

تحلیل و پهنه‌بندی ریسک وقوع یخبندان و سرماهای تشعشی، جبهه‌ای و مختلط در گستره ایران

جواد بذرافشان^{۱*}، جابر رحیمی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۸/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۵/۲۹

چکیده

پدیده یخبندان همه ساله خسارات گسترده‌ای را در زمینه‌های مختلف تولید بخش کشاورزی وارد می‌سازد. بنابراین یکی از پارامترهای مهم در اجرای سیاست‌های بیمه محصولات کشاورزی کمی‌سازی ریسک خطر وقوع یخبندان می‌باشد. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه ۵۱ ایستگاه هواشناسی کشور (دوره آماری ۲۰۰۹-۱۹۵۱) یک الگوریتم سلسله مراتبی برای تشخیص یخبندان‌های تابشی و فرارفتی ارائه شد. سپس، درصد مواقعی از سال (بر مبنای داده‌های سه ساعتی) که یخبندان اتفاق افتاده بود (با دو آستانه دمایی ۴ و صفر درجه سلسیوس) تعیین و در سه گروه یخبندان تابشی، فرارفتی و مختلط تفکیک گردید. این درصد که ریسک سرما/ یخبندان نامیده شده است، از نظر وابستگی به مشخصات جغرافیایی (طول، عرض جغرافیایی و ارتفاع) مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، نقشه پهنه‌بندی یخبندان‌ها در گستره کشور ترسیم گردید. بررسی نقشه‌های ریسک سرما/ یخبندان نشان داد که ریسک وقوع یخبندان‌های مختلط و تابشی بیشتر از یخبندان‌های فرارفتی در گستره کشور است. همچنین، مشخص شد که بیشترین احتمال وقوع یخبندان‌های خسارت‌زای تابشی با آستانه‌های دمایی ۴ و صفر درجه سلسیوس، به ترتیب، در ایستگاه‌های شهرکرد (۱۰/۶۲ درصد) و کوهرنگ (۷/۲۳ درصد) و از آن یخبندان‌های فرارفتی با آستانه‌های دمایی ۴ و صفر درجه سلسیوس، در ایستگاه اردبیل به ترتیب با احتمال ۷/۲۲ درصد و ۴/۰۷ درصد اتفاق افتاده است.

واژه‌های کلیدی: یخبندان تابشی، یخبندان فرارفتی، کمی‌سازی ریسک، ایران

مقدمه

گذشته صندوق بیمه محصولات کشاورزی ایران که قانوناً مجری سیاست‌های مدیریتی در بخش کشاورزی است، ارقام غرامت پرداخت شده به کشاورزان برای عامل سرما و یخبندان از ۶۱۳/۲۸۹ میلیون ریال در سال زراعی ۸۶-۸۵ تا ۱/۳۵۴/۳۸۶ میلیون ریال در سال زراعی ۸۴-۸۳ متغیر بوده است. طبق تعریف، 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. با این وجود متخصصان هواشناسی کشاورزی بر این باورند که یخبندان‌های کشاورزی از آستانه بالاتری آغاز می‌شود، به طوری که اغلب آستانه ۴ درجه سلسیوس را به عنوان نقطه شروع خسارت یخبندان به بافت‌های گیاهی در نظر می‌گیرند (تام و شاو^۳؛ استرلینگ^۱، ۲۰۰۲). یخبندان‌ها را

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، زراعین و در نهایت منافع ملی کشور وارد می‌شود. برای نمونه، بین سال‌های زراعی ۱۳۷۳ تا ۱۳۷۸ مجموعاً در حدود ۶۵۷۷۴ هکتار از زمین‌های زیر کشت تحت تأثیر خسارت ناشی از بلایای طبیعی قرار گرفته‌اند و این در حالی است که خسارت سرما ۴۰٪ از این میزان را به خود اختصاص داده است (صدقی، ۱۳۷۸). طبق آمار ده سال

^۱ استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.
^۲ دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.

(*نویسنده مسئول: jbazr@ut.ac.ir)

^۳ Thom and Show

تاریخ های آغاز و خاتمه یخبندان، سردترین دما و ریسک وقوع دوره‌های سرد را در فلوریدای مرکزی بررسی، و توزیع احتمالی آن را پیش‌بینی نمود. فرانسویس^{۱۰} و همکاران (۱۹۹۹) با به کارگیری داده‌های ماهواره نوآ و ۲۲ ایستگاه هواشناسی و با ارائه روشی جدید، نقشه ریسک یخبندان ناحیه آلتیپلانو بولیوی را تهیه کردند. تات و ژنگ^{۱۱} (۲۰۰۳) با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای ویژگی‌های یخبندان ناحیه اوتاگو در کشور نیوزلند را مورد بررسی قرار داده و نقشه‌های زمان آغاز و خاتمه یخبندان را با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی برای این ناحیه تهیه کردند. تراسمونت^{۱۲} و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی و تعیین خصوصیات مکانی و زمانی پدیده یخبندان از قبیل شدت، مدت، تواتر، طول دوره عاری از یخبندان و روند زمانی وقوع در کشور پرو پرداختند. بررسی مطالعات انجام شده در کشور نشان می‌دهد که اکثر این مطالعات در حیطه احتمال وقوع یخبندان بدون توجه به نوع آن (فرارفتی، تابشی یا مختلط) و صرفاً در مفهوم کلی یخبندان (دمای زیر صفر) و خسارت‌بار بودن یا نبودن آن انجام شده است. علاوه بر این، در محدود تحقیقات نیز ریسک اولین یخبندان پاییزه و نوع آن و ریسک آخرین یخبندان بهاره و نوع آن مورد توجه قرار گرفته است. به عنوان مثال، هاشمی در سال ۱۳۴۸ سری‌های زمانی شروع و خاتمه یخبندان در تهران را برای چهار آستانه حرارتی تحلیلی نمود. علیزاده و همکاران (۱۳۷۳) وقوع یخبندان‌های زودرس و دیررس با شدت‌های مختلف را در استان خراسان بر اساس روش‌های احتمالی بررسی نمودند. سمیعی و همکاران (۱۳۷۶) تاریخ شروع و خاتمه یخبندان‌ها در ۱۲ آستانه دمایی را مورد بررسی قرار دادند و ضمن ارائه احتمال وقوع یخبندان‌ها، مناسب‌ترین تاریخ کاشت را در نقاط مختلف با حداقل احتمال خسارات ناشی از یخبندان پیش‌بینی نمودند. کمالی (۱۳۸۰) نقشه‌های هم احتمال تاریخ رخداد اولین و آخرین یخبندان پاییزه و بهاره و طول دوره یخبندان را در کلیه ایستگاه‌های همدیدی کشور تهیه کرد. کمالی و نوخندان (۱۳۸۴) نیز توزیع زمانی و مکانی

