

دورنمایی از تغییرات فراوانی روزهای یخبندان در ایران با مدل های گردش عمومی جو

بهروز ساری صراف- استاد اقلیم شناسی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه تبریز
علی محمد خورشید دوست- استاد اقلیم شناسی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه تبریز
پیمان محمودی* - استادیار اقلیم شناسی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان
محمد دارائی- دانش آموخته دکتری اقلیم شناسی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۲/۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۴/۱۷

چکیده

شرایط زمستان در معرض تغییرات سریع آب و هواست. این تغییرات می تواند در شاخص های دمایی و بارش نمود پیدا کند. در این میان، یخبندان، به دلیل تأثیرپذیری مستقیم و نمود سریع تأثیرات گرمایش جهانی، بیشتر مورد توجه است. در این پژوهش با استفاده از داده های ۴۴ ایستگاه همدید ایران طی بازه زمانی ۱۹۸۱-۲۰۱۰ و برون داد دو مدل ریزگردانی شده گردش عمومی جو HADCM3 و GFCM21 برای بازه های زمانی ۲۰۴۶-۲۰۶۵ و ۲۰۸۰-۲۰۹۹ تحت سه سناریوی انتشار A2، B1، و A1B اثرات گرمایش جهانی بر تغییرات فراوانی روزهای یخبندان در ایران بررسی شد. نتایج بیانگر این بود که در اقلیم میانی (۲۰۴۶-۲۰۶۵) بر اساس مدل GFCM21 و سناریوهای B1، A1B، و A2 میانگین رخداد سالانه یخبندان در ایران به ترتیب ۳۷، ۴۶، و ۴۱ روز خواهد بود. بر اساس مدل HADCM3 و سناریوهای یادشده، میانگین رخداد سالانه یخبندان به ترتیب ۴۱، ۴۲، و ۴۶ روز است. در دوره ۲۰۸۱-۲۰۹۹، بر مبنای مدل GFCM21، میانگین شاخص یادشده ۳۱، ۲۹، و ۴۳ روز خواهد بود و بر مبنای مدل HADCM3، ۳۳، ۲۸، و ۳۸ روز است. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که در همه ایستگاه های مورد مطالعه تعداد روزهای یخبندان در دهه های آتی رو به کاهش است.

کلیدواژه ها: ایران، روزهای یخبندان، ریزمقیاس نمایی، گرمایش جهانی.

مقدمه

گرمایش جهانی و تغییر آب و هوا یکی از مهم ترین چالش های زیست محیطی دهه های اخیر است. بر اساس آخرین گزارش ها، سال ۲۰۱۶ گرم ترین سال در دوره های آماری موجود است و دما در این سال ۰/۹۹ درجه سلسیوس نسبت به دوره پیش از صنعتی شدن افزایش داشته است (ناسا، ۲۰۱۷). از آنجا که دما از عناصر اساسی شکل گیری اقلیم است، تغییرات آن می تواند ساختار آب و هوایی هر محل را دگرگون کند (اسدی و حیدری، ۱۳۹۰: ۱۳۷). یکی از مشخصه های اقلیمی که از پدیده گرمایش جهانی اثر می پذیرد تعداد روزهای همراه با یخبندان است. از دیدگاه هواشناسی، هنگامی که دمای کمینه به زیر صفر درجه سلسیوس برسد یخبندان رخ می دهد. با افزایش دمای کمینه، به طور مشخص روزهای یخبندان با افت مواجه خواهد شد (محمودی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۲۱). بیشترین میزان افزایش میانگین دما در ایران در دمای کمینه رخ داده است (علیجانی و همکاران، ۱۳۹۰: قاسمی، ۲۰۱۵). نتایج پژوهش سالیانگه و گریفیتز (۲۰۰۱) روی

روند دمای نیوزیلند طی بازه‌های زمانی ۱۹۳۰-۱۹۵۰، ۱۹۵۱-۱۹۷۵، و ۱۹۷۶-۱۹۹۸ بیانگر کاهش فراوانی روزهای یخبندان دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۸۰ نسبت به دهه ۱۹۴۰ است؛ به‌گونه‌ای که در دوره آخر کاهش ۱۵-۵ روزه فراوانی روزهای یخبندان در همه ایستگاه‌های مورد بررسی مشاهده شده است. ژای و پان (۲۰۰۳) در بررسی روند رخداد دماهای حدی چین طی سال‌های ۱۹۵۱-۱۹۹۹ دریافتند که روند افزایش دمای شبانه و کاهش شمار روزهای یخبندان معنادار است. آور و همکاران (۲۰۰۵) در قالب یک پروژه بزرگ پژوهشی، پیوند بین فراوانی روزهای یخبندان و تغییرپذیری میانگین دمای ماهانه در نواحی آلپ در کشور اتریش را با استفاده از مدل‌های تجربی آماری بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده کاهش چهار تا شش‌روزه در فراوانی روزهای یخبندان در طول دو فصل پاییز و بهار برای این منطقه از اتریش بوده و تغییرات در فصل بهار بیشتر از فصل پاییز بوده است. لوگینوف و همکاران (۲۰۰۷) تغییرپذیری زمانی و مکانی فراوانی شمار روزهای یخبندان ماه می کشور بلاروس را بررسی کردند. نتایج بررسی این پژوهشگران نشان می‌دهد که قبل از ۱۹۸۵ یک روند افزایشی در شمار و شدت روزهای یخبندان مشاهده می‌شود؛ در حالی که بعد از ۱۹۸۵ این روند برعکس شده و شمار روزهای یخبندان به طور چشم‌گیری در غرب بلاروس و به نسبت کمتری در شرق آن کاهش نشان داده است. فراوانی روزهای یخبندان در سال‌های ۱۹۵۰-۲۰۱۰ در ۷۲ ایستگاه هواشناسی ترکیه کاهش یافته است. میزان کاهش در قسمت‌های شرقی آناتولی و سواحل دریاهای مرمره و مدیترانه بیش از سایر نقاط و چهار روز در دهه است و همچنین همبستگی قوی بین کاهش شمار روزهای یخبندان و افزایش دمای کمینه وجود دارد (ارلات و ترکیش، ۲۰۱۲: ۱۸۹۰).

شبیه‌سازی‌های مدل اقلیم جهانی (GCM) برای قرن بیست‌ویکم نیز نشان از یک کاهش عمومی در شمار روزهای یخبندان در جهان دارد؛ اما این کاهش برای همه بخش‌های کره زمین یکسان نبوده و بخش‌های غربی قاره‌ها بیشترین کاهش را نشان داده‌اند (مهیل و همکاران، ۲۰۰۴: ۴۶۵). فراوانی روزهای یخبندان در غرب میانه ایالات متحده آمریکا بر اساس سناریوهای اقلیمی A1B، B1، و A2 برای دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ نسبت به دوره پایه ۱۹۷۷-۲۰۰۷ به ترتیب ۶۵، ۳۰ و ۳۸ روز کاهش نشان می‌دهد (سینا و چرکاور، ۲۰۱۰: ۱). نتایج مطالعه بنستاد (۲۰۱۱) نشان می‌دهد که تا سال ۲۱۰۰ به احتمال ۹۵ درصد درجه حرارت تابستانه ۳-۵ درجه سلسیوس در بسیاری از نقاط اروپا افزایش خواهد داشت و برای همه نقاط اروپا احتمال کاهش دمای پایین‌تر از صفر درجه سلسیوس در زمستان با کاهش شدید ۶۰ درصدی مناطقی که در آن درجه حرارت در زمستان در حال حاضر در حدود نقطه انجماد است، وجود دارد. روند فراوانی شمار روزهای یخبندان در ایالت کانزاس در دوره ۱۹۶۰-۲۰۰۸ از ۱۷۷ به ۱۶۳ روز کاهش یافته است و در اقلیم میانی (۲۰۴۶-۲۰۶۵) ۵-۱۰ روز و در اقلیم دور (۲۰۸۰-۲۰۹۹) ۸-۱۲ روز کاهش تعداد روزهای یخبندان نسبت به دوره پایه مشاهده می‌شود (آناندی و همکاران، ۲۰۱۳: ۳۰۹۴).

