

بررسی تغییرات شروع و خاتمه یخبندان‌ها و سرماهای مؤثر در کشاورزی تحت

شرایط تغییر اقلیم در شمال غرب ایران

ناصر جعفر بگلو^۱، دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

دکتر علی محمد خورشید دوست، استاد اقلیم شناسی، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

دکتر مجید رضایی بنفشه، استاد اقلیم شناسی، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

دکتر داشم رستم زاده، اقلیم شناسی، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۰۵/۱۶

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۳

چکیده

سرما و یخبندان از مهم‌ترین پارامترهای اقلیمی در زمینه کشاورزی می‌باشد که آسیب‌های ناشی از آن‌ها، امکان تولید بسیاری از محصولات کشاورزی و باغی را در مناطق آسیب‌پذیر کاهش می‌دهد. بنابراین بررسی زمان وقوع و پیش‌بینی تغییرات آن‌ها در آینده از اهمیت زیادی برخوردار است. بدین منظور مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) طراحی شده‌اند که می‌توانند پارامترهای اقلیمی را در آینده شبیه‌سازی کنند. لذا در این پژوهش داده‌های خروجی مدل گردش عمومی HadCM3 تحت دو سناریوی انتشار A2 و B1 توسط مدل آماری LARS-WG در ۲۱ ایستگاه سینوپتیک واقع در شمال غرب ایران ریز گردانی شد و نتایج حاصل از آن در دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۸۰) و دهه ۲۰۲۰ (۲۰۳۰-۲۰۱۱) برای دو متغیر اقلیمی دمای کمینه و دمای بیشینه مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس تاریخ وقوع اولین و آخرین یخبندان و سرمای پاییزه و بهاره استخراج و تاریخ وقوع آن‌ها در آینده محاسبه شد. نتایج حاصل نشان داد که با توجه با افزایش دمای کمینه و بیشینه در منطقه، در تمام ایستگاه‌های مطالعاتی نیز تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم اولین یخبندان و سرمای پاییزه دیرتر و آخرین یخبندان و سرمای بهاره نیز زودتر رخ خواهد داد و طول دوره سرما و یخبندان در منطقه نیز کاهش خواهد یافت. از نتایج حاصل از این بررسی می‌توان در مدیریت بخش‌های مختلف کشاورزی استفاده نمود.

واژگان کلیدی: تغییر اقلیم، سرما، یخبندان، LARS-WG.

مقدمه

سرما و یخبندان، یکی از مخاطرات اقلیمی است که همه ساله باعث ایجاد خسارت در فعالیت‌های مختلف می‌گردد. مهم‌ترین بخشی که آسیب جدی و بیشترین خسارت را از یخبندان می‌بیند، بخش کشاورزی است (رضایی، ۱۳۸۹). وقتی که دما به صفر و زیر صفر درجه سانتی‌گراد نزول می‌کند، محصولات حساس، آسیب دیده و میزان تولید کاهش می‌یابد. خسارت یخبندان می‌تواند در هر منطقه‌ای بیرون از مناطق حاره‌ای، رخ بدهد. مقدار خسارت به تحمل و حساسیت محصول در مقابل یخبندان بستگی دارد (F.A.O, 2005). سرمازدگی و یخبندان در مراحل مختلف رویشی برای محصولات کشاورزی و باغی بسیار مهم است. چرا در صورت حادث شدن، منجر به محدودیت تولید می‌شود (علیچانی و هژبر پور، ۱۳۸۶). یک یا چند ساعت یخبندان کافی است که تمام محصول زراعی را از بین برده و امکان جبران آن وجود نداشته باشد (علیزاده، ۱۳۸۹ : ۱۱۹). سرما و یخبندان‌های شدید برای بسیاری از گیاهان زراعی و باغی نتایج زیان‌بار و نابودکننده‌ای را در پی دارد، به طوری که در برخی سال‌ها میلیاردها ریال خسارت به باغداران، زارعین و در نهایت منافع ملی کشور وارد می‌شود (بذرافشان و رحیمی، ۱۳۹۳). آسیب‌های ناشی از پدیده یخبندان، امکان تولید بسیاری از محصولات کشاورزی و باغی را در مناطق آسیب‌پذیر کشور کاهش می‌دهد. سرمازدگی به دلیل خسارت قابل ملاحظه‌ای که به تولیدات کشاورزی وارد می‌آورد، در چارچوب بلایای طبیعی، طبقه‌بندی می‌شود. از نظر فنولوژیکی بالاترین سطح خسارت یخبندان در مراحل نمو جوانه‌های گل در درختان میوه رخ می‌دهد (Rodrigo, 2000). جو، فقط شرایط حرارتی لازم برای نمو گیاه را فراهم نمی‌کند بلکه براساس رخدادهایی مانند یخبندان، خشک‌سالی و طوفان موجب خسارت و نابودی گیاهان می‌شود (Scheifinger et al., 2003). افزایش گازهای گلخانه‌ای در چند دهه اخیر و افزایش دمای ناشی از آن باعث برهم خوردن تعادل سیستم آب و هوایی کره زمین شده و تغییرات آب و هوایی گسترده‌ای را در اغلب نواحی کره زمین موجب شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این پدیده می‌تواند بر بخش‌های مختلف اعم از منابع آب، کشاورزی و محیط‌زیست و غیره اثرات منفی داشته باشد (Legave et al., 2008). جهت کاهش اثرات مخرب پدیده تغییر اقلیم باید به چگونگی تغییرات اقلیم یک منطقه در آینده پی برد. بررسی مطالعات تغییر اقلیم و بررسی روند تغییرات زمانی مراحل فنولوژیکی درختان میوه در شرایط اقلیم آبی جهان، امکان اتخاذ تصمیمات مدیریتی و تکنولوژیکی جدید جهت تطبیق شرایط متفاوت و تعدیل اثرات سوء احتمالی را فراهم می‌سازد. در این راستا، اکسل و همکاران (Eccel et al., 2009) ریسک یخبندان دیررس بهاره بر روی تولید سیب‌درختی تحت شرایط تغییر اقلیم را با استفاده از مدل HadCM3 تحت دو سناریو A2 و B2 در ایتالیا بررسی نمودند نتایج حاصل نشان داد که در اثر افزایش گرمایش جهانی، گلدهی زود هنگام در درختان میوه مناطق معتدله رخ می‌دهد و این شرایط موجب آسیب بیشتر درختان میوه از سرما و یخبندان‌های دیررس بهاره می‌شود. Bennie et al (۲۰۱۰) پیش‌بینی الگوهای توزیع زمانی- مکانی جوانه‌زنی و خطر یخبندان بهاره در شمال غربی اروپا را بررسی نمودند. آن‌ها مشخص نمودند که قرارگیری در معرض خطر یخبندان به آرامی کاهش می‌یابد اما طول فصل رشد به طور قابل ملاحظه‌ای در بیشتر مناطق افزایش خواهد یافت. بنابراین، خطر یخبندان در مناطق عرض‌های بالا به دلیل جوانه‌زنی زود هنگام افزایش می‌یابد. McEwan et al (۲۰۱۱) تغییرات مرحله فنولوژی گلدهی و گرمایش ناشی از تغییر اقلیم را