می‌توان در گروه‌های مختلفی از قبیل فرارفتی (جبهه‌ای)، تابشی و مختلط تقسیم‌بندی نمود (کالما^۲ و همکاران، ۱۹۹۲). محققان یخبندان فرارفتی را نتیجه انتقال یک توده هوا در مقیاس وسیعی توأم با وزش باد می‌دانند و یخبندان تشعشعی را دارای منشاء آنتی سیکلونی و وقوع آن را در داخل توده‌های وسیع و متجانس با هوای صاف و آرام همراه با وارونگی‌های دمایی می‌دانند (هوت^۳، ۱۹۷۳). در یخبندان‌های مختلط، طی دوره یخبندان هر دو نوع یخبندان تابشی و فرارفتی متوالیاً مشاهده می‌شوند. در این وضعیت، یخبندان‌های تابشی به طور معمول پس از عبور یک جبهه سرد رخ می‌دهند. تفکیک یخبندان مختلط از سایر یخبندان‌ها بسیار مشکل می‌باشد اما انتظار می‌رود که اغلب در شب رخ دهند (آهرنز^۴، ۲۰۰۹). بررسی اسناد و مدارک علمی موجود نشان می‌دهد که توجه به پدیده یخبندان و آثار آن قدمت طولانی داشته آن چنان که توجه به انواع مختلف یخبندان و شرایط ایجاد آنها از اوایل قرن بیستم در مطالعات مختلف وجود داشته است. برای مثال، تروارتا^۵ (۱۹۵۴) نقشه جهانی متوسط طول دوره بدون یخبندان را تهیه کرد. تام و شاو (۱۹۵۸) نحوه تحلیل و واری داده‌های یخبندان را ارائه نمودند. روزنبرگ و مایر^۶ در سال ۱۹۶۲ دریافتند که نوع یخبندان در برنامه‌ریزی اهداف کشاورزی مهم‌تر از میانگین تاریخ یک دمای حداقل خاص است. این محققین پیشنهاد کردند که تاریخ وقوع اولین و آخرین یخبندان به تفکیک نوع یخبندان (تابشی یا فرارفتی) براساس آمار و اطلاعات اقلیمی تعیین شود. از اولین تحلیل‌های مکانی یخبندان می‌توان به مطالعه کاپریو^۷ (۱۹۶۱) اشاره نمود. وی نحوه تهیه و بررسی نقشه‌های یخبندان را ارائه کرده است. اشمدیلین و دیزیر^۸ (۱۹۸۶) در یک تحلیل آماری، خطرات یخبندان را برای نیویورک بررسی نمودند. ویلن^۹ (۱۹۸۸) با تحلیل احتمالاتی ویژگی‌های یخبندان،

¹ Esterling

² Kalma

³ Hewett

⁴ Ahrens

⁵ Trewartha

⁶ Rozenberg and Myers

⁷ Caprio

⁸ Schmidlin and Detheir

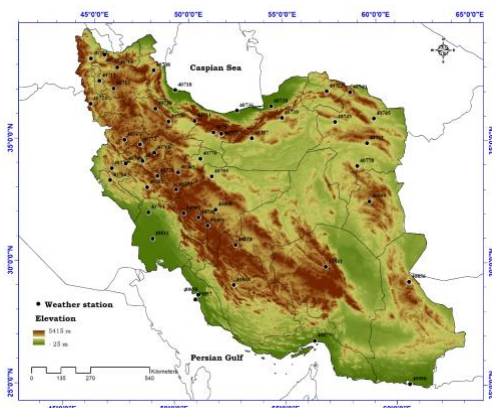
⁹ Waylen

¹⁰ François

¹¹ Tait and Zheng

¹² Trasmonte

(۱۹۵۱-۲۰۰۹) و معیارهایی چون وجود آمار طولانی مدت، نواقص کم آماری، استاندارد بودن ایستگاه هواشناسی و پراکنش مکانی مناسب استفاده شد. شکل ۱ پراکنش ایستگاه‌های مورد مطالعه را در ایران نمایش می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت مکانی شبکه ایستگاه‌های هواشناسی تحت بررسی در ایران

توزیع ارتفاعی ایستگاه‌های هواشناسی مطالعاتی نیز ناهمگن است. در جدول ۱ کلاس‌های ارتفاعی ایستگاه‌های مطالعاتی درج شده است.

جدول ۱- توزیع ارتفاعی ایستگاه‌های مورد مطالعه در سطح کشور

| تعداد ایستگاه | کلاس ارتفاعی (متر) |
|---------------|--------------------|
| ۹ | ۵۰۰ > |
| ۵ | ۵۰۰ - ۱۰۰۰ |
| ۲۲ | ۱۰۰۰ - ۱۵۰۰ |
| ۹ | ۱۵۰۰ - ۲۰۰۰ |
| ۶ | > ۲۰۰ |

در پژوهش حاضر به منظور ارزیابی یخبندان‌های تابشی و فرارفتی در گستره کشور، روزهای مشترک آماری (از نیمه شب یک روز تا نیمه شب روز بعد) تعریف شد. همچنین، به دلیل کوچک بودن واحد زمانی ارزیابی یخبندان، از بازسازی و تکمیل خلاءهای آماری صرف‌نظر گردید. به هر حال، ارزیابی‌ها در گستره کشور با در نظر گرفتن روزهای مشترک، یعنی روزهایی که همه ایستگاه‌های تحت مطالعه دارای آمار می‌باشند، انجام شد.

پدیده یخبندان را با استفاده از داده‌های ۱۱۹ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک و بهره‌گیری از مدل رگرسیونی (بین متغیرهای مورد بررسی و ارتفاع و عرض جغرافیایی) مورد بررسی قرار دادند. ضیایی و همکاران (۱۳۸۵) در استان فارس، بر اساس داده‌های ۲۵ ایستگاه موجود اقدام به تهیه اطلس احتمال وقوع کمینه دمای استان نمودند. این محققین نشان دادند که هر چه عرض جغرافیایی ایستگاه کمتر شود، اولین یخبندان‌ها دیرتر و آخرین یخبندان‌ها زودتر اتفاق می‌افتد. از جمله مهم‌ترین و جدیدترین مطالعه انجام شده در این زمینه می‌توان به طرح ملی پهنه‌بندی هواشناسی کشاورزی ایران جهت بیمه در برابر خطرات خشکسالی، یخبندان و باران‌های سیل آسا اشاره نمود (خلیلی، ۱۳۸۶). اگر بروز یخبندان ناشی از تغییرات ماکروکلیمایی (یخبندان فرارفتی) باشد مقابله با آن به علت گسترده بودن سطح تأثیر و دوام طولانی آن دشوار خواهد بود. اما چنانچه بروز یخبندان به علت تغییرات میکروکلیمایی (یخبندان تابشی) باشد مقابله با آن تا حدود زیادی امکان‌پذیر خواهد بود. این مساله به ویژه به هنگام تعیین سهم خسارت باغدار حائز اهمیت است و می‌توان با توجه به نوع یخبندان اتفاق افتاده درصد‌های متفاوتی خسارت به باغداران پرداخت کرد. هدف مقاله حاضر ارزیابی کمی ریسک اقلیمی یخبندان‌های تابشی، فرارفتی و مختلط در گستره کشور و پهنه‌بندی آن به منظور استفاده در صنعت بیمه است.

مواد و روش‌ها

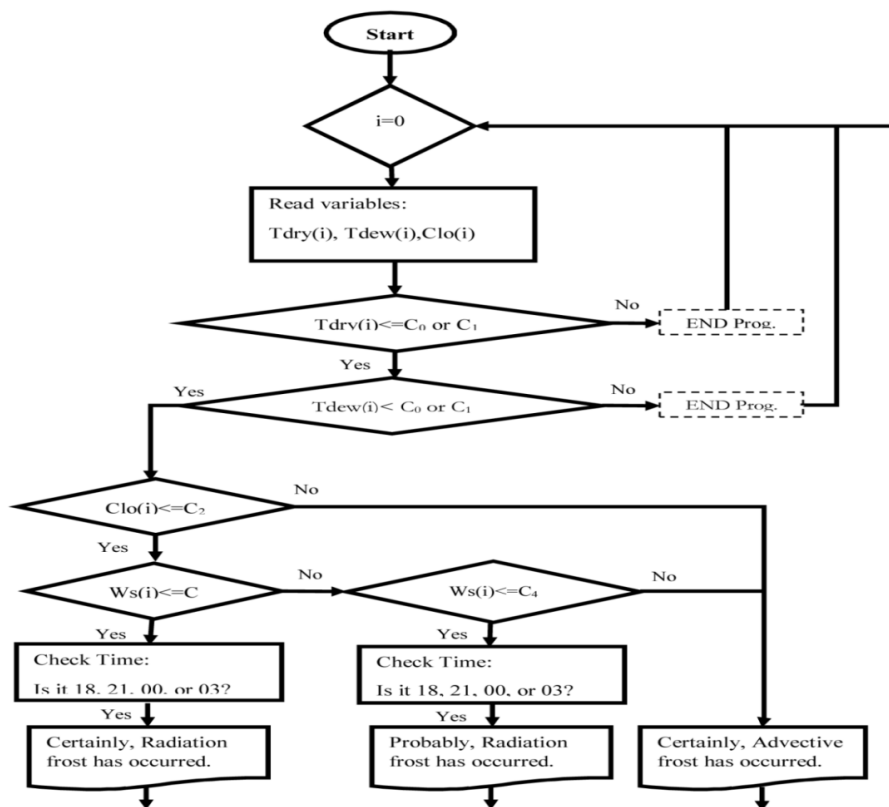
شبکه ایستگاه‌های مطالعاتی و آماده‌سازی داده‌ها