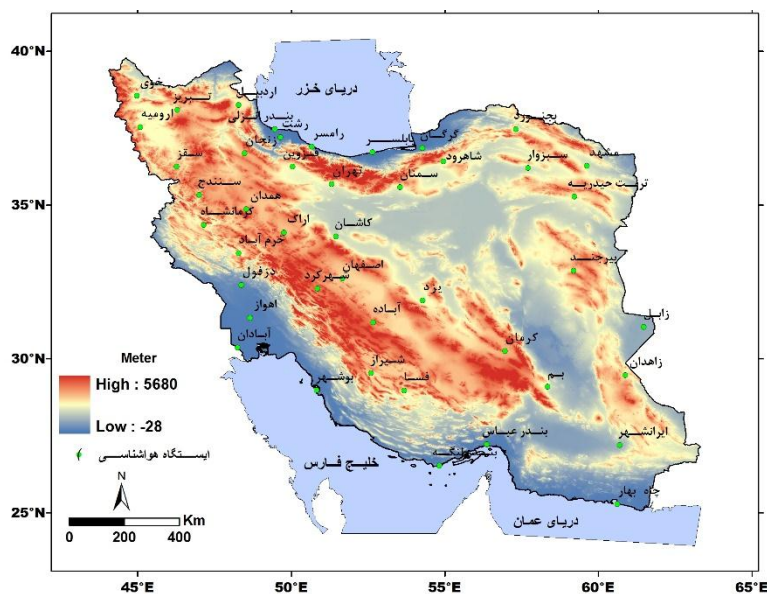
پژوهش‌هایی که در ایران انجام گرفته است بیشتر مربوط به روند گذشته فراوانی روزهای یخبندان بوده است و حاکی از کاهش شمار روزهای یخبندان در گستره ایران است و نتایج این مطالعات مشابه با سایر پژوهشگران دیگر مناطق جهان بوده است؛ از جمله صداقت‌کردار و رحیم‌زاده (۱۳۸۶) تغییرات سه شاخص فرین- شمار روزهای یخبندان، شمار روزهای یخی، و طول دوره رشد- را در نیمه دوم قرن بیستم برای ۱۶ ایستگاه هواشناسی کشور بررسی کردند. نتایج مطالعات این پژوهشگران نشان از افزایش طول دوره رشد در بیشتر ایستگاه‌های کشور به‌خصوص در نیمه شمالی کشور دارد؛ به‌گونه‌ای که سه ایستگاه کرمانشاه، مشهد، و تهران به ترتیب با میانگین تقریبی ۱۲، ۹، و ۷ روز بیشترین افزایش را داشته‌اند. متعاقب این افزایش در طول دوره رشد، آن‌ها شاهد روند کاهشی در شمار روزهای یخبندان نیز بوده‌اند؛ به‌طوری که در تهران هفت و در اصفهان، مشهد، و شیراز چهار روز کاهش در شمار روزهای یخبندان را گزارش کرده‌اند. ربانی و کرمی (۱۳۸۸) در تحقیقی تغییرات احتمالی نوسانات زمانی تعداد روزهای یخبندان استان خراسان شمالی را طی دوره آماری ۱۹۷۸-۲۰۰۵ مطالعه کردند. نتایج نشان داد که تعداد روزهای یخبندان طی سال‌های آتی دارای روندی

نزولی است. رضایی و عابد (۱۳۸۹) روند تغییرات یخبندان در ایستگاه همدید رشت را در دوره آماری پنجاهساله (۲۰۰۹-۱۹۶۰) مطالعه کردند و دریافتند که طول دوره یخبندان در ایستگاه مورد مطالعه روند کاهشی دارد و از صد روز به کمتر از هشتاد روز نوسان داشته است. میزان دمای حداقل مطلق سالانه از منفی ۷ به منفی ۴ افزایش یافته و فراوانی تعداد روزهای همراه با یخبندان از چهل روز به کمتر از بیست روز نوسان داشته است. مسعودیان و دارند (۱۳۹۴) در پژوهشی به کمک داده‌های میان‌یابی‌شده دمای کمینه ایران طی بازه زمانی ۱۳۴۰ تا ۱۳۸۲ روند تعداد روزهای یخبندان را بررسی کردند. به طور کلی، نتایج پژوهش نشان داد که در بیشتر گستره ایران روند تعداد روزهای یخبندان رو به کاهش است. بررسی روند روزهای یخبندان ایران با استفاده از داده‌های روزانه دمای کمینه ۴۴ ایستگاه سینوپتیک کشور در بازه زمانی ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۲ نشان می‌دهد که در بیشتر ایستگاه‌های کشور روند روزهای همراه با یخبندان دارای شیب منفی است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۲۸). اسماعیلی و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری به بررسی تغییرات طول دوره رشد و طول دوره یخبندان برای دو دوره اقلیمی گذشته (۱۳۵۵-۱۳۸۴) و آینده (۱۳۸۹-۱۴۱۸) برای سه ایستگاه مشهد، تربت حیدریه، و سبزوار اقدام کردند. نتایج کار این پژوهشگران نشان می‌دهد که دو ایستگاه مشهد و سبزوار در طول دوره رشد افزایش و ایستگاه تربت حیدریه در طول دوره رشد کاهش داشته‌اند. اما طول دوره یخبندان هر سه ایستگاه دارای کاهشی بین ۱۵ الی ۱۶ روز بوده است که پژوهشگران آن را نتیجه‌ای منطقی از گرمایش جهانی می‌دانند. مطالعه بهیار و همکاران (۱۳۹۲) بیانگر آن است که فراوانی وقوع یخبندان در همه ایستگاه‌های مورد بررسی ایران در دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۹ در مقایسه با ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰ کاهش خواهد یافت. شبیه‌سازی اثرهای تغییر اقلیم در یخبندان‌های زاهدان با استفاده از مدل HADGEM تحت سناریوی انتشار A1 نشان داد که تعداد یخبندان‌های سالانه در آینده (۲۰۱۱-۲۰۳۹) هجده روز نسبت به دوره حاضر (۱۹۷۱-۲۰۰۰) کاهش خواهد یافت (احمدی و زهرایی، ۱۳۹۳: ۲۹).

تغییر در تعداد روزهای همراه با یخبندان می‌تواند اثرهای مختلفی در محیط داشته باشد. با کاهش تعداد روزهای یخبندان طول عمر برف‌های کوهستان و همچنین منابع یخچالی کوتاه می‌شود و این حالت تغذیه سفره‌های زیرزمینی را با تهدید مواجه می‌کند و همچنین رخداد سیلاب را نیز تحت تأثیر قرار خواهد داد. از این رو، بررسی و شناخت تغییرات و رفتار آبی روزهای همراه با یخبندان، به عنوان یکی از فرین‌های اقلیمی در نواحی مختلف ایران، بر اساس سناریوهای مختلف تغییر اقلیم دارای اهمیت است و از اهداف اصلی این پژوهش به‌شمار می‌رود.

داده‌ها و روش شناسی

داده‌های مورد نیاز پژوهش شامل دو گروه داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی‌شده است. داده‌های مشاهداتی دمای کمینه و بیشینه، بارش، و ساعات آفتابی روزانه ۴۴ ایستگاه همدید در نواحی گوناگون ایران- که دارای داده کامل سی سال (۱۹۸۱-۲۰۱۰) هستند- از سازمان هواشناسی ایران دریافت شده است. با توجه به اینکه پنج ایستگاه ساحلی جنوبی به‌ندرت روز یخبندان دارند، از محاسبات حذف شدند (شکل ۱). از این داده‌ها برای تولید داده‌های شبیه‌سازی آینده استفاده شده است.



شکل ۱. پراکنش ایستگاه‌های مورد مطالعه ایران

داده‌های شبیه‌سازی شده دوره آینده با استفاده از برون‌داد ریزگردانی شده مدل‌های گردش عمومی جو تولید می‌شود. در این مدل‌ها، متغیرهای آب و هوایی تحت تأثیر تنش‌های ناشی از گازهای گلخانه‌ای شبیه‌سازی می‌شوند. یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هوا LARS-WG است که برای تولید مقادیر بارش، تابش، درجه حرارت‌های بیشینه و کمینه روزانه در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم حاضر و آینده به کار می‌رود. این مدل توانایی مدل‌سازی دوره گذشته و آینده را دارد، اما برای هر گونه مدل‌سازی نیازمند یک سناریوی اقلیمی ویژه است. از این مدل می‌توان برای مدل‌سازی داده‌های گم‌شده و خلأهای آماری نیز استفاده کرد (سمنوف و همکاران، ۱۹۹۸: ۹۵). مقیاس زمانی مورد استفاده لارس دهه‌ای است و رفتارهای کلی را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. مدل LARS-WG برای مدل‌سازی متغیرهای هواشناسی توزیع‌های آماری پیچیده‌ای به کار می‌برد. مبنای این مدل برای مدل‌سازی طول دوره‌های تر و خشک، بارش روزانه و سری‌های تابش توزیع نیمه تجربی است. در این مدل، تابش به طور مستقل از درجه حرارت مدل‌سازی شده است و به جای آن می‌توان ساعات آفتابی را به کار برد. از روش زنجیره مارکف برای مدل‌سازی بارش استفاده می‌شود و سری‌های فوریه درجه حرارت را تخمین می‌زنند. درجه حرارت‌های کمینه و بیشینه روزانه به صورت فرایندهای تصادفی و با میانگین و انحراف معیارهای روزانه، که به وضعیت تر یا خشک بودن روز مورد نظر وابسته‌اند، مدل‌سازی می‌شوند. سری فوریه مرتبه سوم برای شبیه‌سازی میانگین و انحراف معیار درجه حرارت فصلی به کار می‌رود. رفتار حاکم بر مقادیر مانده‌ها، که از تفریق مقادیر میانگین از مقدار دیدبانی شده به دست می‌آیند، از طریق تحلیل خودهمبستگی زمانی داده‌های کمینه و بیشینه به دست می‌آیند (سمنوف و بارو، ۲۰۰۲: ۴).

