



پیش‌نگری کمی اثرات محتمل تغییر اقلیم بر تاریخ و ریسک خسارت رخداد یخبندان دیررس بهاره طی قرن بیست و یکم در ایران

علی خلیلی^{۱*}، جابر رحیمی^۲، جواد بذرافشان^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۲۶

چکیده

یخبندان دیررس بهاره یک پدیده زیان‌بخش اقلیمی است که بر اقتصاد کشاورزی به ویژه تولید محصولات زراعی و باغی تأثیر می‌گذارد. از طرفی مسلم است که نحوه بروز این پدیده در شرایط تغییر اقلیم و گرمایش زمین دستخوش تغییر خواهد شد. بررسی حاضر به منظور کمی‌سازی این تغییرات با استفاده از مدل گردش عمومی جو CGCM3 تحت سناریوهای انتشار A2 و A1B و روش ریزمقیاس‌نمایی آماری شبکه عصبی مصنوعی (ANN) به انجام رسیده است. برای این منظور ابتدا داده‌های دمای کمینه روزانه ۵۰ ایستگاه هواشناسی، معرف اقلیم‌های گوناگون کشور، از بدو تأسیس تا سال ۲۰۱۰ گردآوری و کنترل کیفی شد. بررسی روند تغییرات میانگین منطقه‌ای سالانه دمای کمینه روزانه در ایران در دوره ۲۰۱۰-۱۹۶۱ افزایش معنی‌دار ۰/۳ درجه سانتی‌گراد در هر ده سال را مشخص می‌سازد. همچنین عقب رفت معنی‌دار ۱/۴ روز در هر دهه در تاریخ وقوع یخبندان دیررس بهاره صفر درجه در همین دوره به ویژه پس از دهه ۸۰ میلادی با اطمینان ۹۵ درصد نیز دیده می‌شود. در ادامه معادلات سه بعدی توزیع فضایی ریسک و تاریخ رخداد یخبندان دیررس بهاره برای آستانه دمایی صفر درجه تعیین و نقشه آن‌ها با تفکیک ۱×۱ کیلومتر و با دقت ۵۰ ایستگاه در سطح کشور در محیط GIS و به روش ایجاد لایه تصحیح خطا چه در دوره تاریخی و چه در دوره آینده (جمعاً ۱۴ نقشه) ترسیم گردید و مساحت پهنه‌های کم، متوسط، پر و بسیار پرخطر و همچنین بازه‌های زمانی رخداد یخبندان دیررس بهاره مشخص شد و سپس اختلافات در تغییر مساحت‌های تحت پوشش هر پهنه تعیین و به طور کمی مقایسه گردید. در دید کلی بر اساس نتایج به دست آمده، یخبندان‌های دیررس بهاره با گذشت زمان بر اساس هر دو سناریو زودتر اتفاق خواهد افتاد. پهنه‌هایی از کشور که تاریخ رخداد آخرین یخبندان آن بین ۱۰ آذر تا ۱۰ دی اتفاق می‌افتد و در حال حاضر ۱/۸۳ درصد سطح کشور را پوشش می‌دهد در اواخر قرن در شرایط سناریوی A2، ۱۳/۹۱ و در شرایط A1B، ۱۲/۸۴ درصد مساحت ایران را فرا می‌گیرد. همچنین گستره‌هایی که آخرین یخبندان بهاره آن‌ها بین ۱۰ فروردین تا ۱۰ اردیبهشت است و در حال حاضر ۲۱/۴۷ درصد مساحت کشور را در قلمرو خود دارند در اواخر قرن تحت همین سناریوها به ترتیب به ۸/۲۹ و ۹/۱۵ درصد کاهش می‌یابند. به علاوه در دهه‌های آتی با ریسک کمتر رخداد پدیده یخبندان دیررس بهاره مواجه خواهیم بود.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، یخبندان دیررس بهاره، ریسک یخبندان، شبکه عصبی مصنوعی، ایران

مقدمه

روش‌های مناسب مدیریتی و استفاده از تکنولوژی‌های جدید جهت تطابق با شرایط اقلیمی متفاوت و نیز تعدیل اثرات زیان‌بخش احتمالی را فراهم می‌کند. برای مثال این مدیریت‌ها و تصمیمات می‌تواند شامل مواردی از جمله تغییر الگوی کشت در مناطقی که در نتیجه گرم‌تر شدن هوا با تغییر تاریخ یخبندان‌های زودرس پاییزی و یا دیررس بهاره روبرو هستند باشد. با عنایت به اهمیت پدیده سرمایه‌های زیان‌بخش در بحث تولید و همچنین شواهد پدیده تغییر اقلیم در ایران (بابائیان و همکاران،

مدل‌سازی تغییرات عوامل محیطی مرتبط با بخش کشاورزی در شرایط اقلیم آینده جهان، امکان به‌کارگیری

^۱ استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

(*)نویسنده مسئول: akhalili@ut.ac.ir

^۲ دانش‌آموخته دکتری هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

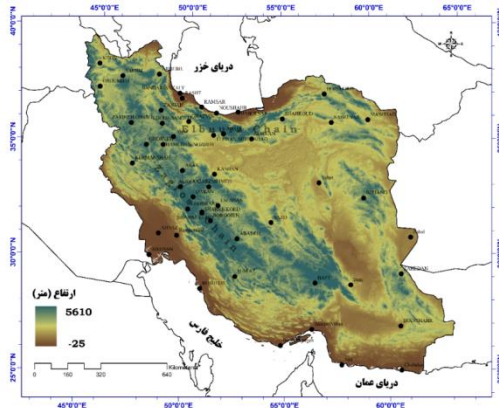
^۳ دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

همکاران^۴ (۲۰۱۵) به بررسی یخبندان دیررس بهاره در ارتباط با مراحل جوانه زنی و برداشت انگور طی دو دوره ۱۹۰۱ تا ۲۰۱۰ و ۲۰۱۰ تا ۲۱۰۰، بر اساس دو سناریوی گزارش پنجم هیأت بین‌الدول تغییرات اقلیمی (RCP4.5 و RCP8.5)، در آلمان پرداختند. نتایج نشان‌گر افزایش سرعت مراحل فنولوژیک (11 ± 3 روز) بعد از دهه ۱۹۸۰ بود. در ایران نیز مطالعات مربوط به تاریخ وقوع اولین و آخرین سرما برای آستانه‌های مختلف دمایی در مقیاس سراسری و منطقه‌ای کم و بیش از دهه پنجاه به بعد آغاز گردید و از آن جمله می‌توان به مطالعات مقدسی (۱۳۶۱)، سمیعی و همکاران (۱۳۶۷)، علیزاده و همکاران (۱۳۷۳)، براتی (۱۳۷۵)، مجرد قره‌باغ (۱۳۷۶)، ایزدی (۱۳۷۷)، کمالی و حبیبی نوخندان (۱۳۸۴)، رحیمی و همکاران (۲۰۰۷) و فرج زاده و همکاران (۲۰۱۰) اشاره کرد. قربانی و ولیزاده (۱۳۹۳) با بهره‌گیری از مدل HadCM3 (تحت سناریوی AIB و با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG)، تأثیر تغییرات اقلیمی بر تاریخ اولین یخبندان پاییزه، آخرین یخبندان بهاره را در ایستگاه‌های تبریز، مشهد و قزوین را مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که در دوره آتی (۲۰۵۰-۲۰۰۵) برای سه آستانه دمایی مورد بررسی (۱/۱، ۲/۲ و ۳/۳ درجه سانتی‌گراد) این تاریخ‌ها زودتر اتفاق خواهد افتاد. خلیلی (۱۳۸۸ و ۱۳۹۳) اطلس اقلیمی تاریخ وقوع اولین سرمای پاییزه، آخرین سرمای بهاره و طول مدت سرما در گستره ایران را ارائه داد. مطالعه وی شامل سیزده آستانه دمایی بحرانی سرما (θ) از $7/8$ تا $4/4$ + درجه سانتی‌گراد، هر یک در ۱۱ سطح احتمالاتی از ۵ تا ۹۵ درصد و مبتنی بر داده‌های ۱۴۲ ایستگاه است. در این بررسی تاریخ‌های وقوع سرما در سطوح احتمال مختلف برای هر ایستگاه و برای هر مقدار θ با استفاده از برآزیده‌ترین تابع چگالی احتمال آن ایستگاه محاسبه شده است. اطلس شامل ۱۴۳ نقشه در محیط GIS با تفکیک 1×1 کیلومتر می‌باشد که بر اساس گروه روابط رگرسیونی خطی معنی دار بین عوامل دمایی و مختصات جغرافیایی ترسیم شده است. هدف اصلی پژوهش حاضر در ادامه مطالعات وی، ارزیابی تغییرات محتمل ریسک و تاریخ رخداد یخبندان دیررس در گستره ایران در دهه‌های آتی می‌باشد. در این

