اثرات تغییر اقلیم بر احتمال وقوع اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان بهاره (مطالعه موردی: اصفهان)

جهانگیر عابدی کوپایی*، سمیه رحیمی خشویی و سیدسعید اسلامیان[1]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۴/۱۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱/۱۶)

چکیده

تغییر تاریخ وقوع اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان بهاره که به‌لحاظ کشاورزی بسیار حائز اهمیت است، می تواند یکی از پیامدهای ناشی از پدیدهٔ گرمایش جهانی باشد. یکی از روش‌های مطالعهٔ اقلیم آینده، استفاده از خروجی مدل های گردش عمومی جو است. با استفاده از روش وزن‌دهی میانگین مشاهداتی دما و بارندگی (MOTP) که طی آن مدل های گردش عمومی جو بر اساس مقدار انحراف میانگین دما یا بارندگی شبیه‌سازی شده در دورهٔ پایه از میانگین داده‌های مشاهداتی وزن‌دهی می‌شوند، مدلی که وزن بیشتری در مدل‌سازی در مورد دادهٔ دمای گذشتهٔ منطقه دارد، به‌عنوان مدل بهینه انتخاب می‌شود. اما این مدل‌ها به‌دلیل قدرت تفکیک مکانی پایین، گویای تغییر اقلیم ایستگاهی نیستند. لذا در این تحقیق برای ریزمقیاس‌نمایی نتایج مدل‌های GCM تحت سه سناریوی انتشار A2 و B1 و A1B در ایستگاه اصفهان از مدل LARS-WG استفاده شد. نتایج استخراج شده با نرم افزار SPSS مورد تحلیل آماری قرار گرفت و بررسی ها در سطح آماری ۵ درصد (P<۰/۰۵) انجام پذیرفت. نتایج این بررسی‌ها برای چشم‌انداز ۲۰۴۹-۲۰۲۰ نشان داد که میانگین شماره روز وقوع اولین یخبندان پاییزه مبتنی بر هر سه سناریو در مقایسه با اقلیم گذشته، در ایستگاه اصفهان ۲ تا ۵ روز افزایش خواهد یافت. همچنین در این ایستگاه برای میانگین شماره روز وقوع آخرین یخبندان بهاره مبتنی بر هر سه سناریو در مقایسه با اقلیم گذشته، بین ۲ تا ۴ روز کاهش مشاهده می‌شود. درنهایت برای داده‌های به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار Easy Fit بهترین توابع توزیع برای تعیین احتمال وقوع اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان بهاره در دورهٔ پایه و در شرایط تغییر اقلیم تحت سه سناریوی انتشار انتخاب شد و مورد مقایسه قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، اولین یخبندان پاییزه، آخرین یخبندان بهاره، مدل LARS-WG، GCMs.

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: koupai@cc.iut.ac.ir

مقدمه

امروزه بزرگ ترین مشکل در هواشناسی کشاورزی تأثیر عوامل آب و هوایی بر محصول است. یخبندان، از مهم ترین پدیده های اقلیمی است که از کاهش دما در طول زمان ناشی می‌شود (۳۰). تجربه و دانش بشری در قلمرو کشاورزی بیانگر این است که می‌توان با تدابیر و پیشگیری‌های به موقع، اثرات زیانبار سرما و یخزدگی را در باغات و مزارع به میزان زیادی کاهش داد (۱۷). از سوی دیگر، موضوع تغییرات اقلیمی مطرح است که در عصر حاضر، یکی از مسائل چالش برانگیز مرتبط با مسائل زیست‌محیطی است. افزایش دمای هوا چه به‌دلیل خشکسالی‌های دوره‌ای و چه به‌دلیل گرمایش جهانی، در سال های آتی امری بسیار محتمل است. مدل های پیش بینی اقلیم آینده نیز نشان می‌دهند که تحت شرایط تغییر اقلیم به‌طور متوسط، درجه حرارت ماهانه حدود ۱/۱ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و بارش سالانه نیز بین ۱۱ تا ۳۱ درصد کاهش می‌یابد (۱۱).

از نیمهٔ دوم قرن بیستم، رشد سریع جمعیت و نیز صنعتی شدن جوامع، منجر به انتشار سریع تر گازهای گلخانه‌ای در جو شد. مهم‌ترین تأثیر افزایش گازهای گلخانه‌ای را می‌توان وقوع خشکسالی های توأم با افزایش درجه حرارت دانست که اثر آن بر کشاورزی بسیار زیان آور است (۵). تغییر شکل نزولات جوی، تغییر زمان وقوع و شدت بارش ها و وقوع سیلاب های ناگهانی نیز از دیگر عوارض آن به‌شمار می رود (۱۶ و ۲۴). از معروف‌ترین گازهای گلخانه‌ای اصلی می توان بخار آب، دی‌اکسید کربن، اکسید نیتروژن، متان و کلروفلوئوروکربن‌ها را نام برد.

دمای هوا یکی از مهم ترین فاکتورهای اقلیمی مؤثر بر رشد گیاهان و تولیدات کشاورزی محسوب می شود. گیاهان برای هر مرحله از دوران رویشی و زایشی خود محدودهٔ دمایی خاصی را نیاز دارند. گیاه در شرایط خارج از این محدودهٔ دمایی، با تنش روبه‌رو شده و ممکن است خسارت ببیند. کاهش دما به پایین تر از حد آستانهٔ تحمل گیاه، باعث بروز سرمازدگی می شود و درصورتی که این کاهش موجب رسیدن دمای هوا به پایین تر از صفر درجه سانتی‌گراد شود، باعث بروز پدیدهٔ یخبندان می شود. از دیدگاه هواشناسی کشاورزی، یخبندان به وقوع دماهای پایین در حدی که منجر به خسارت به بافت های گیاهی شود، اتلاق می‌شود. اثرات یخبندان در بخش کشاورزی بیشتر از سایر بخش‌ها است. در پایان فصل سرما با توجه به تغییر فصل، نوسانات دمایی شدیدی مشاهده می شود، به طوری که در برخی از سال ها افزایش دمای هوا طی چند روز متوالی رخ می دهد و این امر باعث تحرک گیاهان چندساله و بیداری آنها از خواب زمستانی می شود. وقوع سرما و یخبندان بعد از این دوره باعث نابودی بافت‌های نورس گیاهان، جوانه و شکوفهٔ درختان میوه می شود، همچنین محصولات زراعی که مراحل حساس دورهٔ رشد آنها با این سرما مواجه می‌شود، خسارت می بینند. این نوع یخبندان که معمولاً در فصل بهار و اواخر زمستان رخ می دهد، به آخرین یخبندان بهاره (LSF) شهرت دارد و بیشترین خسارت را به بخش کشاورزی وارد می کند. اما آگاهی از آغاز شروع سرما و یخبندان که معمولاً در فصل پاییز رخ می‌دهد و به اولین یخبندان پاییزه (FFF) شهرت دارد، این امکان را به کشاورز می‌دهد تا با به‌کارگیری اقدامات امنیتی شامل استفاده از بخاری‌ها و وسایل گرم کننده، استفاده از پوشش‌های مالچی، کاه و روش‌های دیگر، خسارت‌های احتمالی وارده به گیاهان را به حداقل رسانده یا از آن جلوگیری کند. طول دورهٔ یخبندان نیز می تواند در تصمیم‌گیری برای مناسب بودن الگوی کشت گیاهان زراعی و درختان باغی با توجه به هزینهٔ لازم برای کاهش و جبران خسارات مؤثر باشد. بنابراین مطالعهٔ یخبندان‌ها در بخش کشاورزی می تواند از بنیادی‌ترین مطالعات در بخش کشاورزی باشد (۹).

