

Forecasting Frost Changes in the City of Kashan based on the Simulation of General Atmospheric Circulation Model

Boroumand Salahi^{1*}, Fakhry Sadat Fateminiya²

¹ Professor, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

² Ph. D student in Agroclimatology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Abstract

In this study, in order to know the trend of frost phenomenon in Kashan station in the next years, the ice days of this station were modeled. To this end, the comparison and selection of the best fitted model has been investigated by atmospheric circulation models. After collecting daily data of Kashan synoptic station in the period of 1973-2000, according to the data of the general circulation model in the period of 2011-2030 and the selection of the A1 emission scenario, among the general atmospheric circulation models, five applicable models including BCM2, HADCM3, IPCM4, GIAOM, and HADGEM were selected and the climatic data of the station were redistributed using LARS-WG software. In order to create daily data by 2030, the mean and standard deviation of each model were compared with the calculation of bias and absolute error. Considering the lowest absolute error among models, the GIAOM model was selected to predict the minimum and maximum temperature and artificial ice data, as well as to investigate Kashan frost for future climatic intervals. The results of the GIAOM model showed that the highest increase in the minimum and maximum mean temperatures in the future will occur in the summer and autumn seasons and the lowest temperature increase will be in the winter and spring seasons, which indicates that we should be waiting for warmer summers and autumns. The results of frost trends show that the number of days with weak, moderate, and severe frost in the future will be reduced. Meanwhile, the maximum reduction in the number of freezing days will be due to weak freezing. The decrease in the number of freezing days in Kashan station indicates the climatic susceptibility of this region to the global warming consequences and, in fact, shows the sensitivity of the number of freezing days in this region to this phenomenon.

Key words: Forecasting, Frost, Kashan, General Circulation Model, LARS-WG Model.

* Bromand416@yahoo.com

پیش‌بینی روند تغییرات یخبندان در ایستگاه هواشناسی کاشان

برومند صلاحی*، استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
فخری سادات فاطمی‌نیا، دانشجوی دکتری آب و هواشناسی کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

وصول: ۱۳۹۳/۰۵/۱۸ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۱۹، صص ۲۱-۳۶

چکیده

در این پژوهش، به منظور آگاهی از روند پدیده یخبندان طی سال‌های آینده در ایستگاه کاشان، روزهای یخبندان این ایستگاه الگوسازی شد. در این راستا، مقایسه و انتخاب بهترین الگوی برازش داده‌شده به سری با الگوهای گردش عمومی جو بررسی شد. پس از گردآوری داده‌های روزانه ایستگاه همدید کاشان در دوره آماری ۲۰۱۰-۱۹۷۳، با توجه به داده‌های الگوی گردش عمومی جو در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و انتخاب سناریوی انتشار A1، از میان الگوهای گردش عمومی جو، پنج الگوی کاربردی شامل BCM2، IPCM4، HADCM3، GIAOM، HADGEM برگزیده و داده‌های اقلیمی ایستگاه با نرم‌افزار LARS-WG ریزگردانی شد. به منظور ایجاد داده‌های روزانه تا سال ۲۰۳۰، میانگین و انحراف معیار هر الگو با محاسبه بایاس و خطای مطلق مقایسه شد. با توجه به کمترین میزان خطای مطلق در میان الگوها، الگوی GIAOM به منظور پیش‌بینی داده‌های مصنوعی دمای کمینه و بیشینه و نیز بررسی یخبندان‌های کاشان برای بازه اقلیمی آینده برگزیده شد. نتایج الگوی GIAOM نشان داد که بیشترین افزایش در میانگین کمینه و بیشینه دما در آینده در فصل‌های تابستان و پاییز و کمترین میزان افزایش دما در فصل‌های زمستان و بهار خواهد بود؛ این موضوع، نشان‌دهنده این است که باید در انتظار تابستان‌ها و پاییزهای گرم‌تری بود. نتایج بررسی روند یخبندان‌ها نشان داد که از تعداد روزهای یخبندان ضعیف، متوسط و شدید در آینده کم خواهد شد. در این بین، بیشترین میزان کاهش تعداد روزهای یخبندان، مربوط به یخبندان‌های ضعیف خواهد بود. کاهش تعداد روزهای یخبندان در ایستگاه کاشان، نشان‌دهنده تأثیرپذیری اقلیم این منطقه از پیامدهای گرمایش جهانی است و درواقع، حساسیت تعداد روزهای یخبندان این منطقه را به این پدیده نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی، یخبندان، کاشان، الگوهای گردش عمومی جو، الگوی لارس.

مقدمه

همه موجودات قادرند در محدوده حرارتی معینی رشد کنند؛ بنابراین تحمل‌پذیری آنها در مقابل دماهای فرین محدود است (میرموسوی و حسین بابایی، ۱۳۹۰: ۱۶۷). کاهش دما تا کمترین آستانه تحمل گیاهان، همه‌ساله خسارات گسترده‌ای را به کشور وارد می‌کند. از دیدگاه هواشناسی، هنگامی که دمای کمینه (شبانه) به زیر صفر درجه سانتیگراد برسد، یخبندان رخ می‌دهد (مسعودیان و دارند، ۱۳۹۱: ۱۲۹)؛ این پدیده بر بسیاری از فعالیت‌ها، به‌ویژه انرژی، حمل و نقل و کشاورزی به طور مستقیم یا غیرمستقیم تأثیر می‌گذارد که آثار آن در بخش کشاورزی بیش از سایر بخش‌هاست (حجازی‌زاده و ناصرزاده، ۱۳۸۴: ۱۳۹).

افزایش و کاهش یخبندان، یکی از جنبه‌های مهم تغییر اقلیم است؛ از این رو، پیش‌بینی بلندمدت فراسنج‌های اقلیمی برای آگاهی از میزان تغییرات و در نتیجه در نظر گرفتن تمهیدات لازم برای کاهش آثار سوء ناشی از تغییر اقلیم مورد توجه پژوهشگران مختلف قرار گرفته است (خلیلی اقدام و همکاران، ۱۳۹۱: ۸۷).

برای انجام پژوهش در موضوع تغییر اقلیم، نخست می‌باید متغیرهای اقلیمی ناشی از تغییرپذیری گازهای گلخانه‌ای شبیه‌سازی شوند که برای این کار، روش‌های متفاوتی از جمله الگوهای گردش عمومی جو (AGCM)^۱ وجود دارد (طاووسی و همکاران، ۱۳۹۱: ۲۹). در این میان، الگوی LARS-WG، به منزله یکی از الگوهای گردش عمومی جو، کاربرد بسیاری در پیش‌آگاهی از تغییرات اقلیمی آینده دارد.

نسخه اولیه این الگو را در سال ۱۹۹۰ راسکو و همکارانش در بوداپست مجارستان به عنوان بخشی از پروژه ارزیابی ریسک کشاورزی ابداع کرده و سپس در سال ۱۹۹۸ سمنوف و همکارانش آن را بازننگری و تعدیل کردند (بذرافشان و همکاران، ۱۳۸۸: ۴۷).

اساساً این الگو به منظور مهیاکردن ابزاری برای شبیه‌سازی مصنوعی سری‌های زمانی متغیرهای هواشناسی طراحی شده است. الگوی لارس، نمونه‌ای از الگوهای مولد متغیرهای هواشناسی است که از روش‌های توزیع نیمه‌تجربی برای طول روزهای تر و خشک، بارش روزانه و تابش آفتاب استفاده می‌کند (معافی مدنی و همکاران، ۱۳۹۱: ۲۲). در این الگو، شبیه‌سازی رخداد بارش با استفاده از سری‌های تر و خشک انجام می‌شود. دمای کمینه و بیشینه روزانه نیز به صورت فرآیندی تصادفی به لحاظ میانگین و انحراف معیار این پارامترها که وابسته به روزهای تر و خشک هستند، تولید می‌شوند. متغیرهای فصلی میانگین و انحراف معیار دما با استفاده از سری فوریه مرتبه سوم، الگوسازی شده و مقادیر باقی‌مانده دما نیز با استفاده از توزیع نرمال شبیه‌سازی می‌شوند (طاووسی و همکاران، ۱۳۹۱: ۳۲).