ایران به عنوان منطقه مطالعاتی، کشوری است که بروز پدیده یخبندان و تکرار آن سبب زیان‌های متفاوتی بر بخش کشاورزی شده است. بررسی‌های اولیه نشان داد که به دلیل نیاز به اطلاعات هواشناسی در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر از یک روز در مطالعه پدیده یخبندان، صرفاً می‌بایست به داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های سینوپتیک سازمان هواشناسی کشور در فواصل زمانی سه ساعته اکتفا نمود. به همین دلیل از داده‌های دمای هوا، دمای نقطه شبنم، رطوبت نسبی، فشار بخار آب، ابرناکی، و سرعت باد مربوط به ۵۱ ایستگاه هواشناسی در ایران با حفظ دوره آماری مشترک ۵۹ سال

شب‌نم ممکن است وقوع یخبندان، صدمات جزئی تا نابودی کامل گیاهان را سبب شود. اگر شرط ۲ برقرار نباشد، واحد زمانی بعدی فراخوانده می‌شود. در غیر این صورت برنامه وارد شرط ۳ می‌شود. شرط ۳، میزان پوشش ابری (C_{10}) بر حسب Octa (هشتم) در هر واحد زمانی با آستانه $C_2=2$ (یعنی حداکثر ۲ قسمت از ۸ قسمت آسمان ابری باشد) مقایسه می‌شود. اگر $C_{10} \leq C_2$ باشد، برنامه وارد مرحله چهارم می‌شود. شرط ۴، سرعت باد اندازه‌گیری شده در ایستگاه (ws) بر حسب knot با سرعت آستانه $C_3=5$ knot مقایسه می‌شود. اگر شرط $ws \leq C_3$ برقرار باشد و این وضعیت در یکی از ساعات شب (یعنی ۰۰، ۰۳، ۱۸، ۲۱) اتفاق بیفتد، قطعاً یخبندان از نوع تابشی است. به منظور افزایش دقت در تعیین یخبندان‌های تابشی، به اندازه یک نات به آستانه C_3 اضافه شده و آستانه جدید $C_4=6$ knot در نظر گرفته شد. چنانچه در یکی از ساعات شب، سرعت باد، بیشتر از آستانه C_3 و کمتر از آستانه C_4 باشد، مشروط بر اینکه در یک واحد زمانی قبل و یک واحد زمانی بعد از آن سرعت باد کمتر از ۵ نات و پوشش ابری کمتر از ۲ باشد، یخبندان از نوع تابشی در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که شرط مذکور برقرار نباشد یخبندان از نوع فرارفتی است. در صورتی که یخبندان خسارت‌زا هم مشخصات یخبندان‌های تابشی و هم فرارفتی را داشته باشد، اصطلاحاً از نوع مختلط تعریف می‌شود. به عنوان مثال، در مورد یک یخبندان خسارت‌زا ممکن است سرعت باد به اندازه کافی زیاد بوده، اما هوا کاملاً صاف باشد یا هوا آرام بوده اما ابرناکی از آستانه تعیین شده برای یخبندان‌های تابشی بزرگتر باشد. در حالت اول، وقوع چنین وضعیتی حاکی از فرارفت هوای سرد و نزدیک شدن یک جبهه جوی در ساعات آینده است. حالت دوم نیز به دنبال عبور جبهه جوی و استقرار یک توده هوای سرد اتفاق می‌افتد. نکته قابل بحث و توسعه در اینجا، در مورد شرط ۲ است. در این شرط از دمای نقطه شب‌نم استفاده شده است. در مواقعی که مقداری برای Tdew گزارش نشده باشد می‌توان از روابط و فرمول‌های هواشناسی برای تخمین آن استفاده کرد.

الگوریتم شناسایی یخبندان‌های خسارت‌زای تابشی، فرارفتی و مختلط

دقیق‌ترین روش برای شناسایی و تمایز یخبندان‌های تابشی و فرارفتی، استفاده از نقشه‌های سینوپتیکی ترازهای مختلف جو در ساعات مختلف شبانه‌روز است. به علت هزینه بسیار زیاد تهیه این نقشه‌ها و عدم دسترسی به نقشه‌های یک دوره تاریخی طولانی مدت در کشور، در این پژوهش از روش‌های آماری مبتنی بر احتمالات شرطی برای شناسایی و برآورد احتمالات وقوع انواع یخبندان‌ها استفاده شد. در مطالعات مربوط به شناسایی نوع یخبندان به روش آماری از آستانه‌های تقریباً ثابت برخی عوامل هواشناسی استفاده می‌شود. به کمک این آستانه‌ها، الگوریتم منعکس شده در شکل (۲) برای شناسایی و تمایز یخبندان‌های تابشی و فرارفتی طراحی و مورد استفاده قرار گرفت. واحد زمانی شناسایی نوع یخبندان در این الگوریتم، سه ساعتی است و فرض می‌شود در هر واحد زمانی تنها یک نوع خاص از یخبندان‌ها می‌تواند اتفاق افتد. با این فرض، الگوریتم مذکور با فراخوانی داده‌های دمای هوا (Tdew)، دمای نقطه شب‌نم (Tdry)، رطوبت نسبی (RH)، فشار بخار آب (vap)، و سرعت باد (ws) در ۸ ساعت از شبانه‌روز، یعنی ۰۰، ۰۳، ۰۶، ۰۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱ آغاز می‌شود. سپس، چندین الگوی شرطی بر روی متغیرهای هواشناسی اجرا می‌شود. در ادامه، هر یک از شروط تا رسیدن به نوع خاصی از یخبندان بیان می‌شوند. شرط ۱، دمای هوا را با آستانه‌های معین C_0 یا C_1 مقایسه کنید. در اینجا، $C_0=4^\circ C$ و $C_1=0^\circ C$ اختیار شده است که به ترتیب معرف آستانه شروع سرمازدگی در برخی محصولات کشاورزی و آستانه شروع یخبندان در مفهوم هواشناسی آن و بروز خسارت در تعداد زیادی از گیاهان است. چنانچه این دو شرط برقرار نباشند، واحد زمانی بعدی فراخوانی می‌شود. در غیر این صورت، برنامه وارد شرط ۲ می‌شود. شرط ۲، برقراری شرط ۱ به معنی وقوع یخبندان است. برای این که پدیده یخبندان به لحاظ کشاورزی خسارت‌زا باشد لازم است دمای نقطه شب‌نم (Tdew) نیز کمتر از آستانه‌های $C_0=4^\circ C$ و $C_1=0^\circ C$ باشد. در این شرایط بسته به اختلاف دمای هوا و دمای نقطه