تاکنون مطالعات مختلف و متعددی روی سرما و یخبندان از دیدگاه‌های مختلف و در رابطه با مباحثی از قبیل مقادیر دما، مقادیر حدی دما، زمان وقوع دمای حداقل، نوع سرما، سرماهای پاییزه و بهاره، شدت و دوام سرما و همچنین استفاده از مدل های اقلیمی و ارزیابی نوسانات اقلیمی و تأثیرات آن در

آینده صورت گرفته است. به طور خاص، مطالعات متعددی بر روی سه موضوع اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان بهاره و دورهٔ یخبندان در داخل و خارج از کشور انجام گرفته است که به نمونه‌هایی از آن اشاره می‌شود:

روزنبرگ و مایرز (۲۲) به این نتیجه رسیدند که تاریخ‌های وقوع یخبندان‌های زودرس پاییزه و دیررس بهاره برای داده های مشاهداتی و برآورد شده از یکدیگر مستقل هستند. فریچ و همکاران (۷) شواهدی مبنی بر طولانی‌تر شدن فصل رشد و کاهش تعداد روزهای یخبندان در بسیاری از نواحی عرض‌های میانی و بالای نیم‌کرهٔ شمالی در طی ۵۰ سال اخیر ارائه دادند. استرلینگ (۶) تغییرات تعداد روزهای یخبندان و بدون یخبندان را که به‌سبب گرمایش جهانی جو در طی نیمهٔ دوم قرن بیستم ایجاد شده است، برای ۹ ناحیهٔ کشور آمریکا به روش آماری مورد مطالعه قرار داد، او نتیجه گرفت که طول فصل بدون یخبندان برای دورهٔ ۱۹۴۸ تا ۱۹۹۹در ایالات متحده افزایش یافته است. آناندهی و همکاران (۲)، پارامترهای مربوط به پدیدهٔ یخبندان از جمله LSF و FFF را با استفاده از دمای کمینهٔ روزانهٔ ۲۳ ایستگاه هواشناسی ناحیهٔ کانزاس برای ۴ دورهٔ زمانی (قبل از سال ۱۹۱۹، ۱۹۴۹-۱۹۲۰، ۱۹۷۹-۱۹۵۰ و ۲۰۰۹-۱۹۸۰) حساب کرده‌اند.

مجرد قره باغ (۱۸) در مطالعه خود در زمینه اصول و روش های تحلیل و پیش‌بینی کمی یخبندان در منطقه آذربایجان، ویژگی آنها را بر مبنای ۱۶ شاخص معتبر و معکوس بین سری های زمانی آغاز و خاتمه یخبندان تحلیل کرده است. نتایج این مطالعه نشان می دهد هر اندازه شروع یخبندان در منطقه زودتر از میانگین کل شروع‌ها رخ دهد، خاتمه آن نیز در بهار دیرتر از میانگین کل پایان ها رخ خواهد داد. نصیری محلاتی و همکاران (۱۹) با مطالعهٔ نتایج حاصل از مدل گردش عمومی در ۳۶ ایستگاه هواشناسی در کل ایران نشان دادند تاریخ وقوع اولین یخبندان پاییزه در ایستگاه های مورد مطالعه در کل ایران تا سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۵۰ میلادی به‌ترتیب به میزان ۹-۵ روز و ۱۵-۸ روز به تأخیر خواهد افتاد. همچنین نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل‌های گردش عمومی جو حاکی از وقوع زودتر آخرین یخبندان بهاره به میزان ۸-۴ روز و ۱۲-۷ روز به ترتیب تا سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۵۰ میلادی خواهد بود. پدرام و همکاران (۲۱) به بررسی تغییرات طول دوره بدون یخبندان و تعداد روزهای یخبندان در استان‌های آذربایجان شرقی و غربی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که در بین ۸ ایستگاه منتخب، روند تعداد روزهای یخبندان در اغلب ایستگاه ها به‌غیر از ارومیه و جلفا کاهشی بوده است. عابدی و همکاران (۱) نشان دادند که در مطالعات آماری مربوط به این‌گونه پدیده‌ها، تنها استفاده از یک نوع تابع توزیع، مناسب به‌نظر نمی‌رسد، بلکه باید برای هر سری از داده‌ها، بهترین تابع توزیع انتخاب شود و داده‌ها نسبت به آن تابع برازش شود. خیراندیش و همکاران (۱۵) تأثیر تغییر اقلیم را بر طول فصل رشد بررسی کردند. آنها طول فصل رشد را فاصلهٔ بین آخرین یخبندان بهاره تا اولین یخبندان پاییزه با فرض دمای مبنای صفر درجه سانتی‌گراد درنظر گرفتند و نشان دادند در چشم‌انداز ۲۰۲۰-۲۰۵۰ در چند نمونه اقلیمی ایران برای آستانهٔ دمایی صفر درجه سانتی‌گراد، طول فصل رشد در مقایسه با اقلیم گذشته در ایستگاه های مشهد، تهران، اصفهان، رشت و زاهدان افزایش خواهد یافت. نتایج مطالعات قربانی و ولیزاده (۹) نشان داد در ایستگاه‌های مطالعاتی مشهد، تبریز و قزوین تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر اساس خروجی مدل گردش عمومی جو HadCM3 تحت سناریوی A_1B و با استفاده از نرم‌افزار مولد داده LARS-WG ، طول دوره یخبندان و سرما کاهش خواهد یافت.

با پیش بینی پارامترهای اقلیمی و بررسی روند آنها در آینده، می‌توان نحوهٔ وقوع پدیده‌های جوی زیان‌بخش یا سودمند و محاسبهٔ احتمال وقوع آنها در هر محل را بررسی کرد که در مجموع در طول سال های متمادی، منافع اقتصادی زیادی را می‌تواند تضمین کند. از آنجا که در بیشتر سال‌ها چه در اوایل پاییز و چه در اوایل بهار، یخبندان‌ها آسیب جدی را به محصولات زراعی وارد می‌کند، شناخت زمان وقوع این یخبندان‌ها برای محافظت از محصولات زراعی و باغی لازم

است. بررسی و شناخت دقیق این یخبندان‌ها در برنامه‌ریزی های محیطی به دلیل آسیب کمتر کشاورزان، لازم و ضروری است و در آن تأثیر زیادی خواهد داشت و تعیین این روندهای احتمالی که در اثر گرمایش جهانی در آینده اتفاق خواهند افتاد، تصویری از شرایط زیست‌محیطی در آینده را به تصویر می‌کشد (۴، ۲۰ و ۲۸).