۱۳۸۸؛ رحیمی و همکاران، ۲۰۱۳)، علاوه بر ضرورت انجام مطالعات پایه‌ای به منظور شناخت راه‌های مقابله با آن در سطح مزرعه، می‌بایست توجه ویژه‌ای را به چگونگی تغییر این پدیده طی سده کنونی در سطح کشور معطوف کرد که این مهم توسط مدل‌های گردش عمومی جو، سناریوهای اقلیمی و روش‌های ریزمقیاس‌نمایی امکان‌پذیر شده است. طی سال‌های اخیر بررسی تغییرات ریسک و تاریخ وقوع یخبندان دیررس بهاره از این منظر که مؤلفه مهمی در تولید محصول و امنیت غذایی محسوب می‌شود به‌عنوان یک مبحث اساسی در مطالعات راهبردی مورد توجه محققین قرار گرفته است. ریگی و پورپوراتو^۱ (۲۰۰۸) یک مدل احتمالاتی به منظور ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر ریسک یخبندان بهاره ارائه کردند. مدل پیشنهاد شده بر پایه دما و فنولوژی استوار بوده و با ارزیابی هم‌زمان میانگین، واریانس و ضرایب خودهمبستگی دمای فصل بهار به بررسی ریسک یخبندان بهاره می‌پردازد. بر اساس نتایج به دست آمده اثرات تغییر اقلیم بر ریسک وقوع یخبندان بهاره بیشتر متاثر از افزایش واریانس دمای روزانه است تا افزایش میانگین دمای روزانه. اسیل و همکاران^۲ (۲۰۰۹) با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های دمای مدل بزرگ مقیاس HadCM3 بر روی دو منطقه مهم تولید سیب در اروپا (طی ۵۰ سال آینده و بر اساس دو سناریوی انتشار A2 و B2) و با بهره‌گیری از دو مدل پیش‌بینی مراحل فنولوژیک به بررسی ریسک پدیده یخبندان بهاره پرداخته و به این نتیجه دست یافتند که محصول سیب در آینده در معرض ریسک سرمازدگی کمتری قرار خواهد داشت. آناندهی و همکاران^۳ (۲۰۱۳)، به بررسی چگونگی تغییرات پارامترهای مرتبط با یخبندان (طول فصل سرما، تاریخ یخبندان زودرس پاییزه، یخبندان دیررس بهاره، تعداد روزهای یخبندان و غیره) تحت تأثیر تغییرات اقلیمی طی دو دوره آتی ۲۰۴۵-۲۰۶۵ و ۲۰۸۵-۲۱۰۰ در مناطق کوهستانی نیویورک پرداختند و نشان دادند که بر اثر تغییر اقلیم تاریخ یخبندان زودرس پاییزه و یخبندان دیررس بهاره به ترتیب دیرتر و زودتر اتفاق خواهد افتاد. کارتسکل و

¹ Rigby and Porporato² Eccel et al.³ Anandhi et al.⁴ Kartschall et al.

از تابع تجمعی احتمالات ایستگاه تحت بازسازی استخراج می‌گردد (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۶).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های همدیدی مورد مطالعه

علاوه بر آمار و اطلاعات دوره پایه که نحوه سرنده آن در بالا شرح داده شد، به منظور بررسی اثرات محتمل تغییر اقلیم بر گستره کشور در دوره آتی، از داده‌های خروجی مدل CGCM3 که در واقع نسل سوم مدل‌های مرکز مدل‌سازی و تحلیل اقلیم کانادا محسوب می‌شود، تحت سناریوی انتشار A2 و A1B (از مجموعه سناریوهای SRES) استفاده گردید.

روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری

در این مطالعه از روش شبکه عصبی مصنوعی^۱ به منظور انجام ریزمقیاس‌نمایی داده‌های دمای کمینه روزانه استفاده شده است. روش مورد بحث در این مطالعه، یک مدل شبکه عصبی مصنوعی دینامیک^۲ است که توسط کولیبالی و همکاران^۳ (۲۰۰۵) توسعه داده شد. در این مدل یک رابطه غیرخطی بین تعدادی از پیش‌بینی‌کننده‌های افسری بزرگ مقیاس و پیش‌بینی شونده‌ها هواشناسی با بهره‌گیری از یک شبکه عصبی پیش‌خور با تاخیر زمانی^۴ برقرار شده و آموزش مدل توسط الگوریتم پس انتشار خطا انجام می‌گیرد.

انتخاب پیش‌بینی‌کننده مناسب

انتخاب بهترین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده از بین متغیرهای بزرگ مقیاس، یکی از مهم‌ترین مراحل فرآیند

راستا، برای هر دوره اعم از دوره پایه (مبتنی بر داده‌های مشاهده شده ایستگاهی) و دوره‌های آتی، دمای کمینه روزانه (تحت هر یک از دو سناریوی A2 و A1B، با استفاده از روش ریزمقیاس‌نمایی ANN و مدل CGCM3) تولید شد و پارامترهای ریسک و تاریخ بر اساس آن‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و نتایج مربوط برای گستره کشور در ادامه آورده شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

کشور ایران با وسعتی در حدود ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومتر مربع و متوسط دراز مدت بارش ۲۵۴ میلی‌متر در سال (خلیلی و رحیمی، ۲۰۱۴) در نیم‌کره شمالی، در قاره آسیا و در قسمت غربی فلات ایران واقع شده است. بر اساس طبقه‌بندی دومارتن در حدود ۳۶ درصد از مساحت ایران را آب و هوای فراخشک و ۲۹ درصد را آب و هوای خشک بیابانی درقلمرو خود دارند و به طور کلی ۶۵ درصد مساحت کشور زیر پوشش اقلیم خشک قرار دارد و اقلیم نیمه‌خشک در حدود ۲۰ درصد را به خود تخصیص داده است. به این ترتیب سهم اقلیم مدیترانه‌ای تا بسیار مرطوب جمعاً به ۱۵ درصد محدود می‌گردد (رحیمی و همکاران، ۲۰۱۳).

داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه از داده‌های دمای کمینه روزانه ۵۰ ایستگاه همدید کشور استفاده شده است (شکل ۱) که دارای پوشش آماری کافی در دوره مطالعاتی و یا پوشش آماری قابل بازسازی در دوره اقلیمی ۲۰۱۰-۱۹۶۱ بودند. برای بازسازی داده‌های روزانه مفقود، یک مدل روزانه تدوین و گسترش داده شد و به این ترتیب سری‌های زمانی پیوسته برای دمای کمینه روزانه در شبکه استنادی به دست آمد. در این روش در گام نخست مناسب‌ترین ایستگاه همبسته و مجاور به ایستگاه تحت بازسازی انتخاب می‌گردد. سپس برازنده‌ترین تابع توزیع احتمالات وقوع دماها تعیین و احتمال تراکمی دما برای هر ایستگاه مشخص می‌گردد. در گام بعدی برای برآورد دمای یک روز معین در ایستگاه تحت بازسازی، ابتدا احتمال وقوع دمای آن روز از تابع تجمعی احتمالات ایستگاه مرجع تعیین و سپس دمای متناظر با آن احتمال

¹ ANN

² Dynamic Artificial Neural Network

³ Coulibaly et al.