روایی مدل LARS-WG

برای بررسی روایی مدل LARS-WG، داده‌های ماهانه دمای کمینه دوره مشاهداتی (۱۹۸۱-۲۰۱۰) و تولیدشده مدل با استفاده از نمودار مقایسه و معناداری آن‌ها در سطح ۰/۰۵ با آزمون تی نمونه‌ای زوجی (تی وابسته) بررسی شد.

بررسی عدم قطعیت

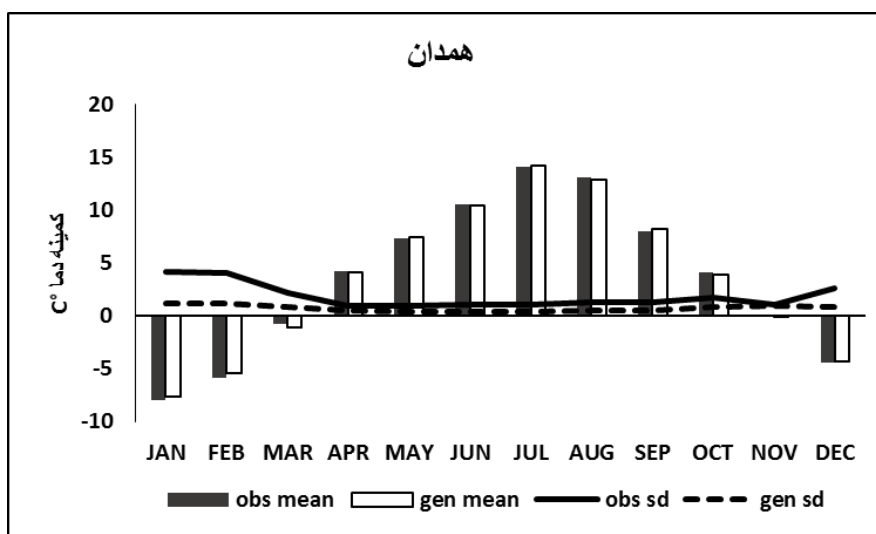
برای ارزیابی عدم قطعیت مربوط به تفاوت در پیش‌بینی آب و هوایی مدل‌های AR4 از نمودار باکس پلات استفاده شد. طرح این نمودار طیف وسیعی از عدم قطعیت در پیش‌بینی را، که ناشی از محدودیت درک فعلی ما از سیستم آب و هوایی

مدل‌های GCMها است، نشان می‌دهد. به دلیل عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های اقلیمی ناشی از تفاوت‌های ساختاری در مدل‌های اقلیمی جهانی و همچنین عدم قطعیت در تغییرات شرایط اولیه یا پارامتری کردن مدل، استفاده از چند مدل و سناریو در پیش‌بینی‌ها توصیه می‌شود (سمنوف و ستارتونوویچ، ۲۰۱۰: ۶). اجرای چند مدل و سناریو گستره وسیعی را برای تحلیل ایجاد می‌کند. با انجام دادن این کار می‌توان عدم قطعیت را در تولید داده‌های اقلیمی آینده به حداقل رساند. پس از اثبات روایی لارس از مجموعه ۱۵ مدل لارس، دو مدل آب و هوای جهانی GFCM21 و HadCM3، که بیشترین کارایی (همبستگی) و کمترین خطای شبیه‌سازی را در برآورد پارامتر دما دارا بودند، انتخاب شدند. کارایی این مدل‌ها را قبلاً هاشمی (۱۳۹۴) در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی ایران تأیید کرده است. داده‌های شبیه‌سازی شده با این دو مدل برای بازه‌های زمانی ۲۰۴۶-۲۰۶۵ و ۲۰۸۰-۲۰۹۹ تحت سه سناریوی انتشار A1B، A2، و B1 اجرا و تولید شدند.

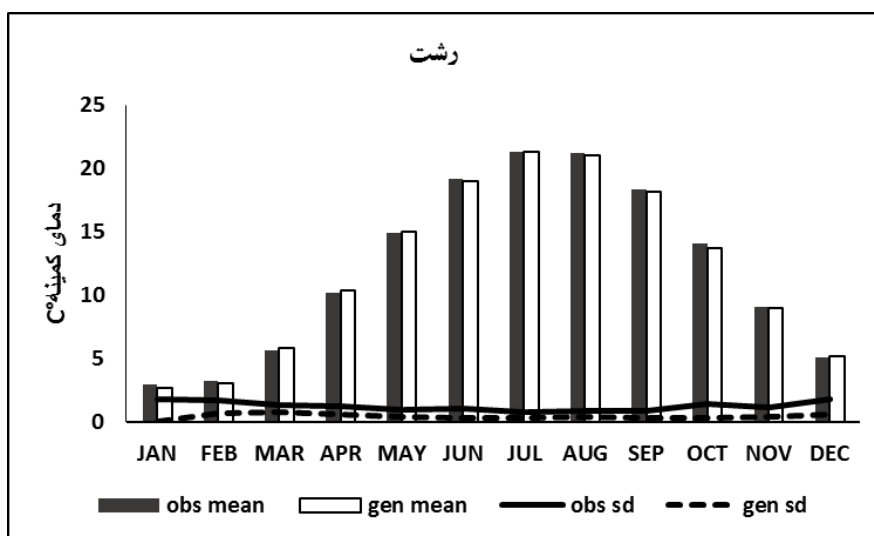
پس از تشکیل بانک اطلاعاتی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، شمار روزهای یخبندان برای هر ایستگاه در دوره مشاهداتی و اقلیم میانی و اقلیم دور برای دو مدل و سه سناریو استخراج شد. سپس، برای مقایسه تغییرات احتمالی شمار روزهای یخبندان در دهه‌های آتی، داده‌های اختلاف داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی محاسبه شد. به دلیل اینکه در بخش‌های گسترده‌ای از ایران، همچون نواحی بیابانی و کوهستانی، فاقد ایستگاه هواشناسی است، نقشه‌های پهنه‌بندی شمار روزهای یخبندان دهه‌های آتی بر مبنای داده‌های ایستگاهی در بازه‌های زمانی مورد نظر ایران تهیه شد و تحلیل‌ها بر اساس آن‌ها به صوت نقطه‌ای انجام گرفت.

یافته‌ها

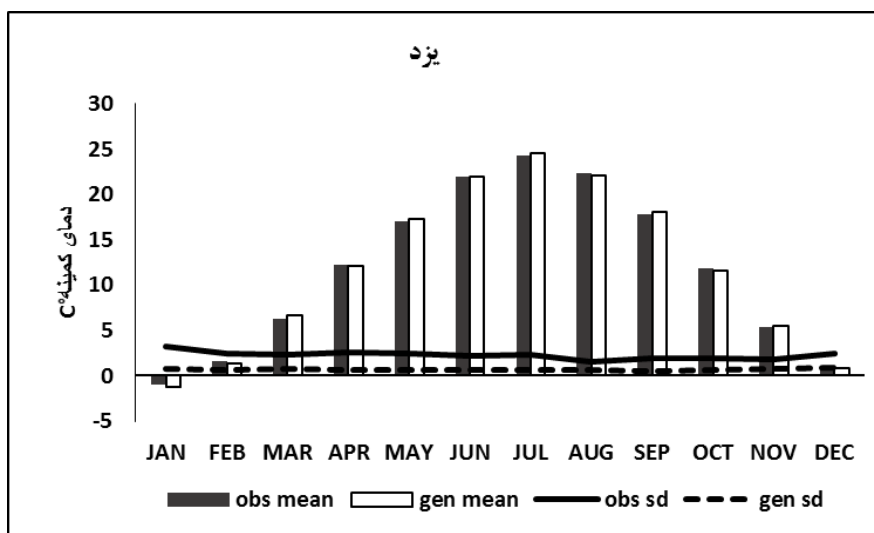
بررسی معنی‌داری اختلاف میانگین‌های مشاهداتی و برآورد شده با آزمون تی نشان داد که این اختلافات به غیر از ایستگاه بجنورد در ماه ژانویه، ایستگاه‌های بوشهر و شهرکرد در ماه مارس، ایستگاه اصفهان در ماه فوریه، و ایستگاه زاهدان در ماه اوت در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار نیست. همچنین، مقایسه چشمی میانگین و انحراف معیار داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دمای کمینه نشان از انطباق مناسب داده‌ها دارد (شکل‌های ۲-۴). در کل، می‌توان گفت که مدل LARS-WG از توانایی قابل قبولی برای شبیه‌سازی داده‌های دمای کمینه ایستگاه‌های مورد مطالعه در ایران برخوردار است و خطای موجود تصادفی است.



