرات و روند در دوره حاضر و آینده است. در مجموع روندها و تغییرات در شاخص‌های فرین به نفع گرمایش و افزایش دما در ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌باشد. در دوره مشاهداتی و آینده فرینهای سرد (روزهای یخی ID، شب‌های سرد TN^{۱۰p}، روزهای یخبندان FD و روزهای سرد TX^{۱۰p}) با شیب کاهشی مواجه است. از طرف دیگر فرین‌های گرم (روزهای تابستانی SU^{۲۵}، شب‌های حاره ای TR^{۲۰}، شب‌های گرم TN^{۹۰p} و روزهای گرم TX^{۹۰p}) با شیب افزایشی در هر دو دوره مشاهداتی و آینده مواجه هستند. روند کمینه و بیشینه دما و

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر گرمایش جهانی و تغییر در پارامترهای اقلیمی باعث شده است تا مطالعات در زمینه تغییر اقلیم اثرات آن در جنبه‌های مختلف و اقلیمی و محیطی گسترش یابد. یکی از اثرات تغییر اقلیم و گرمایش جهانی تغییر در فرین‌های اقلیمی می‌باشد. با توجه به اینکه فرین‌های اقلیمی اثرات قابل ملاحظه‌ای در محیط طبیعی و مصنوعی و برنامه‌ریزی-های محیطی دارد، مطالعه روند و تغییرات آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش روند شاخص‌های فرین‌های دمایی ایستگاه‌های نوار شمالی کشور (رامسر، گرگان، بابلسر، رشت و انزلی) برای دوره مشاهداتی ۲۰۱۵-۱۹۸۲ و دوره آینده ۲۰۲۰-۲۰۵۵ تحت دو سناریوی ۴,۵ RCP و ۸,۵ RCP مورد بررسی

شبانه روزی دما مطابق با مطالعاتی همچون (رحیم‌زاده و همکاران، ۱۳۹۰؛ نیو و همکاران، ۲۰۰۶؛ براون و همکاران، ۲۰۱۰) می‌باشد. در مجموع می‌توان با توجه به روندهای موجود در شاخص‌های دمایی اظهار کرد فرین‌های سرد در آینده به سوی تعدیل پیش خواهد رفت و حدهای گرم از فراوانی و شدت بیشتری برخوردار خواهند بود.

منابع

۱. اسدی، اشرف، حیدری، علی. ۱۳۹۰. تحلیل تغییرات سری‌های دما و بارش شیراز طی دوره ۱۹۵۱-۲۰۰۵، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۲، شماره پیاپی ۴۱، شماره ۱، ۱۳۷-۱۵۲.
۲. اوجی، روح‌اله. ۱۳۹۷. مقایسه ریزگردانی تک‌ایستگاهی و چندایستگاهی فرین‌های دما و بارش (مطالعه موردی: سواحل جنوبی دریای خزر)، فیزیک زمین و فضا، مقاله ۱۰، دوره ۴۴، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۷، ۳۹۷-۴۱۰.
۳. تقوی، فرحناز. روند شاخص‌های حدی دما و بارش ایران، پایان‌نامه دکتری، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
۴. تقوی، فرحناز. محمدی، حسین. ۱۳۸۶. بررسی دوره بازگشت رویدادهای اقلیمی حدی به‌منظور شناخت پیامدهای زیست‌محیطی، محیط‌شناسی، سال سی و سوم، شماره ۴۳، ۱۱-۲۰.
۵. دشت بزرگی، آمنه. علیجانی، بهلول. جعفر پور، زین‌العابدین. شکیب، علیرضا. ۱۳۹۴. شبیه‌سازی شاخص‌های حدی دمای استان خوزستان بر اساس سناریوهای RCP، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۱۶، ۱۲۳-۱۰۵.
۶. رحیم‌زاده، فاطمه، دزفولی، هدایت‌پور اصغریان، آرزو. ۱۳۹۰. ارزیابی روند و جهش نمایه‌های حدی دما و بارش استان هرمزگان، مجله توسعه جغرافیایی، شماره ۲۱، ۱۱۶-۹۷.
۷. رنجبر، فیروز. ۱۳۹۵. شبیه‌سازی روند حدهای دما و بارش ایران، پایان‌نامه دوره دکتری، دانشگاه تهران، دانشکده جغرافیا.
۸. سازمان هواشناسی کشور. ۱۳۹۳. خلاصه گزارش