⁴ Time-lagged Feed-forward Neural Network, TLFN

مطالعه در هر ایستگاه می‌باشند. بر اساس این شاخص، هر سال i با یکی از توصیف‌های خطر آسیب، در یکی از رده‌های چهارگانه خطر (ناچیز $(Z \leq 0)$ ، خفیف $(0 < Z \leq 1/25)$ ، ملایم $(1/25 < Z \leq 0/25)$ و شدید $(Z > 0/25)$) قرار می‌گیرد و احتمال وقوع هر یک از این رده‌ها برای آستانه آسیب θ (به ترتیب $P_0(\theta)$ ، $P_1(\theta)$ ، $P_2(\theta)$ و $P_3(\theta)$) محاسبه شد. در گام بعدی، معیار ریسک یا بزرگی خطر یخبندان، اندازه $P_{23}(\theta) = P_2(\theta) + P_3(\theta)$ یعنی مجموع احتمالات تجربی آسیب‌های ملایم و شدید انتخاب گردید. گفتنی است در مقاله حاضر θ برابر با صفر درجه سانتی‌گراد اختیار شده است. رده‌های ریسک یا خطر یخبندان بر پایه مقدار $P_{23}(\theta)$ (حسب $\%$) براساس آزمون‌های مربوط به مقایسه ایستگاه‌ها با یکدیگر به شرح جدول ۱ انجام شده است. به این ترتیب مقادیر $P_{23}(\theta)$ و رده‌های مختلف خطر یخبندان‌های بهاره برای کلیه ایستگاه‌های مطالعاتی که برآورد درباره آن‌ها امکان‌پذیر بوده و برای آستانه دماهای بحرانی صفر درجه سانتی‌گراد محاسبه شد (جدول ۱).

جدول ۱- معیارهای پهنه‌بندی خطر یخبندان بهاره $P_{23}(\theta)$ برای آستانه دمایی معین θ درجه (خلیلی، ۱۳۸۸)

نماد	توصیف	حدود شاخص
A	بسیار کم خطر	کمتر از یک
B1	کم خطر ۱	۱ تا ۱۰
B2	کم خطر ۲	۱۰ تا ۲۰
C1	متوسط خطر ۱	۲۰ تا ۳۰
C2	متوسط خطر ۲	۳۰ تا ۳۵
D1	پرخطر ۱	۳۵ تا ۴۰
D2	پرخطر ۲	۴۰ تا ۵۰
D3	بسیار پرخطر	بیشتر از ۵۰

ترسیم نقشه وضعیت فعلی و آتی

در این پژوهش به منظور میدانی کردن محاسبات و ترسیم ویژگی‌های مورد نظر در یک نقشه، چه در دوره تاریخی و چه دوره‌های آینده، از روش لایه خطا استفاده گردید (خلیلی و همکاران، ۱۳۸۳). اساس روش لایه خطا بر جستجوی یک معادله به شکل $P(\theta) = \alpha + \beta x + \gamma y + \lambda z + \varepsilon$ استوار است که در آن $P(\theta)$ ویژگی مورد نظر (در اینجا احتمال عبور دما از مرز صفر درجه سانتی‌گراد با احتمال ۵۰ درصد) و x ، y ، z و ε مختصات جغرافیایی (طول و عرض و ارتفاع) و خطای

ریزمقیاس نمایی آماری است (ویلی و همکاران، ۲۰۰۲؛ هوانگ و همکاران^۱، ۲۰۱۱). در این پژوهش برای تعیین پیش بینی کننده مناسب، از روشی که با بهره‌گیری از ماتریس همبستگی، خود همبستگی و P-value که به انتخاب متغیرهای برتر می‌پردازد استفاده شد (محمود و بابل^۲، ۲۰۱۳؛ گاگنون و همکاران^۳، ۲۰۰۵) و به این ترتیب از بین ۲۶ متغیر پیش‌بینی کننده دمای کمینه، بهترین پیش‌بینی کننده‌ها جهت انجام ریزمقیاس‌نمایی آماری در گستره کشور تعیین گردید.

سال دمایی و کمی‌سازی ریسک یخبندان دیررس بهاره

تعریف یخبندان دیررس بهاره در قالب تقویم بین‌المللی (ژولوسوسی) برای کشور ایران که دارای عرض جغرافیایی گسترده و طیف ارتفاعی وسیعی است اشکالاتی ناشی از ناهماهنگی در تقویم (تاریخ) دوره‌های رشد و مراحل فنولوژی به وجود می‌آورد در پژوهش حاضر برای رفع این ناهماهنگی از تعریف سال دمایی^۴ نظیر آن چه در هیدرولوژی برای سال آبی عمل می‌شود، استفاده شد. حسب تعریف، سال دمایی سالی است که ابتدا و انتهای آن در گرم‌ترین ایام سال قرار می‌گیرد و برحسب قرارداد در این بررسی، آغاز آن اول ماه اوت هر سال و پایان آن ۳۱ ماه ژوئیه سال بعد می‌باشد. با این تعریف اصطلاح یخبندان دیررس بهاره، آخرین یخبندانی است که در طی یک سال دمایی اتفاق می‌افتد و ممکن است حسب عرض جغرافیایی و ارتفاع در زمستان یا اواخر فصل بهار، همگام با روند فنولوژی گیاهان بومی رخ دهد. در ادامه به منظور کمی‌سازی ریسک یخبندان دیررس بهاره نیز از شاخص و روش تاریخ استاندارد (خلیلی، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۳) و معیارهای طبقه‌بندی مربوطه استفاده شد.

$$Z_i = \frac{(TDN)_i - \overline{TDN}}{SD_{TDN}} \quad (1)$$

که در آن Z_i متغیر معیار شده بدون بعد در یک سال معین i ، $(TDN)_i$ شماره روز دمایی وقوع یخبندان دیررس بهاره در یک سال معین i ، \overline{TDN} میانگین شماره روزها (یا تاریخ متوسط) و $SD_{(TDN)}$ انحراف معیارهای تاریخ‌های $(TDN)_i$ پدیده دمایی در دوره اقلیمی مورد

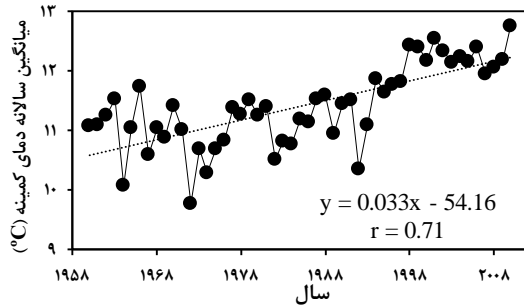
¹ Huang et al.

² Mahmood and Babel

³ Gagnon et al.

⁴ Thermal year

است. نتایج به دست آمده بر اساس آزمون تعیین روند من‌کندال نیز، روند صعودی معنی‌دار (با اطمینان ۹۹ درصد) دمای کمینه در دوره فعلی را تأیید می‌کند که همخوان با یافته‌های جهانی نیز می‌باشد.