شکل ۲. مقایسه میانگین و انحراف معیار داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دمای کمینه ایستگاه همدان



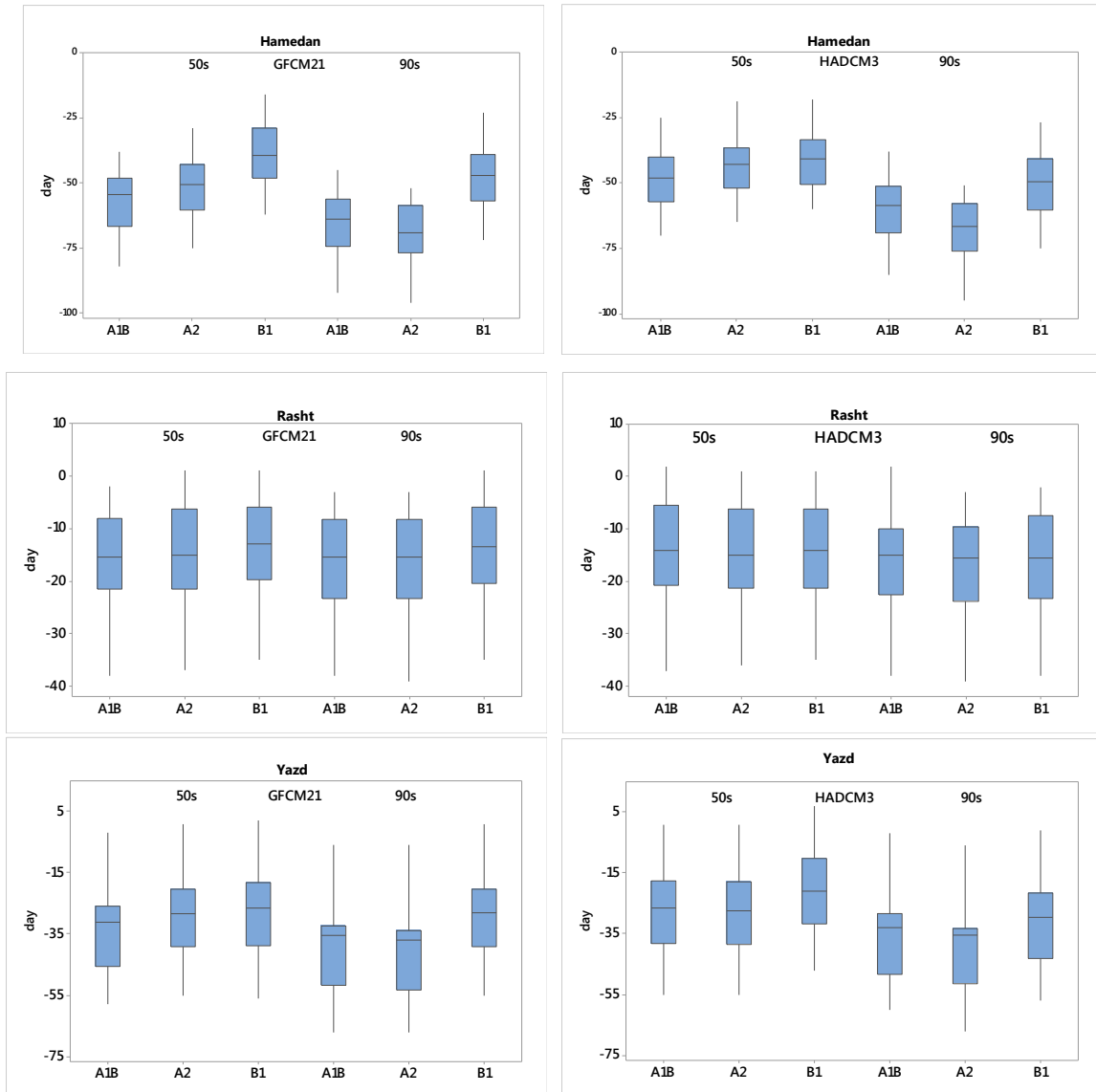
شکل ۳. مقایسه میانگین و انحراف معیار داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دمای کمینه ایستگاه رشت



شکل ۴. مقایسه میانگین و انحراف معیار داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دمای کمینه ایستگاه یزد

تحلیل نمودارهای باکس پلات فراوانی روزهای یخبندان ایستگاه‌های مورد مطالعه، که چند نمونه از نواحی مختلف آب و هوایی ایران که در شکل ۵ آورده شده، نشان می‌دهد که در ایستگاه همدان در دهه پنجاه (۲۰۴۶-۲۰۶۵) در مدل GFCM21 بر مبنای سناریوی انتشار A1B، A2، B1 و در ۷۵ درصد سال‌ها به ترتیب بیشتر از ۴۳، ۴۸/۲۵ و ۲۹ روز و در مدل HadCM3 ۴۰/۲۵، ۳۶/۵ و ۳۳/۵ روز کاهش در میانگین سالانه شمار روزهای یخبندان مشاهده می‌شود. در دهه نود (۲۰۸۰-۲۰۹۹) در مدل GFCM21 به ترتیب ۵۶/۲۵، ۵۶/۵ و ۳۹/۲۵ روز کاهش و در مدل HadCM3 ۵۱/۲۵، ۵۸ و ۴۰ روز میانگین سالانه فراوانی روزهای یخبندان کم شده است. در ایستگاه رشت در دهه پنجاه در مدل GFCM21 بیشتر از ۸، ۶/۲۵ و ۶ روز و در مدل HadCM3 ۵/۵، ۶/۲۵ و ۶/۲۵ روز کاهش دیده می‌شود. در دهه نود در مدل GFCM21 به ترتیب ۸/۲۵، ۸/۲۵ و ۶ روز و در مدل HadCM3 ۱۰، ۹/۵ و ۷/۵ روز میانگین سالانه فراوانی روزهای یخبندان کم شده است. در ایستگاه یزد در دهه پنجاه، در مدل GFCM21 ۲۵/۷۵، ۲۰/۲۵ و ۱۸/۲۵ روز و در مدل HadCM3 ۱۷/۵، ۱۸ و ۱۰/۲۵ روز کاهش در شمار روزهای یخبندان مشاهده می‌شود. در دهه نود در مدل GFCM21 به ترتیب ۳۲/۲۵، ۳۴ و ۲۰/۲۵ روز و در مدل HadCM3 ۲۸/۵، ۳۳/۲۵ و ۲۱/۵ روز از میانگین سالانه

فراوانی روزهای یخبندان کاسته شده است. این تفاوت در مقادیر کاهش فراوانی روزهای یخبندان در بازه‌ها و سناریوهای یکسان و مدل‌های متفاوت ناشی از عدم قطعیت به‌وجودآمده در مدل‌های مورد استفاده است. در سایر چارک‌ها نیز این تفاوت‌ها مشاهده شد. برای کاهش عدم قطعیت از میانگین دو مدل برگزیده تحت سه سناریوی انتشار بهره گرفته شده است.