شکل ۲- فلوجارت تعیین نوع یخبندان تابشی یا فرارفتی

پهنه‌بندی ریسک وقوع یخبندان

بررسی‌های سه بعدی دما در گستره ایران نشان داده است که پارامترهای دمایی در ایران حسب طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و ارتفاع متغیر است (خلیلی، ۱۳۷۵). چون مقادیر ریسک وقوع یخبندان خود تابعی از دمای هوا می‌باشند طبیعی به نظر می‌رسد که این عوامل نیز تابع مختصات جغرافیایی باشند. برای پهنه‌بندی ریسک وقوع یخبندان یا تعمیم نتایج، آنالیز همبستگی چند متغیره بین ریسک وقوع یخبندان از یک طرف و طول X ، عرض Y و ارتفاع Z جغرافیایی ۵۱ ایستگاه مطالعاتی از طرف دیگر به فرم زیر مورد آزمون قرار گرفت.

$$y = a_0 + a_1 \text{Lat} + a_2 \text{Lon} + a_3 \text{Ele} + \varepsilon \quad (2)$$

که در آن a_0 تا a_3 پارامترهای معادله، Lat عرض جغرافیایی، Lon طول جغرافیایی، Ele ارتفاع (بر حسب متر)، ε مقدار خطا یا اختلاف مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده و y شامل هشت متغیر وابسته که همان درصد فراوانی

اگر مقدار رطوبت نسبی هوا (RH) وجود داشته باشد می‌توان به کمک فشار بخار اشباع در دمای هوا، ابتدا مقدار فشار بخار واقعی (vap) را محاسبه کرد. سپس، دمایی که در آن دما فشار بخار اشباع با فشار بخار واقعی برابر می‌شود را تعیین نمود.

$$T_{dew} = \frac{116.91 + 237.3 \ln(vap)}{16.78 - \ln(vap)} \quad (1)$$

طبیعتاً وجود اطلاعاتی در زمینه وارونگی هوا در نقاط ایستگاه‌ها امکان تصمیم‌گیری بهتر در تشخیص یخبندان‌های تابشی را فراهم می‌کند ولی به علت عدم دسترسی به این داده‌ها بررسی‌های دقیق‌تر در مورد یخبندان‌های تابشی امکان‌پذیر نبود. همچنین، این مطالعه کل سال را از نظر پتانسیل وقوع یخبندان مورد توجه قرار داده است. دلیل این مسأله نیاز تحقیقاتی بیمه محصولات کشاورزی بود تا بتواند بهتر در مورد پتانسیل وقوع یخبندان نواحی مختلف تصمیم بگیرد.

چابهار و بندر عباس تقریباً در هیچ موقع از سال طی دوره آماری قابل دسترس، یخبندان اتفاق نیافتاده است. با توجه به شرایط اقلیمی خاص این مناطق (اقلیم گرمسیری) و ناچیز بودن ارتفاع آنها نسبت به سطح (کمتر از ۱۰ متر) مشاهده این وضع دور از انتظار نیست.

پهنه‌بندی و تحلیل ریسک وقوع انواع یخبندان

به منظور تهیه میدان عددی ریسک وقوع یخبندان‌های تابشی، مختلط، فرارفتی و کل خسارت‌زا در گستره کشور، رابطه همبستگی آنها با مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌ها (ارتفاع، طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی) تعیین گردید. بررسی‌های آماری حاکی از وجود رابطه قوی هر یک از انواع سه‌گانه یخبندان و یخبندان کل با ارتفاع است، آن چنان که بخش زیادی از تغییرات ریسک توسط عامل ارتفاع تبیین می‌شود. عامل بعدی، عرض جغرافیایی است که اهمیت بیشتری نسبت به طول جغرافیایی دارد. روابط رگرسیونی سه بعدی معرف هر یک از یخبندان‌ها با دو آستانه ۴ و صفر درجه سلسیوس در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که ضریب همبستگی یخبندان فرارفتی نسبت به دو نوع دیگر یخبندان کمتر است. به عبارت دیگر، یخبندان فرارفتی تأثیرپذیری کمتری از مشخصات جغرافیایی مناطق دارد. این نتیجه، علی‌القاعده صحیح است زیرا این نوع یخبندان بستگی به فراوانی ورود سیستم‌های جوی و گستره ریزش هوای سرد بر روی کشور دارد. چون اکثر سیستم‌های جوی از سمت شمال غرب و غرب به کشور وارد می‌شوند انتظار می‌رود در آن نواحی، ریسک وقوع یخبندان فرارفتی بیشتر باشد. بالعکس، یخبندان تابشی تابع شرایط وضع هوای محل است. بنابراین، انتظار می‌رود همبستگی آن با توپوگرافی مناطق بالاتر باشد. شکل‌های ۳ و ۴ نقشه‌های ریسک وقوع یخبندان‌های فرارفتی، تابشی، مختلط و کل را با دو آستانه خسارت ۴ و صفر درجه سلسیوس نشان می‌دهند. این نقشه‌ها پس از اعمال روابط رگرسیونی بدست آمده‌اند، تطابق خوبی با مشخصات جغرافیایی مناطق مختلف کشور دارند. شکل ۳ الف نشان می‌دهد که ریسک سرمای تابشی با آستانه ۴ درجه سلسیوس در پهنه کشور تا بیش از ۱۲ درصد می‌رسد.

وقوع یخبندان‌های تابشی، فرارفتی، مختلط، و کل هر یک با دو آستانه دمایی صفر و ۴ درجه سلسیوس است. در نهایت و پس از تعیین قانونمندی ریسک وقوع یخبندان با مشخصات جغرافیایی مناطق، نقشه‌های ریسک وقوع یخبندان در محیط نرم‌افزار ArcGIS 9.3 تهیه گردید.

نتایج و بحث

تعیین انواع یخبندان و ارزیابی ریسک وقوع آنها در گستره کشور

به منظور تعیین نوع یخبندان در واحدهای زمانی سه ساعته در هر یک از ایستگاه‌های تحت مطالعه، یک برنامه رایانه‌ای در محیط فرترن تهیه شد. این برنامه با فراخوانی فایل‌های مربوط به داده‌های وضع هوا، شرط‌های موجود در الگوریتم (شکل ۲) را برای تعیین انواع یخبندان‌های تابشی، فرارفتی (جبهه‌ای)، مختلط و کل خسارت‌زا مورد بررسی قرار داده و احتمال وقوع آنها را تعیین می‌کند. نتایج حاصل از اجرای برنامه در جدول ۲ به ترتیب برای آستانه‌های دمایی ۴ و صفر درجه سلسیوس ارائه شده است. بیشترین احتمال وقوع یخبندان‌های خسارت‌زای تابشی با آستانه‌های دمایی ۴ و صفر درجه سلسیوس، به ترتیب، در ایستگاه‌های شهرکرد (۱۰/۶۲ درصد) و کوه‌رنگ (۷/۲۳ درصد) اتفاق افتاده است. بیشینه ریسک وقوع یخبندان‌های خسارت‌زای فرارفتی با آستانه‌های دمایی ۴ و صفر درجه سلسیوس، در ایستگاه اردبیل اتفاق افتاده است. احتمال وقوع یخبندان فرارفتی در این ایستگاه با آستانه دمایی ۴ درجه سلسیوس، ۷/۲۲ درصد و با آستانه دمایی صفر درجه سلسیوس، ۴/۰۷ درصد است. ایستگاه آبعلی دارای حداکثر احتمال وقوع یخبندان‌های خسارت‌زای مختلط در هر دو آستانه دمایی ۴ و صفر درجه سلسیوس است. درصد یخبندان مختلط در این ایستگاه با آستانه دمایی ۴ درجه سلسیوس، ۲۴/۳۲ درصد و با آستانه دمایی صفر درجه سلسیوس، ۱۵/۶۱ درصد است. حداکثر احتمال فراوانی وقوع کل یخبندان‌های خسارت‌زا (تابشی + مختلط + فرارفتی) با آستانه‌های ۴ و صفر درجه سلسیوس در ایستگاه آبعلی با مقادیر به ترتیب ۳۷/۰۴ و ۲۴/۳۷ درصد اتفاق افتاده است. در ایستگاه‌های بوشهر (ساحلی و دریایی)،