شکل ۲- روند منطقه‌ای تغییرات متوسط سالانه دمای کمینه در دوره آماری ۲۰۱۰-۱۹۶۰- نگرش یکپارچه

همین بررسی برای تاریخ وقوع آخرین یخبندان در گستره کشور نشان داد که این تاریخ در طی ۵۰ سال گذشته به سمت عقب آمده و به عبارت دیگر روند تغییرات شماره روز یخبندان دیررس بهاره نزولی است. جدول ۲ نتایج به دست آمده در این بخش را نمایش می‌دهد. با توجه به این جدول می‌توان گفت روند نزولی تاریخ بروز یخبندان دیررس بهاره (به طور متوسط ۱/۴ روز در هر دهه) پس از دهه ۸۰ میلادی در سطح ۵ درصد معنی‌دار است.

جدول ۲- روند تغییرات تاریخ یخبندان دیررس بهاره در دوره آماری ۲۰۱۰-۱۹۶۰- نگرش یکپارچه

دهه	۱۹۶۱-۱۹۷۰	۱۹۷۱-۱۹۸۰	۱۹۸۱-۱۹۹۰	۱۹۹۱-۲۰۰۰	۲۰۰۱-۲۰۱۰
شماره روز متوسط تاریخ رخداد آخرین یخبندان بهاره (TDN)	۲۲۳	۲۱۹	۲۱۹	۲۱۷	۲۱۷
تاریخ	۲۱ اسفند	۱۷ اسفند	۱۶ اسفند	۱۵ اسفند	۱۵ اسفند

جغرافیایی حسب درجه قوسی و ضریب تبیین هستند. این معادلات در سطح معنی‌داری ۵٪ معنی دارند. معادله تاریخ وقوع آخرین یخبندان با آستانه صفر درجه سانتی‌گراد در سطح احتمال ۵۰ درصد نشان می‌دهد که این تاریخ با افزایش عرض جغرافیایی ۶ روز و با افزایش طول جغرافیایی (از غرب به شرق) کمتر از یک روز و با افزایش ارتفاع به ازاء هر کیلومتر، ۳۹/۶ روز دیرتر رخ می‌دهد و دلیل اینکه در روی نقشه در ارتفاعات یخبندان دیررس بسیار دیرهنگام به وقوع می‌پیوندد همین است. شکل ۳ پهنه‌های مربوط به ریسک و تاریخ وقوع یخبندان دیررس بهاره در گستره کشور را نمایش می‌دهد.

برآورد است که به روش ایجاد و اعمال لایه خطا بر جزء قانونمند معادله اضافه می‌گردد.

نتایج و بحث

آنالیز روند در دوره فعلی

نتایج حاصل از ارزیابی روند زمانی تغییرات مقدار میانگین دمای کمینه سالانه در شبکه ایستگاه‌های مطالعاتی حاکی از آن بوده است که مجموعاً در ۱۱ ایستگاه، روند مذکور در سطح ۵ درصد معنی‌دار و در ۲۷ ایستگاه در سطح کمتر از ۵ درصد معنی‌دار بوده است. حال آن‌که در ۲ ایستگاه شهرکرد و خرم‌آباد این روند برعکس جریان گرمایش جهانی نزولی معنی‌دار می‌باشد. بررسی تاریخچه ایستگاه‌ها نشان داد که این مساله به جابجایی موقعیت مکانی این دو ایستگاه مرتبط است. در یک ارزیابی دیگر به منظور کمی کردن روند تغییرات دمای کمینه در گستره کشور، میانگین منطقه‌ای سالانه دمای حداقل روزانه شبکه ایستگاه‌های مورد بررسی در هر سال محاسبه و سپس روند تغییرات آن در دوره تاریخی مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۲ نتایج حاصل از این بررسی را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان ارزیابی کرد که میزان افزایش دمای کمینه در دوره تاریخی (۲۰۱۰-۱۹۶۱) در نگرش یکپارچه برای تمام کشور برابر ۰/۳ درجه سانتی‌گراد در هر دهه بوده

وضعیت تاریخ وقوع یخبندان‌های دیررس بهاره در

دوره اقلیمی ۲۰۱۰-۱۹۶۱

برای ترسیم نقشه‌های هم‌ریسک و هم‌تاریخ یخبندان دیررس بهاره در کشور، معادله تغییرات متوسط تاریخ رخداد این پدیده حسب مختصات جغرافیایی و دمای بحرانی صفر درجه سانتی‌گراد به صورت معادله‌های ۲ و ۳ به دست آمد.

$$LSF_Risk = -112 + 0.0679 Z + 2/61 Y + 1/02 X + \epsilon, R^2 = 47/2 \quad (2)$$

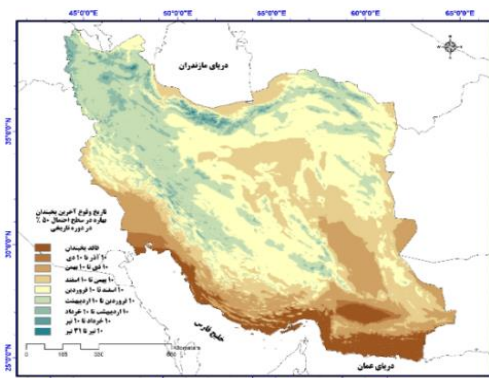
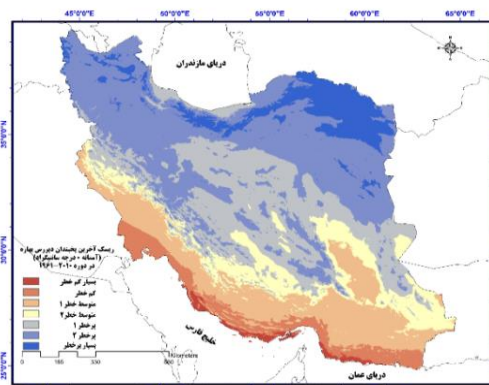
$$LSF_Date = -21/4 + 0.396 Z + 5/98 Y - 0.76 X + \epsilon, R^2 = 70/5 \quad (3)$$

که در آن، LSF_Risk و LSF_Date به ترتیب معرف تاریخ حسب TDN و ریسک یخبندان دیررس بهاره و Z، Y، X و R² به ترتیب ارتفاع، عرض و طول

می‌شود به طوری که قریب به ۱۰ درصد از مساحت کشور در مناطقی واقع شده است که به لحاظ ریسک وقوع یخبندان دیررس بهاره بسیار پر خطر ارزیابی می‌شوند. همچنین در دوره تاریخی ۲۰۱۰-۱۹۶۱، پهنه‌های پرخطر ۲ و بسیار کم خطر به ترتیب بیشترین (۳۳/۵٪) و کمترین (۱٪) مساحت را در بین پهنه‌های ریسک به خود اختصاص داده‌اند. همچنین مساحت‌سنجی نقشه تاریخ رخداد یخبندان دیررس بهاره طی دوره ۲۰۱۰-۱۹۶۱ نشان می‌دهد پهنه‌هایی که تاریخ وقوع آخرین یخبندان سال آن‌ها بین ۱۰ اسفند تا ۱۰ فروردین و ۱۰ تیر تا ۳۱ تیر اتفاق می‌افتد به ترتیب بیشترین (۳۱/۸۷٪) و کمترین (۰/۰۴٪) مساحت کشور را به خود اختصاص داده‌اند.

تأثیرات تغییر اقلیم بر ریسک و تاریخ رخداد یخبندان دیررس بهاره

به منظور ترسیم نقشه‌های هم ریسک و هم تاریخ یخبندان دیررس بهاره در کشور طی سه دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱، معادله تغییرات شاخص ریسک $P_{23}(\theta)$ و شماره روز یخبندان دیررس بهاره بر اساس آستانه دمای بحرانی صفر درجه سانتی‌گراد به دست آمد.