در سری‌های فوریه، برای میانگین‌ها، میانگین داده‌های مشاهداتی برای هر ماه جفت می‌شود. پیش از جفت‌شدن انحراف معیارها در سری‌های فوریه، انحراف معیار داده‌های مشاهده‌شده در هر ماه با انحراف معیار داده‌های شبیه‌سازی‌شده مطابقت داده شده و با حذف میزان خطاها در هر ماه، تغییرات در میانگین برای هر ماه تخمین زده می‌شود. مقادیر باقی‌مانده که از تفریق مقادیر میانگین داده‌های مشاهداتی به دست می‌آیند، برای محاسبه

^۱ Atmospheric General Circulation Models

گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم استفاده شده است. ارزیابی شبیه‌سازی‌های الگوی HadGEM1 با مقادیر دیده‌بانی و واکاوی شده^۵ نشان می‌دهد که توانایی شبیه‌سازی این الگو در مقایسه با الگوی HadCM3، به میزان چشمگیری بهبود یافته است (مارتین و همکاران، ۲۰۰۶).

الگوی HADGEM^۶، یکی از الگوهای جفت‌شده گردش عمومی جو - اقیانوس است که مرکز تحقیقات و پیش‌بینی‌های اقلیمی هادلی در اداره هواشناسی انگلستان تهیه کرده است. مؤلفه جوی این الگو دارای تفکیک افقی ۱/۲۵ درجه عرض جغرافیایی در ۱/۷۵ درجه طول جغرافیایی و ۳۸ لایه و مؤلفه اقیانوسی آن دارای تفکیک افقی ۱ درجه عرض جغرافیایی در ۱ درجه طول جغرافیایی بین قطب و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه است (URL^۷).

الگوی IPCM4 را با نام CM4-IPSL^۸ مرکز ملی تحقیقات جوی آمریکا ایجاد کرده است. تفکیک جوی این الگو، ۲/۵ در ۳/۷۵ درجه و شامل ۱۹ لایه و تفکیک افقی آن ۲ درجه (در استوا و دریای سرخ نزدیک به ۱ درجه) است.

الگوی GIAOM را مرکز ناسا به منظور مطالعات محیطی ایجاد کرده است. این الگو خلاصه‌ای از AOM 4x3^۹ - GISS^{۱۰} بوده و نام اصلی آن AOM 4x3 است. الگوی GIAOM، یک الگوی جوی - اقیانوسی است که مؤلفه جوی آن دارای تفکیک افقی ۳ × ۴

خودهمبستگی زمانی داده‌های دمای کمینه و بیشینه استفاده می‌شود (عباسی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۱۹).

فرآیند تولید داده‌های مصنوعی با الگوی لارس در سه مرحله کالیبره کردن الگو^۱، ارزیابی الگو^۲ و تولید (شبیه‌سازی) داده‌های مصنوعی انجام می‌شود (حق طلب و همکاران، ۱۳۹۲: ۳۹) که در این پژوهش نیز به همین روش عمل شده است.

از الگوهای تعبیه‌شده در ریزگردان لارس، الگوی BCM2 را مرکز تحقیقات اقلیمی دانشگاه برگن نروژ^۳ تهیه کرده که به نام الگوی «اقلیمی برگن» شهرت یافته است (سبحانی و فاطمی نیا، ۱۳۹۳: ۳۱۵). تفکیک اقیانوسی - جوی این الگو ۱/۵ در ۱/۵ درجه است.

الگوی HADCM3 نیز، یکی از الگوهای جفت‌شده گردش عمومی جو - اقیانوس است که آن را مرکز تحقیقات و پیش‌بینی‌های اقلیمی هادلی در اداره هواشناسی انگلستان^۴ تهیه کرده است. مؤلفه جوی الگوی HADCM3 دارای تفکیک افقی ۲/۵ درجه عرض جغرافیایی تا ۳/۷۵ درجه طول جغرافیایی و ۱۹ لایه و مؤلفه اقیانوسی آن دارای تفکیک افقی ۱/۲۵ درجه در ۱/۲۵ درجه و شامل ۲۰ لایه است (خزانه‌داری و همکاران، ۱۳۸۷: ۸۷).

در سال ۲۰۰۶، جانز و همکارانش (۲۰۰۶) نسخه جدید HadCM3 را به نام HadGEM1 طراحی کردند که نتایج الگوسازی تغییر اقلیمی آن در گزارش چهارم هیئت بین‌الدول اقلیمی استفاده شده است. این مرکز همچنین نسخه دوم این الگو را با نام HadGEM2 طراحی کرده که نتایج ارزیابی تغییر اقلیم آن در

^۵ Reanalysis

^۶ Hadley Centre Global Environmental Model

^۷ <http://ibabaeian.persiangig.com/document/HadCM3.docx/dl>

^۸ Institut Pierre Simon Laplace

^۹ Climate Model

^{۱۰} Goddard Institute for Space Studies

^{۱۱} atmosphere-ocean model for transient climate change

^۱ Model Calibration

^۲ Model validation

^۳ Berknes Centre for Climate Research (BCCR), University of Bergen, Norway

^۴ Hadley center Climate Prediction Research (HCCPR)

درجه و ۱۲ لایه و مؤلفه اقیانوسی آن دارای تفکیک افقی 4×3 درجه و شامل بیش از ۱۶ لایه است (URL^۱).

به‌کارگیری الگوهای گردش عمومی جو برای بازسازی اقلیم گذشته یا پیش‌بینی اقلیم آینده، این قبیل الگوها را به الگوهای جهانی اقلیم (GCM)^۲ معروف کرده است. قدرت تفکیک افقی الگوهای AGCM، بیش از صد کیلومتر ($2/8$ درجه قوسی) و قدرت تفکیک عمودی، ۱۰ تا ۳۰ متر است (عساکره، ۱۳۸۶: ۱۰۹). یکی از ضعف‌های عمده این الگوها در قدرت تفکیک مکانی کم آن‌هاست؛ برای حل این مشکل، لازم است خروجی این الگوها پیش از استفاده در مطالعات ارزیابی آثار تغییر اقلیم، ریزمقیاس‌نمایی آماری و دینامیکی شوند (عباسی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۱۸)؛ زیرا روش‌های آماری نسبت به روش‌های دینامیکی به پارامترهای کمتری نیاز دارند و به همین دلیل در مطالعات علوم آب و هواشناسی بسیار به آنها توجه شده است (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۹: ۸۱۷).

پژوهشگران به الگوسازی یخبندان، مقابله با آن و کاهش هزینه‌های خسارت بارش، بسیار توجه داشته‌اند. واتکینز (۱۹۹۱) با استفاده از الگوی رگرسیون خطی، کاهش طول مدت فصل یخبندان را حدود دو روز برای هر دهه بیان و این کاهش را با افزایش درجه حرارت توجیه کرد.

هارمسن و همکاران (۲۰۰۹)، تغییر اقلیم را برای چند مکان در پورتریکو پیش‌بینی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که فصل بارش، مرطوب‌تر و فصل خشک، خشک‌تر خواهد شد.

قمقامی و همکاران (۱۳۸۹)، به همسوسازی سری شبیه‌سازی‌شده مقادیر حدی دما و سناریوهای تغییر اقلیم در چند ایستگاه ایران پرداختند.

طاووسی و همکاران (۱۳۹۱)، نشان دادند که الگوی BCM2، به بهترین نحو می‌تواند یخبندان‌های زابل را برای بازه اقلیمی آینده الگوسازی کند. نتایج الگو، حاکی از آن بود که میانگین متغیرهای دمایی در بازه اقلیمی آینده نسبت به بازه گذشته افزایش خواهد یافت که بیشترین افزایش در فصول بهار و پاییز بیش از فصول زمستان و تابستان است و شمار روزهای یخبندان زابل به میزان چشمگیری کاهش خواهد یافت.

صلاحی و همکاران (۱۳۹۳)، در ارزیابی تغییرات اقلیمی آینده استان اصفهان، به روند افزایشی دمای کمینه آن منطقه اذعان کردند.

با توجه به کارایی الگوهای گردش عمومی جو در پیش‌بینی یخبندان‌ها، هدف این پژوهش، الگوسازی و پیش‌بینی پیامدهای تغییر آب و هوا بر یخبندان ایستگاه کاشان است؛ به عبارت دیگر در این پژوهش، با بهره‌گیری از فراسنج دمای کمینه و بیشینه و نیز الگوهای جوی BCM2، HADCM3، IPCM4، GIAOM و HADGEM تحت ریزگردان لارس، الگوسازی یخبندان و پیش‌بینی روند تغییرات آن در ایستگاه کاشان در آینده بررسی خواهد شد تا با شناخت این مسئله، مدیریتی درست در برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای و محلی اعمال شود.