در جنوب شرقی اوهایو را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که تقریباً حدود ۶۰ درصد گونه‌ها با افزایش دمای هوا گلدهی‌های آن‌ها زودتر رخ می‌دهد. He et al. (۲۰۱۲) تأثیرات تغییر اقلیم بر روی یخبندان‌های ناگهانی در گندم‌زارهای کانادا را در دوره ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۹ بر اساس مدل CGCM3، نسبت به دوره پایه ۱۹۹۰-۱۹۶۱ تحت سناریوهای مختلف بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که دوره بدون یخبندان ناگهانی در دوره آینده نسبت به دوره گذشته، افزایش می‌یابد. Ellwood et al. (۲۰۱۴) زمان گلدهی میوه کران بری تحت تغییر اقلیم در ماساچوست را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که با افزایش ۱ درجه سانتی‌گراد دما در اثر تغییر اقلیم تقریباً زمان گلدهی ۲ روز جلوتر رخ می‌دهد. گرکشک و کانزویچ (Graczyk and Kundzewicz, 2015) در بررسی تغییرات شاخص‌های اقلیم کشاورزی مرتبط با درجه حرارت در لهستان مشخص نمودند که، تاریخ رخداد یخبندان‌های دیررس بهاره، در اثر گرمایش جهانی در آینده تغییر یافته و زمان وقوع آن‌ها جلوتر می‌افتد. Modola et al. (۲۰۱۶) پیش‌بینی تغییر اقلیم برای دشت‌های مرتفع و هموار منطقه نگرزاس را بررسی نمودند و با بررسی مدل‌های مختلف GCM مشخص نمودند که تا ۲۰۷۰ طول فصل بدون یخبندان ۲/۶ تا ۳/۴ هفته طولانی‌تر می‌گردد و همچنین روزهای یخبندان ۱۷/۹ تا ۳۰ درصد، در کل منطقه کاهش می‌یابد. Hidalgo-Galvez et al. (۲۰۱۷) با بررسی رفتار فنولوژیکی گلدهی اولیه چند گونه از درختان خزان‌دار در اسپانیا در واکنش به تغییرات اقلیمی مشخص نمودند که ۵۵ درصد روند افزایش در فنولوژی درختان ناشی از افزایش دمای کمینه بوده است. اسماعیلی و همکاران (۱۳۹۱) پهنه‌بندی وقوع آخرین یخبندان‌های دیررس خراسان رضوی با استفاده از خروجی مدل ECHO-G تحت سناریو A1 برای شناسایی یخبندان‌های سبک و سنگین در دوره آینده تا سال ۱۴۱۸ را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که، خطر یخبندان دیررس بهاره در نواحی جنوبی و پست استان خراسان رضوی در نیمه اول اسفندماه و در مناطق مرتفع تا اواخر فصل بهار طول می‌کشد. خلیلی (۱۳۹۳) ارزیابی کمی و مدل‌سازی ریسک سرمازدگی بهاره محصولات زراعی و باغی در ایران را بررسی نمود و با ارزیابی دماهای کمینه در آستانه‌های دمایی مختلف، احتمال وقوع یخبندان‌های بهاره را پهنه‌بندی و مدل‌سازی نمودند. حسینی و احمدی (۱۳۹۵) به چشم‌انداز تغییرات دمای کمینه و بیشینه با استفاده از مدل HadCM3 تحت سه سناریوی تغییر انتشار و مدل LARS-WG در سقز پرداختند نتایج حاصل نشان داد که دما در تمامی ماه‌های سال در این منطقه افزایش خواهد یافت. آقا شریعتمداری و همکاران (۱۳۹۵) به چشم‌انداز زمان وقوع یخبندان‌های زودرس پاییزه و دیررس بهاره با استفاده از مدل HadCM3 تحت دو سناریوی A2 و B2 در غرب ایران پرداختند نتایج حاصل نشان داد که تاریخ یخبندان پاییزه دیرتر و تاریخ یخبندان بهاره زودتر از گذشته روی می‌دهد. سبحانی و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی تاریخ آغاز و پایان یخبندان‌های زودرس و دیررس در استان اردبیل در دوره آماری ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۰ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در مناطق شمال استان مانند پارس‌آباد تاریخ خاتمه یخبندان دیررس در آوریل و در مرکز و جنوب مانند خلخال در ماه می پایان می‌یابد. خلیلی و همکاران (۱۳۹۶) پیش‌نگری کمی اثرات محتمل تغییر اقلیم بر تاریخ و ریسک خسارت رخداد یخبندان دیررس بهاره طی قرن بیست و یکم در ایران را بررسی نمودند. آن‌ها با استفاده از مدل CGCM3 با سناریوهای انتشار A2 و A1B دوره آینده مشخص نمودند که در دوره آینده ریسک یخبندان دیررس بهاره کمتر خواهد شد. در ایران به دلیل تنوع اقلیمی و اتلاف هزینه‌های ناشی از خسارت‌های قهری و طبیعی باعث می‌گردد که شناخت تاریخ یخبندان و سرما جهت پیشگیری از جایگاه خاصی برخوردار شود و از آنجایی که این پدیده سالانه خسارت زیادی به باغداران وارد می‌شود، می‌توان با مطالعه تاریخ‌های شروع و خاتمه یخبندان و سرما

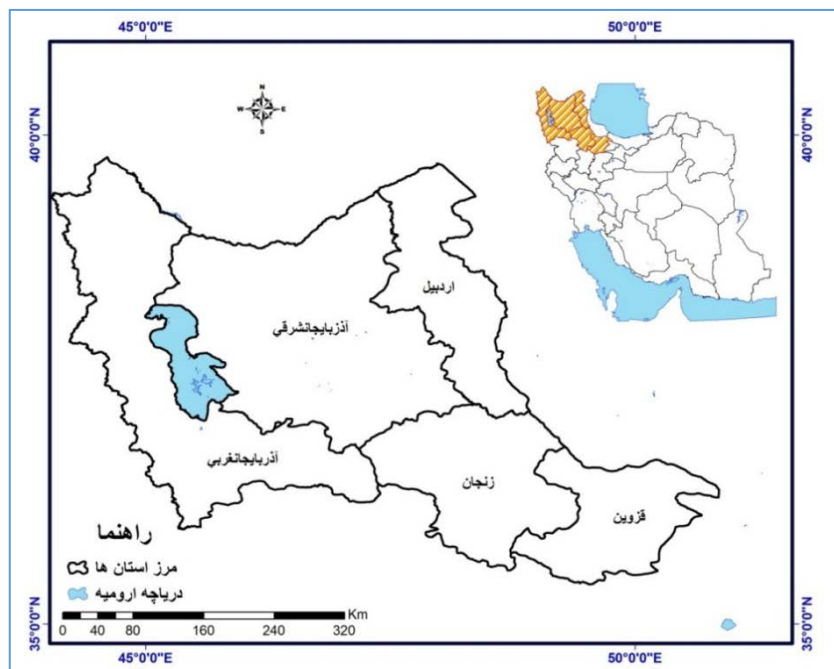
مناسب‌ترین ارقام را برای مقابله مشخص نمود (غربی، ۱۳۹۵: ۴۶). بازگیر و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی مخاطره یخبندان و سرمازدگی محصولات باغی آذربایجان غربی پرداختند. نتایج نشان داد که دماهای بیش از ۴ درجه سلسیوس در آبان، اسفند و فروردین تاثیری در خسارت به محصولات ندارند. خورشید دوست و همکاران (۱۳۹۶) تاثیر عامل های اقلیمی بر برخی ویژگیهای کیفی میوه پرتقال تامسون ناول در استان مازندران پرداختند. نتایج نشان داد که وزن، گوشت و اسیدیته مرکبات تحت تاثیر عوامل اقلیمی قرار دارند.

با توجه به اینکه منطقه شمال غرب ایران هر ساله خسارات مالی زیادی را در اثر رخداد مخاطرات جوی بخصوص سرما و یخبندان متحمل می شود. شنا سایی و پهنه‌بندی فضایی مناطق دارای پتانسیل بالای مخاطره سرما و یخبندان و پیش‌بینی زمان وقوع آن‌ها، می‌تواند اطلاعات مناسب و با ارزشی را در جهت پیشگیری و کاهش خسارات فراهم آورد که در این پژوهش با استفاده مدل جهانی HadCM3 تحت دو سناریوی A2 و B1 و مدل ریزمقیاس گردانی LARS-WG به این امر پرداخته می‌شود.