اهداف عمدهٔ این تحقیق عبارتند از: بررسی پدیدهٔ یخبندان با استفاده از دماهای حداقل روزانه و تعیین تاریخ‌های وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه و آخرین یخبندان دیررس بهاره برای ایستگاه اصفهان و بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روی آن بر اساس مدل های چرخش عمومی جو (GCM) و تعیین بهترین تابع توزیع برای تعیین احتمال وقوع اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان بهاره برای ایستگاه اصفهان در شرایط تغییر اقلیم و مقایسه با شرایط عادی.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقهٔ مورد مطالعه

شهر اصفهان دارای طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۹ دقیقه و ۴۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۸ دقیقه و ۳۰ ثانیه شمالی است و ۱۵۵۰ متر ارتفاع از سطح دریا دارد. بر اساس روش دومارتن، دارای اقلیم خشک است. متوسط میزان بارندگی سالانهٔ آن ۱۱۶/۹ میلی‌متر است.

مدل‌های گردش عمومی جو

مدل های گردش عمومی جو، مدل های سه بعدی هستند که روابط حاکم بر هواکره، یخ‌کره، آب‌کره و زیست‌کره را بیان می‌کنند. پس از شبیه‌سازی این متغیرها در دوره‌های گذشته، به‌منظور شبیه‌سازی این متغیرها در دوره‌های آتی نیاز به معرفی وضعیت انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی برای این مدل هاست. بدین منظور ابتدا میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه شده در سناریوهای انتشار، به‌عنوان ورودی مدل های گردش عمومی ارائه می‌شوند. نتایج ناشی از شبیه‌سازی، سری زمانی متغیرهای اقلیمی را ارائه می دهند (۸). سناریوی انتشار، بیانگر اطلاعاتی از وضعیت اجتماعی و اقتصادی و تأثیر این وضعیت بر انتشار گازهای گلخانه ای است. دو گروه عمده و مهم از این سناریوها گروه A و B است. در سناریوی A تأکید بر مسائل اقتصادی است و برنامهٔ خاصی برای کنترل صنایع تولید کنندهٔ گازهای گلخانه‌ای وجود ندارد. پس در واقع فرض بر ادامهٔ روند فعلی افزایش گازهای گلخانه‌ای است. در سناریوی B تأکید بر مسائل زیست‌محیطی است. پس فرض بر این است که انتشار گازهای گلخانه ای کنترل خواهد شد و برنامهٔ کنترل کننده آلاینده ها برای صنایع اجرا خواهد شد. سناریوی A_2 یکی از سناریوهای تغییر اقلیم است که بر اساس آن عقیده بر این است که در آینده، جمعیت دنیا به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد و سوخت‌های فسیلی بدون حفظ تعادل مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سناریوی B_1 دنیا یکپارچه و دوستدار محیط زیست درنظر گرفته می‌شود و استفاده از منابع پاک و فناوری های نوین و با بازده زیاد و کاهش مواد آلاینده وجود دارد. در سناریوی A_1B در آینده، میزان سوخت های فسیلی با حفظ تعادل مورد استفاده قرار می‌گیرد و همچنین در کنار آنها از سوخت غیرفسیلی نیز استفاده می‌شود (۱۰).

مدل LARS-WG

خروجی مدل های GCM به دلیل بزرگ بودن سلول‌های محاسباتی آنها به طور مستقیم قابل استفاده نیست و برای استفاده بایستی آنها را به اصطلاح ریزمقیاس کرد. دو روش آماری و دینامیکی برای این کار وجود دارد. از مهم‌ترین روش‌های آماری موجود برای مطالعهٔ اثرات تغییراقلیم، می‌توان به مدل‌های مولد داده های هواشناسی اشاره کرد (۱۳). دو دلیل عمده برای توسعهٔ مدل های مولد تصادفی داده های آب و هواشناسی، ایجاد سری داده های هواشناسی گمشده در ایستگاه های هواشناسی و یا تطویل آنها و نیز صرفهٔ اقتصادی و زمان کم مورد نیاز برای اجرای این مدل ها در تولید داده های روزانهٔ آب و هوایی است (۲۶).

در این تحقیق از مدل LARS–WG5.5 برای ریزمقیاس کردن استفاده شد. ارزیابی این مدل در اقلیم های مختلف ایران، حاکی از مفید بودن آن در مدل سازی رفتار اقلیم است (۲۷). این مدل از سه بخش اصلی واسنجی، صحت‌سنجی (اعتبارسنجی) و ایجاد داده های هواشناسی مصنوعی تشکیل شده است. مرحلهٔ واسنجی مدل، اولین مرحله برای تولید سری‌های زمانی روزانه داده‌های جوی است. در این مرحله، داده های مشاهداتی برای تحلیل خصوصیات آماری به مدل معرفی شد. در مرحلهٔ صحت‌سنجی مدل که در گزینه Qtest انجام می‌گیرد، توانایی مدل برای شبیه‌سازی اقلیم در منطقه مورد نظر بررسی می‌شود. دراین مرحله، یک مقایسه آماری بین داده‌های جوی مصنوعی تولید شده و پارامترهای به‌دست آمده از داده های مشاهده‌ای انجام می‌گیرد. در مرحلهٔ سوم نیز اقدام به تولید داده‌های آب و هوایی برای دوره‌های آتی مورد مطالعه شد (۲۳).

آزمون کلوموگروف – اسمیرنوف

آزمون کلوموگروف – اسمیرنوف یکی از آزمون‌هایی است که برای سنجش تبعیت توزیع یک نمونه از توزیع خاص استفاده می شود. آماره این آزمون، بیشترین اختلاف بین فرکانس‌های مورد انتظار و واقعی (به صورت قدر مطلق) اندازه گیری شده در دسته‌های مختلف است. این آماره به صورت رابطهٔ زیر نوشته می‌شود:

$$D=\max \left| f(x)-f^{*}(x) \right| \qquad (۱)$$

که در آن f فرکانس نسبی تجمعی واقعی و f^{*} فرکانس نسبی تجمعی مورد انتظار است. مراحل زیر برای انجام این آزمون طی می‌شود:

۱- فرکانس نسبی تجمعی یک نمونه برای بازه‌های (دسته‌بندی‌های) مختلف اندازه‌گیری می‌شود.

۲- فرکانس نسبی تجمعی برای دسته‌های مختلف با استفاده از توزیع آماری تئوری یا از روی نمونه اطلاعات دیگری به‌دست می‌آید.

۳- قدر مطلق تفاضل دو فرکانس به‌دست آمده از مراحل ۱ و ۲ در هر بازه محاسبه می‌شود و بیشترین مقدار تفاضل به‌دست آمده به‌عنوان آمارهٔ آزمون (D) یادداشت می‌شود.

۴- با انتخاب مقدار α به‌عنوان میزان خطا و برای تعداد نمونهٔ n، مقدار D_{α} از جدول‌های مربوطه خوانده می‌شود.

۵- اگر D از مقدار D_{α} کمتر باشد، آنگاه فرض تبعیت نمونه از توزیع درنظر گرفته شده پذیرفته شده و در غیر این‌صورت رد می‌شود (۱۴).

نرم‌افزار EasyFit

نرم‌افزار EasyFit، تحلیل و شبیه‌سازی داده‌ها را با امکان برازش توزیع‌های احتمالی بر روی نمونه داده ها، انتخاب بهترین مدل و اعمال نتایج تحلیل فراهم می کند. این نرم افزار شامل تمام قابلیت‌های لازم برای انجام آنالیز و تفسیر نتایج است. دو نوع تحلیل در این نرم افزار وجود دارد که شامل برازش توزیع و آمار توصیفی می‌شوند. نرم افزار EasyFit دارای بیش از ۵۰ تابع توزیع احتمال است (۱۲ و ۲۵).