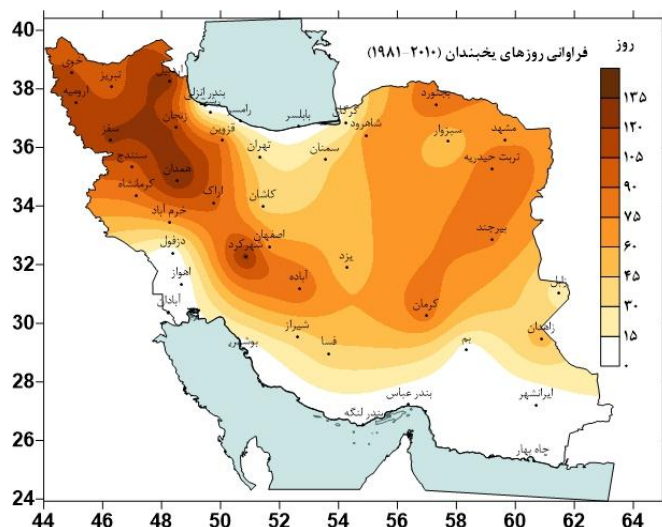
شکل ۵. نمودار باکس پلات تغییرات فراوانی روزهای یخبندان چند نمونه اقلیمی ایران بر اساس برون‌داد دو مدل ریزگردانی‌شده گردش عمومی جو HADCM3 و GFCM21 برای بازه‌های زمانی ۲۰۴۵-۲۰۶۵ و ۲۰۸۰-۲۰۹۹، تحت سه سناریوی انتشار B1، A1B، و A2.

بررسی روند میزان افزایش میانگین سالانه تغییرات دمای کمینه و بیشینه ایران در دهه‌های ۲۰، ۵۰، و ۸۰ آتی با میانگین مدل‌های HadCM3 و GFCM21 نسبت به دوره ۱۹۸۱-۲۰۱۰ نشان می‌دهد که میزان افزایش دمای کمینه (دمای شبانه) بیشتر از افزایش دمای بیشینه خواهد بود (جدول ۱). افزایش دمای کمینه تأثیر زیادی روی شاخص‌های یخبندان همچون کاهش فراوانی روزهای یخبندان دارد.

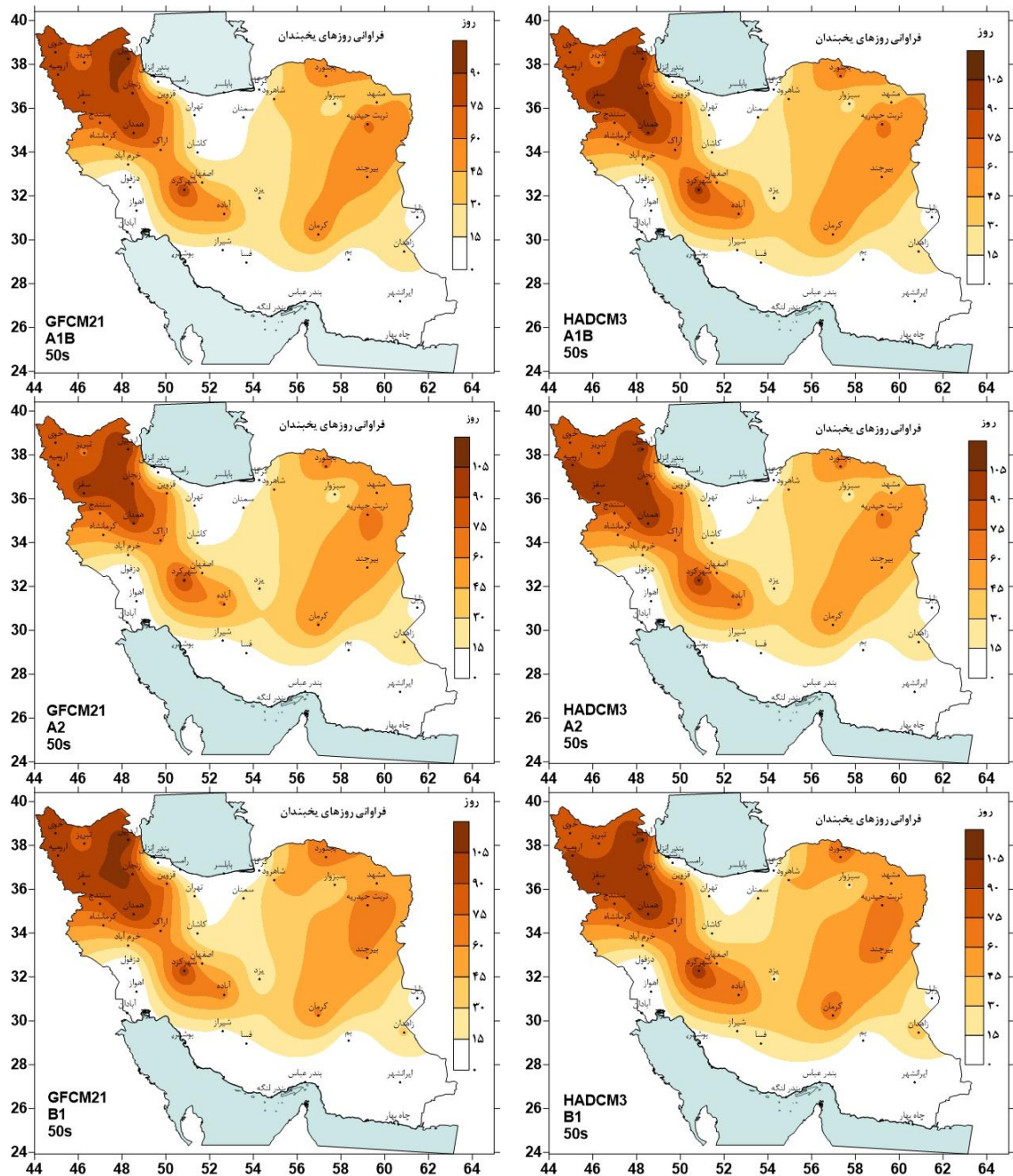
جدول ۱. میانگین سالانه افزایش دمای کمینه و بیشینه ایستگاه‌های مورد مطالعه ایران در دهه‌های ۲۰، ۵۰، و ۹۰ آتی با میانگین مدل‌های HadCM3 و GFCM21 نسبت به دوره ۱۹۸۱-۲۰۱۰

دوره	سناریو	دمای بیشینه °C	دمای کمینه °C
۲۰۱۱-۲۰۳۰	A1B	۰٫۶۷	۰٫۷۱
	A2	۰٫۷۱	۰٫۷۵
	B1	۰٫۶۵	۰٫۶۸
۲۰۴۶-۲۰۶۵	A1B	۲٫۳۴	۲٫۳۷
	A2	۲٫۱۳	۲٫۱۶
	B1	۱٫۶۸	۱٫۸
۲۰۸۰-۲۰۹۹	A1B	۳٫۴۷	۳٫۵
	A2	۴٫۰۷	۴٫۰۹
	B1	۲٫۳۴	۲٫۳۷

میانگین فراوانی روزهای یخبندان ایستگاه‌های منتخب ایران در دوره ۱۹۸۱-۲۰۱۰، ۶۲ روز در سال است. پراکندگی تعداد روزهای یخبندان در گستره ایران با هم بسیار متفاوت است. دامنه روزهای یخبندان (۰-۱۳۴ روز) در سال در ایستگاه‌های مورد مطالعه متغیر است. فراوان‌ترین روزهای یخبندان مربوط به همدان با میانگین ۱۳۴ روز در سال است. فراوانی روزهای یخبندان در ایستگاه‌های اردبیل، شهرکرد، سقز، زنجان، ارومیه، و خوی بیشتر از ۱۰۰ روز در سال است. نوار باریکی از سواحل جنوب از بندر بوشهر تا مرز پاکستان شامل چهار ایستگاه ساحلی جنوب بوشهر، بندرعباس، بندر لنگه، و چاه‌بهار و همچنین اهواز در جنوب غرب بدون یخبندان است و هرچه از ساحل دور می‌شویم به تدریج شمار روزهای یخبندان بیشتر می‌شود. ایستگاه‌های آبادان و ایرانشهر، با میانگین سالانه یک روز، کمترین میزان رخداد یخبندان را دارند. بعد از سواحل جنوبی، کمترین فراوانی روزهای یخبندان در کرانه‌های دریای خزر دیده می‌شود. در همین راستا، محمدی و همکاران (۱۳۹۴) و محمدی و همکاران (۱۳۹۱) در تحلیل پراکنش مکانی فراوانی روزهای یخبندان در ایران به نتایج مشابهی دست یافتند. آرایش فضایی فراوانی روزهای یخبندان در ایران بیانگر این است که از سواحل جنوب تا مرکز ایران هرچه از ساحل دور می‌شویم به تدریج شمار روزهای یخبندان بیشتر می‌شود. از مرکز ایران به سمت شمال، که ارتفاعات نقش بارزتری پیدا می‌کنند، این آرایش به هم می‌خورد. بیشترین یخبندان‌ها در محور کوهستانی شمال غرب- جنوب شرق رخ می‌دهد که عمدتاً از نوع یخبندان‌های تابشی است و در مرتبه دوم در شمال شرق اتفاق می‌افتد که نتیجه پُرفشار سبیری است و عمدتاً از نوع یخبندان‌های وزشی است (مسعودیان، ۱۳۹۰: ۹۹) (شکل ۶).