داده و روش کار

الف: منطقه مورد مطالعه

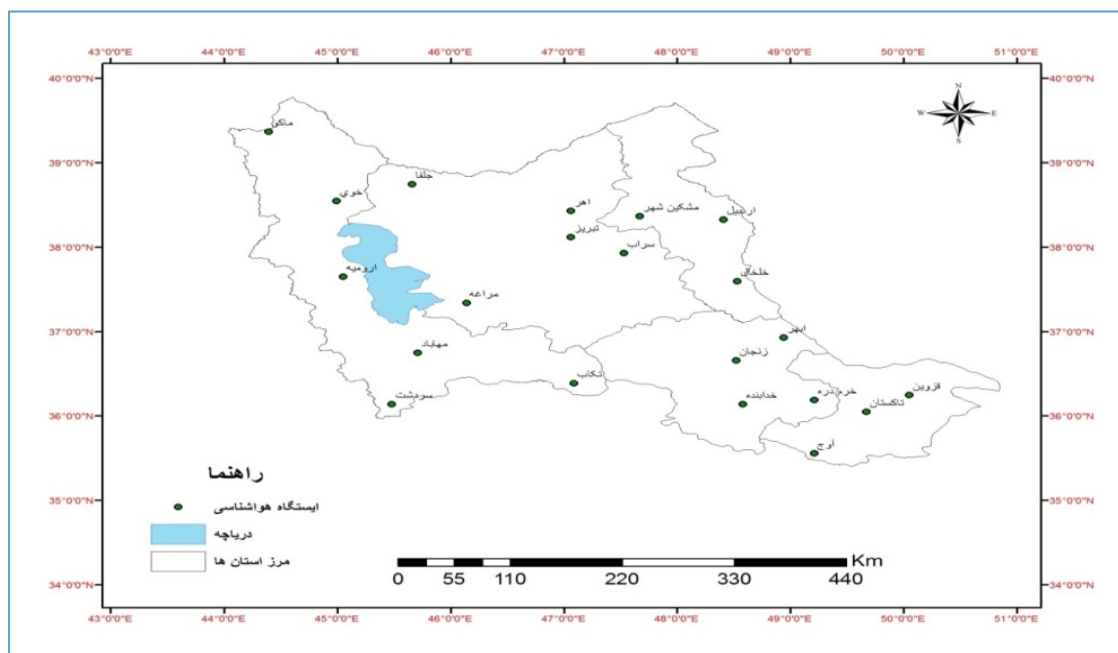
منطقه مورد مطالعه به عنوان منطقه شمال غرب ایران بخش‌های شمال غربی ایران را در بر می‌گیرد. منطقه شمال غرب، استان‌های قزوین، زنجان، آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و اردبیل را شامل می‌شود. منطقه مذکور به عنوان یکی از مناطق متراکم جمعیتی در کشور، ۱۳۸۳۹۳/۸۲ کیلومتر مربع از مساحت کشور را شامل می‌شود. بیشترین مساحت را استان آذربایجان شرقی به خود اختصاص می‌دهد. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) آورده شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی شمال غرب ایران (استان‌های قزوین، زنجان، اردبیل، آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی)

در این تحقیق از آمار و اطلاعات ایستگاههای هواشناسی همدید در منطقه شمال غرب برای دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ استفاده گردید. شکل (۲) موقعیت و پراکنش ایستگاههای منتخب مورد مطالعه را نشان می‌دهد. برای شبیه سازی داده دوره آینده از ریزمقیاس گردانی آماری از طریق مدل‌های مولد هوا استفاده شد. اساساً مولدهای تصادفی هوا برای دو هدف عمده تهیه شده‌اند: (۱) تهیه میانگین‌های سری‌های زمانی داده‌های جوی شبیه‌سازی شده مصنوعی در هر ایستگاه که خصوصیات آماری آنها منطبق بر خصوصیات داده‌های هوای مشاهده شده باشد و به قدر کافی برای استفاده در ارزیابی‌های ریسک در کاربردهای هیدرولوژیکی و کشاورزی طولانی باشند. (۲) تهیه میانگین‌های بلندمدت شبیه‌سازی‌های سری‌های آب و هوایی در نقاط مشاهده نشده از طریق درون‌یابی پارامترهای مولد هوای به دست آمده از اجرای مدل در مکان‌های مجاور به دست می‌آید.

بیان این نکته حائز اهمیت است که مولد تصادفی هوا یک ابزار پیش‌بینی کننده نیست که بتوان از آن در پیش‌بینی هوا استفاده کرد، بلکه یک ابزار برای تولید سری‌های زمانی داده‌های آب و هوای مصنوعی است که مشخصات آماری آن داده‌ها با مشاهدات مشاهده شده یکسان است. در حال حاضر، خروجی مدل‌های جهانی اقلیم (GCM) از نظر تفکیک مکانی وزمانی فاقد کارایی لازم هستند و استفاده از آنها به طور مستقیم در مدل‌های ارزیابی قابل اعتماد نیست. بنابراین، می‌توان از مولد تصادفی هوا به عنوان یک ابزار محاسباتی ارزان برای تولید سناریوهای چندساله تغییر اقلیم در مقیاس زمانی روزانه که تغییرات در میانگین اقلیمی و تغییرپذیری آب و هوا را با همدیگر ترکیب می‌کند، استفاده شود (Semonov et al, 1998).



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی و پراکنش ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

ب: روش کار

ب-۱: مدل ریزمقیاس گردانی LARS-WG

این مدل یک مدل تصادفی با استفاده از توزیع نیمه تجربی برای تولید داده‌های آب و هوایی به وسیله تکنیک‌های ریزمقیاس‌گردانی آماری است (Wilby & Wilks, 1999). که به مراتب از دیگر برنامه‌ها به دلیل تکرار محاسبات، نیاز به داده‌های ورودی کمتر و همچنین سادگی و کارایی دارای کاربرد بیشتری است (Coulibaly & Dibike, 2005). این مدل به عنوان یک مدل ریزمقیاس‌گردانی، در عین پیچیدگی کمتر فرآیند شبیه‌سازی و داده‌های ورودی و خروجی، توانایی بالایی در پیش‌بینی تغییرات اقلیمی دارد (Stratonovitch & Semonov, 2010). اولین نسخه آن در سال ۱۹۹۰ در شهر بوداپست مجارستان ارائه شد. داده‌های ورودی به مدل شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و میزان تابش به صورت روزانه می‌باشد این داده‌ها که از سازمان هواشناسی کشوری اخذ گردید حداقل باید دارای یک دوره زمانی ۳۰ ساله باشند. جهت تولید داده‌های مصنوعی، مدل از داده‌های روزانه بلندمدت مربوط به ایستگاه به صورت ورودی را با یکدیگر مقایسه می‌نماید. در صورت تطابق این دو دسته داده، مدل قادر به تولید سری‌های زمانی مربوط به دوره‌های آینده می‌باشد سپس به منظور صحت‌سنجی و اطمینان از توانمندی مدل، برای دوره آماری پایه رویه QTEST را اجرا نموده تا یک سری داده‌های مصنوعی در دوره پایه مجدداً ایجاد شود. سپس این خروجی‌ها به منظور ارزیابی عملکرد مدل در بازسازی داده‌ها، با مشخصات آماری مشاهداتی ایستگاه به کمک آزمون کلموگروف-اسمیرنوف (K-S)، مقایسه می‌شوند. تطابق مشخصات آماری داده‌های مشاهداتی و داده‌های باز تولیدی، نشان می‌دهد که مدل، می‌تواند سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای انتخابی و خروجی مدل‌های اقلیمی (GCM) را به داده‌های دوره پایه اعمال و تغییرات را شبیه‌سازی می‌کند (آقاشاهی و همکاران، ۱۳۹۱).