جدول ۲- احتمال وقوع یخبندان‌های تابشی قطعی و یخبندان‌های خسارت زا با آستانه‌های دمایی ۴ و ۰ درجه سلسیوس در ایستگاه‌های مطالعاتی

| ایستگاه | یخبندان تابشی (%) | | یخبندان فرارفتنی (%) | | یخبندان مختلط (%) | | یخبندان خسارت زای کل (%) | |
|----------------|-------------------|------|----------------------|------|-------------------|-------|--------------------------|-------|
| | ۰°C | ۴°C | ۰°C | ۴°C | ۰°C | ۴°C | ۰°C | ۴°C |
| آباده | ۴/۹۲ | ۸/۵۴ | ۰/۴۲ | ۱/۰۳ | ۲/۶۴ | ۷/۴۸ | ۱۷/۰۸ | ۸/۰۰ |
| آبعلی | ۵/۳۵ | ۷/۲۴ | ۳/۴۱ | ۵/۴۸ | ۱۵/۶۱ | ۲۴/۳۲ | ۳۷/۰۴ | ۲۴/۳۷ |
| اهواز | ۰/۰۲ | ۰/۳۱ | ۰/۰۰ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۱۴ | ۰/۴۶ | ۰/۰۲ |
| الیگودرز | ۱/۴۴ | ۲/۳۱ | ۲/۴۸ | ۶/۶۲ | ۸/۴۸ | ۱۵/۱۹ | ۲۴/۱۲ | ۱۲/۴۰ |
| اراک | ۴/۰۰ | ۶/۸۶ | ۰/۴۹ | ۱/۳۷ | ۷/۶۹ | ۱۴/۳۲ | ۲۲/۵۵ | ۱۲/۱۸ |
| اردبیل | ۴/۱۳ | ۵/۸۶ | ۴/۰۷ | ۷/۲۲ | ۱۱/۱۰ | ۱۷/۸۳ | ۳۰/۹۱ | ۱۹/۳۰ |
| بابلسر | ۰/۲۶ | ۲/۰۷ | ۰/۰۲ | ۰/۲۶ | ۰/۱۰ | ۱/۴۹ | ۲/۸۲ | ۰/۳۸ |
| بندر عباس | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ |
| بندر انزلی | ۰/۱۲ | ۰/۹۱ | ۰/۰۷ | ۱/۲۰ | ۰/۱۲ | ۱/۷۰ | ۳/۸۱ | ۰/۳۱ |
| بیرجند | ۴/۴۶ | ۷/۸۸ | ۰/۲۶ | ۱/۰۸ | ۱/۶۴ | ۵/۱۶ | ۱۴/۱۲ | ۶/۳۶ |
| بجنورد | ۴/۱۹ | ۶/۹۹ | ۱/۷۶ | ۴/۱۹ | ۵/۵۷ | ۱۲/۷۲ | ۲۳/۹۰ | ۱۱/۵۲ |
| بروجن | ۵/۴۸ | ۸/۰۸ | ۱/۰۰ | ۳/۵۱ | ۷/۰۰ | ۱۳/۲۶ | ۲۴/۸۵ | ۱۳/۴۸ |
| بروجرد | ۲/۳۵ | ۴/۲۹ | ۱/۲۷ | ۴/۴۴ | ۳/۹۲ | ۸/۹۳ | ۱۷/۶۶ | ۷/۵۴ |
| بوشهر | ۰/۰۰ | ۰/۰۲ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۲ | ۰/۰۴ | ۰/۰۰ |
| بوشهر(دریایی) | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ |
| چابهار | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ |
| دزفول | ۰/۱۱ | ۱/۲۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۲۵ | ۱/۴۶ | ۰/۱۲ |
| اصفهان | ۳/۷۳ | ۷/۳۷ | ۰/۱۶ | ۰/۵۴ | ۲/۲۰ | ۶/۹۷ | ۱۴/۷۸ | ۶/۰۹ |
| اسلام آباد غرب | ۴/۶۸ | ۷/۹۴ | ۰/۵۵ | ۱/۷۴ | ۴/۹۳ | ۱۱/۹۴ | ۲۱/۶۲ | ۱۰/۱۶ |
| قزوین | ۳/۹۰ | ۶/۰۷ | ۰/۸۰ | ۲/۱۲ | ۶/۳۰ | ۱۳/۳۷ | ۲۱/۵۶ | ۱۱/۰۰ |

ادامه جدول ۲- احتمال وقوع یخبندان‌های تابشی قطعی و یخبندان‌های خسارت‌زا با آستانه‌های دمایی ۴ و ۰ درجه سلسیوس در ایستگاه‌های مطالعاتی

| ایستگاه | یخبندان تابشی (%) | | یخبندان فرارفتی (%) | | یخبندان مختلط (%) | | یخبندان خسارت‌زای کل (%) | |
|--------------|-------------------|------|---------------------|------|-------------------|------|--------------------------|-------|
| | ۴°C | ۰°C | ۴°C | ۰°C | ۴°C | ۰°C | ۴°C | ۰°C |
| آستانه دمایی | ۴°C | ۰°C | ۴°C | ۰°C | ۴°C | ۰°C | ۴°C | ۰°C |
| قم | ۵/۱۸ | ۲/۴۷ | ۰/۷۹ | ۰/۱۹ | ۶/۴۷ | ۱/۹۶ | ۱۲/۴۴ | ۴/۶۲ |
| ایلام | ۵/۱۳ | ۱/۸۵ | ۱/۰۷ | ۰/۱۵ | ۶/۱۵ | ۱/۳۲ | ۱۲/۳۵ | ۳/۳۲ |
| جلفا | ۶/۴۵ | ۴/۳۹ | ۳/۰۷ | ۱/۴۷ | ۱۳/۳۷ | ۶/۹۰ | ۲۲/۸۹ | ۱۲/۷۶ |
| کنگاور | ۸/۲۰ | ۵/۱۵ | ۲/۱۹ | ۰/۵۹ | ۱۲/۵۱ | ۵/۸۳ | ۲۲/۹۰ | ۱۱/۵۷ |
| کاشان | ۴/۱۷ | ۱/۵۶ | ۰/۷۰ | ۰/۰۱ | ۴/۶۶ | ۱/۲۱ | ۹/۵۳ | ۲/۷۸ |
| کرمان | ۵/۶۵ | ۳/۴۱ | ۱/۱۲ | ۰/۳۲ | ۵/۲۶ | ۱/۸۹ | ۱۲/۰۳ | ۵/۶۲ |
| کرمانشاه | ۶/۷۵ | ۴/۰۳ | ۲/۸۹ | ۰/۸۰ | ۹/۴۴ | ۴/۰۲ | ۱۹/۰۸ | ۸/۸۵ |
| خرم‌آباد | ۵/۰۶ | ۲/۱۸ | ۰/۷۰ | ۰/۱۱ | ۶/۰۵ | ۱/۴۰ | ۱۱/۸۱ | ۳/۶۹ |
| خرم‌دره | ۵/۵۰ | ۳/۳۹ | ۵/۳۷ | ۲/۷۷ | ۱۵/۷۹ | ۸/۵۴ | ۲۶/۶۶ | ۱۴/۷۰ |