داده های روزانه و ماهانهٔ بارش و دما برای ایستگاه اصفهان از سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری شد. سپس داده‌های ماهانه دما و بارش ماهانهٔ ۸ مدل CSMK3، CNCM3، NCAR، ECHAM4، CCSR، HADCM3، CSIRO و GFDL از مدل‌های GCM برای دورهٔ زمانی پایه ۲۰۰۰–۱۹۷۱ از سایت مربوطه (۲۹) دریافت شد (جدول ۱). با روش وزن‌دهی میانگین مشاهداتی دما و بارندگی (MOTP)، مدل های GCM بر اساس مقدار انحراف میانگین دما یا بارندگی شبیه سازی شده در دورهٔ پایه از میانگین داده های مشاهداتی وزن‌دهی شدند:

$$W_i = (1/\Delta T_i) / \sum_{i=1}^{N} (1/\Delta T_i) \qquad (۲)$$

که در آن W_i وزن هر مدل در ماه مورد نظر و ΔT_i انحراف میانگین طولانی مدت دمای شبیه سازی شده توسط هر یک از

جدول ۱. وزن‌های به‌دست آمده برای ۸ مدل GCM مربوط به متغیر دما برای ایستگاه اصفهان

ماه	NCAR	ECHAM4	CCSR	HADCM3	CSIRO	GFDL	CNCM3	CSMK3
ژانویه	۰/۳۲	۰/۱۷	۰/۰۳	۰/۱	۰/۱	۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۰۸
فوریه	۰/۳۱	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۰۹
مارس	۰/۴	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۰۷
آوریل	۰/۴۳	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۱	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۸
می	۰/۴۸	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۹
ژوئن	۰/۴۷	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۱۲
جولای	۰/۴۹	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۹
آگوست	۰/۴۸	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۸
سپتامبر	۰/۶۱	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
اکتبر	۰/۵۹	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۵
نوامبر	۰/۶۷	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۵
دسامبر	۰/۷۵	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۲

مدل‌های GCM در دورهٔ پایه از میانگین داده‌های مشاهداتی است. با جایگذاری مقادیر بارندگی به‌جای دما در رابطهٔ بالا، وزن‌های متناظر با متغیر بارندگی نیز به دست می آید. درنهایت، مدلی که بیشترین وزن را در مورد دادهٔ دما داشت به‌عنوان مدل بهینه انتخاب شد. سپس توانایی مدل LARS در ایجاد داده‌های روزانه توسط برنامهٔ SPSS و با استفاده از آزمون T-Test ارزیابی شد و مقایسه‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام پذیرفت. داده های ماهانه دما و بارش برای دورهٔ زمانی آینده ۲۰۴۹-۲۰۲۰ برای مدل بهینه تحت سه سناریوی انتشار از سایت مربوطه دریافت شد. با کمک داده‌های مذکور و نیز داده‌های مشاهداتی، داده های ریزمقیاس شده توسط مدل LARS-WG برای ایستگاه اصفهان ایجاد شد. در مرحلهٔ بعد نیز از روی داده‌های خروجی دمای کمینهٔ روزانهٔ شبیه‌سازی شده و ریزمقیاس شده در دورهٔ ۲۰۴۹-۲۰۲۰ و با توجه به دمای مبنای صفر درجه سانتی‌گراد برای وقوع یخبندان، تاریخ وقوع اولین یخبندان پاییزه و نیز آخرین یخبندان بهاره مشخص شد. درنهایت بهترین توابع توزیع احتمال برای دو حالت دورهٔ پایه و در شرایط تغییر اقلیم تحت سه سناریوی انتشار تعیین شد.

نتایج و بحث

انتخاب بهترین مدل

نتایج حاصل از وزن‌دهی به مقادیر دمای میانگین خروجی ۸ مدل انتخابی GCM برای دورهٔ زمانی پایهٔ ۲۰۰۰-۱۹۷۱ نشان داد که مدل NCAR با اختلاف زیادی بیشترین وزن را در شبیه سازی متغیر دما دارا است و به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

ارزیابی مدل LARS-WG

برای ارزیابی مدل لارس در تولید داده‌های هواشناسی، از داده های مشاهداتی ایستگاه اصفهان در دورهٔ ۳۰ سالهٔ ۲۰۰۰-۱۹۷۱ استفاده شد. داده‌های مورد استفاده شامل دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش بود. برای تولید داده توسط مدل لارس، ابتدا مشخصات ایستگاه شامل نام، موقعیت مکانی و ارتفاع از سطح دریا و همچنین فایل داده های هواشناسی روزانه در دورهٔ مشاهداتی به‌عنوان ورودی به مدل داده شد، سپس مدل با توجه به روند موجود در سری‌های زمانی داده های مشاهداتی، اقدام به باز تولید داده‌های ایستگاه در همین دورهٔ

جدول ۲. مقادیر p-value برای سال‌های ۱۹۷۱ تا ۱۹۸۰ ایستگاه اصفهان

ماه	p-value									
	۱۹۷۱	۱۹۷۲	۱۹۷۳	۱۹۷۴	۱۹۷۵	۱۹۷۶	۱۹۷۷	۱۹۷۸	۱۹۷۹	۱۹۸۰
ژانویه	۰/۹۵۱	۰/۹۴۶	۰/۸۹۷	۰/۸۵۷	۰/۷۱۳	۰/۷۱۵	۰/۶۲۳	۰/۶۴۳	۰/۷۵۳	۰/۹۰۲
فوریه	۰/۷۶۰	۰/۸۳۹	۰/۷۳۱	۰/۷۹۱	۰/۶۱۳	۰/۷۱۷	۰/۷۶۰	۰/۸۸۳	۰/۹۴۷	۰/۸۳۴
مارس	۰/۷۶۱	۰/۸۴۳	۰/۷۰۴	۰/۸۳۰	۰/۹۱۲	۰/۸۴۴	۰/۶۱۸	۰/۸۶۱	۰/۵۹۹	۰/۹۸۷
آوریل	۰/۸۸۳	۰/۶۹۴	۰/۶۶۹	۰/۹۹۱	۰/۸۳۵	۰/۷۸۳	۰/۷۰۴	۰/۵۹۸	۰/۴۴۳	۰/۷۰۲
می	۰/۳۳۱	۰/۹۰۴	۰/۴۴۲	۰/۹۰۷	۰/۷۶۰	۰/۶۵۳	۰/۳۰۹	۰/۶۴۹	۰/۸۴۱	۰/۲۶۸
ژوئن	۰/۶۶۸	۰/۷۲۹	۰/۶۴۶	۰/۷۴۵	۰/۵۳۶	۰/۷۷۲	۰/۵۳۵	۰/۲۰۹	۰/۳۱۱	۰/۴۱۳
جولای	۰/۳۹۰	۰/۶۴۸	۰/۷۶۴	۰/۹۶۱	۰/۵۴۷	۰/۶۴۵	۰/۸۸۶	۰/۹۰۱	۰/۵۴۴	۰/۵۴۷
آگوست	۰/۸۵۵	۰/۶۲۶	۰/۵۲۳	۰/۳۲۳	۰/۸۵۹	۰/۶۷۴	۰/۵۳۱	۰/۷۶۴	۰/۷۷۳	۰/۲۹۸
سپتامبر	۰/۵۶۸	۰/۴۲۵	۰/۸۳۵	۰/۶۳۹	۰/۵۲۶	۰/۸۲۷	۰/۴۲۹	۰/۷۴۸	۰/۶۵۱	۰/۷۵۴
اکتبر	۰/۵۶۴	۰/۳۹۷	۰/۸۶۹	۰/۶۵۴	۰/۴۳۴	۰/۹۵۷	۰/۵۳۵	۰/۲۶۶	۰/۸۶۰	۰/۵۳۴
نوامبر	۰/۵۴۵	۰/۶۵۹	۰/۶۵۴	۰/۷۶۷	۰/۳۱۸	۰/۵۴۳	۰/۷۵۹	۰/۹۷۸	۰/۵۳۲	۰/۵۴۹
دسامبر	۰/۴۶۵	۰/۳۶۷	۰/۹۸۵	۰/۸۷۶	۰/۴۸۷	۰/۶۷۴	۰/۴۵۳	۰/۹۸۰	۰/۵۴۸	۰/۷۶۳