شاخص‌های فرین دمایی در سناریوی RCP ۴.۵ به واسطه انتشار کمتر گازهای گلخانه و دستکاری کمتر بشر در محیط با شیب ملایمتری نسبت به سناریوی RCP ۸.۵ همراه است. شاخص دامنه نوسان شبانه روزی دما در دوره مشاهداتی در ایستگاه‌های مورد مطالعه با کاهش مواجه است. کاهش در این شاخص نشانگر افزایش بیشتر دمای شبانه نسبت به دمای روزانه دارد. کاهش در مقادیر شاخص دامنه تغییرات

- ارزیابی پنجم هیات بین‌الدولی تغییر اقلیم و برنامه‌های آتی IPCC، نشست دبیرخانه، دی ماه سال ۱۳۹۳.
۹. عساکره، حسین. ۱۳۹۱. تغییر توزیع فراوانی بارش‌های فرین شهر زنجان، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۳۳، شماره ۱، ۵۱-۶۶.
۱۰. عسگری، احمد. رحیم‌زاده، فاطمه. محمدیان، نوشین. فتاحی، ابراهیم. ۱۳۸۶. تحلیل روند نمایه‌های بارش‌های حدی در ایران، تحقیقات منابع آب ایران، سال سوم، شماره ۳، ۴۲-۵۳.
۱۱. علیجانی، بهلول. فرج‌زاده، حسن. ۱۳۹۴. تحلیل روند شاخص‌های دمای فرین در شمال ایران، نشریه جغرافیای و برنامه‌ریزی، شماره ۵۲، ۲۲۹-۲۵۶.
۱۲. محمدی، حسین. تقوی، فرحناز. ۱۳۸۴. روند شاخص‌های حدی دما و بارش تهران، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۳، ۱۷۲-۱۵۱.
۱۳. ورشوایان، وحید، قهرمان، نوذر. حجام، سهراب. ۱۳۹۰. بررسی روند تغییرات مقادیر حدی دمای حداقل، حداکثر و میانگین روزانه در چند نمونه اقلیمی ایران، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۷، شماره ۱، ۱۶۹-۱۷۹.
۱۴. هدایتی، اکرم. ۱۳۸۲. تحلیلی بر تغییرات تاریخ شروع بارش و روند آن در تهران، سومین کنفرانس منطقه‌ای و اولین کنفرانس ملی تغییر اقلیم، اصفهان.
۱۵. Brown, Paula, J., Raymond, S., Bradley, and Frank Keimig, T. ۲۰۱۰. Changes in Extreme Climate Indices for the Northeastern United States, ۱۸۷۰-۲۰۰۵, Journal of Climate, ۲۳: ۶۵۵۰-۶۵۷۲.
۱۶. Bürger, G., Murdock, T.Q., Werner, A.T., Sobie, S.R., and Cannon, A.J. ۲۰۱۳. Downscaling Extremes-An