این مدل از توزیع‌های نیمه تجربی برای طول سری‌های خشک و تر، ساعات آفتابی و بارش روزانه استفاده می‌کند. توزیع نیمه تجربی به طور کلی از (۱):

$$Emp = \{a, a_i, h_i, i = 1, \dots, 10\} \quad (1)$$

استفاده می‌کند که یک هیستوگرام با فواصل ۱۰ گانه است $[i, a_i]$ ، که در آن $a_{i-1} < a_i$ منظور از h_i تعداد رخدادها (فراوانی) داده‌های مشاهده‌شده در i امین فاصله است. مقادیر تصادفی از توزیع‌های نیمه تجربی نخست از طریق انتخاب یکی از فواصل (با استفاده از نسبت رخدادها در هر فاصله به احتمال منظور شده) و سپس انتخاب یک مقدار که در درون آن فاصله بر اساس توزیع یکنواخت انجام می‌گیرد. چنین توزیعی انعطاف‌پذیر بوده و قادر است شکل‌های متنوع وسیعی را با تعدیل کردن فواصل (i, a_{i-1}, a_i) برآورد کند. فواصل $[i, a_{i-1}, a_i]$ ، بر مبنای خصوصیات مورد انتظار متغیرهای هوا انتخاب شده‌اند. برای تابش خورشید فواصل $[i, a_{i-1}, a_i]$ ، به طور مساوی بین مقادیر کمینه و بیشینه داده‌های واقعی در همراه توزیع می‌شود، در حالی که برای طول سری‌های روزهای خشک و تر و بارش، اندازه فاصله طبقات به تدریج متناسب با افزایش شماره طبقات (i)، افزایش می‌یابد.

ب-۲: مدل جفت شده HadCM3

روش‌های مختلفی برای تولید سناریوهای آب و هوایی وجود دارد، ولی در حال حاضر معتبرترین ابزار برای تولید سناریوهای آب و هوایی، مدل‌های سه بعدی سیاره‌ای جو هستند. این مدل‌ها با هدف شبیه‌سازی فرایندهای اصلی مرتبط با آب و هوا، جو، اقیانوس، سطح زمین، یخ پهنه و زیست کره به صورت جفت شده اجرا شده‌اند (شمسی پور، ۱۳۹۲: ۱۳۶). مدل‌های چرخش عمومی جو (GCM) می‌توانند اطلاعات جامعی در باره پاسخ جو به افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای فراهم کنند. یکی از مدل‌های عمده بررسی تغییر اقلیم مدل HadCM3 می‌باشد (خیر اندیش و

همکاران، ۱۳۹۲: ۱۴۳). مدل HadCM3 نوعی ابزار پیچیده آب و هوایی برای شبیه سازی آب و هوای جهانی است. بنیان این مدل بر انتقالات فیزیکی، ماده و انرژی است. داده‌های مدل در شبکه‌ای ۲/۵ درجه عرض جغرافیایی در ۳/۷۵ درجه طول جغرافیایی با مقیاسی از ۲۶۵ تا ۳۰۰ کیلومتری تولید می‌شود (شمسی پور، ۱۳۹۲: ۱۴۷). در این پژوهش از آمار دمای کمینه و بیشینه ایستگاه‌های سینوپتیک در دوره (۲۰۱۰-۱۹۸۰) و مدل جفت شده جوی- اقیانوسی HadCM3 تحت سناریوی A2 و B1 در دوره زمانی (۲۰۱۱-۲۰۳۰) استفاده شده است که مشخصات این مدل در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات مدل جفت شده جوی- اقیانوسی HadCM3

مرجع	سناریوهای شبیه‌سازی شده SRES	طول دوره شبیه‌سازی (سال)	دوره شبیه‌سازی گازهای گلخانه‌ای و ذرات معلق در گذشته	دقت مکانی OGCM (درجه) (طول×عرض)	دقت مکانی AGCM (درجه) (طول×عرض)	
Gorden <i>et al</i> , 2000	A1, A2, B1, B2	دوره کنترل: ۲۴۰ سناریوهای SRES: ۱۹۵۰-۲۰۹۹	CO ₂ : ۱۸۶۰-۱۹۸۹ SO ₄ : ۱۸۶۰-۱۹۸۹	۲/۵×۳/۷۵	۲/۵×۳/۷۵	HadCM3

ب-۳: تعریف یخبندان و سرما

یخبندان به شرایطی اطلاق می‌شود که در آن دمای سطح زمین و اشیائی که در مجاورت با آن هستند به کمتر از صفر درجه سلسیوس برسد (بذر افشان و رحیمی، ۱۳۹۳: ۶۷). در هواشناسی کشاورزی، یخبندان به وقوع دماهای پایین در حدی که منجر به خسارت به بافت‌های گیاهی شود اطلاق می‌شود (میان‌آبادی و همکاران، ۱۳۸۸: ۷۷). واژه یخبندان عبارت است از هر دمای حداقل معادل یا زیر صفر درجه یا هر آستانه بحرانی مورد نظر دیگر (مانند ۲- درجه سانتی‌گراد و یا حتی دمای بالای صفر) که فعالیت زیستی را متوقف یا مختل کند. واژه Frost که در زبان هسرو یا یخبندان و همچنین سرما و یخبندان معادل‌یابی شده است. در هواشناسی کشاورزی به رویداد افت دمای محیط به پایین تر از آستانه دمایی تحمل گیاه که موجب آسیب به آن شود اطلاق می‌گردد. پدیده سرمازدگی گیاهان به دو صورت، یکی در دمای بالاتر از صفر درجه سانتی‌گراد (Chilling) که در برخی از مراحل فنولوژی، گیاه به آن حساس است و دیگری در دمای کمتر از صفر درجه (Freezing) که باعث تغییرات فیزیولوژیکی در گیاه می‌گردد قابل تفکیک است. برای سرما و یخبندان تعاریف مختلفی ارائه شده ولی در بسیاری از محاورات متعارف کشاورزی و حتی محفل علمی واژه Frost، معادل سرما و یخبندان و یا هر دو، با جایگزینی یکسان مورد استفاده قرار می‌گیرد (خلیلی، ۱۳۹۳: ۱۷).

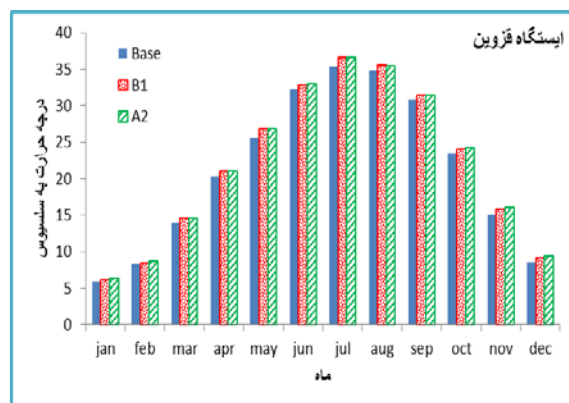
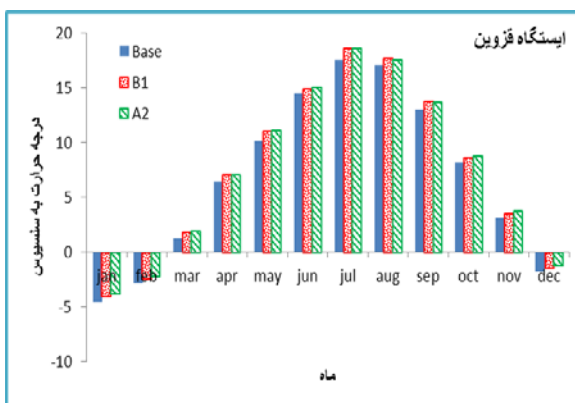
ب-۴: تعیین تاریخ شروع، پایان و طول دوره یخبندان و سرما

جهت تعیین تاریخ شروع، پایان و طول دوره یخبندان و سرما در منطقه مورد مطالعه داده‌های مورد بررسی به دو دوره آماری پایه (۲۰۱۰-۱۹۸۰) و دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۱۱) که داده‌های تولید شده توسط مدل LARS-WG تقسیم شدند و سری زمانی دماهای کمینه برای هر یک از روزهای سال طی هر دوره برای هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه تشکیل شد. برای تبدیل تاریخ به عدد از ابتدای مهرماه شماره مسلسل روزها به‌عنوان شماره روز در نظر گرفته شد. بر

اساس توصیه سازمان هواشناسی جهانی (۲۰۱۰) دماهای صفر درجه و پایین‌تر به عنوان روزهای یخبندان و آستانه‌های دمایی ۱/۱ تا ۳/۳ به عنوان روزهای سرمای تعیین و در هر سال شماره اولین و آخرین روزهایی که دمای کمینه آنها کمتر از این آستانه‌ها بودند استخراج شدند. همچنین در هر سال فاصله بین شماره اولین و آخرین روزهایی که دما از این آستانه‌ها پایین بودند به عنوان طول دوره یخبندان و سرما به حساب آمد. (قربانی و ولیزاده، ۱۳۹۳: ۲۰۳). روش استخراج تاریخ‌ها به این ترتیب بود که از اول ماه مهر شروع به کنترل دمای کمینه گردید و اولین روزی که دمای کمینه آستانه مورد نظر و یا کمتر از آن بود، به عنوان زمان آغاز یخبندان و سرما در نظر گرفته شد. برای استخراج آخرین روز سرما و یخبندان بهار نیز به همین شیوه عمل شد.