زمانی کرد. درنهایت با استفاده از آزمون آماری T-test، میانگین ماهانهٔ داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی مقایسه شد تا توانایی مدل در شبیه سازی داده های هواشناسی در این ایستگاه‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. با توجه به مقادیر p-value ارائه شده برای ایستگاه اصفهان توسط برنامهٔ SPSS، نتایج آزمون T نشان داد که فرض صفر رد نمی شود و توانمندی مدل LARS-WG در مدل‌سازی دمای کمینه برای ایستگاه اصفهان در سطح اطمینان ۹۵ درصد قابل قبول است. به‌عنوان نمونه برای سال‌های ۱۹۷۱ تا ۱۹۸۰ ایستگاه اصفهان، مقادیر p-value ارائه شده توسط برنامهٔ SPSS مطابق جدول ۲ است:

بررسی تاریخ وقوع یخبندان‌ها و طول دورهٔ یخبندان برای دورهٔ ۲۰۰۰-۱۹۷۱ و دورهٔ ۲۰۴۹-۲۰۲۰

جدول ۳ زودترین، دیرترین و میانگین تاریخ وقوع اولین یخبندان پاییزه و تاریخ وقوع آخرین یخبندان بهاره، و نیز کوتاه‌ترین، بلندترین و میانگین طول دورهٔ یخبندان را برحسب تعداد روز برای دورهٔ آماری پایه یعنی طی سال‌های ۲۰۰۰-۱۹۷۱ برای ایستگاه مورد مطالعه نشان می‌دهد. واحد دوره‌ها برحسب روز است.

جدول ۴ نیز زودترین، دیرترین و میانگین تاریخ وقوع اولین یخبندان پاییزه و تاریخ وقوع آخرین یخبندان بهاره، و نیز کوتاه‌ترین، بلندترین و میانگین طول دورهٔ یخبندان را برحسب روز برای دورهٔ آماری آینده یعنی طی سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۹ و تحت شرایط تغییر اقلیم برای سه سناریوی انتشار A_2، B_1 و A_1B برای ایستگاه اصفهان نشان می‌دهد.

بررسی تاریخ وقوع یخبندان‌ها و طول دورهٔ یخبندان برای ایستگاه اصفهان

طول دورهٔ یخبندان به طور میانگین برای ایستگاه اصفهان در مقایسه با میانگین طول دورهٔ یخبندان برای اقلیم گذشتهٔ ایستگاه تحت سناریوهای انتشار A_2، B_1 و A_1B به ترتیب به‌میزان ۱۰ روز، ۷ روز و ۹ روز کوتاه‌تر است. میانگین تاریخ وقوع اولین یخبندان پاییزه نیز به‌ترتیب به‌طور میانگین ۵ روز، ۴ روز و ۲ روز دیرتر از دورهٔ گذشته رخ می‌دهند. تاریخ

جدول ۳. نتایج محاسبات مربوط به دورهٔ یخبندان طی دورهٔ آماری ۲۰۰۰-۱۹۷۱

ایستگاه	زودترین تاریخ FFF	دیرترین تاریخ FFF	میانگین تاریخ FFF	زودترین تاریخ LSF	دیرترین تاریخ LSF	میانگین تاریخ LSF	کوتاه‌ترین دوره یخبندان	بلندترین دوره یخبندان	میانگین دوره یخبندان
اصفهان	۱۰ آبان	۲۶ آبان	۲۱ آبان	۵ اسفند	۲۳ فروردین	۲۵ اسفند	۱۰۰	۱۴۹	۱۱۲

جدول ۴. نتایج محاسبات مربوط به یخبندان طی دورهٔ آماری ۲۰۴۹-۲۰۲۰

سناریوی انتشار	زودترین تاریخ FFF	دیرترین تاریخ FFF	میانگین تاریخ FFF	زودترین تاریخ LSF	دیرترین تاریخ LSF	میانگین تاریخ LSF	کوتاه‌ترین دوره یخبندان	بلندترین دوره یخبندان	میانگین دوره یخبندان
A2	۲۸ آبان	۴ آذر	۲۶ آبان	۲۰ بهمن	۲۰ فروردین	۲۱ اسفند	۶۷	۱۳۵	۱۰۲
B1	۱۰ آبان	۴ آذر	۲۵ آبان	۲ اسفند	۲۰ فروردین	۲۳ اسفند	۷۰	۱۲۹	۱۰۵
A1B	۴ آذر	۲۷ آبان	۲۳ آبان	۲۶ بهمن	۱ فروردین	۲۲ اسفند	۷۲	۱۳۲	۱۰۳

وقوع آخرین یخبندان بهاره برای ایستگاه اصفهان تحت سناریوهای انتشار A2، B_1 و A_1B به ترتیب به‌طور میانگین ۴ روز، ۲ روز و ۳ روز زودتر از دورهٔ گذشته رخ می‌دهند.

ضریب همبستگی اسپیرمن

ضریب همبستگی، آماره‌ای برای بررسی وجود رابطهٔ خطی بین دو متغیر که هر کدام با واحدهای مخصوص به خود اندازه‌گیری شده‌اند است، با r نشان داده شده و دامنهٔ آن بین ۱ + تا ۱- تغییر می‌کند. مقادیر نزدیک به ۱+ و ۱- نشان از همبستگی قوی بین دو متغیر دارد و هرقدر این مقادیر به صفر نزدیک شوند، از قدرت همبستگی بین دو متغیر کم می‌شود، به‌طوری که در نقطهٔ صفر دو متغیر هیچ رابطه‌ای با یکدیگر ندارند. مراحل محاسبه ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن بدین شرح است (۳):

۱- مقادیر x_i از x و y_i از y رتبه‌بندی شده و سپس مقادیر $d_i = x_i - y_i$ محاسبه می‌شود.

۲- ضریب همبستگی اسپیرمن بر اساس رتبه‌ها محاسبه می شود واز رابطهٔ ۲ به‌دست می‌آید:

$$r_s=1-6\sum d_i^2/[n(n^2-1)] \qquad (۲)$$

که در رابطهٔ بالا، n نشانگر تعداد داده‌ها یا تعداد زوج‌های مرتب تشکیل شده و d_i اختلاف بین رتبه‌های دو متغیر و نشان‌دهندهٔ زوج‌های مرتب تشکیل شده از دو متغیری که ضریب همبستگی آنها محاسبه می شود است. فرض صفر زمانی رد می شود که میزان ضریب همبستگی اسپیرمن r_s بیشتر از مقدار بحرانی از جدول ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن به‌دست می‌آید باشد. چون سطح معنی‌داری مورد نظر ما در ۵ درصد است و اندازهٔ جامعهٔ آماری مورد بررسی نیز ۳۰ است، مقدار بحرانی ۰/۳۰۶ از جدول ۵ انتخاب شد.