- Intercomparison of Multiple Statistical Methods for Present Climate, *J. Clim.*, ۲۵, ۴۳۶۶-۴۳۸۸.
۱۷. Detlef P., Van Vuuren, Jae Edmonds, Mikiko Kainuma, Keywan Riahi, Allison Thomson, Kathy Hibbard, George C. Hurtt, Tom Kram, Volker Krey, Jean-Francois Lamarque, Toshihiko Masui, Malte Meinshausen, Nebojsa Nakicenovic, Steven J. Smith & Steven K. Rose, ۲۰۱۱. The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, ۱۰۹, ۵-۳۱.
۱۸. Farajzadeh, M., Oji, R., Cannon, A.J., Ghavidel Y. and Massah Bavani, A. ۲۰۱۵, An evaluation of single-site statistical downscaling techniques in terms of indices of climate extremes for the Midwest of Iran. *Theoretical and Applied Climatology* ۱۲۰, ۳۷۷-۳۹۰, doi ۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۷۰۴-۰۱۴-۱۱۵۷-۴.
۱۹. Frank, D., Markus Reichstein, Michael Bahn, Kirsten Thonicke, David Frank, Miguel D. Mahecha, Pete Smith, Marijn van der Velde, Sara Vicca, Flurin Babst, Christian Beer, Nina Buchmann, Josep G. Canadell, Philippe Ciais, Wolfgang Cramer, Andreas Ibrom, Franco Miglietta, Ben Poulter, Anja Rammig, Sonia I. Seneviratne, Ariane Walz, Martin Wattenbach, Miguel A Zavala, and Jakob Zscheischler, ۲۰۱۵. Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: concepts, processes and potential future impacts, *Glob Chang Biol*, ۲۱(۸): ۲۸۶۱-۲۸۸۰.
۲۰. KElein tank, A.M.G. and Konnen, G.P. ۲۰۰۳. Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, ۱۹۴۶-۹۹, *Journal of climate*, ۱۶: ۳۶۶۵- ۳۶۸۰.
۲۱. Manton, M.J., Della-marta, P.M., Haylock, M.R., Hennessy, K.J., Nicholls, N., Chambers, L.E., Collins, D.A., Daw, G., Finet, A., Gunawan, D., Inape, K., Isobe, H., Kestin, T.S., Lefale, P., Leyu, C.H., Lwin, T., Maitrepierre, L., Ouprasitwong, N., Page, C.M., Pahalad, J., Plummer, N., Salinger, M.J., Suppiah, R., Tran, V.L., Trewin, B., Tibig, I. and Yee, D. ۲۰۰۱. Trends iv extreme Daly Rainfall and Temperature in Southeast Asia and south Pacific: ۱۹۶۱- ۱۹۹۸, *International Journal of Climatology*, ۲۱:۲۶۹-۲۸۴.
۲۲. Sillmann, J. and Roeckner, E. ۲۰۰۸. Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change, *Climatic Change*, ۸۶: ۸۳-۱۰۴.
۲۳. Vincent. L.A.T.C., Peterson, V.R., Barros, M.B., Marino, M., Rusticucci, G., Carrasco, E., Ramirez, L.M., Alves, T., Ambrizzi, M.A., Berlato, A.M., Grimm, J.A., Marengo, L., Molion, K.D.F., Moncunill, L.E., Rebello, Y.M.T., Anunciação, J., Quintana, J.L., Santos, J., Baez, G., Coronel, J., Garcia, R.I., Trebejo, M.m Bidegain, M.R., Haylock, and Karoly, D. ۲۰۰۵. Observed Trends in Indices of Daily Temperature Extremes in South America ۱۹۶۰-۲۰۰۰, *Journal of climatology*, ۱۸: ۵۰۱۱- ۵۰۲۳.
۲۴. Zhang. Xuebin, Enric Aguilar, SerhatSensoy, Hamlet Melkonyan, Umayra Tagiyeva, Nader Ahmed, Nato Kutaladze, Fatemeh Rahimzadeh, AfsanehTaghipour, T.H. Hantosh, Pinhas Albert, Mohammed Semawi, Mohammad Karam Ali, Mansoor Halal Said Al-Shabibi, Zaid Al-Oulan, Taha Zatari, Imad Al Dean Khelet, SalehHamoud, RamazanSagir, MesutDemircan, Mehmet Eken, Mustafa Adiguzel, Lisa Alexander, Thomas C. Peterson, and Trevor Wallis, ۲۰۰۵. Trends in Middle East climate extreme indices from ۱۹۵۰ to ۲۰۰۳, *Journal of Geophysical Research*, ۱۱۰.