شکل ۳- پهنه‌های هم‌ریسک و هم تاریخ یخبندان دیررس بهاره برای آستانه آسیب صفر درجه سانتی‌گراد در گستره کشور بر اساس نقشه ریسک، حدود یک درصد مساحت کشور که نواری در کنار دریای عمان را به خود اختصاص می‌دهد خطر وقوع یخبندان بسیار ناچیز بوده و با حرکت به سوی مناطق مرتفع کشور به میزان ریسک افزوده

جدول ۳- معادلات فضایی ریسک و تاریخ رخداد یخبندان دیررس بهاره در کشور طی دوره‌های آتی

معادله	دوره زمانی	مدل گردش عمومی جو - مدل ریزمقیاس نمایی	پارامتر
$LSF_Date = -17/7 + 0/0444Z + 6/06Y - 0/172X + \epsilon$	۲۰۱۱-۲۰۴۰	ANN_CGCM3_A2	تاریخ رخداد یخبندان دیررس بهاره
$LSF_Date = -1/0 + 0/0436Z + 5/69Y - 0/284X + \epsilon$	۲۰۴۱-۲۰۷۰	ANN_CGCM3_A2	
$LSF_Date = -4/0 + 0/0426Z + 5/92Y - 0/332X + \epsilon$	۲۰۷۱-۲۱۰۰	ANN_CGCM3_A2	
$LSF_Date = -38/6 + 0/0446Z + 6/25Y + 0/140X + \epsilon$	۲۰۱۱-۲۰۴۰	ANN_CGCM3_A1B	
$LSF_Date = -45/3 + 0/0452Z + 6/21Y - 0/246X + \epsilon$	۲۰۴۱-۲۰۷۰	ANN_CGCM3_A1B	
$LSF_Date = -37/3 + 0/0443Z + 6/20Y + 0/103X + \epsilon$	۲۰۷۱-۲۱۰۰	ANN_CGCM3_A1B	
$LSF_Risk = -106/0 + 0/00659Z + 2/52Y + 0/971X + \epsilon$	۲۰۱۱-۲۰۴۰	ANN_CGCM3_A2	ریسک یخبندان دیررس بهاره
$LSF_Risk = -52/3 + 0/00860Z + 1/67Y + 0/444X + \epsilon$	۲۰۴۱-۲۰۷۰	ANN_CGCM3_A2	
$LSF_Risk = -79/0 + 0/00476Z + 2/33Y + 0/640X + \epsilon$	۲۰۷۱-۲۱۰۰	ANN_CGCM3_A2	
$LSF_Risk = -106/0 + 0/00659Z + 2/52Y - 0/971X + \epsilon$	۲۰۱۱-۲۰۴۰	ANN_CGCM3_A1B	
$LSF_Risk = -58/5 + 0/00509Z + 1/94Y + 0/473X + \epsilon$	۲۰۴۱-۲۰۷۰	ANN_CGCM3_A1B	
$LSF_Risk = -62/1 + 0/00826Z + 1/81Y + 0/531X + \epsilon$	۲۰۷۱-۲۱۰۰	ANN_CGCM3_A1B	

تاریخ یخبندان دیررس بهاره برای آستانه دمایی صفر درجه سانتی‌گراد با تفکیک ۱×۱ کیلومتر در دوره‌های آینده در مقاطع زمانی ۳۰ ساله ترسیم گردید و مساحت

در جدول ۳ معادلات فضایی تاریخ رخداد یخبندان دیررس بهاره در کشور طی دوره‌های آتی منعکس شده است. بر اساس معادلات جدول ۳ نقشه‌های ریسک و

اقلیمی ۲۰۴۱-۲۱۰۰ هیچ پهنه‌ای از کشور وجود نخواهد داشت که تاریخ وقوع آخرین یخبندان سالانه آن بین ۱۰ تا ۳۱ تیر اتفاق بیافتد. پهنه مذکور ۰/۰۴ درصد از مساحت کشور (در حدود ۶۶۰۰۰ کیلومتر مربع) در دوره تاریخی را به خود اختصاص داده است. همچنین در دوره‌های آینده، شاهد افزایش مساحت پهنه‌ای از کشور که به طور میانگین فاقد یخبندان با آستانه صفر درجه سانتی‌گراد هستند خواهیم بود؛ به طوری که پهنه مذکور که ۶/۳ درصد مساحت کشور در دوره تاریخی را به خود اختصاص داده، بر اساس سناریوهای A2 و A1B و طی دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ به ترتیب به ۶/۵ و ۷/۱۳ درصد خواهد رسید. از سویی دیگر، پهنه‌هایی از کشور که تاریخ رخداد پدیده در آن بین ۱۰ آذر تا ۱۰ دی و ۱۰ فروردین تا ۱۰ اردیبهشت اتفاق می‌افتد به ترتیب با بیشترین افزایش (۱/۸۳٪) در دوره حاضر به ۱۳/۶۳٪ بر اساس سناریوی A2 و یا ۱۲/۶۲٪ بر اساس سناریوی A1B و بیشترین کاهش (۲۱/۴۷٪) در دوره حاضر به ۹/۰۷٪ بر اساس سناریوی A2 و یا ۹/۹۷٪ بر اساس سناریوی A1B مواجه خواهند بود.

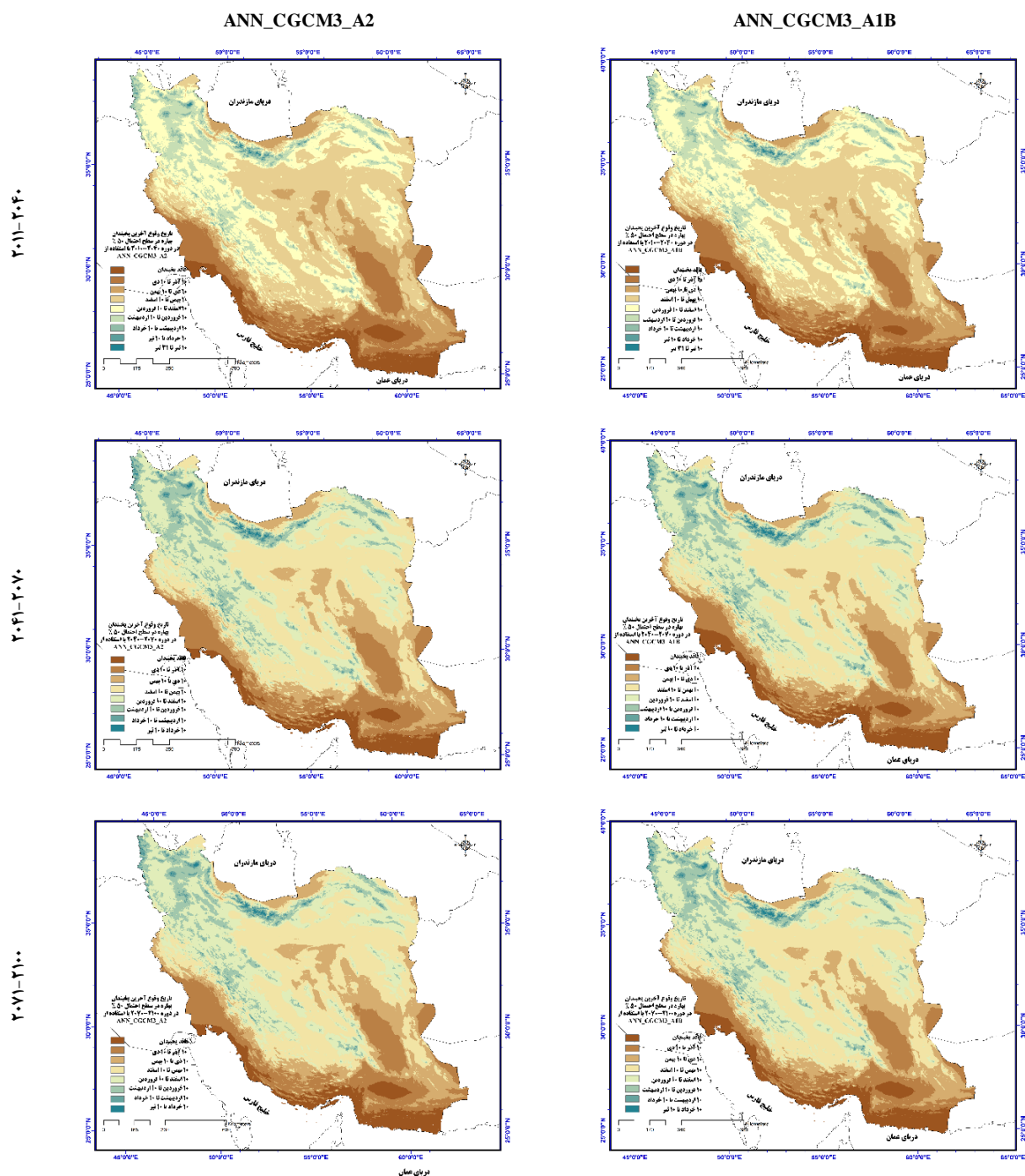
بازه‌های مختلف این تاریخ به دست آمد. سپس اختلافات مساحت‌های تحت پوشش هر بازه در دوره‌های مختلف با دوره مرجع تعیین و به عنوان شاخص کمی ارزیابی تغییر اقلیم ارائه گردید. در شکل ۴ نقشه‌های مربوط به پهنه‌های هم‌تاریخ رخداد آخرین یخبندان بهاره در طی قرن بیست و یکم که در واقع خروجی مدل CGCM3 و ریزمقیاس شده به روش شبکه عصبی مصنوعی هستند تحت دو سناریوی A2 و A1B ترسیم شده است. همچنین در جدول ۴ مساحت‌های تحت پوشش هر یک از این بازه‌ها طی دوره تاریخی (۲۰۱۰-۱۹۶۱) و سه دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱) آمده است. همانطور که پیش‌تر نیز عنوان شد، در دوره اقلیمی حاضر (۲۰۱۰-۱۹۶۱)، پهنه‌هایی که تاریخ رخداد یخبندان دیررس بهاره در آن‌ها بین ۱۰ اسفند تا ۱۰ فروردین و ۱۰ تیر تا ۳۱ تیر اتفاق می‌افتد به ترتیب بیشترین (۳۱/۷۸ درصد) و کمترین (۰/۰۴ درصد) مساحت را در بین پهنه‌های هم‌خطر به خود اختصاص داده‌اند. بر اساس جدول ۴، تاریخ وقوع یخبندان دیررس بهاره با گذشت زمان بر اساس هر دو سناریو زودتر اتفاق خواهد افتاد. به طوری که در دوره