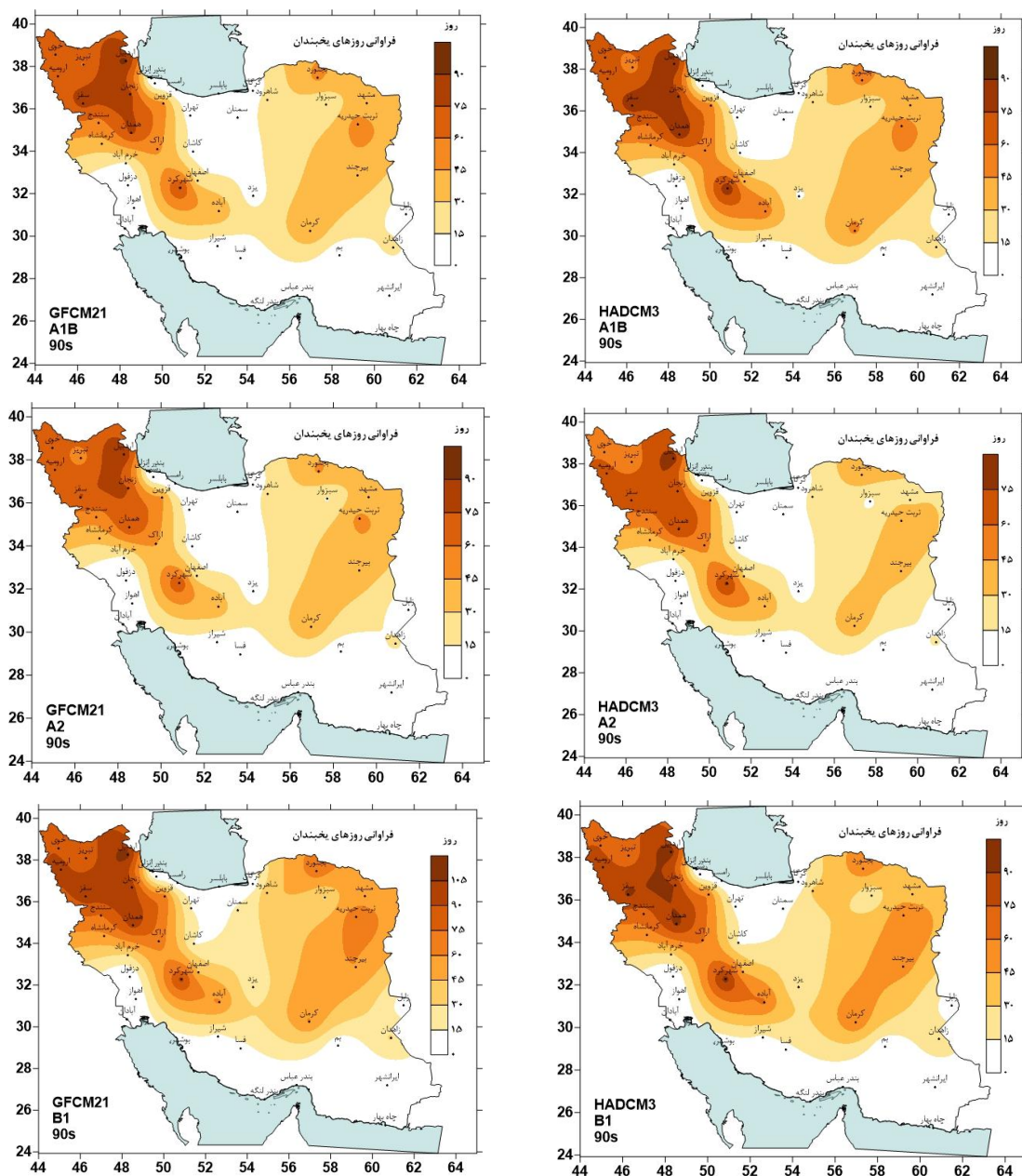
شکل ۶. توزیع فضایی میانگین فراوانی روزهای یخبندان در ایران برای دوره آماری ۱۹۸۱-۲۰۱۰



شکل ۷. نقشه‌های فراوانی روزهای یخبندان اقلیم میانی (۲۰۴۶-۲۰۶۵) با نتایج مدل‌های GFCM21 و HADCM3 بر مبنای سه سناریوی A1B, B1, و A2

بررسی نتایج خروجی مدل‌های اقلیم میانی (۲۰۴۶-۲۰۶۵) بیانگر این است که بر اساس مدل GFCM21 و سناریوهای A1B, A2, و B1 میانگین رخداد سالانه یخبندان در ایران به ترتیب ۳۷، ۴۶، و ۴۱ روز خواهد بود. در سناریوی A1B بیشترین فراوانی رخداد یخبندان در اردیبهیل با میانگین ۱۰۰ روز در سال خواهد بود و ایستگاه‌های سقز، شهرکرد، همدان، زنجان، و ارومیه بیشتر از ۸۰ روز یخبندان خواهند داشت. در دورهٔ مشاهداتی (۱۹۸۱-۲۰۱۰) پنج ایستگاه ساحلی جنوب فاقد یخبندان بودند؛ در حالی که در این دوره ایستگاه‌هایی که در دورهٔ مشاهداتی دارای فراوانی کمتر از ده روز بودند بدون یخبندان خواهند بود. ایستگاه‌های شیراز، فسا، زابل، و بم در نیمهٔ جنوبی، رشت و گرگان در شمال کشور دارای میانگین سالانهٔ یخبندان کمتر از ده روز خواهند بود. بر اساس مدل HADCM3 و سناریوهای

یادشده، میانگین رخداد سالانه یخبندان به ترتیب ۴۱، ۴۲، و ۴۶ روز است. بر مبنای سناریوی A1B و مدل یادشده، بیشترین فراوانی در اردیبهیل با میانگین ۱۰۳ روز در سال دیده می‌شود و شهرهای شهرکرد، سقز، همدان، زنجان، و ارومیه بین ۸۰-۱۰۰ روز یخبندان خواهند داشت. ایستگاه‌های زابل، بم، رامسر، رشت، و گرگان دارای میانگین سالانه کمتر از ده روز یخبندان‌اند. در هر دو مدل و سه سناریو بیشترین کاهش در ایستگاه همدان رخ داده است. در ایستگاه‌های غربی خرم‌آباد، اراک، شهرکرد، و کرمانشاه، در شمال شرق شاهرود و در مرکز ایران در شهر یزد و در نیمه جنوبی ایران در فسا کاهش زیادی نسبت به دوره دیده‌بانی دیده می‌شود. بررسی نقشه‌های پراکنش فضایی روزهای یخبندان بیانگر این است که پراکندگی فراوانی روزهای یخبندان در ایران در هر دو مدل و سه سناریو تغییر زیادی ندارد، فقط میزان فراوانی تفاوت دارد؛ به همین دلیل، به تحلیل سناریوی حد واسط A1B بسنده شده است (شکل ۷).



شکل ۸. نقشه‌های فراوانی روزهای یخبندان اقلیم دور (۲۰۹۹-۲۰۸۰) با نتایج مدل‌های GFCM21 و HADCM3 بر مبنای سه سناریوی B1، A1B، و A2

در دوره ۲۰۰۹-۲۰۸۱ بر مبنای مدل GFCM21 و سناریوهای A1B, B1, و A2 میانگین رخداد سالانه یخبندان ۳۱، ۲۹، و ۴۳ روز خواهد بود. تعداد ایستگاه‌های بدون یخبندان در سناریوی A1B به ۱۲ ایستگاه خواهد رسید. یعنی علاوه بر پنج ایستگاه جنوبی دوره دیده‌بانی، ایستگاه‌های بم، ایرانشهر، آبادان، و دزفول در جنوب و همچنین انزلی، رامسر، و بابلسر در سواحل شمالی کشور بدون یخبندان خواهند بود. بر مبنای مدل HADCM3، میانگین رخداد روزهای یخبندان ۳۳، ۲۸، و ۳۸ روز است. در هر دو مدل بیشترین فراوانی در ایستگاه اردبیل و سپس در دیگر ایستگاه‌های شمال غربی دیده می‌شود. بعد از شمال غرب، در شمال شرق کشور ایستگاه‌های بجنورد و تربت‌حیدریه دارای بیشترین فراوانی روزهای یخبندان با میانگین حدود پنجاه روز در سال خواهند بود (شکل ۸).