داده‌ها و روش‌ها

در این پژوهش، داده‌های روزانه ایستگاه همدید کاشان در دوره آماری ۱۹۷۳-۲۰۱۰ از سازمان

^۱ <http://ibabaeian.persiangig.com/document/HadCM3.docx/dl>

^۲ Global Climate Models

هواشناسی کشور دریافت و از نظر وجود مقادیر پرت و دارای خلأ آماری بررسی شد. در مرحله بعد، از الگوی لارس، یکی از مشهورترین الگوهای مولد داده‌های تصادفی وضع هوا که برای تولید مقادیر تابش، بارش، دمای بیشینه و کمینه روزانه در یک ایستگاه به کار می‌رود، استفاده شد. پس از شناساندن موقعیت ریاضی ایستگاه مورد مطالعه به الگو (از طریق تعریف طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه در نرم‌افزار) و نیز با بهره‌گیری از داده‌های مبنا (۲۰۱۰-۱۹۷۳) که در قسمت ورودی نرم‌افزار قرار گرفته‌اند، از آنها برای پیش‌بینی داده‌های چهارگانه اقلیمی (مقادیر تابش، بارش، دمای بیشینه و کمینه روزانه) در سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۳۰ استفاده شد؛ البته در این پژوهش، فقط داده‌های دمای بیشینه و به‌ویژه دمای کمینه به منزله مرجعی برای استخراج روزهای یخبندان ایستگاه مدنظر به کار رفت. آن‌گاه با استفاده از سناریوی انتشار پرکاربرد و معقول A1 و با بهره‌گیری از پنج الگوی کاربردی گردش عمومی جو شامل GIAOM، IPCM4، HADCM3، BCM2 و HADGEM برای شبیه‌سازی مصنوعی سری‌های زمانی متغیرهای چهارگانه اقلیمی و ارزیابی درستی شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته با این الگوها اقدام شد. این ارزیابی با محاسبه بایاس و خطای مطلق در هر الگو و نیز مقایسه میانگین و انحراف معیار هر یک از الگوهای به کار گرفته‌شده به منظور ایجاد داده‌های روزانه تا سال ۲۰۳۰ صورت گرفت. با توجه به

کمترین میزان خطای مطلق، مناسب‌ترین الگو برای پیش‌بینی داده‌های مصنوعی و نیز بررسی یخبندان‌های کاشان برای بازه اقلیمی آینده برگزیده شد. پس از دستیابی به خروجی‌های لازم بر مبنای صحت‌سنجی انجام‌شده حاصل از شبیه‌سازی‌ها، مقادیر میانگین و انحراف معیارهای دیده‌بانی و شبیه‌سازی‌شده متغیرهای دمایی این ایستگاه بر اساس ۵ الگو با یکدیگر مقایسه شده و الگوهای مورد مطالعه در این پژوهش، راستی‌آزمایی آماری شدند. پس از انتخاب مناسب‌ترین الگو برای پیش‌بینی داده‌های مصنوعی، تغییرات متغیرهای دمایی کاشان در بازه اقلیمی آینده با استفاده از الگو منتخب بررسی شد. آن‌گاه روند سالانه متغیرهای دمایی برای هر دو بازه اقلیمی گذشته و آینده مقایسه شد. پس از تعیین روند کلی یخبندان‌ها در هر دو بازه اقلیمی، یخبندان‌ها با شدت‌های مختلف برای هر دو بازه زمانی استخراج شد.

در این پژوهش، بنا بر نظر علیزاده و همکارانش (۱۳۷۳)، یخبندان‌های با دمای بین ۰ تا -۱ درجه سلسیوس یخبندان‌های ضعیف، یخبندان‌های بین -۱ تا -۳ درجه سلسیوس یخبندان‌های متوسط و یخبندان‌های کمتر از -۳ درجه سلسیوس یخبندان‌های شدید در نظر گرفته شدند. پس از استخراج رخداد انواع یخبندان‌ها، میانگین آنها طی دو بازه اقلیمی گذشته و آینده مقایسه و سپس ایستایی یا نایستایی سری هریک برای هر دو بازه ارزیابی شد. جدول (۱)، مشخصات جغرافیایی ایستگاه بررسی‌شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی ایستگاه بررسی‌شده

ایستگاه مطالعاتی	عرض جغرافیایی (درجه شمالی)	طول جغرافیایی (درجه شرقی)	ارتفاع (متر)
کاشان	۳۳/۵۹	۵۱/۲۷	۹۸۲/۳

یافته‌های پژوهش

مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده کمینه و بیشینه دمایی کاشان براساس الگوی BCM2 در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است. با توجه به شبیه‌سازی صورت گرفته با الگوی BCM2، در متغیر بیشینه دما، مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده، نزدیکی زیادی به یکدیگر دارند. در متغیر بیشینه دما، با وجود انطباق زیاد بین مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده، مشاهده می‌شود که تفاوت جزئی در این دو مقدار در نیمه سرد سال کمتر از نیمه گرم سال است؛ به این معنا که این الگو، بیشینه دمایی ایستگاه مدنظر را در نیمه سرد سال بهتر از نیمه گرم سال شبیه‌سازی می‌کند.

در متغیر کمینه دما، عکس این حالت حاکم است. اگر چه ظاهراً اختلافی در مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده وجود ندارد، اما تفاوت اندک در این دو مقدار در نیمه سرد سال بیش از نیمه گرم سال است. در هر دو مؤلفه دمایی، اختلاف انحراف معیار مقادیر دیده‌بانی و الگوسازی شده بیش از اختلاف مقادیر خود مؤلفه‌های دمایی است؛ با این حال، انحراف معیار مقادیر دیده‌بانی و الگوسازی شده در متغیر بیشینه دما در نیمه سرد سال بیش از نیمه گرم سال و در متغیر کمینه دما در نیمه سرد سال کمتر از نیمه گرم سال است.

شکل‌های (۱) و (۲)، نمودارهای مقایسه‌ای مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده کمینه و بیشینه دمایی کاشان را بر اساس الگوی BCM2 به تصویر کشیده است؛ بر اساس این اشکال، انطباق بسیار مناسبی در مؤلفه‌های دمایی ایستگاه بررسی شده مشاهده می‌شود.

جدول ۲. مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده کمینه دمایی

کاشان (c) بر اساس الگوی BCM2

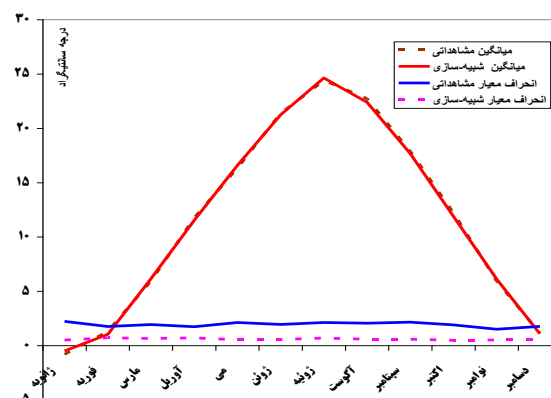
ماه	میانگین مشاهداتی	میانگین شبیه‌سازی	انحراف معیار مشاهداتی	انحراف معیار شبیه‌سازی
ژانویه	-۰.۸۰	-۰.۴۹	۲.۲۳	۰.۵۲
فوریه	۱.۳۱	۱.۰۴	۱.۷۶	۰.۷۳
مارس	۵.۹۵	۶.۱۶	۱.۹۴	۰.۶۶
آوریل	۱۱.۷۴	۱۱.۵۴	۱.۷۴	۰.۷۱
می	۱۶.۳۶	۱۶.۶۰	۲.۱۳	۰.۵۴
ژوئن	۲۱.۳۷	۲۱.۲۴	۱.۹۵	۰.۵۶
ژوئیه	۲۴.۴۲	۲۴.۶۴	۲.۱۳	۰.۷۰
آگوست	۲۲.۷۳	۲۲.۴۰	۲.۰۷	۰.۵۹
سپتامبر	۱۷.۸۸	۱۷.۶۸	۲.۱۶	۰.۵۹
اکتبر	۱۲.۲۰	۱۱.۸۹	۱.۹۱	۰.۴۹
نوامبر	۵.۹۳	۶.۱۱	۱.۵۱	۰.۵۳
دسامبر	۱.۱۶	۱.۰۹	۱.۷۷	۰.۵۳