از روش همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن برای بررسی وجود همبستگی معنی دار بین تاریخ وقوع اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان بهاره و طول دورهٔ یخبندان در دو دورهٔ گذشته و آینده، استفاده شد. آزمون‌های فرض مطرح شده در این مورد عبارتند از (۳):

H_0: $r_s=0$: بین طول دورهٔ یخبندان گذشته با طول دورهٔ یخبندان آینده همبستگی وجود ندارد.

H_1: $r_s\neq0$: بین طول دورهٔ یخبندان گذشته با طول دورهٔ یخبندان آینده همبستگی وجود دارد.

به‌طور مشابه برای شمارهٔ روز وقوع اولین یخبندان پاییزه و

جدول ۵. ارزش‌های بحرانی rs در سطوح مختلف برای ضریب همبستگی اسپیرمن

تعداد نمونه‌ها	سطح معنی‌داری			
	۰/۰۵	۰/۰۲۵	۰/۰۱	۰/۰۰۵
۵	۰/۹	۱	۱	–
۶	۰/۸۲۹	۰/۸۸۶	۰/۹۴۳	۱
۷	۰/۷۱۴	۰/۷۸۶	۰/۸۹۳	۰/۹۲۹
۸	۰/۶۴۳	۰/۷۳۸	۰/۸۳۳	۰/۸۸۱
۹	۰/۶۰۰	۰/۶۸۳	۰/۷۸۳	۰/۸۳۳
۱۰	۰/۵۶۴	۰/۶۴۸	۰/۷۴۶	۰/۷۹۴
۱۲	۰/۵۰۶	۰/۵۹۱	۰/۷۱۲	۰/۷۷۷
۱۴	۰/۴۵۶	۰/۵۴۴	۰/۶۴۵	۰/۷۱۵
۱۶	۰/۴۲۵	۰/۵۰۶	۰/۶۰۱	۰/۶۶۵
۱۸	۰/۳۹۹	۰/۴۷۵	۰/۵۶۴	۰/۶۲۵
۲۰	۰/۳۷۷	۰/۴۵۰	۰/۵۳۴	۰/۵۹۱
۲۲	۰/۳۵۹	۰/۴۲۸	۰/۵۰۸	۰/۵۶۲
۲۴	۰/۳۴۳	۰/۴۰۹	۰/۴۸۵	۰/۵۳۷
۲۶	۰/۳۲۹	۰/۳۹۲	۰/۴۶۵	۰/۵۱۵
۲۸	۰/۳۱۷	۰/۳۷۷	۰/۴۴۸	۰/۴۹۶
۳۰	۰/۳۰۶	۰/۳۶۴	۰/۴۳۲	۰/۴۷۱

نیز شمارهٔ روز وقوع آخرین یخبندان بهاره این فرضیات تعریف می‌شود.

میزان ضریب همبستگی اسپیرمن r_s، برای داده‌های رتبه‌بندی شدهٔ شمارهٔ روز وقوع اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان بهاره و طول دورهٔ یخبندان گذشته و آینده با استفاده از رابطهٔ ۲، به وسیلهٔ نرم‌افزار SPSS محاسبه شد. بعد از محاسبهٔ ضرب همبستگی اسپیرمن، این مقدار با مقدار بحرانی این ضریب در سطح اطمینان ۹۵ درصد مورد مقایسه و بررسی آماری قرار گرفته و فرض صفر مبنی بر فقدان همبستگی بین شمارهٔ روز وقوع اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان بهاره و طول دورهٔ یخبندان گذشته و آینده برای هر شش ایستگاه مورد بررسی واقع شد. نتایج این بررسی‌ها در جدول ۶ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می شود، چون مقادیر ضریب همبستگی محاسبه شده برای ایستگاه اصفهان بزرگ‌تر از مقدار بحرانی در جدول است، بدین ترتیب نمی توان فرض مخالف صفر را رد کرد و بنابراین فرض مخالف صفر مبنی بر وجود همبستگی بین شمارهٔ روز وقوع اولین یخبندان پاییزه و وقوع آخرین یخبندان بهاره و طول دورهٔ یخبندان گذشته و آینده در سطح اطمینان ۹۵ درصد پذیرفته می‌شود. یعنی مقادیر دو متغیر شبیه هم تغییر می کند، یعنی با کم یا زیاد شدن یکی دیگری هم کم یا زیاد شود و کاهش یا افزایش آن از روی علامت ضریب r_s تعیین می شود. این فرض با توجه به استفاده از مقادیر داده‌های مشاهده شده در گذشته برای به دست آوردن مقادیر پیش‌بینی شده برای آینده تحت برنامهٔ لارس که برای ریزمقیاس‌نمایی استفاده شد، قابل قبول است.

جدول ۶. نتایج حاصل از محاسبهٔ ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن

سناریوی انتشار	پارامتر	ضریب همبستگی اسپیرمن به‌دست آمده | rs |	مقدار بحرانی ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن
A2	اولین یخبندان پاییزه	۰/۳۷۶	۰/۳۰۶
B1	اولین یخبندان پاییزه	۰/۴۴۱	۰/۳۰۶
A1B	اولین یخبندان پاییزه	۰/۳۷۵	۰/۳۰۶
A2	آخرین یخبندان بهاره	۰/۳۵۵	۰/۳۰۶
B1	آخرین یخبندان بهاره	۰/۳۸۱	۰/۳۰۶
A1B	آخرین یخبندان بهاره	۰/۴۲۹	۰/۳۰۶
A2	طول دورهٔ یخبندان	۰/۴۲۹	۰/۳۰۶
B1	طول دورهٔ یخبندان	۰/۷۷۱	۰/۳۰۶
A1B	طول دورهٔ یخبندان	۰/۹۱۲	۰/۳۰۶

بررسی توابع توزیع برازش شده

در این تحقیق، آزمون برازش نکویی کلموگروف- اسمیرنوف از بین سه آزمون کای اسکوئر، اندرسون دارلینگ و کلموگروف- اسمیرنوف مورد استفاده در برنامهٔ Easyfit، به دلیل دقت بالاتر انتخاب شد و برای هر سری از داده‌ها، اولین تابع برازش شده انتخاب شد که در جدول ۷ توابع مشاهده می‌شود.

برنامهٔ Easyfit، مقادیر بحرانی شاخص‌های آماری آزمون نکویی برازش محاسبه شده را بر اساس سطوح معناداری مختلف (۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲=α) فهرست می کند. همچنین پذیرش فرض صفر در هر سطح معناداری را نیز با مقایسهٔ آمارهٔ آزمون محاسبه شده توسط برنامه و آمارهٔ آزمون بحرانی نشان می‌دهد. همان‌طور که بیان شد، آمارهٔ آزمون بحرانی بر اساس تعداد نمونه‌ها و سطح معناداری مورد نظر تعیین می‌شود.