جدول ۳ - معادلات رگرسیونی یخبندان تابشی، فرارفتی، مختلط و خسارت‌زای کل با مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌ها

| پارامتر | آستانه دمایی (°C) | معادله | ضریب همبستگی |
|---------------------------|-------------------|---|--------------|
| درصد یخبندان تابشی | ۴ | $T4Rad = - 8.59 + 0.214 Lat + 0.0556 Lon + 0.00307 Ele$ | ۰/۸۳** |
| درصد یخبندان فرارفتی | صفر | $T0Rad = - 4.09 + 0.125 Lat + 0.0047 Lon + 0.00221 Ele$ | ۰/۸۲** |
| درصد یخبندان مختلط | ۴ | $T4Adv = - 6.31 + 0.260 Lat - 0.0402 Lon + 0.00145 Ele$ | ۰/۷۰* |
| درصد یخبندان خسارت‌زای کل | صفر | $T0Adv = - 4.08 + 0.140 Lat - 0.0112 Lon + 0.00062 Ele$ | ۰/۶۴* |
| درصد یخبندان تابشی | ۴ | $T4Mix = - 17.0 + 0.887 Lat - 0.211 Lon + 0.00605 Ele$ | ۰/۸۹** |
| درصد یخبندان فرارفتی | صفر | $T0Mix = - 5.92 + 0.463 Lat - 0.181 Lon + 0.00342 Ele$ | ۰/۸۱** |
| درصد یخبندان مختلط | ۴ | $T4Tot = - 31.9 + 1.36 Lat - 0.196 Lon + 0.0106 Ele$ | ۰/۹۲** |
| درصد یخبندان خسارت‌زای کل | صفر | $T0Tot = - 14.1 + 0.729 Lat - 0.188 Lon + 0.00625 Ele$ | ۰/۸۵** |

Lat عرض جغرافیایی (درجه)، Lon طول جغرافیایی (درجه)، Ele ارتفاع (متر). *، ** معنی‌دار در سطح ۵ و یک درصد.

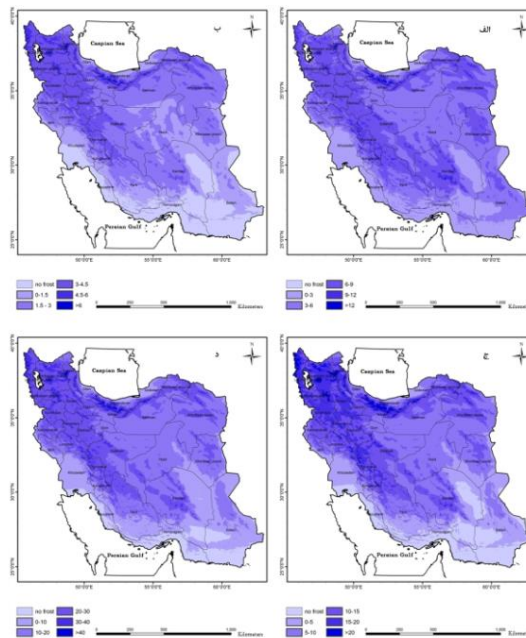
سیستان و بلوچستان و بخش‌های پراکنده‌ای از استان فارس دارای ریسک سرمای تابشی کمتر از ۳ درصد هستند. فراوانی نسبی وقوع سرماهای تابشی با آستانه ۴ درجه سلسیوس در نواحی شمال غربی کشور، سلسله جبال البرز و زاگرس و نواحی کوهستانی خراسان بزرگ و کرمان، و استان

این نوع سرما به طور کلی در تمام بخش‌های کشور اتفاق می‌افتد و هیچ نقطه‌ای از کشور از وقوع آن در امان نیست. بخش‌های جنوبی کشور، شامل نواحی کم‌ارتفاع استان خوزستان، تقریباً تمام استان بوشهر، بخش اعظم استان هرمزگان، نیمه شرقی استان کرمان، بخش‌های جنوبی استان

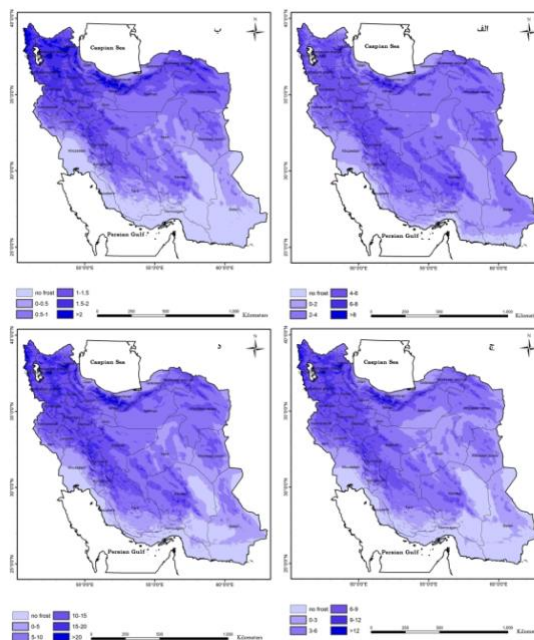
امانند. در استان‌های سیستان و بلوچستان، خراسان جنوبی، یزد، سمنان، خوزستان، فارس، کرمان، ایلام، کرمانشاه، و قم احتمال وقوع سرما به کمتر از ۳۰ درصد و در سایر استان‌ها احتمال وقوع سرما به ۴۰ درصد هم می‌رسد. استان‌های شمال غربی کشور با ریسک وقوع بیش از ۳۰ درصد درگیر سرما می‌باشند. مساحی نقشه نشان داد که ۷/۷ درصد مساحت کشور، فاقد ریسک سرماهای زیان‌بخش، ۲۲/۲ درصد، ریسک کمتر از ۱۰ درصد، ۳۸/۹ درصد، ریسک ۱۰ تا ۲۰ درصد، ۲۶/۲ درصد، ریسک ۲۰ تا ۳۰ درصد، ۴/۷ درصد، ریسک ۳۰ تا ۴۰ درصد و ۰/۳ درصد، ریسک بیش از ۴۰ درصد را دارند. نکته قابل توجه در مورد آستانه صفر درجه سلسیوس آن است که ریسک وقوع انواع یخبندان در این آستانه کمتر از آستانه ۴ درجه سلسیوس است. به طوری که در شکل ۴ الف نشان داده شده است، نوار باریکی از سواحل جنوبی کشور فاقد یخبندان تابشی با دمای کمتر از صفر درجه سلسیوس است. این در حالی است که در مورد آستانه ۴ درجه سلسیوس مشخص شد که در این نواحی امکان وقوع سرماهای تابشی کمتر از ۴ درجه سلسیوس وجود دارد. با حرکت به سمت نواحی مرتفع و کوهستانی و عرض‌های بالاتر، ریسک وقوع یخبندان تابشی نیز افزایش می‌یابد. در قله مرتفع کوهستان‌ها، اندازه ریسک به بیش از ۸ درصد می‌رسد. بر خلاف سواحل جنوبی، در سواحل شمالی کشور امکان وقوع یخبندان‌های تابشی همواره وجود دارد و هیچگاه صفر نیست. بخش‌هایی از استان‌های خوزستان، فارس، بوشهر، هرمزگان، کرمان و سیستان و بلوچستان ریسک وقوع تا ۲ درصد را تجربه می‌کنند. در بیابان‌های ایران مرکزی، مقدار ریسک به ۴ درصد هم می‌رسد. به تدریج با حرکت در دامنه‌های البرز و زاگرس و در نواحی شمال‌غربی کشور، مقدار ریسک افزایش یافته و به ۸ درصد و بیشتر می‌رسد. مساحی نقشه نشان داد که ۴ درصد مساحت کشور، فاقد ریسک یخبندان تابشی، ۲۲/۵ درصد کشور، ریسک کمتر از ۲ درصد، ۴۵/۰ درصد، ریسک ۲ تا ۴ درصد، ۲۵/۵ درصد، ریسک ۴ تا ۶ درصد، ۲/۷ درصد، ریسک ۶ تا ۸ درصد و ۰/۱ درصد، ریسک بیش از ۸ درصد را دارند.