شیب تغییرات دهه‌ای فراوانی روزهای یخبندان در بازه زمانی ۱۹۸۱-۲۰۹۹ بر اساس میانگین دو مدل و داده‌های مشاهداتی بررسی شد. تحت سناریوی A1B در ایستگاه همدان روزهای یخبندان در هر دهه هشت روز کاهش می‌یابد. در ردیف بعدی در ایستگاه‌های خرم‌آباد و اراک ۷، در غالب مناطق کوهستانی غرب و شمال غرب و شمال شرق کشور ۶ تا ۷ روز در هر دهه فراوانی روزهای یخبندان کم می‌شود. بر اساس سناریوی A2 در ایستگاه‌های غربی همدان، سقز، شهرکرد، سنندج، خرم‌آباد، و اراک و در شمال شرق مشهد و شاهرود ۷ تا ۹ روز در دهه کم خواهد شد. در بقیه ایستگاه‌های کوهستانی و مرکزی ۶ تا ۷ روز و هرچه از مرکز ایران به سوی سواحل جنوب برویم شمار روزهای یخبندان ۱ تا ۵ روز در هر دهه کاهش می‌یابد تا در سواحل جنوب به منطقه‌ای عاری از یخبندان می‌رسیم. بر مبنای سناریوی B1، میزان تغییرات دهه‌ای کمتر است. دامنه تغییرات دهه‌ای ۰-۶ روز است. میزان کاهش در همدان، اراک، و خرم‌آباد بیشتر از ۵ روز در هر دهه است. در چهارده ایستگاه کوهستانی میزان کاهش ۴-۵ روز در هر دهه است و در بیشتر گستره ایران ۱-۴ روز در هر دهه کاهش فراوانی روزهای یخبندان مشاهده می‌شود. نتایج فراوانی روزهای یخبندان در همه ایستگاه‌ها بیانگر کاهش فراوانی آن در اقلیم میانی و دور آینده نسبت به اقلیم دوره دیده‌بانی است. بیشتر ایستگاه‌هایی که روند کاهشی زیادی در فراوانی روزهای یخبندان در آن‌ها دیده می‌شود در نیمه شمالی کشور قرار دارند و غالباً ایستگاه‌هایی هستند که دارای فراوان‌ترین میانگین روزهای یخبندان سالانه هستند. همچنین، ایستگاه‌هایی که دارای میانگین فراوانی روزهای یخبندان سالانه کمتر از ۱۰ روز هستند و در استان‌های سواحل شمالی و جنوبی قرار دارند در دهه‌های آتی بدون یخبندان خواهند بود. شیب تغییرات مکانی در ایستگاه‌های مختلف دارای تفاوت‌های زیادی است. این تفاوت مکانی می‌تواند بیانگر این مطلب باشد که با وجود اثر پدیده گرمایش جهانی، که می‌تواند به کاهش روزهای یخبندان منجر گردد، عوامل دیگری مانند شرایط محلی و سطحی نیز اثرگذارند. مثلاً، در ایستگاه‌های هواشناسی واقع در کلان‌شهرها، علاوه بر اثر پدیده گرمایش جهانی، اثر جزیره گرمایی ناشی از توسعه شهرنشینی و فعالیت‌های انسانی که موجب افزایش کمینه دما می‌گردد نیز دارای اهمیت است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۳۲).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه اثر گرمایش جهانی بر فراوانی روزهای یخبندان در ایران در دهه‌های آتی با دو مدل سری CMIP3 تحت سه سناریو در بازه‌های زمانی (۲۰۶۵-۲۰۴۶) و (۲۰۹۹-۲۰۸۰) بررسی و با دوره مشاهداتی (۲۰۱۰-۱۹۸۱) مقایسه شد. نتایج ریزگردانی شده کمیته دما بیانگر این بود که در اقلیم میانی (۲۰۶۵-۲۰۴۶) GFCM21 و سناریوهای A1B, B1، و A2 میانگین رخداد سالانه یخبندان در ایران به ترتیب ۳۷، ۴۶، و ۴۱ روز خواهد بود. بر اساس مدل HADCM3 و سناریوهای یادشده، میانگین رخداد سالانه یخبندان به ترتیب ۴۱، ۴۲، و ۴۶ روز است. در دوره ۲۰۰۹-۲۰۸۱، بر مبنای مدل GFCM21، میانگین شاخص یادشده ۳۱، ۲۹، و ۴۳ روز خواهد بود و بر مبنای مدل HADCM3، ۳۳، ۲۸، و ۳۸ روز است. همچنین، شیب تغییرات دهه‌ای فراوانی روزهای یخبندان در بازه زمانی ۱۹۸۱-۲۰۹۹ تحت سناریوهای یادشده به ترتیب حاکی از کاهش ۵/۵-، ۵/۱-، و ۳/۶- روز در هر دهه است. یافته‌های این پژوهش، هماهنگ با نتایج اغلب

مطالعات دیگر انجام گرفته در نقاط گوناگون کشور، نشان از کاهش فراوانی روزهای یخبندان در دهه‌های آتی ایران دارد و تفاوت‌هایی که وجود دارد ناشی از انتخاب نوع مدل، اختلاف در انتخاب طول دوره مشاهداتی، و شبیه‌سازی است؛ به‌گونه‌ای که در پژوهش بهیار و همکاران (۱۳۹۲) با نرم‌افزار SDSM و بر مبنای مدل HADCM3 و سناریوی A2 در دوره ۲۰۳۹-۲۰۲۰ برای ایستگاه‌های تبریز، تهران، زاهدان، و رشت کاهش ۱۵، ۳، ۷، و ۱۵ روزه پیش‌بینی شده است؛ در حالی که در پژوهش فعلی بر مبنای مدل و سناریوی یادشده در اقلیم میانی کاهش ۲۴، ۱۹، ۲۲، و ۱۳ روزه پیش‌بینی شده است. بر اساس نتایج قربانی و ولی‌زاده (۱۳۹۳) شمار روزهای یخبندان در ایستگاه‌های مشهد، تبریز، و قزوین در دوره ۲۰۵۰-۲۰۰۵ نسبت به دوره دیده‌بانی (۱۹۶۱-۲۰۰۵) بر اساس خروجی مدل گردش عمومی جو HadCM3 تحت سناریوی AIB با استفاده از نرم‌افزار LARS-WG به ترتیب ۱۲/۳، ۱۳، و ۱۲/۱ کاهش می‌یابد و در پژوهش فعلی بر اساس مدل و سناریوی فوق در دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵ ایستگاه‌های یادشده ۲۹، ۲۲، و ۱۹ روز کاهش فراوانی میانگین روزهای یخبندان را خواهند داشت.

میزان کاهش در نیمه شمالی و نواحی کوهستانی، که بیشترین فراوانی رخداد یخبندان را دارند، بیشتر از نیمه جنوبی و سواحل است. با کاهش تعداد روزهای یخبندان در این نواحی، ماندگاری منابع یخچالی کوتاه و انبارهای آبی کشور محدود می‌شود. رخداد این شرایط، لزوم توجه مسئولان و برنامه‌ریزان را برای مدیریت و اتخاذ استراتژی‌های لازم در بهره‌وری بهینه منابع آب می‌طلبد.