جدول ۳. مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده بیشینه دمایی

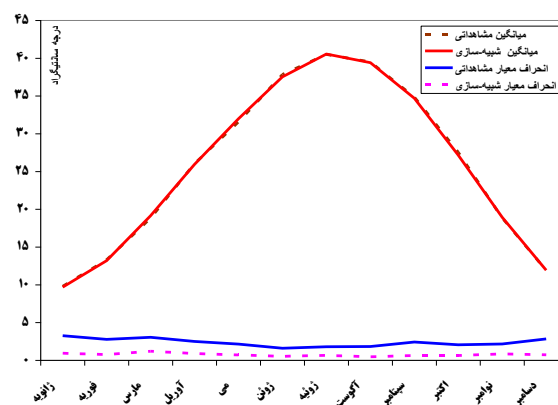
کاشان (c) بر اساس الگوی BCM2

ماه	میانگین مشاهداتی	میانگین شبیه‌سازی	انحراف معیار مشاهداتی	انحراف معیار شبیه‌سازی
ژانویه	۹.۸۱	۹.۶۹	۳.۲۶	۰.۹۴
فوریه	۱۳.۳۰	۱۳.۲۰	۲.۷۸	۰.۷۶
مارس	۱۸.۸۲	۱۹.۱۵	۳.۰۵	۱.۲۰
آوریل	۲۶.۰۴	۲۵.۹۴	۲.۵۰	۰.۹۰
می	۳۱.۵۶	۳۱.۹۹	۲.۱۵	۰.۷۲
ژوئن	۳۷.۸۵	۳۷.۵۴	۱.۶۰	۰.۵۳
ژوئیه	۴۰.۵۱	۴۰.۵۶	۱.۸۰	۰.۶۶
آگوست	۳۹.۵۱	۳۹.۴۲	۱.۸۳	۰.۴۸
سپتامبر	۳۴.۸۳	۳۴.۷۰	۲.۴۲	۰.۶۴
اکتبر	۲۷.۵۴	۲۷.۱۸	۲.۰۶	۰.۶۴
نوامبر	۱۸.۸۴	۱۸.۹۴	۲.۱۶	۰.۸۵
دسامبر	۱۱.۹۰	۱۱.۹۴	۲.۸۴	۰.۷۳

جدول (۴)، مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده کمینه و بیشینه دمایی کاشان را براساس الگوی HADCM3 و شکل‌های (۳) و (۴)، نمودارهای مقایسه‌ای مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده کمینه و بیشینه دمایی کاشان را براساس این الگو نشان می‌دهد. براساس این اشکال، انطباق بسیار مناسبی در مؤلفه‌های دمایی ایستگاه بررسی شده مشاهده می‌شود. براساس نتایج شبیه‌سازی شده الگوی HADCM3، در تمامی ماه‌ها، در متغیر بیشینه دما از ژوئیه تا دسامبر، همپوشانی بیشتری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر واقعی مشهود است (شکل ۳). در متغیر کمینه دما به جز ماه‌های می، ژوئیه، اکتبر و نوامبر در بقیه ماه‌ها، همپوشانی خوبی مشاهده می‌شود (شکل ۴). طبق محاسبات، این الگو در میان الگوهای بررسی شده، دارای بیشترین میزان خطای مطلق در متغیر بیشینه دمایی است (جدول ۴). در این الگو نیز اختلاف انحراف معیار مقادیر دیده‌بانی و الگوسازی شده بیش از اختلاف مقادیر خود مؤلفه‌های دمایی است.



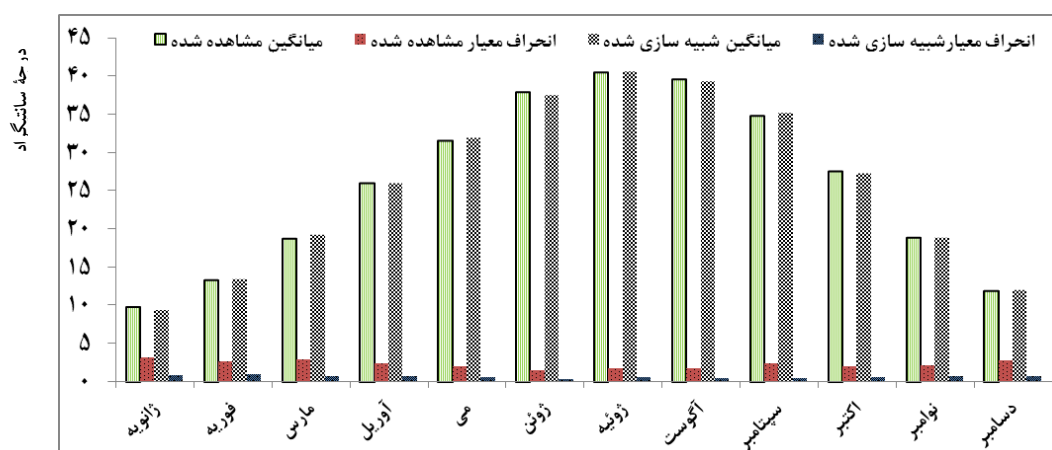
شکل ۱. نمودار مقایسه‌ای مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده کمینه دمایی کاشان (c) براساس الگوی BCM2



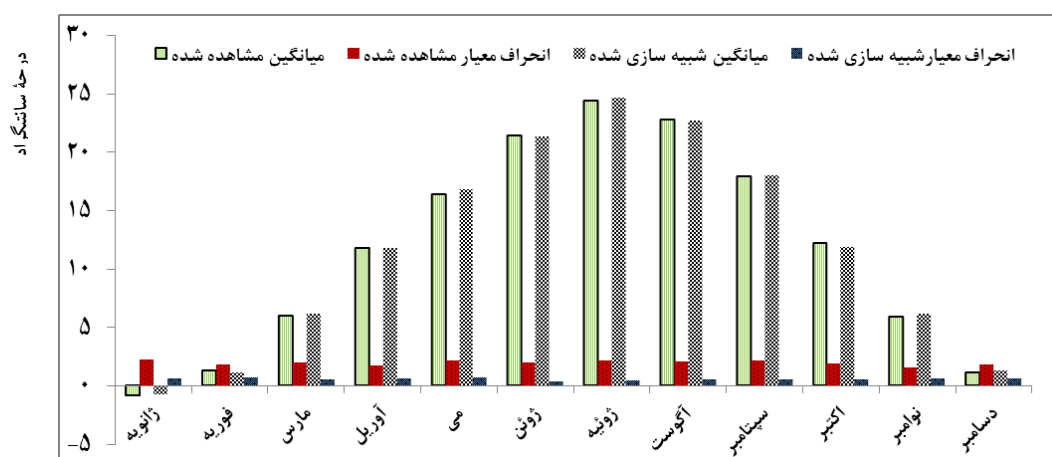
شکل ۲. نمودار مقایسه‌ای مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده بیشینه دمایی کاشان (c) براساس الگوی BCM2

جدول ۴. مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده کمینه و بیشینه دمایی کاشان (c) براساس الگوی HADCM3

		میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
مقادیر دیده‌بانی	میانگین	۱۱.۷۴	۵.۹۵	۱.۳۱	-۰.۸۰	۲۱.۳۷	۲۴.۴۲	۲۲.۷۳	۱۷.۸۸	۱۲.۲۰	۵.۹۳	۱.۱۶	
	انحراف معیار	۱.۷۴	۱.۹۴	۱.۷۶	۲.۲۳	۱.۹۵	۲.۱۳	۲.۰۷	۲.۱۶	۱.۹۱	۱.۵۱	۱.۷۷	
	میانگین	۱۱.۸۱	۶.۱۶	۱.۱۱	-۰.۷۵	۲۱.۳۰	۲۴.۶۶	۲۲.۶۹	۱۸.۰۰	۱۱.۸۷	۶.۱۱	۱.۳۲	
	انحراف معیار	۰.۵۹	۰.۵۴	۰.۶۶	۰.۶۱	۰.۳۷	۰.۴۸	۰.۵۶	۰.۵۲	۰.۵۲	۰.۶۴	۰.۵۹	
مقادیر شبیه‌سازی شده	میانگین	۲۶.۰۴	۱۸.۸۲	۱۳.۳۰	۹.۸۱	۳۷.۸۵	۴۰.۵۱	۳۹.۵۱	۳۴.۸۳	۲۷.۵۴	۱۸.۸۴	۱۱.۹۰	
	انحراف معیار	۲.۵۰	۳.۰۵	۲.۷۸	۳.۲۶	۱.۶۰	۱.۸۰	۱.۸۳	۲.۴۲	۲.۰۶	۲.۱۶	۲.۸۴	
	میانگین	۲۶.۰۲	۱۹.۳۱	۱۳.۴۲	۹.۴۲	۳۷.۵۳	۴۰.۵۶	۳۹.۳۴	۳۵.۱۵	۲۷.۳۲	۱۸.۹۰	۱۱.۹۸	
	انحراف معیار	۰.۷۲	۰.۸۴	۱.۰۲	۰.۹۰	۰.۴۶	۰.۶۸	۰.۵۳	۰.۶۰	۰.۷۰	۰.۷۹	۰.۷۷	