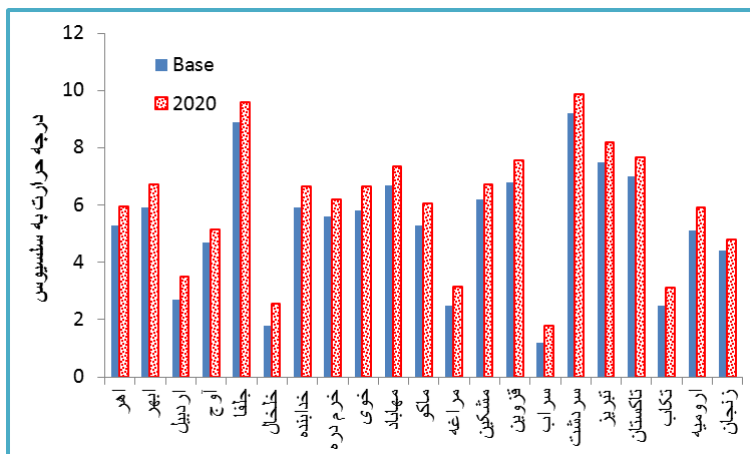
شرح و تفسیر نتایج

در این بررسی جهت تعیین زمان شروع و پایان یخبندان و سرما در دوره‌های آتی ابتدا وضعیت تغییرات دما با استفاده از مدل HadCM3 با کاربست مدل ریزمقیاس گردانی LARS-WG بررسی شد. بدین منظور جهت کالیبره کردن و اطمینان از صحت مدل ریزمقیاس گردانی LARS-WG، ابتدا مدل برای دوره آماری پایه (۲۰۱۰-۱۹۸۰) اجرا گردید؛ سپس خروجی‌های مدل با داده‌های مشاهداتی (۲۰۱۰-۱۹۸۰) ایستگاه‌های مورد مطالعه مقایسه گردید. که نتایج ارزیابی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در منطقه مورد مطالعه بیانگر آن است که اختلاف معنی‌داری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر مشاهداتی آنها با خطای بحرانی ۰/۰۵ وجود ندارد و مقادیر همبستگی پیرسون بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ قابل قبول می‌باشند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که دقت مدل در ایستگاه‌های مورد بررسی و پارامترهای مختلف متفاوت است و مدل در شبیه‌سازی دمای حداقل نسبت به دمای حداکثر موفق‌تر عمل نموده‌اند. و مدل از عملکرد مناسبی برخوردار است. پس از ارزیابی مدل LARS-WG و اطمینان از مناسب بودن آن، به بررسی داده‌های پیش‌بینی شده به وسیله مدل برای دو سناریوی A2 و B1 با استفاده از مدل HadCM3 پرداخته شد. بررسی میانگین ماهانه دمای حداقل ایستگاه‌های مورد مطالعه در دهه ۲۰۲۰ و دوره پایه نشان می‌دهد که میزان دما بر اساس هر دو سناریوی مورد بررسی و در همه ماه‌ها و در بیشتر ایستگاه‌های مطالعاتی نسبت به دوره پایه افزایش یافته است. بررسی میانگین ماهانه دمای حداکثر نیز نشان می‌دهد که میزان دمای حداکثر بر اساس هر دو سناریوی مورد بررسی و در همه ماه‌های سال و همه ایستگاه‌های مورد مطالعه نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت که به علت زیاد بودن تعداد نمودارها و ایستگاه‌های مطالعاتی فقط نتایج مربوط به ایستگاه قزوین در شکل (۳) آورده شده است.



شکل ۳- وضعیت تغییرات ماهانه دمای بیشینه (سمت راست) و دماهای کمینه (سمت چپ) در دهه ۲۰۲۰ نسبت به دوره پایه

بیشترین تغییرات دمای کمینه در منطقه مورد مطالعه بر اساس متوسط سناریوهای مورد بررسی در این دهه مربوط به ایستگاه‌های ابهر، اردبیل، خوی و ارومیه به میزان ۰/۸ درجه سلسیوس می‌باشد؛ در واقع دماهای کمینه‌ای که در این ایستگاه‌ها در دوره پایه اتفاق افتاده است در دوره آینده مشاهده نشده و روند گرمایشی از خود نشان داده است که میزان آن در دوره آتی در سطح منطقه مورد مطالعه در دهه ۲۰۲۰ بین ۰/۴ تا ۰/۸ نسبت به دوره پایه خواهد بود (شکل ۴).



شکل ۴- مقایسه دماهای کمینه در دهه ۲۰۲۰ نسبت به دوره پایه در سطح ایستگاه‌های مورد بررسی

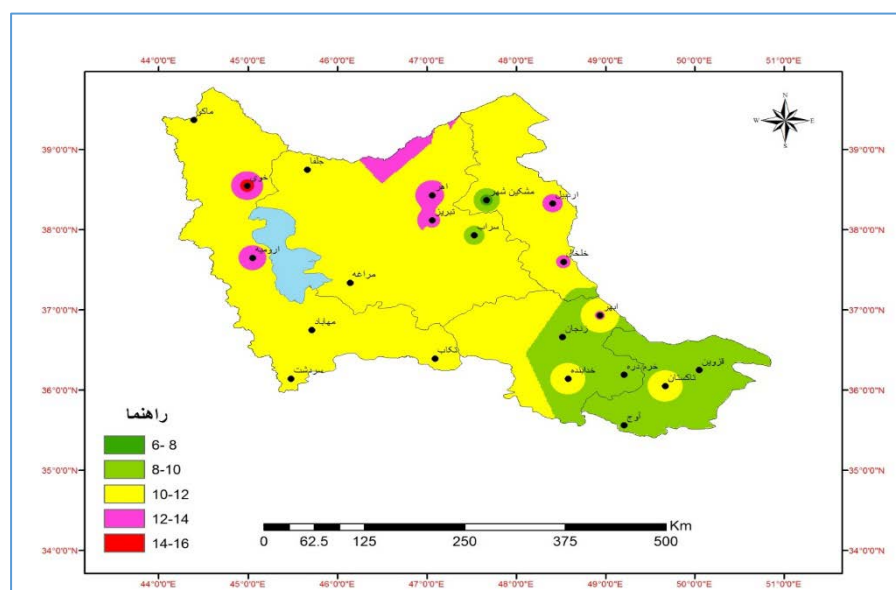
جهت بررسی تغییرات تاریخ آغاز و خاتمه سرما و یخبندان در منطقه مورد مطالعه از داده‌های دمای کمینه به صورت روزانه و متوسط دو سناریوی A2 و B1 مدل جفت شده جوی- اقیانوسی HadCM3 در دوره (۲۰۱۱-۲۰۳۰) استفاده شد. نتایج حاصل از بررسی اولین و آخرین یخبندان در دهه ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که در سطح منطقه مورد مطالعه اولین یخبندان زودرس پاییزه بین ۲ تا ۹ روز دیرتر اتفاق می‌افتد که کمترین تغییرات در تاریخ شروع یخبندان‌ها نیز مربوط به دو ایستگاه قزوین و مشکین‌شهر هر کدام با ۲ روز تغییر نسبت به دوره پایه می‌باشد. آخرین یخبندان دیررس بهار نیز بین ۳ تا ۱۰ روز زودتر در سطح منطقه به پایان می‌رسد که با این وصف طول دوره یخبندان‌ها در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه کاهش خواهد که یافت که بیشترین کاهش مربوط به ایستگاه خوی با ۱۶ روز و سپس ایستگاه‌های ارومیه و اردبیل هر دو با ۱۴ روز و کمترین کاهش مربوط به ایستگاه مشکین‌شهر به ۶ روز می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل تغییرات در تاریخ شروع یخبندان‌های زودرس کمتر از تغییرات نسبت به یخبندان‌های دیررس می‌باشد (جدول ۲).