جدول ۴- مساحت تحت پوشش پهنه‌های هم‌تاریخ وقوع آخرین یخبندان دیررس در سده کنونی تحت دو سناریوی مختلف (واحد درصد مساحت کشور)

ANN_CGCM3_A1B			ANN_CGCM3_A2			دوره تاریخی	بازه وقوع آخرین یخبندان دیررس
۲۰۷۱-۲۱۰۰	۲۰۴۱-۲۰۷۰	۲۰۱۱-۲۰۴۰	۲۰۷۱-۲۱۰۰	۲۰۴۱-۲۰۷۰	۲۰۱۱-۲۰۴۰		
۷/۱۳	۷/۰۴	۵/۹۵	۶/۵	۵/۸۱	۶/۶۸	۶/۳	فاقد یخبندان
۱۲/۸۴	۱۲/۳۵	۱۲/۶۹	۱۳/۹۱	۱۳/۷۵	۱۳/۲۴	۱/۸۳	۱۰ آذر تا ۱۰ دی
۱۴/۱۲	۱۳/۶۷	۱۳/۱۵	۱۵/۴۶	۱۴/۸۸	۱۴/۰۵	۱۳/۴۹	۱۰ دی تا ۱۰ بهمن
۳۱	۳۰/۷۳	۳۰/۵۴	۳۱/۲۲	۳۱/۲۴	۳۰/۷۱	۱۹/۸۵	۱۰ بهمن تا ۱۰ اسفند
۲۳/۹۷	۲۴/۲۸	۲۴/۶۱	۲۳/۱	۲۳/۵۴	۲۳/۵۱	۳۱/۷۸	۱۰ اسفند تا ۱۰ فروردین
۹/۱۵	۹/۹	۱۰/۸۶	۸/۳۹	۹/۰۹	۹/۸۵	۲۱/۴۷	۱۰ فروردین تا ۱۰ اردیبهشت
۱/۵۷	۱/۷۵	۱/۹	۱/۳۴	۱/۴۸	۱/۷	۴/۶۵	۱۰ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد
۰/۲۳	۰/۲۸	۰/۲۳	۰/۱۷	۰/۲۱	۰/۲	۰/۵۸	۱۰ خرداد تا ۱۰ تیر
-	-	۰/۰۸	-	-	۰/۰۷	۰/۰۴	۱۰ تیر تا ۳۱ تیر

آمده در دوره‌های آتی نیز کماکان کلاسه D2 (پر خطر ۲) بیشترین پهنه از مساحت کشور را به خود اختصاص خواهد داد. با این حال تغییرات زیادی در کمیت مساحت تحت پوشش هر یک از کلاسه‌ها دیده شد که از این دست می‌توان به کلاسه A (بی خطر) و D3 (بسیار پر خطر) اشاره کرد. در دید کلی مساحت پهنه بسیار پر خطر تحت هر دو سناریوی A2 و A1B کاهش می‌یابد.

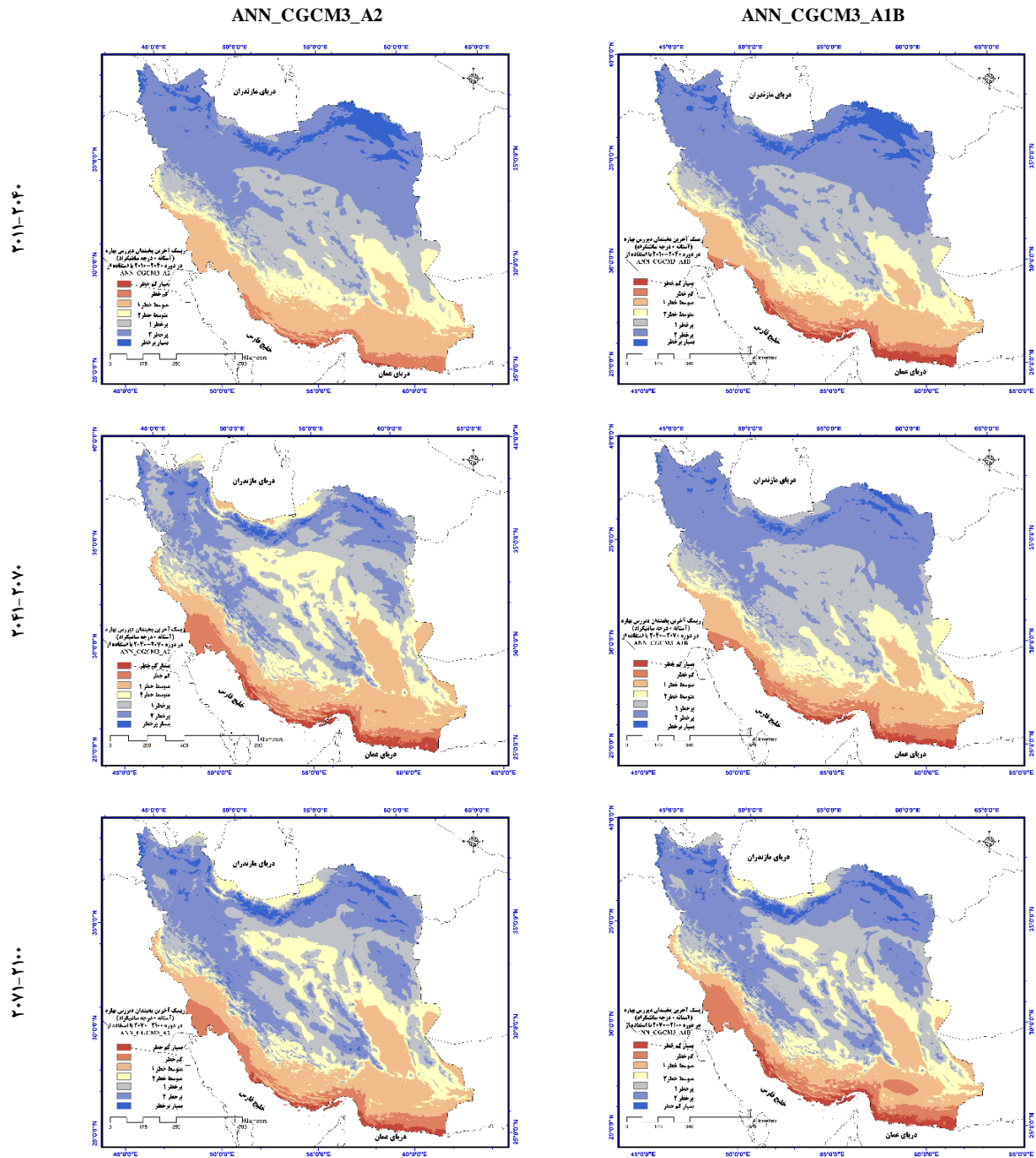
در شکل ۵ نقشه‌های مربوط به پهنه‌های هم‌ریسک رخداد آخرین یخبندان بهاره در طی قرن بیست و یکم تحت دو سناریوی A2 و A1B منعکس شده است. همچنین در جدول ۵ مساحت‌های تحت پوشش هر یک از این پهنه‌های ریسک طی دوره تاریخی (۲۰۱۰-۱۹۶۱) و سه دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱) آورده شده است. بر اساس نتایج به دست