منابع

- احمدی، م. و زهرایی، ا. (۱۳۹۳). شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر یخبندان‌های زاهدان با استفاده از مدل‌های سه‌بعدی گردش عمومی جو، پژوهش‌های دانش زمین، ۵(۲۰): ۴۴-۲۹.
- اسدی، ا. و حیدری، ع. (۱۳۹۰). تحلیل تغییرات سری‌های دما و بارش شیراز طی دوره ۱۹۵۱-۲۰۰۵، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۲(۳۱): ۱۵۲-۱۳۷.
- اسماعیلی، ر.؛ نوخندان، م.ح. و فلاح قاهره‌ری، غ. (۱۳۸۹). ارزیابی تغییرات طول دوره رشد و یخبندان ناشی از نوسانات اقلیمی (مطالعه موردی: خراسان رضوی)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۷۳: ۸۲-۶۹.
- بهیار، م.؛ خیراندیش، م. و زمانیان، م. (۱۳۹۲). بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر شماره روز اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان بهار در ایران با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی SDSM، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۴(۱۵ و ۱۶): ۱۱۷-۱۲۸.
- ربانی، ف. و کرمی، ف. (۱۳۸۸). بررسی روند تعداد روزهای یخبندان در استان خراسان شمالی، فصل‌نامه جغرافیای طبیعی، ۱(۴): ۹۴-۸۵.
- رضایی، پ. و عابد، ح. (۱۳۸۹). بررسی روند تغییرات دمای حداقل در ایستگاه همدیدی شهر رشت با تأکید بر دوره یخبندان، فصل‌نامه جغرافیا و مطالعات محیطی، ۲(۴): ۴۸-۳۹.
- صداقت‌کردار، ع. و رحیم‌زاده، ف. (۱۳۸۶). تغییرات طول دوره رشد گیاهی در نیمه دوم قرن بیستم در کشور، فصل‌نامه پژوهش و سازندگی، ۷۵: ۱۸۲-۱۹۳.
- علیجانی، ب.؛ محمودی، پ.؛ سلیقه، م. و ریگی چاهی، ا. (۱۳۹۰). بررسی تغییرات کمینه‌ها و بیشینه‌های سالانه دما در ایران، فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی، ۳۳(۳): ۱۰۱-۱۲۲.
- قربانی، خ. و ولی‌زاده، ا. (۱۳۹۳). بررسی تاریخ یخبندان‌ها و سرماهای مؤثر در کشاورزی تحت تأثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی: مشهد، تبریز، و قزوین)، پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۱(۴): ۱۹۷-۲۱۴.

- محمدی، ح؛ عزیزی، ق؛ خوش‌اخلاق، ف. و رنجبر، ف. (۱۳۹۴). روند روزهای یخبندان در ایران (۱۹۸۲-۲۰۱۲)، *جغرافیا (فصلنامه علمی - پژوهشی و بین‌المللی انجمن جغرافیای ایران)*، دوره جدید، ۱۳(۴۶): ۱۱۹-۱۳۶.
- مسعودیان، ا. و دارند، م. (۱۳۹۴). بررسی روند تعداد روزهای یخبندان ایران، *جغرافیا و توسعه*، ۳۹: ۴۹-۶۰.
- مسعودیان، ا. (۱۳۹۰). *آب و هوای ایران*، مشهد: انتشارات شریعتی توس.
- محمودی، پ؛ خسروی، م؛ مسعودیان، ا. و علیجانی، ب. (۱۳۹۱). پهنه‌بندی و پایش یخبندان‌های ایران، پایان‌نامه دکتری اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، مهر ۱۳۹۱.
- هاشمی‌عنا، ک.ک؛ خسروی، م. و طاوسی، ت. (۱۳۹۴). اثر تغییر اقلیم بر طول دوره‌های خشک در ایران، پایان‌نامه دکتری در رشته جغرافیای طبیعی گرایش اقلیم‌شناسی در برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- Ahmadi, M. and Zahraei, R. (2014). Simulate the effects of climate change on frost Zahedan with three-dimensional models of general circulation of the atmosphere, *Earth science research*, 20: 29-44.
- Alijani, B.; Mahmoud, P.; Salighe, M. and Rigi chahi, A. (2011). Determine the minimum and maximum annual changes of temperature in Iran, *Geographical Research Quarterly*, 23(3): 101-122.
- Anandhi, A.; Zion, M.S.; Gowda, P.H.; Pierson, D.C.; Lounsbury, D. and Frei, A. (2013). Past and future changes in frost day indices in Catskill Mountain region of New York, *Hydrological Processes*, 27(21): 3094-3104.
- Asadi, A. and Heydari, A. (2011). Analysis of changes in temperature and precipitation series of Shiraz during the period -2005-1951, *Geography and Environmental Planning Journal*, 22, Title 41(1): 137-152.
- Auer, I.; Matulla, C.; Böhm, R.; Ungersböck, M.; Maugeri, M.; Nanni, T. and Pastorelli, R. (2005). Sensitivity of frost occurrence to temperature variability in the European Alps, *International journal of climatology*, 25(13): 1749-1766.
- Behyar, M.; Kheyrandish, M. and Zamanian, d. (2013). Examine the impact of climate change on the number of days the first frosts of autumn and late spring freezing in Iran using downscaling SDSM, *Journal of Ecology and Issue fifteenth and sixteenth*, 4(15 and 16): 117-128.
- Benestad, R.E. (2011). A new global set of downscaled temperature scenarios, *Journal of Climate*, 24(8): 2080-2098.
- Erlat, E. and Türkes, M. (2012). Analysis of observed variability and trends in numbers of frost days in Turkey for the period 1950-2010, *International Journal of Climatology*, 32(12): 1889-1898.
- Esmaeili, R.; Nokhandan, M.H. and Fallah Qalhari, G.h. (2010). Evaluate the changes of the growing season and frost due to climatic fluctuations, Case Study: Khorasan, *Physical Geography Research*, 73: 69-82.
- Ghasemi, A.R. (2015). Changes and trends in maximum, minimum and mean temperature series in Iran, *Atmospheric Science Letters*, 16(3): 366-372.
- Ghorbani, Kh. and Valizadeh, E. (2014). Studying frost and chilling dates affecting agriculture under climate change (Case study: Mashhad, Tabriz and Qazvin), *J. of Water and Soil Conservation*, 21(4): 197-2014.
- Gordon, C.; Cooper, C.; Senior, C.A.; Banks, H.; Gregory, J.M.; Johns, T.C.; ... and Wood, R.A. (2000). The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments, *Climate Dynamics*, 16(2-3): 147-168.
- Hashemi-Ana, S.K.; Khosravi, M. and Tavousi, T. (2015). The effect of climate change on during dry periods in Iran. PHD Thesis of the Climatology, Department of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, October 2015.
- Loginov, V.F.; Mikutskii, V.S. and Kuznetsov, G.P. (2007). Statistical and probability analysis of frosts in Belarus, *Russian Meteorology and Hydrology*, 32(10): 651-657.

- Meehl, G.A.; Tebaldi, C. and Nychka, D. (2004). Changes in frost days in simulations of twenty first century climate, *Climate Dynamics*, 23(5): 495-511.
- Mahmoudi, P.; Khosravi, M.; Masoodian, A. and Alijani, B. (2012). Zoning and Monitoring Frosts of Iran, PHD Thesis of the Climatology, Department of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, October 2012.
- Masoodian, A. and Darand, M. (2013). Analysis of trend the number of frost days in Iran. *Geography and Development*, 39: 49-60.
- Masoodian, A. (2009). *Iran's Weather*, Mashhad: Published by Sharia Toos.
- Mohammadi, H.; Azizi, Gh; Khosh Akhlagh, F. and Ranjbar, F. (2015). The trend of freezing days in Iran (1982-2012), *Geography, Journal of the International Association of geography*, The new period, the thirteenth year, 46: 119-136.
- Nasa (2017). <https://www.giss.nasa.gov/research/news/20170118/>.
- Rabbani, F. and Karami, F. (2009). Assessment of the number of frost days in North Khorasan province, *Quarterly Geography*, 1(4): 85-94.
- Rezai, P. and Abed, h. (2010). Assess changes in minimum temperature synoptic station in Rasht Focusing on Frost, *Journal of Geography and Environmental Studies*, 4: 39-48.
- Salinger, M.J. and Griffiths, G.M. (2001). Trends in New Zealand daily temperature and rainfall extremes, *International Journal of Climatology*, 21(12): 1437-1452.
- Sedaghat Kerdar, A. and Rahimzadeh, F. (2007). Variation of growing season length (GSL) over second half of 20th in Iran, *Research and development*, 75: 193-182.
- Semenov, M.A.; Brooks, R.J.; Barrow, E.M. and Richardson, C.W. (1998). Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates, *Climate research*, 10(2): 95-107.
- Semenov, M.A. and Barrow, E.M. (2002). *LARS-WG a stochastic weather generator for use in climate impact studies*, User's manual, Version3.0.
- Semenov, M.A. and Stratonovitch, P. (2010). Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts, *Climate research (Open Access for articles 4 years old and older)*, 41(1): 1.
- Sinha, T. and Cherkauer, K.A. (2010). Impacts of future climate change on soil frost in the midwestern United States, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(8): 1-16.
- Stouffer, R.J.; Broccoli, A.J.; Delworth, T.L.; Dixon, K.W.; Gudgel, R.; Held, I.; ... and Soden, B. (2006). GFDL's CM2 global coupled climate models, Part IV: Idealized climate response, *Journal of Climate*, 19(5): 723-740.
- Zhai, P. and Pan, X. (2003). Trends in temperature extremes during 1951-1999 in China, *Geophysical Research Letters*, 30(17).