جدول ۲- تاریخ رخداد اولین و آخرین یخبندان در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه و دهه ۲۰۲۰

ایستگاه	دوره مشاهداتی		دوره آتی	
	اولین یخبندان	آخرین یخبندان	اولین یخبندان	آخرین یخبندان
آهر	۱۱ آبان	۲۵ فروردین	۱۸ آبان	۱۸ فروردین
ابهر	۱ آبان	۶ فروردین	۱۰ آبان	۱ فروردین
اردبیل	۱۱ مهر	۱۵ اردیبهشت	۱۹ مهر	۸ اردیبهشت

۱۵۴	۲۵ فروردین	۲۰ آبان	۱۶۲	۲۸ فروردین	۱۵ آبان	آوج
۱۳۷	۳ فروردین	۱۵ آبان	۱۴۸	۹ فروردین	۱۰ آبان	جلفا
۲۱۳	۱۸ اردیبهشت	۱۵ مهر	۲۲۶	۲۵ اردیبهشت	۹ مهر	خلخال
۱۳۰	۱ فروردین	۲۰ آبان	۱۴۱	۵ فروردین	۱۳ آبان	خدابنده
۱۲۷	۲۸ اسفند	۲۱ آبان	۱۳۷	۳ فروردین	۱۵ آبان	خرم دره
۱۳۸	۱۱ فروردین	۲۲ آبان	۱۵۴	۲۰ فروردین	۱۵ آبان	خوی
۱۳۷	۹ فروردین	۲۱ آبان	۱۴۹	۱۵ فروردین	۱۵ آبان	مهاباد
۱۶۲	۲۳ فروردین	۱۰ آبان	۱۷۴	۳۰ فروردین	۵ آبان	ماکو
۱۴۳	۱۴ فروردین	۲۰ آبان	۱۵۴	۲۰ فروردین	۱۵ آبان	مراغه
۲۰۳	۱۰ اردیبهشت	۱۷ مهر	۲۰۹	۱۴ اردیبهشت	۱۵ مهر	مشکین شهر
۱۱۵	۲۷ اسفند	۳ آذر	۱۲۳	۵ فروردین	۱ آذر	قزوین
۲۰۸	۸ اردیبهشت	۱۰ مهر	۲۱۶	۱۳ اردیبهشت	۷ مهر	سراب
۹۲	۲۰ اسفند	۱۸ آذر	۱۰۴	۲۵ اسفند	۱۱ آذر	سردشت
۱۴۴	۱۰ فروردین	۱۵ آبان	۱۵۷	۱۸ فروردین	۱۰ آبان	تبریز
۱۰۹	۱ فروردین	۱۱ آذر	۱۲۰	۷ فروردین	۶ آذر	تاکستان
۱۷۴	۱۸ فروردین	۲۳ مهر	۱۸۴	۲۵ فروردین	۲۰ مهر	تکاب
۱۳۸	۱۲ فروردین	۲۳ آبان	۱۵۲	۲۰ فروردین	۱۷ آبان	ارومیه
۱۷۱	۲۰ فروردین	۲۸ مهر	۱۷۹	۲۵ فروردین	۲۵ مهر	زنجان

جهت نمایش بهتر، و وضعیت تغییرات طول دوره یخبندان در سطح منطقه مورد مطالعه پهنه‌بندی گردید همان‌طور که مشاهده می‌شود کمترین تغییرات مربوط به جنوب شرق منطقه مورد مطالعه و مناطق مشکین شهر و سراب و بیشترین تغییرات طول دوره یخبندان مربوط به مناطق خوی، ارومیه، تبریز و اهر می‌باشد با توجه به نتایج حاصل بیشتر مناطق مورد مطالعه به‌طور متوسط بین ۱۰ تا ۱۲ روز کاهش در طول دوره یخبندان را نسبت به دوره پایه تجربه خواهند کرد (شکل ۵).



شکل ۵- تغییرات طول دوره یخبندان در دهه ۲۰۲۰ نسبت به دوره پایه برحسب روز در سطح منطقه مورد مطالعه

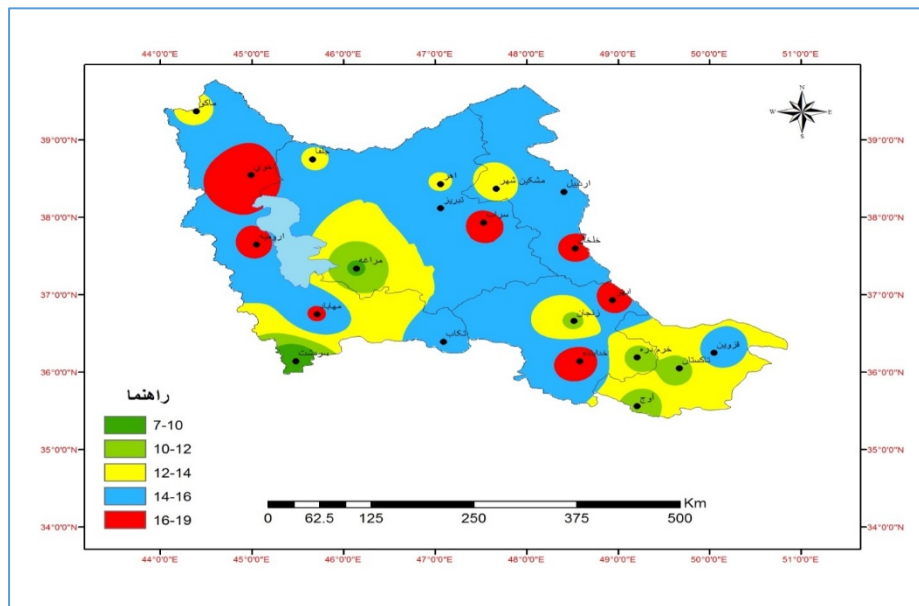
نتایج حاصل از بررسی سرماهای دوره پایه و دوره آبی در دهه ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که با توجه به افزایش دما بر اساس خروجی مدل‌های مورد بررسی اولین سرمای زودرس در سطح منطقه بین ۳ تا ۹ روز دیرتر اتفاق می‌افتد که بیشترین تغییرات در این زمینه مربوط به ایستگاه خدابنده با ۸ روز و کمترین تغییرات مربوط به ایستگاه تاکستان با ۳ روز و سپس ایستگاه‌های سردشت و زنجان با ۴ روز و ایستگاه مشکین‌شهر با ۵ روز می‌باشد. همچنین آخرین سرمای دیررس نیز در سطح منطقه بین ۴ تا ۱۰ روز زودتر به پایان می‌رسد در این رابطه نیز کمترین تغییرات مربوط به ایستگاه سردشت با ۴ روز و بیشترین تغییرات مربوط به ایستگاه‌های خدابنده، خوی، مهاباد، سراب، تکاب و ارومیه هر کدام با ۱۰ روز و سپس اردبیل و مشکین‌شهر با ۹ روز اختلاف نسبت به دوره پایه می‌باشد. بر این اساس طول دوره سرما نیز در سطح منطقه کاهش پیدا خواهد کرد که این کاهش بین ۷ تا ۱۹ روز نسبت به دوره پایه خواهد بود (جدول ۳).