شکل ۳. مقایسه میانگین و انحراف معیار مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده متغیر بیشینه دما با الگوی HADCM3



شکل ۴. مقایسه میانگین و انحراف معیار مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده متغیر کمینه دما با الگوی HADCM3

براساس خروجی شبیه‌سازی شده الگوی GIAOM، در متغیرهای کمینه و بیشینه دما بین مقادیر شبیه‌سازی شده و واقعی (جدول ۵ و ۶) در تمامی ماه‌ها، تطابق خوبی مشهود است. این الگو در مقایسه با سایر الگوها در هر دو متغیر کمینه و بیشینه دما دارای خطای مطلق کمتری است (جدول ۷). در متغیر بیشینه دما، با وجود انطباق زیاد بین مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده، تفاوت جزئی در این دو مقدار در نیمه سرد سال کمتر از نیمه گرم سال است؛ به این معنا که این الگو، بیشینه دمایی ایستگاه مورد مطالعه را در نیمه سرد سال بهتر از نیمه گرم سال شبیه‌سازی می‌کند. در

گفتنی است از آنجایی که نتایج مقایسه‌ای مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده کمینه و بیشینه دمایی کاشان براساس الگوهای HADGEM و IPCM، شبیه به خروجی‌های الگوی HADCM3 بودند، بنابراین از ارائه جداول و اشکال خروجی‌های مربوطه خودداری شد. بر این اساس، مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده کمینه و بیشینه دمایی کاشان براساس دو الگوی HADGEM و IPCM، از نظر تفسیر دارای شرایطی مشابه الگوی HADCM3 هستند و انطباق بسیار مناسبی بین مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده در این الگوها وجود دارد.

متغیر کمینه دما، اگرچه ظاهراً اختلاف زیادی در مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده دیده نمی‌شود، اما تفاوت اندک در این دو مقدار در نیمه سرد سال بیش از نیمه گرم سال است. همانند الگوهای پیشین، در هر دو مؤلفه دمایی، اختلاف انحراف معیار مقادیر دیده‌بانی و الگوسازی شده بیش از اختلاف مقادیر خود مؤلفه‌های دمایی است (اشکال ۵ و ۶).

جدول ۵. مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده کمینه دمایی کاشان (c) براساس الگوی GIAOM

کمینه دما (C)		کمینه دما (C)		ماه
انحراف معیار مشاهده‌ای	انحراف معیار شبیه سازی	میانگین مشاهده‌ای	میانگین شبیه سازی	
۰.۶۸	۲.۲۳	-۰.۳۹	-۰.۸۰	ژانویه
۰.۶۹	۱.۷۶	۱.۱۹	۱.۳۱	فوریه
۰.۶۷	۱.۹۴	۵.۹۱	۵.۹۵	مارس
۰.۶۶	۱.۷۴	۱۱.۵۹	۱۱.۷۴	آوریل
۰.۵۵	۲.۱۳	۱۶.۴۵	۱۶.۳۶	می
۰.۴۲	۱.۹۵	۲۱.۱۱	۲۱.۳۷	ژوئن
۰.۵۴	۲.۱۳	۲۴.۴۵	۲۴.۴۲	ژوئیه
۰.۵۴	۲.۰۷	۲۲.۶۳	۲۲.۷۳	آگوست
۰.۵۳	۲.۱۶	۱۷.۸۴	۱۷.۸۸	سپتامبر
۰.۴۸	۱.۹۱	۱۲.۰۷	۱۲.۲۰	اکتبر
۰.۵۹	۱.۵۱	۶.۱۸	۵.۹۳	نوامبر
۰.۵۶	۱.۷۷	۱.۱۸	۱.۱۶	دسامبر

جدول ۶. مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده بیشینه دمایی کاشان (c) براساس الگوی GIAOM

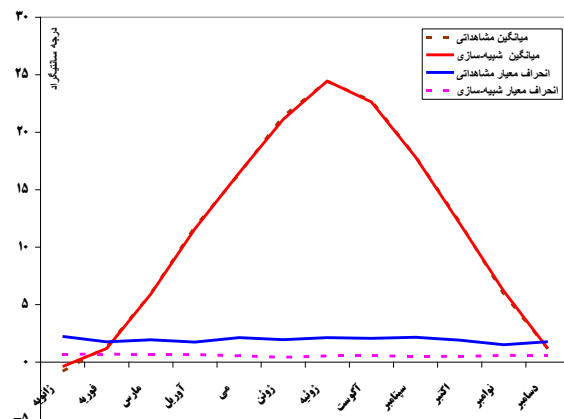
بیشینه دما (C)		بیشینه دما (C)		ماه
انحراف معیار مشاهده‌ای	انحراف معیار مشاهده‌ای	میانگین مشاهده‌ای	میانگین شبیه سازی	
۰.۸۳	۳.۲۶	۹.۹۳	۹.۸۱	ژانویه
۱.۱۰	۲.۷۸	۱۳.۳۸	۱۳.۳۰	فوریه
۰.۹۳	۳.۰۵	۱۸.۹۸	۱۸.۸۲	مارس
۰.۸۷	۲.۵۰	۲۶.۱۷	۲۶.۰۴	آوریل
۰.۶۹	۲.۱۵	۳۲.۰۴	۳۱.۵۶	می
۰.۴۸	۱.۶۰	۳۷.۴۷	۳۷.۸۵	ژوئن
۰.۵۲	۱.۸۰	۴۰.۶۱	۴۰.۵۱	ژوئیه
۰.۴۸	۱.۸۳	۳۹.۵۳	۳۹.۵۱	آگوست
۰.۶۵	۲.۴۲	۳۵.۰۵	۳۴.۸۳	سپتامبر
۰.۷۰	۲.۰۶	۲۷.۵۳	۲۷.۵۴	اکتبر
۰.۹۳	۲.۱۶	۱۸.۸۹	۱۸.۸۴	نوامبر

پارامترهای کمینه دما، بیشینه دما، بارش و تابش و n تعداد ماه‌های سال است (خوشحال دستجردی و حسینی، ۱۳۸۹: ۹؛ طاووسی و همکاران، ۱۳۹۱: ۳۹). نتایج راستی‌آزمایی الگو برای متغیرهای کمینه و بیشینه دما در جدول (۷) نشان داده شده است.

جدول ۷. محاسبه بایاس و خطای مطلق الگوهای مطالعه‌شده در ایستگاه کاشان

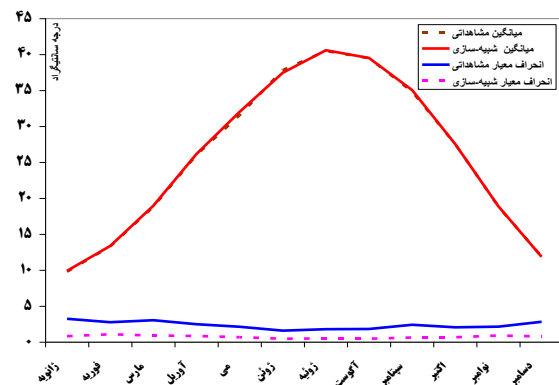
کمینه دما		بیشینه دما		
Bias	MAE	Bias	MAE	
-۰.۰۷	۰.۱۷	-۰.۰۴	۰.۲۲	الگوی HADCM3
۰.۰۳	۰.۲۲	۰.۰۲	۰.۱۸	الگوی BCM2
-۰.۰۷	۰.۱۷	-۰.۰۴	۰.۲۰	الگوی HADGEM
-۰.۰۷	۰.۱۷	-۰.۰۴	۰.۲۰	الگوی IPCM4
۰.۰۰	۰.۱۳	-۰.۰۸	۰.۱۴	الگوی GIAOM

نتایج راستی‌آزمایی آماری الگوهای استفاده‌شده، بیانگر این مطلب است که الگوهای HADCM3 و FGOALS با توجه به بیشترین میزان خطای مطلق در متغیر دمای بیشینه و الگوی BCM2 نیز، به دلیل بیشترین میزان خطای مطلق در دمای کمینه از اهمیت کمتری برخوردار هستند. در مقابل، الگوی GIAOM با توجه به کمترین خطای مطلق برای هر دو متغیر بیشینه و کمینه دما، بهترین الگو برای ارزیابی داده‌های دماست؛ بنابراین، الگوی GIAOM، با توجه به هر دو روش، در بررسی داده‌های متغیرهای دمای پیش‌بینی روند یخبندان کاشان نسبت به بقیه الگوهای استفاده‌شده در این پژوهش از دقت بیشتری برخوردار است؛ به همین دلیل در این پژوهش، تغییرات متغیرهای دمای کاشان در بازه اقلیمی آینده با استفاده از الگوی GIAOM بررسی می‌شود.