شکل ۴- تاریخ وقوع یخبندان دیررس بهاره در گستره کشور در سده کنونی تحت دو سناریوی A2 و A1B و با استفاده از مدل CGCM3 به روش ریزمقیاس‌نمایی شبکه عصبی مصنوعی

استفاده از مدل CGCM3 تحت هر دو سناریوی A2 و A1B، تأثیرات محتمل تغییرات اقلیمی بر کلاسه‌های ریسک وقوع یخبندان دیررس بهاره را به گونه‌ای شبیه سازی می‌کند که ریسک وقوع این پدیده در آینده کمتر خواهد بود.

همچنین مساحت تحت پوشش کلاسه بی خطر در دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ به ترتیب تحت سناریوهای A2 و A1B ۱/۳ و ۰/۳ درصد افزایش خواهد یافت و در قضاوت نهایی در هر سه دوره این افزایش در سناریوی A1B بیشتر است. در مجموع بایستی این‌طور جمع‌بندی کرد که مدل‌سازی بر پایه مدل ریزمقیاس‌نمایی ANN و با



شکل ۵- ریسک یخبندان دیررس بهاره در گستره کشور در سده کنونی تحت دو سناریوی A2 و A1B و با استفاده از مدل CGCM3 به روش ریزمقیاس نمایی شبکه عصبی مصنوعی

جدول ۵- مساحت تحت پوشش پهنه‌های هم ریسک یخبندان دیررس بهاره در بازه‌های زمانی سی ساله سده بیست و یکم با استفاده از مدل‌ها و سناریوهای مختلف (واحد: % مساحت ایران)

ANN_CGCM3_A1B			ANN_CGCM3_A2			دوره تاریخی	پهنه‌های ریسک یخبندان دیررس بهاره
۲۰۷۱-۲۱۰۰	۲۰۴۱-۲۰۷۰	۲۰۱۱-۲۰۴۰	۲۰۷۱-۲۱۰۰	۲۰۴۱-۲۰۷۰	۲۰۱۱-۲۰۴۰		
۲/۳	۱/۴	۲/۲	۱/۳	۲/۳	۰/۳	۱	بسیار کم خطر (A)
۷/۵	۵/۴	۴	۵/۳	۵/۵	۳/۳	۵/۷	کم خطر (B)
۱۴/۳	۱۵/۱	۱۵/۶	۱۷/۹	۱۸/۹	۱۸/۲	۱۶/۱	متوسط خطر ۱ (C1)
۱۵/۱	۱۳/۴	۱۲/۶	۱۶/۷	۲۰/۱	۱۲/۶	۱۱/۲	متوسط خطر ۲ (C2)
۲۶/۲	۲۸/۴	۲۴/۳	۲۴/۵	۲۸/۹	۲۴/۳	۲۴/۳	پر خطر ۱ (D1)
۳۱/۴	۳۴/۳	۳۶/۲	۳۱/۳	۲۲/۵	۳۶/۲	۳۳/۵	پر خطر ۲ (D2)
۳/۳	۲	۵.۱	۳	۱/۷	۵/۱	۸/۲	بسیار پر خطر (D3)

نتیجه‌گیری

هدف تحقیق حاضر شناخت تأثیرات محتمل پدیده تغییر اقلیم بر تاریخ و ریسک رخداد یخبندان‌های دیررس بهاره تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در گستره ایران بوده و نتایج زیر حاصل شده است:

- روند صعودی معنی‌دار (در سطح ۵ درصد) در سری زمانی میانگین منطقه‌ای دمای کمینه در کشور طی دوره تاریخی ۲۰۱۰-۱۹۶۱ به میزان ۰/۳ درجه سانتی‌گراد در هر دهه تأیید شده است.
- بررسی روند تاریخ‌های یخبندان دیررس بهاره نشان داد که این تاریخ در طی ۵۰ سال گذشته بر اساس تقویم دمایی به سمت عقب آمده و به عبارت دیگر پدیده زودتر اتفاق می‌افتد. همچنین روند نزولی سری شماره روز یخبندان دیررس بهاره به ویژه پس از دهه ۸۰ میلادی قرن حاضر با درجه اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است.
- یخبندان دیررس بهاره با گذشت زمان بر اساس هر دو سناریوی A2 و A1B زودتر اتفاق خواهد افتاد.
- مدل‌سازی ریسک یخبندان دیررس بهاره تحت دو سناریوی A2 و A1B با استفاده از مدل CGCM3 به روش ریزمقیاس‌نمایی شبکه عصبی مصنوعی، کاهش ریسک خسارات ناشی از یخبندان دیررس بهاره در آینده بر اثر پدیده تغییر اقلیم را تأیید می‌کند.

سپاسگزاری

این پژوهش با کمک صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور در دانشگاه تهران انجام شده است که بدینوسیله تشکر می‌شود.

منابع

- ایزدی، م. ۱۳۷۷. تعیین احتمالات آخرین تاریخ‌های وقوع سرماهای بهاره و اولین تاریخ‌های وقوع سرماهای پاییزه بر مبنای حداقل دمای هوا در استان همدان. گزارش نهایی طرح پژوهشی. سازمان هواشناسی کشور.
- بابائیان، ا.، نجفی نیک، ز.، زابل عباسی، ف.، حبیبی نوخندان، م.، ادب، ح.، ملبوسی، ش. ۱۳۸۸. ارزیابی تغییر اقلیم کشور در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ میلادی با

استفاده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHO-G. جغرافیا و توسعه، ۷(۱۶): ۱۵۲-۱۳۵.

براتی، غ. ۱۳۷۵. طراحی و پیش‌بینی الگوهای سینوپتیک یخبندان‌های بهاره ایران، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

خلیلی، ع. ۱۳۹۳. ارزیابی کمی و مدل‌سازی ریسک سرمازدگی بهاره محصولات زراعی و باغی در ایران. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۲(۱): ۳۱-۱۷.