جدول ۳- تاریخ رخداد اولین و آخرین سرما در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه و دهه

۲۰۲۰

ایستگاه	دوره مشاهداتی			دوره آبی		
	اولین سرمای زودرس	آخرین سرمای دیررس	طول دوره سرما	اولین سرمای زودرس	آخرین سرمای دیررس	طول دوره سرما
اهر	۳۱ شهریور	۱۵ اردیبهشت	۲۲۵	۷ مهر	۸ اردیبهشت	۲۱۱
ابهر	۷ مهر	۱ اردیبهشت	۲۰۴	۱۸ مهر	۲۵ فروردین	۱۸۶
اردبیل	۵ مهر	۱۰ خرداد	۲۴۶	۱۲ مهر	۱ خرداد	۲۳۰
آوج	۱۵ مهر	۲۰ اردیبهشت	۲۱۵	۲۱ مهر	۱۵ اردیبهشت	۲۰۴
جلفا	۱۱ مهر	۱ اردیبهشت	۲۰۰	۱۸ مهر	۲۵ فروردین	۱۸۶
خلخال	۵ مهر	۵ تیر	۲۷۲	۱۲ مهر	۲۶ خرداد	۲۵۵
خدابنده	۲۰ آبان	۲۰ فروردین	۱۴۹	۲۹ آبان	۱۰ فروردین	۱۳۰
خرم‌دره	۲۵ آبان	۲۰ فروردین	۱۴۴	۱ آذر	۱۵ فروردین	۱۳۳
خوی	۶ مهر	۱۱ اردیبهشت	۲۱۵	۱۵ مهر	۱ اردیبهشت	۱۹۶
مهاباد	۵ آبان	۳۰ اردیبهشت	۲۰۵	۱۲ آبان	۲۰ اردیبهشت	۱۸۸
ماکو	۵ مهر	۱۵ اردیبهشت	۲۲۰	۱۲ مهر	۸ اردیبهشت	۲۰۶
مراغه	۶ مهر	۱۰ اردیبهشت	۲۱۴	۱۲ مهر	۷ اردیبهشت	۲۰۵
مشکین‌شهر	۵ مهر	۸ خرداد	۲۴۴	۱۰ مهر	۳۱ اردیبهشت	۲۳۱
قزوین	۲۵ مهر	۱ اردیبهشت	۱۸۶	۴ آبان	۲۶ فروردین	۱۷۱
سراب	۶ شهریور	۱۰ خرداد	۲۷۶	۱۴ شهریور	۳۱ اردیبهشت	۲۵۸
سردشت	۱ آذر	۲ فروردین	۱۲۰	۵ آذر	۲۸ اسفند	۱۱۳
تبریز	۱۱ مهر	۱۳ اردیبهشت	۲۱۲	۱۷ مهر	۴ اردیبهشت	۱۹۷
تاکستان	۲۷ مهر	۲ اردیبهشت	۱۸۵	۳۰ مهر	۲۵ فروردین	۱۷۴
تکاب	۳۱ شهریور	۱۵ اردیبهشت	۲۲۵	۵ مهر	۵ اردیبهشت	۲۱۰
ارومیه	۱۰ مهر	۱۳ اردیبهشت	۲۱۳	۱۷ مهر	۳ اردیبهشت	۱۹۶
زنجان	۷ مهر	۱۵ اردیبهشت	۲۱۸	۱۱ مهر	۸ اردیبهشت	۲۰۷

نتایج حاصل از پهنه‌بندی طول دوره سرما در سطح منطقه نشان می‌دهد که کمترین تغییرات مربوط به جنوب و جنوب شرق منطقه مورد مطالعه در محدوده شهرستان‌های سردشت، مراغه، تاکستان، آوج و خرمدره و بیشترین تغییرات طول دوره سرما مربوط به آذربایجان غربی در محدوده شهرستان‌های خوی، ارومیه، مهاباد و برخی مناطق در شرق منطقه مورد مطالعه می‌باشد با توجه به نتایج حاصل می‌توان اظهار داشت که بیشتر مناطق مورد مطالعه به‌طور متوسط بین ۱۲ تا ۱۶ روز کاهش نسبت به دوره پایه را خواهند داشت (شکل ۶).



شکل ۶- تغییرات طول دوره سرما در دهه ۲۰۲۰ نسبت به دوره پایه برحسب روز در سطح منطقه مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

در این پژوهش که به بررسی وضعیت سرماها و یخبندانها در ۲۱ ایستگاه هواشناسی در شمال غرب کشور تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم پرداخته شده است بدین منظور ابتدا وضعیت تغییر اقلیم در ایستگاه‌های مطالعاتی با استفاده از مدل جهانی HadCM3 تحت دو سناریوی A2 و B1 با کاربست مدل ریزمقیاس گردانی LARS-WG مورد بررسی قرار گرفت. پس از این که مدل برای دوره پایه (۱۹۸۰-۲۰۱۰) ارزیابی شد و صحت و دقت مدل تعیین شد، به بررسی تغییرات دمای کمینه و بیشینه در دوره آینده (۲۰۱۱-۲۰۳۰) پرداخته شد که نتایج حاصل نشان از افزایش در میانگین ماهانه حداقل و حداکثر دمای روزانه در دوره آتی تا حدود ۰/۸ درجه سانتیگراد دارد. بر این اساس بررسی وضعیت یخبندانها و سرماها نیز در بیشتر ایستگاه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که اولین سرما و یخبندانهای پاییزه در دوره آتی دیرتر از قبل آغاز شده و سرما و یخبندانهای بهاره نیز زودتر به پایان می‌رسند. همچنین طول دوره سرما و یخبندان نیز کاهش می‌یابد، که این می‌تواند بیانگر پیامد تغییر اقلیم در ایستگاه‌های مطالعاتی است. در واقع بر اساس سناریوی‌های A2 و B1 زمان رخداد اولین یخبندانهای زودرس پاییزه بین ۲ تا ۹ روز دیرتر اتفاق می‌افتد. براساس سناریوی‌های A2 و B1 آخرین یخبندان دیررس بهاره نیز بین ۳ تا ۱۰ روز زودتر در سطح منطقه به پایان می‌رسد که با این وصف طول دوره یخبندانها در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه کاهش خواهد که یافت. بر اساس سناریو A2 و

B1 بیشترین تغییرات دمای کمینه براساس سناریوهای مورد مطالعه در منطقه مورد مطالعه بر اساس متوسط سناریوهای مورد بررسی در این دهه مربوط به ایستگاه‌های ابهر، اردبیل، خوی و ارومیه به میزان ۰/۸ درجه سلسیوس می‌باشد.

نتایج حاصل از این پژوهش با مطالعات گرازیک و کودویلیچ (۲۰۱۵) در لهستان، مدالا و همکاران (۲۰۱۶) در تگزاس، حسینی و احمدی (۱۳۹۵) در سقز، آقا شریعتمداری و همکاران (۱۳۹۵) در غرب ایران، سبحانی و همکاران (۱۳۹۶) در اردبیل و خلیلی و همکاران (۱۳۹۶) در ایران مطابقت دارد. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش در منطقه مورد مطالعه میزان دماهای بیشینه افزایش پیدا خواهد کرد که این امر می‌تواند باعث، افزایش تبخیر و در نتیجه کاهش ذخایر آب و افزایش نیاز آبی گیاهان، کاهش بارش‌های برفی، گسترش آفات و بیماری، خشک سالی و غیره در منطقه گردد. همچنین با افزایش میانگین دمای کمینه، عملکرد برخی محصولات که در دوره رشد و محصول دهی نیاز به سرما دارند، کاهش می‌یابد. بنابراین لازم مسئولان و برنامه‌ریزان در بخش‌های مختلف کشاورزی، منابع طبیعی و غیره راهکارهای لازم برای شرایط آب و هوایی جدید را اتخاذ نمایند.