شکل ۵. نمودار مقایسه‌ای مقادیر دیده‌بانی و

شبیه‌سازی‌شده کمینه دمای کاشان (c) براساس الگوی GIAOM



شکل ۶. نمودار مقایسه‌ای مقادیر دیده‌بانی و

شبیه‌سازی‌شده بیشینه دمای کاشان (c) براساس الگوی GIAOM

پس از مقایسه مقادیر میانگین و انحراف معیار در هریک از الگوها، به منظور راستی‌آزمایی و انتخاب بهترین الگو، بایاس و خطای مطلق در هریک از الگوها محاسبه شد. مقدار بایاس و خطای مطلق با استفاده از معادلات زیر به دست می‌آید:

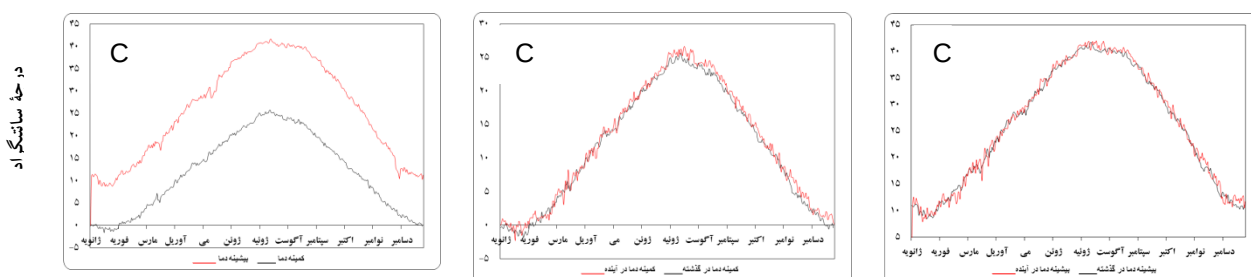
$$\text{Bias} = 1/n \sum_{i=1}^n (s - o) \quad (1)$$

$$\text{MAE} = 1/n \sum_{i=1}^n |s - o| \quad (2)$$

در این معادلات، S و o به ترتیب نشان‌دهنده پارامتر الگو شده و دیده‌بانی‌شده هستند که شامل

با توجه به تحلیل داده‌های دمایی طی دو بازه گذشته و آینده، افزایش میزان دمای کمینه و بیشینه (به جز در ماه فوریه و مارس) در بازه آینده ثابت شد. میانگین ماهانه متغیر کمینه و بیشینه دما در آینده تنها در چند روز از فصل زمستان کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده این متغیرهاست. بیشترین افزایش میانگین هر دو متغیر کمینه و بیشینه دما در آینده در فصل‌های تابستان و پاییز و

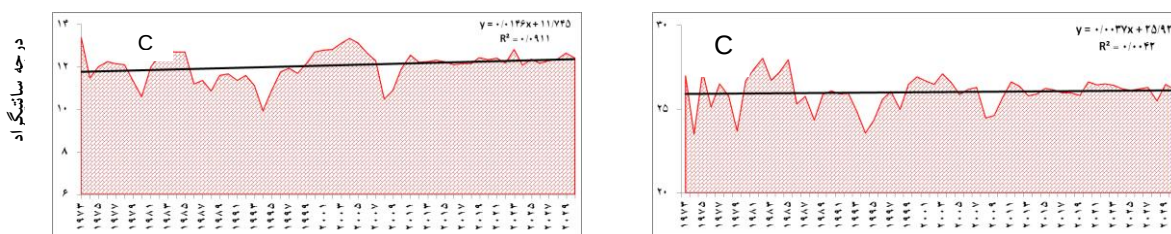
کمترین میزان افزایش دما در فصل‌های زمستان و بهار خواهد بود. بیشترین میزان افزایش دما در متغیر کمینه دما در ماه ژوئیه تا اکتبر خواهد بود. بیشترین میانگین متغیر کمینه دما طی سال‌های گذشته و آینده، $25/8$ درجه و بیشترین بیشینه دما $41/65$ درجه است. کمترین کمینه و بیشینه دما نیز در این مدت به ترتیب $-1/6$ و $8/8$ درجه است (اشکال ۷ تا ۹).



شکل ۷. مقایسه میانگین بیشینه دما (c) در دو بازه اقلیمی گذشته و آینده با استفاده از الگوی GIAOM
شکل ۸. مقایسه میانگین کمینه دما (c) در دو بازه اقلیمی گذشته و آینده با استفاده از الگوی GIAOM
شکل ۹. روند میانگین بیشینه و کمینه دما (c) در دو بازه اقلیمی گذشته و آینده با استفاده از الگوی GIAOM

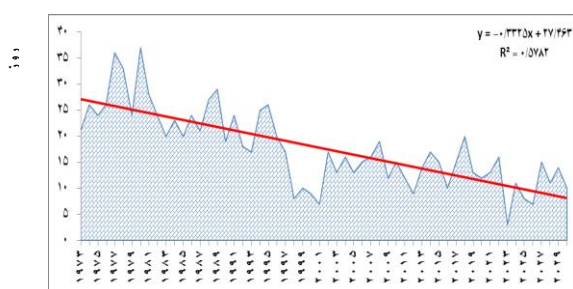
پس از بررسی میانگین ماهانه متغیرهای دمایی، متغیرهای دمایی سالانه و خط روند حاکم بر آن برای هر دو بازه اقلیمی مورد بررسی مقایسه شد. نتایج تحلیل نمودارها نشان می‌دهد که هر دو متغیر بیشینه و کمینه دما در ایستگاه کاشان در آینده افزایش خواهند یافت (شکل ۱۰ و ۱۱). نتایج حاصل از این اشکال

همچنین روشن‌گر این مطلب است که نوسانات متغیرهای دمایی سالانه در ایستگاه مدنظر، از نظم خاصی پیروی نمی‌کند؛ به طوری که نوسانات سال‌های پیش از ۲۰۱۰، بیش از سال‌های پس از آن است و می‌توان گفت که الگوی برگزیده، تغییرات دمایی آینده را با احتیاط بیشتری پیش‌بینی می‌کند.

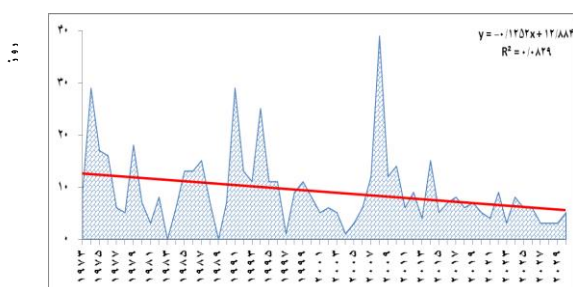


شکل ۱۰. دمای بیشینه سالانه (c) و خط روند برازش‌یافته بر آن در دو بازه اقلیمی گذشته و آینده
شکل ۱۱. دمای کمینه سالانه (c) و خط روند برازش‌یافته بر آن در دو بازه اقلیمی گذشته و آینده

همان‌طور که از اشکال ۱۳ تا ۱۵ پیداست، در هر سه نوع یخبندان، سری‌ها ناپایسته هستند و یخبندان در هر سه نوع، دارای روند کاهشی است. یخبندان‌های ضعیف با ضریب تعیین ۰/۵۷ و به میزان ۰/۳۳- در هر سال بیشترین میزان کاهش را شاهد خواهند بود. کمترین میزان کاهش یخبندان نیز متعلق به یخبندان متوسط است و یخبندان‌های شدید نیز با ضریب تعیین ۰/۰۸ و به میزان ۰/۱۲- در هر صد سال، رتبه دوم کاهش یخبندان را داراست. کاهش تعداد یخبندان‌ها، به معنای افزایش چشمگیر متغیرهای دمایی در ایستگاه کاشان طی سال‌های آینده است.