در این تحقیق بررسی‌های آماری در سطح معناداری ۵ درصد انجام گرفت و آمارهٔ آزمون بحرانی ۰/۲۴۱۷ درنظر گرفته شد. طبق آزمون کلموگروف- اسمیرنوف اگر آماره آزمون محاسبه شده توسط برنامه (D) از مقدار بحرانی آماره آزمون (D_α) به‌دست آمده از جدول کمتر باشد، آنگاه فرض تبعیت نمونه از توزیع درنظر گرفته شده پذیرفته شده و در غیر این‌صورت رد می‌شود. به‌عنوان نمونه، توابع توزیع برازش شده برای شماره روزهای وقوع اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان بهاره در حالت پایه برای ایستگاه اصفهان در جدول‌های ۸ و ۹ بررسی و مقایسه شد.

نتایج بررسی‌های انجام شده و استخراج تاریخ وقوع اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان بهاره و تعیین طول دورهٔ یخبندان، نشان‌دهندهٔ کاهش طول دورهٔ یخبندان در ایستگاه اصفهان تحت هر سه سناریوی انتشار A_2، B_1 و A_1B است. مطالعات انجام شده در گذشته نیز تأیید کنندهٔ نتایج حاصل شده است. به‌عنوان نمونه نصیری محلاتی و همکاران (۱۹) نشان دادند تاریخ وقوع اولین یخبندان پاییزه در۳۶ ایستگاه مورد مطالعه در ایران تا سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۵۰ میلادی به تأخیر خواهد افتاد. همچنین نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل‌های گردش عمومی جو حاکی از وقوع زودتر آخرین یخبندان بهاره تا سال های ۲۰۲۵ و ۲۰۵۰ میلادی خواهد بود. نتایج مطالعات خیراندیش و همکاران (۱۵) و قربانی و ولیزاده (۹) در

جدول ۷. مشخصات توابع توزیع به‌دست آمده از نرم‌افزار EasyFit برای ایستگاه اصفهان

سناریوی انتشار	نوع یخبندان	توزیع	کولموگروف اسمیرنوف		پارامترها
			آماره آزمون	رتبه	
–	پاییزه	Burr	۰/۱۳۳۹۹	۱	κ=۰/۵۲۴۴۵ α=۶۳/۰۱۸ β=۳۱۷/۸۷
	بهاره	Generalized Logistic	۰/۰۷۹۰۹	۱	κ=۰/۰۹۶۴۶ σ=۶/۳۱۸۳ μ=۷۱/۲۵۳
A2	پاییزه	Generalized Logistic	۰/۰۶۶۵۳	۱	κ=۰/۰۸۸۵۳ σ=۶/۰۰۹۲ μ=۳۳۲/۷۲
	بهاره	Wakeby	۰/۰۷۳۲۴	۱	α=۵/۹۴۵ β=۷۴/۵۳۳
B1	پاییزه	Cauchy	۰/۰۸۹۷۶	۱	σ=۵/۵۲۵۴ μ=۳۲۸/۶۶
	بهاره	Generalized Extreme Value	۰/۱۰۱۲۷	۱	κ=۰/۰۶۸۷۷ σ=۱۰/۶۶۹ μ=۶۴
A1B	پاییزه	Log-Pearson 3	۰/۰۸۶۴۲	۱	α=۲۶/۷۷۲ β=۰/۰۰۴۵۷ γ=۵/۶۸۰۲
	بهاره	Weibull	۰/۰۷۳۲۴	۱	α=۵/۹۴۵ β=۷۴/۵۳۳

جدول ۸ . مقایسه دو تابع برازش شده برای شماره روزهای وقوع FFF در حالت پایه برای اصفهان

پارامتر	Burr	Generalized Logistic
α	۰/۰۵	۰/۰۵
مقدار بحرانی آماره آزمون (D_α)	۰/۲۴۱۷	۰/۲۴۱۷
آماره آزمون محاسبه شده (D)	۰/۱۳۳۹۹	۰/۴۶۲۵۳
رد می‌شود؟	خیر	بله

جدول ۹. مقایسه دو تابع برازش شده برای شماره روزهای وقوع LSF در حالت پایه برای اصفهان

پارامتر	Burr	Generalized Logistic
α	۰/۰۵	۰/۰۵
مقدار بحرانی آماره آزمون (D_α)	۰/۲۴۱۷	۰/۲۴۱۷
آماره آزمون محاسبه شده (D)	۰/۲۸۲۷۱	۰/۰۷۹۰۹
رد می‌شود؟	بله	خیر

ایستگاه های مورد مطالعه در کل ایران نیز نشان داد طول دورهٔ یخبندان تحت شرایط تغییر اقلیم در آینده نسبت به دوره‌های گذشته کاهش خواهد یافت. مطالعات فریچ و همکاران (۷) نیز کاهش دورهٔ یخبندان در بسیاری از نواحی عرض‌های میانی و بالای نیم‌کرهٔ شمالی را در طی ۵۰ سال اخیر نشان می‌دهد.

با انجام برازش توزیع‌های گوناگون روی تاریخ‌های احتمالی وقوع اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان بهاره برای دو دورهٔ مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده، مشخص شد که استفاده از یک نوع تابع توزیع برای یک ایستگاه مناسب به‌نظر نمی‌رسد، بلکه باید برای هر سری از داده‌ها، بهترین تابع توزیع انتخاب شود و داده‌ها نسبت به آن تابع برازش شود که مشابه مطالعات عابدی و همکاران (۱) است. روزنبرگ و مایرز (۲۲)

نیز با استفاده از توزیع‌های آماری به این نتیجه رسیدند که توابع توزیع تاریخ‌های وقوع یخبندان‌های زودرس پاییزه و نیز دیررس بهاره برای داده‌های مشاهداتی و برآورد شده از یکدیگر مستقل هستند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با درنظر گرفتن پدیده‌های اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان بهاره و طول دورهٔ یخبندان و مقایسهٔ آنها در دو دورهٔ گذشته و دورهٔ آینده، سعی بر آشکارسازی نوسانات اقلیمی و نشان دادن تصویر واضح‌تری از اقلیم آینده بوده است. بررسی وضعیت یخبندان‌ها نیز نشان می‌دهد که اولین یخبندان‌های پاییزه در دورهٔ آتی نسبت به دورهٔ گذشته زودتر از قبل آغاز شده و یخبندان‌های بهاره نیز زودتر به‌وقوع می‌پیوندند. همچنین طول دورهٔ یخبندان نیز کاهش می‌یابد، که این خود نشانگر پیامد منطقی گرمایش جهانی و تغییر اقلیم در ایستگاه مطالعاتی است.

با دانستن احتمال دقیق تاریخ وقوع اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان بهاره، می‌توان تاریخ مناسب کشت و برداشت محصول را تعیین کرد و از طول فصل رشد و نمو آن آگاه شد و از طرفی می‌توان به این نکتهٔ مهم پی برد که تا چه زمانی در هر منطقه، کشاورزان باید منتظر بروز سرما باشند و روش‌های مقابله با خسارت‌های ناشی از سرما را به‌کار گیرند. در مورد محصولات پاییزه، تاریخ کشت می‌تواند به‌گونه‌ای تنظیم شود که فصل برداشت با سرمای پاییزه همزمان نشود. با دانستن تاریخ وقوع آخرین یخبندان بهاره نیز می‌توان تاریخ کاشت بسیاری از گیاهان زراعی را تعیین کرد.