منابع

- اسماعیلی، رضا؛ حامد ادب و امیر گندمکار. ۱۳۸۹. ارزیابی تغییرات یخبندان‌های دیرهنگام خراسان رضوی در دوره اقلیمی آینده. چهارمین کنگره بین المللی جغرافیدانان جهان اسلام، ایران، - زاهدان: ۲۷-۲۵ فروردین.
- آقا شاهی، محسن؛ مجتبی اردستانی، محمدحسین نیک سخن و بهشته طهماسبی. ۱۳۹۱. معرفی و مقایسه مدل‌های LARS-WG و SDSM به منظور ریزمقیاس سازی پارامترهای زیست‌محیطی در مطالعات تغییر اقلیم. ششمین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط‌زیست، تهران.
- آقا شریعتمداری، زهرا؛ جواد بذرافشان و سیده الهه صفایی. ۱۳۹۵. چشم انداز زمان وقوع یخبندان‌های زودرس پاییزه و دیررس بهار تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از مدل SDSM در چند ایستگاه منتخب در نیمه غربی ایران. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۴ (۱): ۳۱-۲۲.
- بذرافشان، جواد و جابر رحیمی. ۱۳۹۳. تحلیل و پهنه بندی ریسک وقوع یخبندان و سرماهای تشعشعی، جبهه‌ای و مختلط در گستره ایران. نشریه هواشناسی کشاورزی، جلد ۲ (۱): ۷۹-۶۷.
- شمسی پور، علی اکبر. ۱۳۹۲. مدل سازی آب و هوایی، نظریه و روش، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول، تهران.
- حسینی، سید اسعد و حمزه احمدی. ۱۳۹۵. چشم انداز تغییرات دما با استفاده از ریزمقیاس نمایی آماری خروجی‌های مدل HadCM3. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۴ (۱): ۷۳-۶۸.
- خیر اندیش، مر ضیه؛ نوذر قهرمان و جواد بذرافشان. ۱۳۹۲. بررسی تاثیرات تغییر اقلیم بر طول فصل رشد در چشم انداز ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ در چند نمونه اقلیمی ایران. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۴ (۲): ۱۵۰-۱۴۳.
- خلیلی، علی؛ جابر رحیمی و جواد بذرافشان. ۱۳۹۶. پیش‌نگری کمی اثرات محتمل تغییر اقلیم بر تاریخ و ریسک رخداد یخبندان دیررس بهار طی قرن بیست و یکم در ایران. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۲: ۴۸ - ۳۸.
- خورشید دوست، علی محمد؛ فریبرز زارع نهندی و اعظم خلیلی. ۱۳۹۶. تاثیر عامل‌های اقلیمی بر برخی ویژگی‌های کیفی میوه پرتقال تامسون ناول در استان مازندران. علوم باغبانی ایران، ۴۸ (۱): ۴۷-۳۹.

خلیلی، علی. ۱۳۹۳. ارزیابی کمی و مدلسازی ریسک سرما زدگی بهاره محصولات زراعی و باغی در ایران. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۱: ۳۱-۱۷.

رضایی، سمینه. ۱۳۸۹. تحلیل سینوپتیکی یخبندان‌های پاییزه و بهاره استان‌های آذربایجان شرقی و غربی. پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما، سعید جهانبخش، گروه آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه تبریز. سبحانی، بهروز؛ مسعود گنجی و اکبر گل دوست. ۱۳۹۶. تعیین و بررسی تاریخ‌های آغاز و پایان یخبندان‌های زودرس و دیررس و احتمال تداوم، شدت و تواتر آن در استان اردبیل در دوره آماری ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۰. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، ۴۹ (۱): ۵۳-۳۹.

علیچانی، بهلول و قاسم هژبریور. ۱۳۸۶. تحلیل هم‌دید یخبندان‌های استان اردبیل. جغرافیا و توسعه، ۱۰: ۱۰۶-۸۹. علیزاده، امین. ۱۳۸۹. اقلیم و هواشناسی کشاورزی، چاپ اول، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد. غریبی، خسرو. ۱۳۹۵. مدیریت ریسک و بیمه باغبانی (نمونه‌های الگویی، زیتون، موزو انبه). انتشارات پژوهشکده بیمه ایران. چاپ اول. ۱۳۹۵. تهران.

میان‌آبادی، آمنه؛ محمد موسوی بایگی، حسین ثنایی نژاد و احمد نظامی. ۱۳۸۸. بررسی و پهنه‌بندی یخبندان‌های زود هنگام پاییزه، دیر هنگام بهاره و زمستانه با استفاده از GIS در استان خراسان رضوی. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۳ (۱): ۸۸-۷۷.

قربانی، خلیل و اسماعیل ولیزاده. 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.

Bennie, J.; E. Kubin, A. Wiltshire, B. Huntley, and R. Baxter. 2010. Predicting spatial and temporal patterns of bud-burst and spring frost risk in north-west Europe: the implications of local adaptation to climate. *Global Change Biology*, **16(5)**, 1503-1514.

Dibike, Y.B; P. Coulibaly. 2005. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay Watershed: Comparison of Ownscaling Methods and Hydrologic Models. *Journal of Hydrology*, **307**: 145-163.

Eccel, E.; R. Rea, A. Caffarra, and Crisci, A. 2009. Risk of spring frost to apple production under future climate scenarios: the role of phenological acclimation. *International journal of biometeorology*, **53(3)**, 273-286.

Ellwood, E. R.; S. R. Playfair, C. A. Polgar, and R. B. Primack. 2014. Cranberry flowering times and climate change in southern Massachusetts. *International journal of biometeorology*, **58(7)**: 1693-1697.

F.A.O. 2005. *Frost protection: Fundamentals, Practic, and economics*. Volume 1. Food and Agriculture Orgnization of the United Nation, Rome.

Graczyk, D.; Z. W. Kundzewicz. 2015. Changes of temperature-related agroclimatic indices in Poland. *Theoretical and Applied Climatology*, **124**:401-410.

He, Y.; H. Wang, B. Qian, B. McConkey, H. Cutforth, R. Lemke, and G. Hoogenboom. 2012. Effects of climate change on killing frost in the Canadian prairies. *Climate Res*, **54**: 221-231.

Hidalgo-Galvez, M. D.; H. García-Mozo, J. Oteros, A. Mestre, R. Botey, and C. Galán. 2017. Phenological behaviour of early spring flowering trees in Spain in response to recent climate changes. *Theoretical and Applied Climatology*, **134**: 1-11.

Legave, J. M.; D. Christen, D. Giovannini, R. Oger. 2008. Global warming in Europe and its impacts on floral bud phenology in fruit species. In Workshop on Berry Production in Changing Climate Conditions and Cultivation Systems. COST-Action 863: Euroberry Research: from 838 (pp: 21-26).

McEwan, R. W.; R. J. Brecha, D. R. Geiger, and G. John, P. 2011. Flowering phenology change and climate warming in southwestern Ohio. *Plant Ecology*, **212(1)**: 55-61.

- Modala, N. R.; S. Ale, D. W. Goldberg, M. Olivares, C. L. Munster, N. Rajan, and R. A. Feagin. 2016. Climate change projections for the Texas High Plains and Rolling Plains. *Theoretical and Applied Climatology*, **124**:1-18.
- Rodrigo, J. 2000. Spring frosts in deciduous fruit trees morphological damage and flower hardiness. *Scientia Horticulturae*, **85(3)**: 155-173.
- Scheifinger, H.; A. Menzel, E. Koch, and Ch. Peter. 2003. Trends of spring time frost events and phenological dates in Central Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, **74**: 41-51.
- Semonov M.A.; P. Stratonovitch. 2010. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts, *Climate Research*. **41**: 1-14.
- Semenov M. A.; R.J. Brooks, E.M. Barrow, and C.W. Richardson. 1998. Comprision of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in diverse climates. *Climate Research* **10**: 95-107.
- Wilks, D.S.; R.L. Wilby. 1999. The weather generation game: a review of stochastic weather models. *Progress in Physical Geography*, **23**: 329-357.
-