فارس به بیش از ۹ درصد می‌رسد. مساحی نقشه نشان داد که ۱۹/۲ درصد کشور، ریسک کمتر از ۳ درصد، ۴۲/۵ درصد، ریسک ۳ تا ۶ درصد، ۳۴/۲ درصد، ریسک ۶ تا ۹ درصد، ۳/۹ درصد، ریسک ۹ تا ۱۲ درصد و ۰/۲ درصد، ریسک بیش از ۱۲ درصد را دارند. با وجود آن که امکان عبور سیستم‌های فشاری (کم فشار یا پرفشار) از قسمت‌های مختلف کشور وجود دارد اما ارزیابی کلی نقشه‌های ریسک وقوع سرمای فرارفتی با آستانه ۴ درجه سلسیوس (شکل ۳ ب) نشان می‌دهد که دمای هوا در بخش‌های جنوبی، جنوب غربی و جنوب شرقی هیچگاه به زیر ۴ درجه سلسیوس نمی‌رسد. مقایسه این نقشه با نقشه سرمای تابشی حاکی از آن است که ماکزیمم ریسک سرمای فرارفتی که نواحی بسیار مرتفع را در گستره کشور در بر می‌گیرد، نصف سرمای تابشی است. مساحی نقشه نشان داد که ۱۷/۲ درصد کشور، فاقد ریسک سرماهای فرارفتی، ۶۰ درصد، ریسک کمتر از ۳ درصد، ۲۲/۶ درصد، ریسک ۳ تا ۶ درصد، و ۰/۱ درصد، ریسک بیش از ۶ درصد را دارند. بررسی نقشه ریسک سرما مختلط با آستانه ۴ درجه سلسیوس (شکل ۳ ج) نشان می‌دهد که پتانسیل وقوع این نوع سرمای در گستره کشور بیش از سرماهای فرارفتی و تابشی است به طوری که فراوانی وقوع این نوع سرمای به بیش از ۲۰ درصد می‌رسد. وسعت منطقه بدون سرما (No Frost) در این نوع سرما در مقایسه با سرماهای مجزای تابشی و فرارفتی کاهش یافته و بخش‌های کمی از نواحی جنوب غربی و جنوب شرقی را شامل می‌شود. مساحی نقشه نشان داد که ۱۲/۵ درصد مساحت کشور، فاقد ریسک سرماهای مختلط، ۱۸/۰ درصد کشور، ریسک کمتر از ۵ درصد، ۳۲/۸ درصد، ریسک ۵ تا ۱۰ درصد، ۲۳/۶ درصد، ریسک ۱۰ تا ۱۵ درصد، ۱۱/۴ درصد، ریسک ۱۵ تا ۲۰ درصد و ۱/۷ درصد، ریسک بیش از ۲۰ درصد را دارند. بررسی عینی نقشه شکل ۳ د نشان می‌دهد که درصد کل سرماهای خسارت‌زا در گستره کشور به بیش از ۴۰ درصد می‌رسد که مربوط به نواحی مرتفع و قله کوهستانی (مناطق کشاورزی) است. بدون توجه به نوع سرما، تنها بخش باریکی از سواحل خلیج فارس و دریای عمان در استان‌های بوشهر، خوزستان، هرمزگان و سیستان و بلوچستان از خسارت سرماهای زیر ۴ درجه سلسیوس در

این نوع یخبندان در اکثر نواحی جنوبی کشور وجود ندارد (عریض شدن باند No Frost روی نقشه مؤید این مطلب است). بیشینه عبور امواج خسارت‌زا در کشور مقداری معادل ۲ درصد دارد که بخش اعظم آن در شمال‌غربی و غربی کشور و همچنین نوار کوهستانی البرز مربوط می‌شود. مقایسه این نقشه با نقشه ۳ نشان داد که تغییر آستانه از ۴ به صفر سبب می‌شود احتمال وقوع یخبندان به یک سوم کاهش یابد. مساحی نقشه نشان داد که ۲۳/۱ درصد مساحت کشور، فاقد ریسک یخبندان فرارفتی، ۱۴/۴ درصد کشور، ریسک کمتر از ۰/۵ درصد، ۳۰/۳ درصد، ریسک ۱ تا ۰/۵ درصد، ۲۰/۷ درصد، ریسک ۱ تا ۱/۵ درصد، ۹/۶ درصد، ریسک ۱/۵ تا ۲ درصد و ۱/۹ درصد، ریسک بیش از ۲ درصد را دارند. بررسی نقشه شکل ۴ چ نشان می‌دهد که یخبندان-های مختلط با آستانه صفر درجه سلسیوس اولاً، ریسک کمتری نسبت به آستانه ۴ درجه سلسیوس دارند. ثانیاً، ریسک وقوع آنها از یخبندان‌های مجزای تابشی و فرارفتی بیشتر است. حداکثر احتمال وقوع یخبندان مختلط به ۱۲ درصد می‌رسد که در نواحی مرتفع دیده می‌شود. باند عریضی نیز در جنوب کشور وجود دارد که فاقد یخبندان مختلط است. مساحی نقشه نشان داد که ۱۸/۹ درصد مساحت کشور، فاقد ریسک یخبندان مختلط، ۲۴/۹ درصد کشور، ریسک کمتر از ۳ درصد، ۳۰/۸ درصد، ریسک ۳ تا ۶ درصد، ۱۹/۹ درصد، ریسک ۶ تا ۹ درصد، ۰/۵ درصد، ریسک بیش از ۱۲ درصد را دارند. با در نظر گرفتن آستانه دمایی صفر درجه سلسیوس به عنوان آستانه خسارت‌زا برای محصول، احتمال وقوع یخبندان از ۴۰ درصد (در مورد آستانه ۴ درجه سلسیوس) به ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. در نواحی خشک مرکزی ایران، مقدار ریسک تا ۱۰ درصد می‌رسد. در دامنه منتهی به نواحی کوهستانی و مرتفع کشور مقدار شاخص ریسک به ۱۵ درصد و در قله مرتفع کشور به ۲۰ درصد و بیشتر می‌رسد. مساحی نقشه نشان داد که ۱۴/۱ درصد مساحت کشور، فاقد ریسک یخبندان، ۲۰/۰ درصد کشور، ریسک کمتر از ۵ درصد، ۳۳/۹ درصد، ریسک ۵ تا ۱۰ درصد، ۲۳/۴ درصد، ریسک ۱۰ تا ۱۵ درصد، ۷/۶ درصد،



شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی ریسک الف) یخبندان تابشی، ب) یخبندان فرارفتی، ج) یخبندان مختلط و د) یخبندان کل با آستانه ۴ درجه سلسیوس در گستره کشور



شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی ریسک الف) یخبندان تابشی، ب) یخبندان فرارفتی، ج) یخبندان مختلط و د) یخبندان کل با آستانه ۰ درجه سلسیوس در گستره کشور

با ترسیم نقشه ریسک یخبندان فرارفتی با آستانه صفر درجه سلسیوس (شکل ۴ ب) مشخص شد که پتانسیل وقوع