منابع مورد استفاده

1. Abedi Koupai, J., Z. Khosravani, A. Ghare Sheykhloo and S. S. Eslamiyan. 2007. Select the best distribution function to determine the probability of occurrence of the first autumn frost and the last spring frost, Ninth National Seminar on Irrigation and Evaporation Reduction, Kerman.
2. Anandhi, A., S. Perumal, P. H. Gowda, M. Knapp, S. Hutchinson, J. Harrington, L. Murray, M. B. Kirkham and Ch. W. Rice. 2013. Long-term spatial and temporal trends in frost indices in Kansas, USA. *Climatic Change* 120(1-2): 169-181
3. Behbodiyan, J. 2008. Nonparametric Statistics, Shiraz Uni, No. 5.
4. Dodangeh, S., J. Abedi Koupai and S. A. Gohari. 2012. Application of time series modeling to investigate future climatic parameters trend for water resources management purposes. *Journal of Water and Soil Science* 16(59): 59-74.
5. Droogers, P., J. Van Dam, J. Hoogeveen and R. Loeve. 2004. Adaptation Strategies to Climate Change to Sustain Food Security. CABI Publishing, Cambridge, USA.
6. Easterling, D. R. 2002. Recent changes in frost days and the frost-free season in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83(9): 1327-1332.
7. Frich, P., L. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A. K. Tank and T. Peterson. 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research* 19: 193-212.
8. Farzaneh, M. R. 2010. Investigation of SDSM linear multiple model uncertainty on river runoff (Case study: Beheshtabad basin, North Karun, Iran), Master Thesis in Water Resources, Faculty of Agriculture, Birjand University.
9. Ghorbani, Kh. and A. Valizadeh. 2013. Study of glacial history and effective cold in agriculture affected by climate change (Case study: Mashhad, Tabriz and Qazvin). *Journal of Soil and Water Conservation Research* 21(4): 197-214.
10. General Guidelines on the use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment, Version 2. 2007. Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment (TGICA), Intergovernmental Panel on Climate Change.
11. Gohari, A. R., S. Eslamian, J. Abedi-Koupaei, A. R. Massah Bavani, D. Wang and K. Madani. 2013. Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud River Basin. *Science of The Total Environment* 442: 405-419.
12. Hosking, J. R. M. 1990. L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B: Methodological, Series B* 52: 105-124.
13. Khazaei, M. R., B. Zahabiyoun and B. Saghafian. 2011. Assessment of climate change impact on floods using weather generator and continuous rainfall-runoff model. *International Journal of Climatology* 32(13): 1997-2006.

14. Karamooz, M. and Sh. Araghi Nejad. 2004. Advanced Hydrology. Amir Kabir University Press.
15. Kheirandish, M., N. Ghahreman and J. Bazrafshan. 2014. A study of the effects of climate change on length of growing season in several climatic regions of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 44(2): 143-150 .
16. Lehmann, N. 2010. Regional crop modeling: How future climate may impact crop yields in Switzerland. Master Thesis, Applying for the Title of Master of Science ETH in Agroecosystem Science Zurich.
17. Mir Mohammadi Meybodi, A., 2004. Management of cold and frost stresses of crops and orchards. Jihad Daneshgahi Publications, Isfahan Industrial Branch.
18. Mojarad Gharebagh, F., 1997. Glacial analysis and forecasting in Azerbaijan, Doctoral dissertation, Tarbiat Modares University, Tehran.
19. Nasiri Mahalati, M., A. Kuchaki, Gh. A. Kamali and H. Marashi. 2005. Investigating the effects of climate change on climatic indicators of Iranian agriculture. *Journal of Agricultural Science and Technology* 20(7): 82-71.
20. Nicole, M. H. and H. B. Donald. 2005. Analysis of Trends in Evaporation–Phase 1. Waterloo, Canada.
21. Pedram, M., F. Rahim zadeh, F. Sahraiyan and K. Nuhi. 2006. Study of changes in the length of the glacial period and the number of glacial days in the provinces of West and East Azerbaijan. *Journal of Isfahan University* 24: 88-75.
22. Rosenberg, N. J. and R. E. Myers. 1962. The nature of growing season frost. *Monthly Weather Review* 10: 471479.
23. Semenov, M. A. and E. M. Barrow. 2002. LARS-WG, Version 3.0. User Manual.
24. Semenov, M. A., M. Donatelli, P. Stratonovitch, E. Chatzidaki and B. Baruth. 2010. ELPIS: a dataset of local-scale daily climate scenarios for Europe. *Climate Research* 44: 3-15.
25. Simon, M. and K. Alouini. 2004. Digital Communication over Fading Channels (2nd ed.). New York: John Wiley.
26. Tisseuil, C., M. Vrac, S. Lek and A. J. Wade. 2010. Statistical downscaling of river flows. *Journal of Hydrology* 385: 279-291.
27. Varshavian, V., N. Ghahreman, A. Khalili and S. Hajjam. 2008. Study the trend of early and late frost occurrences, length of frost-free period and number of frost day to reduce of agricultural damages in several climatic regions of Iran. *Agricultural Research* 7(4): 39-48.
28. Wang, D., M. C. Shannon, C. M. Grieve and S. R. Yates. 2000. Soil, water and temperature regimes in drip and sprinkler irrigation, implications to soybean emergence. *Agricultural Water Management* 43: 15-28.
29. www.cccsn.ec.gc.ca, Canadian Climate Change Scenarios Network.
30. Zahedi, M. 1990. Meteorological application. *Geographical Research Quarterly* 5: 188-194.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 25, No. 3, Fall 2021, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Effects of Climate Change on the Probability of Occurrence of the First Fall Frost and the Last Spring Frost (Case Study: Isfahan)

J. Abedi-Koupai*, S. Rahimi and S. S. Eslamian[1]

(Received: July 3-2015; Accepted: April 4-2016)

Abstract

Changing the date of the first fall frost and the last spring frost is an important phenomenon in agriculture that can be one of the consequences of global warming. Using general circulation models (GCMs) is a way to study future climate. In this study, observations of temperature and precipitation were weighted by using Mean Observed Temperature-Precipitation (MOTP) method. This method considers the ability of each model in simulating the difference between the mean simulated temperature and mean precipitation in each month in the baseline period and the corresponding observed values. The model that had more weight, selected as the optimum model because it is expected that the model will be valid for the future. But, these models are not indicative of stationary climate change due to their low spatial resolution. Therefore, in this research, the outputs of GCM models are based on the three emission scenarios A_2 and B_1 and A_1B, downscaled by LARS-WG for Isfahan station. The data were analyzed by SPSS software at a 95% confidence level ($P<0.05$). The results indicated that in the Isfahan in the future period 2020-2049 based on the three scenarios, as compared with baseline period 1971-2000, the first fall frost will occur later and the last spring frost will occur earlier. The first fall frost will occur later for 2 days (based on the A_1B emission scenario) to 5 days (based on the A_2 emission scenario) and the last spring frost will occur earlier for 2 days (based on the and B_1 emission scenario) to 4 days (based on the A_2 emission scenario). Finally, the best distribution functions for the first fall frost and the last spring frost for the baseline period and under climate change were selected and compared using the EasyFit software.

Keywords: Climate change, First fall frost, Last spring frost, LARS-WG model, GCMs

1. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
*: Corresponding author, Email: koupai@cc.iut.ac.ir