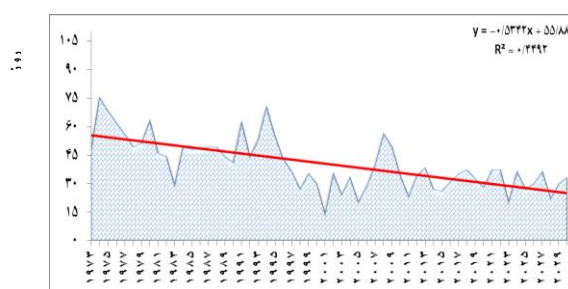


شکل ۱۳. تعداد یخبندان‌های ضعیف سالانه در دو بازه اقلیمی گذشته و آینده

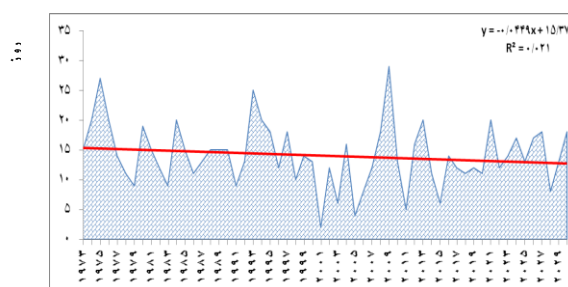


شکل ۱۵. تعداد یخبندان‌های شدید سالانه در دو بازه اقلیمی گذشته و آینده

به منظور تعیین روند یخبندان در ایستگاه کاشان در آینده، روزهای یخبندان این ایستگاه استخراج شد (شکل ۱۲). همان‌طور که از این شکل پیداست، تعداد روزهای یخبندان کاشان در بازه اقلیمی آینده، کاهش چشمگیری خواهد یافت که این امر، مَهر تأییدی است بر افزایش میانگین دمای کمینه دوره سرد سال در بازه اقلیمی آینده که پیش‌تر گفته شد. پس از استخراج رخداد انواع یخبندان، در مرحله بعد، ابتدا میانگین آن‌ها طی دو بازه اقلیمی گذشته و آینده مقایسه و سپس ایستایی یا ناپایستگی سری هرکدام از شدت‌ها و تعیین جهت آنها برای هر دو بازه ارزیابی شد.



شکل ۱۲. تعداد یخبندان‌های سالانه در دو بازه اقلیمی گذشته و آینده



شکل ۱۴. تعداد یخبندان‌های متوسط سالانه در دو بازه اقلیمی گذشته و آینده

الگوی لارس در بازتولید داده‌های روزانه یخبندان ایستگاه کاشان تا سال ۲۰۳۰ ارزیابی شده است. برای رسیدن به این هدف، بایاس و خطای مطلق در

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، توانمندی الگوهای BCM2، GIAOM، IPCM4، HADCM3 و HADGEM تحت

میانگین و انحراف معیار هریک از الگوها محاسبه شد. پس از آن، با توجه به کمترین میزان خطای مطلق در میان الگوها، الگوی GIAOM به منظور پیش‌بینی داده‌های مصنوعی دمای کمینه و بیشینه و نیز بررسی یخبندان‌های کاشان برای بازه اقلیمی آینده برگزیده شد. در این الگو، بیشترین میزان افزایش میانگین هر دو متغیر کمینه و بیشینه دما در آینده در فصل‌های تابستان و پاییز و کمترین میزان افزایش دما در فصل‌های زمستان و بهار خواهد بود. همچنین، هر دو متغیر بیشینه و کمینه دما در ایستگاه کاشان در آینده افزایش خواهند یافت.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روند هر سه نوع یخبندان ضعیف، متوسط و شدید در بازه اقلیمی آینده کاهش خواهد یافت. در این بین، بیشترین میزان کاهش یخبندان مربوط به یخبندان‌های ضعیف خواهد بود. نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌های طاووسی و همکاران (۱۳۹۱)، سبحانی و فاطمی‌نیا (۱۳۹۳)، عباسی و همکاران (۱۳۸۹) و صلاحی و همکاران (۱۳۹۳) که به کاهش روزهای یخبندان و افزایش دما معتقدند، انطباق نسبی دارد.

این کاهش در ایستگاه کاشان، روشن‌گر افزایش دما در سال‌های آینده و تأثیرپذیری یخبندان این منطقه از پدیده گرمایش جهانی است. واضح است که گرمایش جهانی از یک سو معلول افزایش متغیرهای دما و از سوی دیگر، یکی از دلایل تبخیر و تعرق است. همچنین گرمایش جهانی ناشی از تغییر اقلیم به کاهش روزهای یخبندان، یکنواخت نبودن توزیع بارش و درنهایت گسترش خشکسالی و تداوم آن منجر می‌شود. افزایش دما در نیمه سرد سال مسبب کاهش برف و باران در زمستان است. درنتیجه حجم

روان‌آب‌های ناشی از ذوب برف‌ها کاهش می‌یابد و ذخایر آب‌های زیرزمینی نیز تغییر می‌کند؛ به عبارت دیگر، این عوامل طی سالیان متمادی می‌تواند باعث تغییر الگوی زندگی انسان شود. همچنین گرمایش جهانی ناشی از تغییر اقلیم، به دلیل ایجاد تدریجی و احتمالی جزیره گرمایی در شهر کاشان، به تدریج باعث تغییر ویژگی‌های محیط زندگی انسان و همچنین آسیب‌پذیری منابع آب در دسترس در زمینه کشاورزی، تغییر الگوی کشت محصولات کشاورزی و تأثیر بر منابع آب خواهد شد. در این ایستگاه نیز در سال‌های آینده به دلیل افزایش دما و گرمایش ایجادشده، بیشتر بارش‌ها به صورت مایع خواهد بود و در مناطق کوهستانی و مرتفع شهرستان نیز برف‌ها زودتر از موعد ذوب خواهد شد؛ درنتیجه، احتمال کاهش تعداد روزهای یخبندان به وجود خواهد آمد. در کل، هیچ‌یک از متغیرهای اقلیمی و هیچ‌یک از جنبه‌های زندگی انسان از نتایج تغییر اقلیم مبری نیست.

از آنجا که گرمایش جهانی و تغییر اقلیم بر تمامی بخش‌های کشاورزی و منابع طبیعی، منابع آب، محیط زیست، منابع و مصارف انرژی، ساختمان، مسائل شهرنشینی و توسعه شهرها، صنعت حمل و نقل، سلامت و آسایش انسان، بخش‌های اقتصادی - اجتماعی و گردشگری، رخداد بلایای طبیعی نظیر سیل، خشکسالی، بیابان‌زایی، طوفان و ... تأثیرگذار است، در این راستا پیشنهاد می‌شود در این شهرستان، پژوهش‌های جامعی درباره تحلیل آثار گرمایش جهانی ناشی از تغییر اقلیم بر موارد اشاره‌شده به منظور اعمال پیامدهای آن در برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای انجام شود.

منابع

- بذرافشان، جواد و همکاران (۱۳۸۸). «بررسی و مقایسه عملکرد دو مدل (LARS- و ClimGen) WG در شبیه‌سازی فراسنج‌های هواشناسی در شرایط مختلف اقلیمی ایران»، *تحقیقات منابع آب ایران*، شماره ۱۳، ۴۴-۵۷.
- حجازی‌زاده، زهرا و ناصرزاده، محمدحسین (۱۳۸۴). «محاسبه و تجزیه و تحلیل ساعت‌های تداوم یخبندان با استفاده از برنامه‌نویسی به زبان دلفی؛ مطالعه موردی: استان لرستان»، *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، شماره ۷۶، ۱۵۰-۱۳۹.
- حق‌طلب، نفیسه و همکاران (۱۳۹۲). «مدل‌سازی اقلیم استان‌های تهران و مازندران با استفاده از مدل اقلیمی LARS-WG و مقایسه تغییرات آن در جبهه‌های شمالی و جنوبی البرز مرکزی»، *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، دوره پانزدهم، شماره ۱، ۴۹-۳۷.
- هاردی، جان‌تی (۱۳۸۷). *تغییر اقلیم؛ علل، اثرها و راه‌حل‌ها*، ترجمه خزانه‌داری، لیلی و همکاران؛ انتشارات پاپلی.
- خوشحال دستجردی، جواد و حسینی، سید محمد (۱۳۸۹). «کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی عناصر اقلیمی و پیش‌بینی سیکل خشکسالی؛ مطالعه موردی: استان اصفهان»، *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، شماره ۳ (پیاپی ۳۹)، ۱۲۰-۱۰۷.
- خلیلی اقدم، نبی و همکاران (۱۳۹۱). «ارزیابی توانایی مدل LARS-WG در پیش‌بینی برخی از پارامترهای جوی سندج»، *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، جلد ۱۹، شماره ۴، ۱۰۳-۸۵.
- سبحانی، بهروز و فاطمی‌نیا، فخری سادات (۱۳۹۳). «مدل‌سازی فراسنج‌های اقلیمی استان خراسان جنوبی»، *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، سال ۴۶، شماره ۳، ۳۳۲-۳۱۱.
- صلاحی، برومند و همکاران (۱۳۹۳). «ارزیابی تغییرات اقلیمی آینده استان اصفهان با استفاده از مدل‌های BCM2 و HADCM3 در محیط ریزگردان LARS-WG»، *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، سال پنجم، شماره ۱۶، ۱۱۸-۱۰۱.
- طاووسی، تقی و همکاران (۱۳۹۱). «پیش‌بینی تغییرات یخبندان شهر زابل بر پایه شبیه‌سازی مدل گردش عمومی جو»، *مجله مخاطرات محیطی*، سال اول، شماره ۲، ۴۸-۲۹.
- عباسی، فاطمه و همکاران (۱۳۸۹). «پیش‌بینی تغییرات اقلیمی خراسان جنوبی در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ با استفاده از ریزمقیاس نمایی آماری خروجی مدل ECHO-G»، *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، جلد ۲۴، شماره ۲، ۲۳۳-۲۱۸.
- عساکره، حسین، (۱۳۸۶). *تغییر اقلیم*، چاپ اول، زنجان: انتشارات دانشگاه زنجان.
- علیزاده، امین و همکاران (۱۳۸۹). «بررسی پتانسیل اثرهای تغییر اقلیم بر منابع و مصارف آب کشاورزی (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه

- G), Journal of Geography and Development, Vol. 24(2), PP: 218-233.
- Alizadeh, A., Mousavi, M. and Kamali, Gh. (1994). **Date of first frost in autumn and last frost of spring in Khorasan**. Journal of nivar, No. (24), pp: 38-56.
- Alizadeh, A., Sayari, N., Hesami Kermani, MR., Banayan Aval, M., Farid Hosseini, A. (2008). **Climate change effects survey in agriculture water source (case study: Kashafrood river)**, Journal of water and soil, Vol. 24(4), PP: 815-835
- Asakereh, H., 2005, **Climate Change**, First edition, University of Zanjan, Zanjan.
- Bazrafshan, J., Khalili, A., Horfar, A., Torabi, S., Hejam, S. (2007). **Survey and comparison work climgen and lars-wg models in weather parameter simulation in Iran climate various qualification**, Water Resources Association, No. 13, PP.44-57.
- Ghamghamy, M., Araghinejad, Sh., Ghahraman, N. (2010). **Aligning a series of simulated extreme values of temperature with climate change scenarios using a nonparametric approach**, 4th Regional conference on climate change, pp.169-179.
- Haghtalab, N., Goodarzi, M., Habibi Nokhandan, M., Yavari, A.R., Jafari, H.R. (2014). **Climate Modeling in Tehran & Mazandaran Provinces by LARSWG and Comparing Changes in Northern and Southern Central Alborz hillside**, Journal of Environmental Sciences and Technology, No.1. pp. 37-49.
- Harmsen, E., Miller, N.L., Schlegel, N.J., Gonzalez, J.E. (2009). **Seasonal climate change impacts on evapotranspiration, precipitation deficit and crop yield in Puerto Rico**. Journal of Agricultural Water Management. Vol. 96, pp. 1085– 1095.
- Hejazizadeh, Z., Naserzadeh, H. (2005). **Calculation and analysis of frost hours continuous using Delphi programming language, case study: Lorestan Province**, Journal of Geographical Research, No. 76, pp. 139-150.
- کشف‌رود»، **نشریه آب و خاک**، جلد ۲۴، شماره ۴، ۸۳۵-۸۱۵.
- علیزاده، امین و همکاران (۱۳۷۳). «تاریخ وقوع اولین یخبندان‌های پاییزه و آخرین یخبندان‌های بهاره در خراسان»، **نشریه نیوار**، شماره ۲۴، ۵۶-۳۸.
- قمقامی، مهدی و همکاران (۱۳۸۹). «همسوسازی سری شبیه‌سازی شده مقادیر حدی دما با سناریوهای تغییر اقلیم با استفاده از یک رهیافت ناپارامتری»، **چهارمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم**، ۱۶۹-۱۷۹.
- مسعودیان، سیدابوالفضل و دارند، محمد (۱۳۹۱). «تحلیل هم‌دید یخبندان‌های فراگیر و بادوام ایران»، **جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی**، سال ۲۴، شماره ۲ (پیاپی ۵۰)، ۱۴۰-۱۲۹.
- معافی مدنی، سیده فاطمه و همکاران (۱۳۹۱). «پیش‌بینی وضعیت خشکسالی استان خراسان رضوی طی دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ با استفاده از ریزمقیاس نمایی آماری خروجی مدل Lars-wg5»، **جغرافیا و مخاطرات محیطی**، شماره ۳، ۳۷-۲۱.
- میرموسوی، سیدحسین و حسین‌بابایی، مصطفی (۱۳۹۰). «مطالعه توزیع زمانی - مکانی احتمال وقوع یخبندان در استان زنجان»، **مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی**، سال ۲۲، شماره ۴۳، ۱۸۴-۱۶۷.
- Abbasi, F., Malbosi, SH., Babaeian, I., Asmari, M., Borhani, R. (2007). **Climate change forecast in Southern khorasan in 2010-2039 by Gcm data downscaling (ECHO-**

- Geography and Environmental Planning Journal, vol. 43, pp. 167-184.
- Moafi madani, S.M., Mousavi baygi, M., Ansari, H. (2012). **Prediction of drought in the Khorasan Razavi province during 2011-2030 by using statistical downscaling of hadcm3 model output**, Geography and environmental hazards, No. 3. Pp. 21-37.
- Salahi, B., Fatemi-nia, F.S., Hosseini, S.M. (2014). **Assessment of future climate changes in Isfahan province using BCM2 & HADCM3 models by Lars-Wg downscaling model**, Arid Regions Geographic Studies, Vol. 5, No. 16, pp. 55-71.
- Sobhany, B., Fateminiya, F.S. (2014). **Modelling of Climatic Parameters in Province of Southern Khorasan**, Physical Geography Research Quarterly, vol. 3. Pp. 311-332.
- Tavoosi, T., Khosravi, M., Zahraee, A. (2010). **Glacial change forecast zabol by simulation of atmospheric general circulation model**, Journal of environmental hazards, No. 2, PP. 29-48.
- Watkins, S.C. (1991). **The annual period of freezing temperatures in Central England 1850-1959**, Inter. J. Climatology, Vol. 11, pp. 889-896.
- Masoodian, S.A., Darand, M. (2013). **Synoptic analysis of extensive and persistent frosts in Iran**, Geography and Environmental Planning Journal, Vol. 50, No. 2, PP. 129-140.
- <http://ibabaeian.persiangig.com/document/HadCM3.docx/dl>
- Johns, T. C., Durman, C.F., Banks, H.T., Roberts, M.J., McLaren, A.J., Ridley, J.K., Senior, C.A., Williams, K.D., Jones, A., Rickard, G.J., Cusack, S., Ingram, W.J., Crucifix, M., Sexton, D.M.H., Joshi, M.M., Dong, B.-W., Spencer, H., Hill, R.S.R., Gregory, J.M., Keen, A.B., Pardaens, A.K., Lowe, J.A., Bodas-Salcedo, A., Stark, S., Searl, Y. (2006). **The new Hadley Centre climate model HadGEM1: Evaluation of coupled simulations**. J. Climate, vol. 19, pp. 1327-1353.
- Khalily Aghdam, N., Mosaedy, A., Soltany, A., Kamkar, B. (2012). **Assessment of ability LARS-WG model to predict climatic variable in Sanandaj**, Water and Soil conservation, Vol. 19(4), PP. 85-103.
- Khazanedari, L., Kouhi, M., Ghandhari, Sh., Asiaei, M. (2008). **Climate change, causes, effects & solutions**, Translated, second edition, Amir-Kabir press, Mashhad.
- Khoshhal dastjerdi, J., Hosseini S.M. (2010). **Application of artificial neural network in climatic elements simulation and drought cycle predication (case study: Isfahan province)**, Journal of Geography and Environmental Planning, Vol. 39(3), PP.107-120.
- Martin, G.M., Ringer, M.A., Pope, V.D., Jones, A., Dearden, C., Hinton, T.J. (2006). **The Physical properties of the atmosphere in the new Hadley Centre Global Environmental Model**, HadGEM1. Part I. Model description and global climatology. J. Clim. Vol. 19, pp. 1274-1301. (Doi: 10.1175/JCLI3636.1).
- MirMousavi, S.H., Hosseinbabai, M. (2011). **Study of frost tempo_spatial probability distribution in Zanjan province**,