ریسک ۱۵ تا ۲۰ درصد و ۱/۰ درصد، ریسک بیش از ۲۰ درصد را دارند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا با تدوین یک الگوریتم سلسله مراتبی و سپس بر اساس معادلات حاصل، امکان برآورد ریسک یخبندان‌های تابشی و فرارفتی در گستره کشور از روی داده‌های دمای هوا، دمای نقطه شبنم، رطوبت نسبی، فشار بخار آب، ابرناکی، و سرعت باد به دست آمده از ۵۱ ایستگاه هواشناسی در هر نقطه از کشور فراهم گردید. عمده نتایج بدست آمده از تحقیق عبارتند از:

- مشخص شد که ارتباط نسبتاً قوی بین انواع یخبندان‌ها و مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌ها وجود دارد به طوری که ضریب همبستگی آن‌ها در برخی مواقع به ۰/۹ یا بیش‌تر می‌رسد. وجود این رابطه سبب شد تا با دقت نسبتاً قابل قبولی نقشه‌های یخبندان برای گستره کشور تهیه شود.
- نتیجه این مطالعه، آماده سازی نقشه‌های ریسک وقوع یخبندان و سرماهای زیان‌بخش است که می‌تواند برای انواع محصولات کشاورزی حساس به سرما (دمای زیر ۴ درجه سلسیوس) و یخبندان (دمای زیر صفر درجه سلسیوس) مورد استفاده قرار گیرد.
- مناطق شمال غربی کشور در مقایسه با سایر نواحی کشور استعداد بیشتری به وقوع و خسارت انواع مختلف یخبندان دارند. این در حالی است که در نواحی کم ارتفاع و عرض‌های پایین کشور، پتانسیل وقوع یخبندان کمتر است.

سپاسگزاری

این مقاله دستاورد طرح تحقیقاتی "تحلیل و پهنه‌بندی ریسک وقوع سرماهای تشعشعی و جبهه‌ای در گستره ایران" است که با حمایت مالی صندوق بیمه محصولات کشاورزی به شماره مصوب ۰۱۸/۹۰۲/۵۲۴۵ انجام شده است و بدینوسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- خلیلی، ع.، ۱۳۷۵. تغییرات سه‌بعدی میانگین‌های درازمدت سالانه دمای هوا در گستره ایران. نیوار، زمستان، ۳۲: ۱۵-۲۴.
- خلیلی، ع.، ۱۳۸۶. طرح ملی پهنه‌بندی هواشناسی کشاورزی ایران جهت بیمه در برابر خطرات خشکسالی، یخبندان و باران‌های سیل آسا. صندوق بیمه محصولات کشاورزی، تهران.
- سمیعی، م.، عسگری، م.، باستانی، خ.، ۱۳۷۶. شروع و خاتمه یخبندان در ایران. سازمان هواشناسی کشور، تهران.
- صدقی، ح.، ۱۳۷۸. نگرشی بر نحوه انجام مطالعات کاهش ضایعات ناشی از سرمازدگی محصولات کشاورزی، مجموعه مقالات کارگاه آموزشی سرما و یخ زدگی محصولات کشاورزی، سازمان حفظ نباتات وزارت کشاورزی.
- ضیایی، ع.، کامگار حقیقی، ع.، سپاسخواه، ع.، رنجبر، س.، ۱۳۸۵، تعیین اطلس احتمال وقوع کمینه دمای استان فارس با استفاده از آمار هواشناسی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۰(۳): ۲۷-۱۳.
- علیزاده، ا.، موسوی بایگی، م.، کمالی، غ.ع.، ۱۳۷۳. تاریخ وقوع اولین یخبندان‌های پاییزه و آخرین یخبندان‌های بهاره در خراسان. مجله نیوار، ۲۴: ۳۸-۵۶.
- 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): ۱۲۷-۱۳۵.
- کمالی، غ.ع.، ۱۳۸۰. بررسی سرماهای زیان‌بخش به کشاورزی ایران و تهیه اطلس اقلیمی آن. گزارش نهایی طرح پژوهشی، سازمان هواشناسی کشور.
- هاشمی، ف.، ۱۳۴۸، تجزیه و تحلیل استاتستیکی از سرمای تهران، سازمان هواشناسی کشور.
- Ahrens, C.D., 2009. Meteorology today. Brooks/Cole, Gengage learning.
- Caprio, J.M., 1961. A Rational Approach to the Mapping of Freeze Dates. Bull. Amer. Meteorol. 13: 339-348.

- Schmidlin, T.W., Dethier, B.C., 1986. A statistical analysis of Freeze hazard in New York State. *Phys. Geogr.*, 7(3): 246-257.
- Tait, A., Zheng, X., 2003. Mapping frost occurrence using satellite data. *J. Appl. Meteorol.*, 42(2): 193-203.
- Thom, H.C., Show, R.H., 1958. Climatological analysis of freeze data for Iowa, *Mon. Weather Rev.*, 86: 251-257.
- Trasmonte, G., Chavez, R., Segura, B., Rosales, J.L., 2008. Frost risks in the Mantaro river basin. *Adv. Geosci.*, 14(14): 265-270.
- Trewartha, G. T., 1954. *An Introduction to Climate*. McGraw-Hill, New York, N.Y., 402 pp.
- Waylen, P.R., 1988. Statistical Analysis of Freezing Temperatures in Central and Southern Florida, *J. Climatol.*, 8: 607-628.
- Esterling, D.R., 2002. Recent changes in frost days and the first in the United States, *BULL. Am. Meteorol. Soc.*, 83: 1327-1332.
- François, C., Bosseno, R., Vacher, J. J., Seguin, B., 1999. Frost risk mapping derived from satellite and surface data over the Bolivian Altiplano. *Agr. Forest. Meteorol.* 95(2): 113-137.
- Hewett, E. W., 1973. *Preventing Frost Damage to Fruit Trees*. 2d ed. Department of Scientific and Industrial Research Information Series, 86, DSIR, 55 pp.
- Kalma, J.D., Laughlin, G.P., Caprio, J.M., Hamer, P.J.C., 1992. *Advances in Bioclimatology, 2. The Bioclimatology of Frost*. Springer-Verlag Pub., Berlin.
- Rozenberg, N.J., Myers, R.E., 1962. The nature of growing season frost in and along the Platte valley of Nebraska. *Mon. Weather Rev.*, 11: 471-478.



Radiation, Advection and Mixed Freezing and Frost Risk Assessment and Zoning in Iran

J. Bazrafshan^{1*}, J. Rahimi²

Received: 02/11/2013

Accepted: 20/08/2014

Abstract

Each year, frost causes extensive damage to all aspects of agricultural production. Therefore, quantification of frost risk occurrence is one of the most important factors in implementing agricultural insurance policies. In this study, a hierarchical algorithm for detecting advection and radiation frost has been presented using data of a network consisting of 51 meteorological stations of Iran during the period 1951-2009. Using 3-hours interval data, the percentage of the frost events occurrence were determined and categorized into three frost classes (i.e. advection, radiation and mixed frost). These occurrence percentages, known as frost risk, were further analyzed according to their geographical characteristics (latitude, longitude and altitude). Finally, frost risk map of Iran was generated. Analysis of frost risk maps showed that occurrence risk of radiation and mixed frost are more than advection frost across the country. Besides, it was found that the maximum values of risk for radiation frost with the threshold temperatures of 4 and 0 °C are 10.62% (Shahrekd station) and 7.23% (Koohrang station). Corresponding values for advection frost are 7.22% and 4.07% respectively, both observed in Ardebil station.

Keywords: Advection Frost, Radiation Frost, Risk Quantification, Iran

¹ Assistant Professor (Corresponding Author), Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, Univ. of Tehran, Karaj 31587-77871, Iran

² Ph.D. Student, Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, Univ. of Tehran, Karaj 31587-77871, Iran.

(*Corresponding author email address: jbazr@ut.ac.ir)