خلیلی، ع.، درویش صفت، ع. ا.، برادران راد، ر.، بذرافشان، ج. ۱۳۸۳. پیشنهاد روش برای پهنه‌بندی اقلیمی در محیط GIS (مطالعه موردی شمال غرب ایران در سیستم سلیانینف). نشریه بیابان، ۹(۲): ۲۳۸-۲۲۷.

خلیلی، ع. ۱۳۸۸. گزارش طرح «پهنه‌بندی اقلیمی ایران از دیدگاه بیمه محصولات کشاورزی در مقابل آسیب‌های خشکسالی، سرماهای زیان‌بخش و بارش‌های سیل‌آسا». امور پژوهش‌های کاربردی دانشگاه تهران و صندوق بیمه محصولات کشاورزی، جلد ۲ و ۷.

رحیمی، ج.، خلیلی، ع.، بذرافشان، ج. ۱۳۹۶. ارزیابی روش‌های مختلف و پیشنهاد یک روش جدید برای بازسازی خلاءهای آماری داده‌های دمای کمینه روزانه در ایستگاه‌های ارتفاعی ایران. نشریه تحقیقات آب و خاک ایران، در نوبت چاپ سال ۱۳۹۶.

سمیعی، م.، عسگری، م.، باستانی، خ. ۱۳۶۷. شروع و خاتمه یخبندان در ایران. سازمان هواشناسی کشور، تهران.

علیزاده، ا.، موسوی بایگی، م.، کمالی، غ. ع. ۱۳۷۳. تاریخ وقوع اولین یخبندان‌های پاییزه و آخرین یخبندان‌های بهاره در خراسان. نشریه نیوار، ۲۴: ۵۶-۳۸.

قربانی، خ.، ولیزاده، ا. ۱۳۹۳. بررسی تاریخ یخبندان‌ها و سرماهای مؤثر در کشاورزی تحت تأثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی: مشهد، تبریز و قزوین). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۱(۴): ۲۱۴-۱۹۷.

کمالی، غ. ع.، حبیبی نوخندان، م. ۱۳۸۴. بررسی توزیع مکانی و زمانی یخبندان در ایران و نقش آن در حمل و نقل جاده‌ای. پژوهش‌نامه حمل و نقل تابستان، ۲(۲): ۱۳۵-۱۲۷.

- statistical downscaling method. *Stoch. Env. Res. Risk Assess.*, 25(6): 781-792.
- Kartschall, T., Wodinski, M., von Bloh, W., Oesterle, H., Rachimow, C., & Hoppmann, D. 2015. Changes in phenology and frost risks of *Vitis vinifera* (cv Riesling). *Meteorologische Zeitschrift*, 189-200.
- Khalili, A., Rahimi, J. 2014. High-resolution spatiotemporal distribution of precipitation in Iran: a comparative study with three global-precipitation datasets. *Theor. Appl. Climatol.*, 118(1-2): 211-221.
- Mahmood, R., Babel, M. S. 2013. Evaluation of SDSM developed by annual and monthly sub-models for downscaling temperature and precipitation in the Jhelum basin, Pakistan and India. *Theor. Appl. Climatol.*, 113(1-2): 27-44.
- Rahimi, J., Ebrahimpour, M., Khalili, A. 2013. Spatial changes of extended De Martonne climatic zones affected by climate change in Iran. *Theor. Appl. Climatol.*, 112(3-4): 409-418.
- Rahimi, M., Hajjam, S., Khalili, A., Kamali, G. A., Stigter, C. J. 2007. Risk analysis of first and last frost occurrences in the Central Alborz Region, Iran. *Int. J. Climatol.*, 27(3): 349-356.
- Rigby, J. R., Porporato, A. 2008. Spring frost risk in a changing climate. *Geophys. Res. Lett.*, 35(12).
- Wilby, R. L., Dawson, C. W., Barrow, E. M. 2002. SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environ. Modell. Softw.*, 17:147-159.
- مجرد قره باغ، ف. ۱۳۷۶. تحلیل و پیش‌بینی یخبندان در آذربایجان، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- مقدّسی، ف. ۱۳۶۱. برآورد احتمالات خطر سرمای بهاره همدان، نشریه شماره ۱۰۰، سازمان هواشناسی کشور.
- Anandhi, A., Zion, M. S., Gowda, P. H., Pierson, D. C., Lounsbury, D., Frei, A. 2013. Past and future changes in frost day indices in Catskill Mountain region of New York. *Hydrol. Process.*, 27(21): 3094-3104.
- Coulibaly, P., Dibike, Y. B., Anctil, F. 2005. Downscaling precipitation and temperature with temporal neural networks. *J. Hydrometeorol.*, 6(4): 483-496.
- Eccel, E., Rea, R., Caffarra, A., Crisci, A. 2009. Risk of spring frost to apple production under future climate scenarios: the role of phenological acclimation. *Int. J. Biometeorol.*, 53(3): 273-286.
- Farajzadeh, M., Rahimi, M., Kamali, G. A., Mavrommatis, T. 2010. Modelling apple tree bud burst time and frost risk in Iran. *Meteorol. Appl.*, 17(1): 45-52.
- Gagnon, S., Singh, B., Rousselle, J., Roy, L. 2005. An application of the statistical downscaling model (SDSM) to simulate climatic data for streamflow modelling in Québec. *Can. Water Resour. J.*, 30 (4): 297-314.
- Huang, J., Zhang, J., Zhang, Z., Xu, C., Wang, B., Yao, J. 2011. Estimation of future precipitation change in the Yangtze River basin by using



Quantitative projection of the probable impacts of climate change on date and damage risk of late spring frost during 21st century over Iran

A. Khalili^{*1}, J. Rahimi², J. Bazrafshan³

Received: 23/04/2012

Accepted: 16/11/2016

Abstract

The late spring frost (LSF), as one of the main climatic disasters, has significant negative impacts on agricultural and horticultural crops production. It is expected that the features of its occurrence will be altered by climate change and global warming. Hence, the present study was performed to quantify these changes under two scenarios of A2 and A1B using CGCM3 general circulation model outputs, downscaled by ANN technique. For this purpose, daily minimum temperature data of 50 weather stations for the period of 1961-2010, representing different climatic regions of Iran, were collected and quality-controlled. Trend analysis of the regional mean of annual minimum temperature showed a significant ($p < 0.05$) increase of 1.3°C per decade during the study period. There was also a significant ($p < 0.05$) decreasing trend of 1.4 days per decade in the average date of the LSF, which was especially marked after 1980s. Besides, the GIS maps of date and risk of LSF (with a threshold of 0°C) were produced with the resolution of 1 × 1 km and the using the data of 50 study stations. by means of error layer technique for the baseline and future periods (total 14 maps). Subsequently, areas of low-, mid-, high- and very high-risk along with the average dates of frost occurrence zones were identified. Finally, changes in coverage area of each climatic zone were examined and compared for three 30-years periods of this century (2010-2100). The area of the regions in which LSF occurs during December to January would significantly increase from 1.83 % in the baseline period to 13.91 % and 12.84% under A2 and A1B scenarios, respectively). The least variation from 21.47 % in the current conditions to 8.29 % under A2 scenario and 9.15 % under A1B scenario) is projected for the areas in which LSF occur during March to April. In general, across the county risk of LSF in the future decades would decrease.

Keywords: Climate change, Late spring frost, Frost risk, ANN, Iran



¹ Professor, Meteorological Division, Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Soil and Water Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran

(*Corresponding author's email address: akhalili@ut.ac.ir)

² Ph. D. Graduate, Meteorological Division, Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran

³ Associate Professor, Meteorological Division, Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Soil and Water Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran