

## پیشنهاد یک روش آماری - احتمالی برای شناسایی یخبندان‌های دیررس (مطالعه موردی یخبندان‌های یخبندان دیررس در باختر ایران)

حسن شادمان<sup>۱\*</sup>، مسعود جلالی<sup>۲</sup>، فرصت لطفی<sup>۳</sup>

\*۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، shadman.h@znu.ac.ir

۲- استادیار آب و هواشناسی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، mjalali@znu.ac.ir

۳- کارشناس ارشد آب و هواشناسی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، forsats.lotfi2014@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۶ تاریخ پذیرش: ۹۶

### چکیده

در این پژوهش کوشش شده است تا با به کارگیری روش‌های آماری و مدل‌سازی زنجیره مارکوف<sup>۱</sup>، روشی آماری-احتمالی برای شناسایی یخبندان دیررس در باختر ایران ارائه شود. برای رسیدن به این هدف، مشاهدات کمینه‌ی دمای ۳۷ ایستگاه همدید و ۲ ایستگاه کلیماتولوژی، در دوره ۳۵ ساله (۲۰۱۴-۱۹۸۰) از سازمان هواشناسی کشور فراهم شد. سپس با انجام میان‌یابی (درون‌یابی)<sup>۲</sup>، به روش کریجینگ<sup>۳</sup>، برای ۱۲۷۸۴ روز، در بازه زمانی موردبررسی، با تفکیک مکانی ۶×۶ کیلومتر و سیستم تصویری UTM یک پایگاه داده شبکه‌ای ساخته شد. در این پژوهش یخبندان دیررس برای هر نقطه، از منطقه مورد مطالعه، روزی است که در آن احتمال رخداد یخبندان ۱۰ درصد و کم‌تر باشد. از این برای هرروز از سال و هر یاخته (پیکسل) از منطقه‌ی موردبررسی، یک احتمال رخداد یخبندان برآورد شد. مراحل محاسباتی احتمال رخداد یخبندان، با استفاده از زنجیره مارکوف و در محیط نرم‌افزار متلب<sup>۴</sup> انجام شده و نقشه‌ها در محیط نرم‌افزار سورفر<sup>۵</sup> ترسیم شده است. دستاوردها نشان داد که در جنوب باختری منطقه تاریخ آغاز یخبندان دیررس بین ۷ تا ۱۵ اسفند و در شمال منطقه بین ۱ تا ۱۵ اردیبهشت است. شدت یخبندان‌های دیررس در جنوب باختری منطقه نسبت به شمال بیش‌تر است.

### کلمات کلیدی

یخبندان دیررس، احتمال، زنجیره مارکوف

1. Markov Chain Model

2. Interpolation.

3. Kriging.

4. MATLAB

5. Surfer.

## ۱-مقدمه

دما یکی از عناصر بسیار مهم سامانه‌ی آب‌وهوا است. چگونگی دما، نقشی تعیین‌کننده‌ی در چگونگی محیط و زیست‌بوم‌ها دارد. یکی از حالت‌های مهم دما که از دیرباز موردتوجه بوده؛ پدیده‌ی یخبندان است. یخبندان یکی از زیان‌بارترین مخاطرات طبیعی است که می‌تواند با زیان‌های مالی و جانی همراه باشد. واژه‌ی یخبندان برای کاهش دمای هوا به زیر صفر درجه سلسیوس به‌کاربرده می‌شود (طاووسی و درخشی، ۱۳۸۹:۹۰). رخداد دیرهنگام یخبندان در آغاز موسم رشد (بهار)، مایه نابودی جوانه و شکوفه‌های درختان میوه و دیگر فرآورده‌های کشاورزی می‌شود. همچنین رویداد زودهنگام آن در پایان موسم رشد (پاییز)، به بسیاری از فرآورده‌های کشاورزی برداشت‌نشده، زیان‌های جبران‌ناپذیری وارد می‌کند.

با نگرش به ویژگی‌های جغرافیایی باختر کشور (کوهستانی بودن) و قرارگیری این منطقه در گذرگاه توده‌هواهای گوناگون، هرساله سرما و یخبندان بخش‌هایی از این پهنه را در برمی‌گیرد که گاهی زیان‌های سنگینی را نیز به بخش‌های عمرانی و اقتصادی به‌ویژه کشاورزی وارد می‌کند. یخبندان دیررس، یکی از گونه‌های یخبندان است که معمولاً زیان‌های فراوانی به بخش کشاورزی وارد می‌کند؛ بنابراین بررسی یخبندان‌های دیررس از جنبه‌های گوناگون، موردتوجه پژوهشگران و دانشمندان دانش‌های طبیعی و جوی بوده است. برای نمونه Thom and Shaw (۱۹۵۸) در پژوهشی با نام، احتمال رخداد یخبندان‌های زودرس پاییزه و دیررس بهار، با به‌کارگیری میانگین و انحراف معیار کمینه‌ی دمای ماهانه، طول موسم رشد را برآورد کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که تاریخ رخداد یخبندان‌ها، تصادفی بوده و از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. Bootsma (۱۹۷۶) دمای کمینه و احتمال رویداد یخبندان را در زمین‌های کوهستانی در کانادا مورد مطالعه قرارداد و به این نتیجه رسید که میانگین زمان‌های برآورد شده‌ی رخداد یخبندان در ژرفای دره‌ها، ۳۴ روز زودتر و ۳۹ روز دیرتر نسبت به بلندی‌ها رخ می‌دهد. Baron (۱۹۸۲) یخبندان‌های ثبت‌شده در خاور ماساچوست، میان‌سال‌های ۱۹۸۰-۱۷۳۳ را بررسی کرد. Laughlin and Kalma (۱۹۸۷) با بررسی دمای کمینه در ۳۱ نقطه از یک چراگاه به گستره‌ی ۱۰۷ کیلومترمربع در طول ۳۰ شب زمستانی در سال ۱۹۸۲ و با به‌کارگیری یک الگوی رگرسیونی چند متغیره

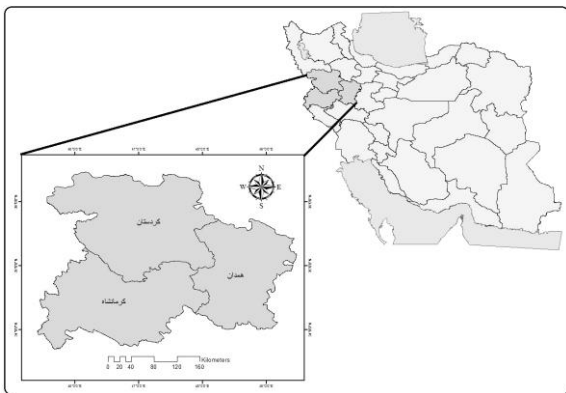
از عواملی چون سرعت باد در طول شب، هدر رفت‌های گرمایشی در همه طول‌موج‌ها در طول شب، موفق به ارائه الگوهای فضائی احتمال رخداد یخبندان در مقیاس محلی شدند. Weylon (۱۹۸۸) بر پایه واکاوی‌های احتمالی، ویژگی‌های یخبندان‌ها، تاریخ آغاز و پایان آن‌ها، سردترین دما و خطر پیش آمد دوره‌های سرد را در فلوریدای مرکزی، بررسی و توزیع احتمالی آن را پیش‌بینی کرده است. Weylon (۱۹۸۹) در پژوهشی با نام ویژگی‌های آماری تاریخ یخبندان و طول موسم رشد، با استفاده از کمینه‌ی دمای روزانه در ایستگاه‌های لیک سیتی و رگینا آپرپورت، به پیش‌بینی تاریخ رخداد یخبندان‌ها پرداخته است. Watkins با استفاده از الگوی رگرسیون خطی پی برد که طول مدت یخبندان نزدیک به دو روز در هر دهه کاهش یافته است؛ این کاهش را می‌توان با افزایش دما توجیه کرد. Boer et al (۱۹۹۳) بر پایه پنج ویژگی یخبندان، یکی از مناطق گندم خیز استرالیا را به چهار ناحیه همگن بخش کرده و بر مبنای رگرسیون وزنی به این نتیجه رسیدند که ارتفاع، بهترین عامل پیش‌بینی‌کننده ویژگی‌های یخبندان است و از این نظر عرض جغرافیایی و دیگر عوامل در جایگاه پس‌از آن قرار می‌گیرند. Kassomenos et al (۱۹۹۷) در یک بررسی موردی شرایط همدیدی همراه با یخبندان‌های پایان ماه مارس ۱۹۹۴ را در مقدونیه مرکزی با به‌کارگیری یک الگوی عددی همانندسازی کردند. شرایط همدیدی پایان این ماه نشان داد که یک جریان ضعیف باد برآمده از یک گردش و اچرخندی و وجود شیب ضعیف فشار در منطقه، مایه به وجود آمدن یخبندان شده است. Madelin and Beltrando (۲۰۰۵) پراکندگی مکانی یخبندان‌های دیررس بهار و عوامل تأثیرگذار بر روی آن را در ناحیه تاکداری شمال فرانسه مورد مطالعه قرار داده‌اند. Vavrus et al (۲۰۰۶) به کمک الگوی گردش عمومی جو، رفتار امواج سرما را واکاوی کرده و به این نتیجه رسیدند که در بخش‌های باختری امریکای شمالی و اروپا با شدتی کم بر روی کلاهک‌های قطبی، بسامد رخداد امواج سرما رو به افزایش است و دلیل آن را قرارگیری در بخش پایین‌دست سرد چال جوی می‌دانند. Kim and Byun (۲۰۱۶) با بکارگیری داده‌های تاریخی و جدید تغییرپذیری زمانی مکانی یخبندان‌های دیررس در شبه جزیره کره و ارتباط آن با گردش‌های جوی را بررسی کردند. تاریخ آغاز داده‌های جدید از ۱۹۰۴ بوده است. ایشان نشان دادند که بیش-

حوضه زاب پرداختند. یافته‌ها نشان داد روش شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی دماهای کمینه برای آشکار ساختن سرمای دیررس بهاره روش مناسبی است. در این پژوهش کوشش شده با بهره‌گیری از روش زنجیره مارکوف، یک روش نو برای شناسایی یخبندان‌های دیررس (بهاره) در باختر ایران ارائه شود.

## ۲- روش انجام تحقیق

### • محدوده مورد مطالعه

پهنه موردبررسی در این پژوهش دربرگیرنده استان‌های کرمانشاه، کردستان و همدان در باختر ایران است که در ۳۳ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۳۶ دقیقه طول خاوری جای گرفته است. گستره آن ۷۳۳۸۲ کیلومترمربع است و ۴/۴ درصد از گستره‌ی کشور را در بر گرفته است (شکل ۱). این ناحیه، از سوی باختر با کشور عراق، از شمال با استان‌های آذربایجان باختری، زنجان و قزوین و از خاور با استان مرکزی همچنین از جنوب با استان‌های ایلام و لرستان همسایه است.



شکل ۱- منطقه موردبررسی در باختر ایران

با نگرش به نقش پستی و بلندی‌های زمین بر دمای نواحی جغرافیایی نقشه ارتفاعی منطقه موردبررسی در شکل ۲ ارائه شد. بر این پایه کم‌ترین اندازه ارتفاع در منطقه ۱۱۷ متر و بیش‌ترین اندازه ارتفاع ۳۵۶۰ متر است. پست‌ترین زمین‌ها در نواحی جنوبی و جنوب باختری منطقه دیده می‌شود و با حرکت به سوی شمال و شمال خاوری بر اندازه ارتفاع زمین افزوده می‌شود.

ترین فراوانی یخبندان‌های دیررس در سال ۲۰۱۳ بوده است. یخبندان‌های بهاره در کره به طور میانگین بین ۱۷ مارس در Wando و ۱۷ می در Daegwallyeong رخ داده است؛ همچنین بین ارتفاع و عرض جغرافیایی با یخبندان‌های زودرس همبستگی مثبت وجود داشته است. Vitasse et al (۲۰۱۸) خطر یخبندان‌های بهاره بر درختان را ۵۰ نقطه سویس بررسی کردند. ایشان با بررسی چهار گونه درختی سیب، گیلان، صنوبر و راش نشان دادند که از سال ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۶ خطر یخبندان‌های دیررس برای درختانی که در ارتفاعات بیش از ۸۰۰ متر قرار دارند افزایش داشته ولی در ارتفاعات پایین‌تر این خطر تغییری نکرده است. به باور ایشان دلیل این گوناگونی رخداد یخبندان بهاره در تاریخ‌های متفاوت، در ارتفاعات پایین و بالاتر است. عساکره، (۱۳۸۹) احتمال پی‌آبی و تداوم یخبندان‌های زودرس و دیررس شهر زنجان را با استفاده از روش زنجیره مارکوف واکاوی کرد. ایشان احتمال رخداد یخبندان را در هرروز برای ماه فروردین ۰/۳۵۱۹ و برای مهرماه ۰/۰۳۷۵ محاسبه کرده و احتمال تداوم‌های ۲ تا ۵ روزه و نیز احتمال رخداد یخبندان را با شدت‌های گوناگون برای روزهای فروردین و مهر برآورد و ترسیم کرد. علیجانی و همکاران (۱۳۸۹) برای بررسی تداوم روزهای یخبندان در ایران، از الگوی زنجیره مارکوف، مرتبه‌های یک، دو و سه‌حالت بهره گرفتند و به این نتیجه رسیدند که تداوم روزهای یخبندان در ایران تصادفی نیست بلکه رخداد یخبندان به ویژگی‌های آب‌وهوایی روزهای گذشته وابسته است. منتظری (۱۳۸۹) در بررسی و واکاوی آماری پدیده‌ی یخبندان نجف‌آباد با به‌کارگیری دمای شبانه، رگرسیون خطی و روش من-کنندال به این نتیجه رسید که شمار روزهای یخبندان در نجف‌آباد کاهش نیافته، ولی رخداد یخبندان‌های شدید رو به کاهش بوده و از سوی دیگر فراوانی رخداد دماهای صفر درجه به‌شدت رو به افزایش بوده است. میرموسوی و بابایی (۱۳۹۰) برای بررسی توزیع زمانی-مکانی احتمال رخداد یخبندان استان زنجان، با استفاده از روش‌های توزیع نرمال، لوگ نرمال و توزیع احتمال تجمی یکنواخت به واکاوی احتمال رخداد یخبندان پرداخته و به این نتیجه رسیدند که نخستین یخبندان‌های منطقه پاییز بین ۷ مهر تا ۲۴ آبان و میانگین تاریخ پایان یخبندان‌ها از ۲۰ فروردین تا ۳۰ اردیبهشت رخ می‌دهد. جامعی و همکاران (۱۳۹۳) با به‌کارگیری یک الگوی پرسپترون چندلایه و شبکه عصبی مصنوعی به پیش‌بینی سرما و یخبندان‌های دیررس بهاره‌ی

شکل ۳- پراکنش ایستگاه‌های مورد استفاده در باختر ایران

### • روش واکاوی داده‌ها

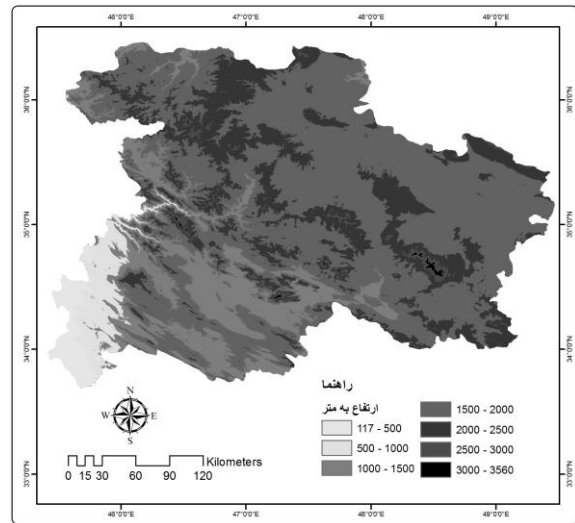
رویدادهای آب‌وهوایی به‌عنوان پدیده‌های تصادفی به‌گونه‌ای دقیق قابل پیش‌بینی نیستند ولی از مشاهده پیاپی آن‌ها آگاهی‌های سودمندی به دست می‌آید که از راه قوانین احتمالی درخور تعریف است. درک بسیاری از رویدادهای آب‌وهوایی وابسته به شناخت احتمال رخداد این فرآیندها است. بر پایه قوانین احتمال برخی پدیده‌های تصادفی شانس بیش‌تری برای رخداد دارند. فرآیندهای تصادفی به پدیده‌هایی گفته می‌شود که نتوان پیامد آن‌ها را پیش از رخ دادن به‌طور قطع آشکار کرد. یک فرآیند تصادفی به مجموعه‌ای از متغیرهای تصادفی که در راستای زمان اندازه‌های گوناگونی را نشان می‌دهد گفته می‌شود. مانند رخداد بارش با اندازه مشخص، خشک‌سالی، ترسالی و یخبندان. برای برآورد شانس رخداد پیشامدها نیاز است الگوی درخوری گزینش شود. بررسی این حالت‌های ناشناخته یا تصادفی و گزینش الگو را دانش احتمال بر دوش دارد (عساکره، ۱۳۸۷).

زنجیره مارکوف یک روش ریاضی برای الگوبندی فرآیندهای تصادفی است که توالی مشاهدات را در راستای زمان نشان می‌دهد. وابستگی این زنجیره به زمان یا از راه ضرایب همبستگی و یا با به‌کارگیری آرایه‌های احتمال انتقال بیان می‌شود (علیزاده، ۱۳۸۷).

هر برآمد فرایندهای تصادفی که تنها به برآمد پیشین خود پیوند دارد را فرآیند تصادفی با ویژگی مارکوف می‌گویند. بر این پایه فرآیند تصادفی که در ویژگی مارکوف صدق می‌کند فرآیند یا زنجیره‌های مارکوف نامیده می‌شود (عساکره، ۱۳۸۹: ۴). از این‌رو در این رویه احتمال رخداد یک حالت آب‌وهوایی در زمان  $t$  به چگونگی آن در زمان پیشین یعنی  $t-1$  بستگی دارد (علیزاده، ۱۳۸۷). برای نمونه احتمال یخبندان امروز با دمای روز پیشین بررسی می‌شود، بنابراین برای هر جفت رویدادهای پی‌درپی یک احتمال وجود دارد. از این‌رو، احتمال تغییر هر یک از مشاهدات از حالتی به حالت دیگر آشکار می‌شود. فرآیند مارکوفی پایه یکم را می‌توان به روش زیر نشان داد (عساکره، ۱۳۸۹):

$$y_t = py_{t-1} + e_i \quad (1)$$

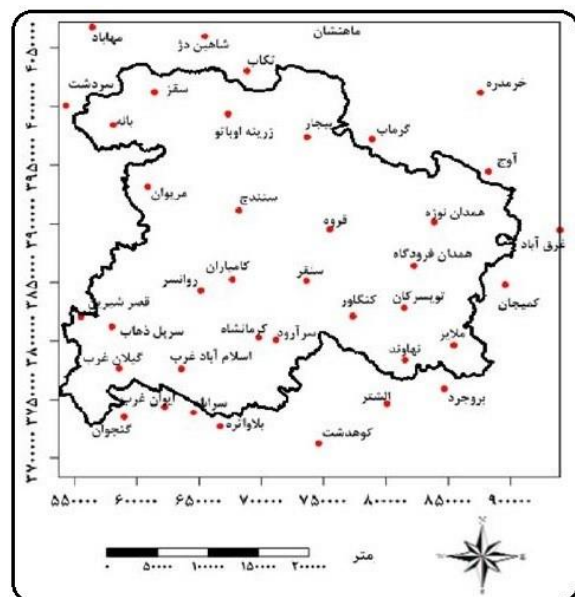
همچنین فرایندهای مارکوفی پایه‌ی یکم به‌مراتب بالاتر نیز قابل تعمیم است. در حالت کلی فرآیند پایه‌ی  $P$  را می‌توان به شکل زیر نوشت (همان منبع):



شکل ۲- اشکوب‌های ارتفاعی در منطقه مورد بررسی

### • داده‌ها

داده‌های به‌کاررفته در این پژوهش داده‌های شبکه‌ای دمای کمینه‌ی روزانه است. این داده‌ها دستاورد میان‌یابی دمای کمینه-ی ۳۷ ایستگاه همدید و ۲ ایستگاه اقلیم‌شناسی، در دوره ۳۵ ساله (۱۹۸۰-۲۰۱۴) و با استفاده از روش کریجینگ است. از این‌رو داده‌های شبکه‌ای دمای کمینه‌ی باختر ایران آرایه‌ای با ابعاد  $20 \times 33$  است؛ که در آن زمان بر روی سطرها و مکان بر روی ستون‌های جای دارد. چگونگی توزیع مکانی ایستگاه‌های مورد استفاده در شکل ۳ نشان داده شده است. چگونگی کاربرد میان‌یابی کریجینگ در آب‌وهوا شناسی به‌وسیله عساکره (۱۳۸۷) بیان شده است.



(۲)

$$y_t = P_1 y_{t-1} + P_2 y_{t-2} + \dots + P_p y_{t-p}$$

زنجیره مارکوف همچنین پیروی یک رویداد از تداوم‌های گوناگون را مورد بحث قرار می‌دهد. برای آگاهی بیش‌تر درباره‌ی زنجیره مارکوف و کاربرد آن در آب‌وهوا شناسی عساکره، ۱۳۸۷ همچنین عساکره و مازینی، ۱۳۸۹ را ببینید.

در بسیاری از پژوهش‌های آب‌وهوایی، تعریف پدیده مورد بررسی بخش مهمی از پژوهش را در برمی‌گیرد؛ زیرا بر پایه این تعریف است که دیگر بخش‌های پژوهش شکل می‌گیرد. منظور از بهار در این پژوهش، پایان موسم سرما و آغاز موسم گرما است که این موضوع لزوماً برابر با بهار گاه‌شماری نیست. از این‌رو چه‌بسا در یک ناحیه بهار واقعی زودتر از فروردین‌ماه و در ناحیه‌ای دیگر پس از فروردین‌ماه آغاز شود.

روی‌هم‌رفته یخبندان‌ها و به‌ویژه یخبندان‌های دیررس از زیان‌بارترین پدیده‌های هواسپهر به شمار می‌آیند؛ زیرا رخداد نابهنگام یخبندان در آغاز موسم رشد (بهار) مایه نابودی بافت‌های نارس گیاهان، جوانه‌ها و شکوفه‌های درختان می‌شود. یخبندان دیررس یک پدیده‌ی فرین و ناهنجار آب‌وهوایی است، چراکه در این هنگام از سال انتظار رخداد چنین پدیده‌ای نمی‌رود.

یخبندان دیررس به یخبندان‌هایی اشاره دارد که دیرتر از زمان مورد انتظار رخ می‌دهند. به بیان دیگر یخبندان‌هایی که پس از پایان موسم سرما و بیش‌تر در آغاز موسم گرم رخ می‌دهد یخبندان دیررس (بهاره) نامیده می‌شود. با این‌همه پدیده‌هایی همچون سرما و گرما پدیده‌هایی نسبی و تابعی از زمان و مکان هستند. برای نمونه یک روز با دمای ۵ درجه سلسیوس شاید برای یک نقطه جغرافیایی روزی سرد و برای نقطه‌ای دیگر روز غیر سرد شمرده شود (عساکره و شادمان، ۱۳۹۱). بدین‌سان مفهوم موسم سرد و گرم نیز پیرو ویژگی‌های جغرافیایی خواهد بود و آغاز و پایان آن‌ها لزوماً برابر با گاه‌شمار خورشیدی نخواهد بود؛ از این‌رو یخبندان‌های دیررس نیز تابعی از زمان و مکان بوده و برای مناطق جغرافیایی گوناگون در زمان‌های ناهمگونی رخ خواهند داد. برای نمونه ممکن است پایان موسم سرد در یک ناحیه نخستین روزهای اسفندماه و در ناحیه‌ای دیگر در روزهای پایانی فروردین‌ماه باشد. روشن است که زمان رخداد یخبندان دیررس نیز برای این دو ناحیه یکسان نیست. چراکه یخبندان‌های رخ داده در اسفندماه برای ناحیه نخست یخبندان دیررس و برای منطقه دوم یخبندانی معمولی به شمار می‌آید.

با نگرش به آنچه گفته شد به‌کارگیری یک آستانه نسبی برای تعریف مفهوم دیررس بودن امری بایسته به نظر می‌رسد. در این

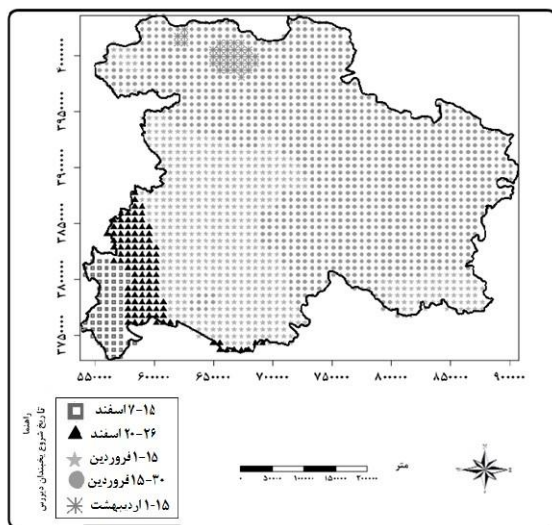
پژوهش کوشش شده با به‌کارگیری مفاهیم دانش احتمال و برقراری ارتباط میان این شاخه‌ی علمی و دانش آب و هواشناسی یک آستانه‌ی نسبی برای شناسایی یخبندان‌های دیررس ارائه شود. به باور بسیاری از متخصصین آب‌وهوا شناسی آماری رویدادهای فرین منطبق بر دنباله‌های توزیع آماری است. از این‌رو به‌کارگیری نمایه‌های چندکی روشی بایسته برای شناسایی چنین رویدادهایی است. همچنین توانایی این نمایه‌ها در آشکارسازی رویدادهای فرین نشان داده شده است.

با نگرش به آنچه گفته شد پایه نخست برای آشکارسازی زمان آغاز یخبندان دیررس، احتمال ۱۰ درصد در نظر گرفته شد. به گفتاری دیگر برای هر یک از یاخته‌های منطقه مورد بررسی نخستین روزی که احتمال یخبندان به ۱۰ درصد یا کمتر برسد، روز آغاز یخبندان‌های دیررس خواهد بود. با نگرش به این‌که صدک ۱۰ برابر با دهک اول داده‌ها یا همان ۱۰ درصد نخستین داده‌ها است می‌توان انتظار داشت که یخبندان‌های دیررس در این بخش از سری داده‌ها جای داشته باشند. همچنین گزینش صدک‌های کوچک‌تر ممکن است منجر به این موضوع شود که شماری از یخبندان‌های دیررس به‌عنوان یخبندان‌های بهنجار تعریف شود. گزینش آستانه‌های بزرگ‌تر نیز می‌تواند سبب شود تا بخشی از یخبندان‌های بهنجار به‌عنوان یخبندان دیررس دسته‌بندی شود. برای افزایش دقت، احتمال رخداد یخبندان برای هر یاخته در هرروز به‌طور جداگانه برآورد شد. از این‌رو ۳۶۶ نقشه احتمال رخداد یخبندان برای هر یک از روزهای سال به دست آمد؛ که پایه تصمیم‌گیری برای زمان آغاز یخبندان دیررس قرار گرفته‌اند. شکل ۴ نمونه‌ای از نقشه‌های یادشده برای روزهای نخست و پانزدهم ماه‌های بهاری است.

این شکل نشان‌گر توزیع مکانی احتمال رخداد یخبندان موسم بهار در روزهای نخست و پانزدهم ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد در باختر ایران است. آن‌گونه که دید می‌شود بیش‌ترین احتمال رخداد یخبندان برای روز نخست فروردین در بخش‌هایی از شمال تا خاور پهنه و بین ۶۰ تا ۸۰ درصد، است. از سوی دیگر در همین روز احتمال یخبندان در بخشی از جنوب باختری منطقه برابر با صفر است. این در حالی است که احتمال رخداد یخبندان در روز ۱۵ فروردین در نواحی شمالی بین ۳۰ تا ۴۰ درصد و در بخش‌هایی از خاور پهنه نیز احتمال رویداد یخبندان به ۲۵ تا ۴۰ درصد رسیده است. به‌طور کلی در هر دو روز احتمال رخداد یخبندان از باختر به خاور و از جنوب به شمال پهنه افزایش می‌یابد. افزایش احتمال رخداد یخبندان در خاور پهنه را می‌توان به ارتفاع بیش‌تر و افزایش احتمال این رویداد در شمال پهنه را به

بخش پست‌ترین ناحیه در پهنه‌ی موردبررسی و دارای ارتفاع ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر است.

در بخش‌های دیگر جنوب باختری منطقه سرآغاز یخبندان دیررس بین ۲۰ تا ۲۶ اسفندماه است. در این ناحیه به دلیل افزایش ارتفاع نسبت به ناحیه نخست، آغاز یخبندان دیررس، دیرتر از ناحیه اول است. در باختر، جنوب و بخشی از مرکز، بخشی‌هایی از جنوب خاوری و بخشی از شمال باختری به دلیل افزایش ارتفاع نسبت به جنوب باختری، تاریخ آغاز یخبندان دیررس در بهار گاه‌شماری و در روزهای نخست تا ۱۵ فروردین است. ارتفاع ناحیه‌ی یادشده بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر است. در بخش‌هایی از شمال و شمال خاوری، خاور و بخش‌هایی از جنوب خاوری پهنه، تاریخ آغاز یخبندان دیررس بین روزهای ۱۵ تا ۳۰ فروردین است. دلیل اینکه یخبندان دیررس در این بخش‌ها دیرتر آغاز شده ارتفاع بیشتر ناحیه‌ی یادشده نسبت به بخش‌های دیگر است. به‌گونه‌ای که ارتفاع در این ناحیه به ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر رسیده است. تنها در بخشی از شمال پهنه تاریخ آغاز یخبندان دیررس در ماه اردیبهشت و بین روز ۳۰ فروردین تا ۱۵ اردیبهشت است. این رویداد می‌تواند به دلیل افزایش ارتفاع (۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متر) و افزایش عرض جغرافیایی باشد.

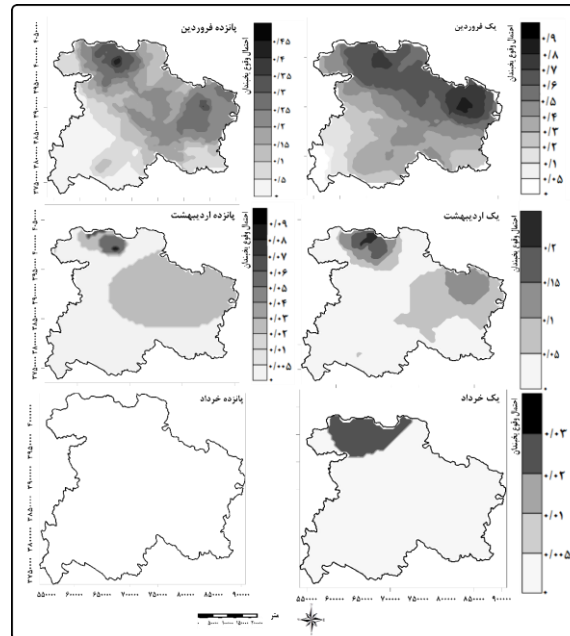


شکل ۵- توزیع مکانی تاریخ آغاز یخبندان دیررس بهاره در باختر ایران

### ویژگی‌های زمانی- مکانی دمای یخبندان‌های دیررس بهاره

شکل ۶ الف، توزیع مکانی میانگین دمای یخبندان‌های دیررس را نشان می‌دهد. کم‌ترین میانگین دمای یخبندان‌های دیررس در بخش‌هایی از شمال پهنه و بخش کوچکی از جنوب باختری منطقه بین ۳- تا ۲/۵- درجه سلسیوس بوده است. در دیگر

افزایش ارتفاع همچنین عرض جغرافیایی بالاتر نسبت داد. نمونه‌های تغییر در احتمال رخداد یخبندان برای یک مکان مشخص را می‌توان در نقشه‌ی مربوط به روزهای نخست و پانزدهم اردیبهشت همچنین روزهای نخست و پانزدهم خرداد نیز دید. برای نمونه در نخستین روز اردیبهشت‌ماه بیش‌ترین احتمال یخبندان در بخش‌هایی از شمال پهنه بین ۱۵ تا ۲۰ درصد است در حالی که در روز پانزدهم اردیبهشت بین ۵ تا ۹ درصد و در روز آغازین خرداد ۲ تا ۳ درصد است. در روز پانزدهم خرداد احتمال رویداد یخبندان در همه‌ی پهنه‌ی موردبررسی به صفر رسیده است. از این رو می‌توان دید که احتمال رخداد یخبندان در یک روز مشخص از یک ناحیه به ناحیه‌ای دیگر دچار دگرگونی می‌شود. همچنین احتمال رویداد این پدیده برای یک نقطه در روزهای گوناگون سال برابر نیست.

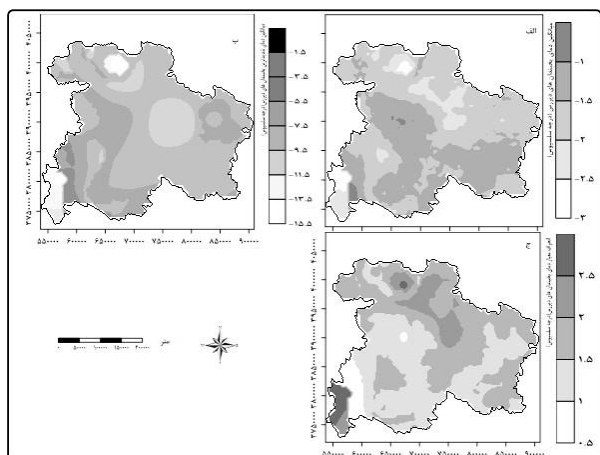


شکل ۴- احتمال رخداد یخبندان روزهای نخست و پانزدهم ماه‌های بهار در باختر ایران (۱۹۸۰-۲۰۱۴)

### ۳- نتایج

#### • توزیع زمانی- مکانی تاریخ آغاز یخبندان دیررس بهاره در باختر ایران

شکل ۵ توزیع مکانی تاریخ آغاز یخبندان دیررس در باختر ایران را نشان می‌دهد. آن گونه که دیده می‌شود در بخشی از جنوب باختری منطقه زمان آغاز یخبندان دیررس بین ۷ تا ۱۵ اسفندماه است. برای این بخش تاریخ آغاز یخبندان بهاره زودتر از دیگر بخش‌های پهنه و در زمستان گاه‌شماری روی داده است. این



شکل ۶- میانگین دما (الف)، دمای سخت‌ترین یخبندان‌ها (ب) و انحراف معیار دمای (ج) یخبندان‌های دیررس در باختر ایران

شکل ۶ ج، انحراف معیار دمای یخبندان‌های دیررس را نشان می‌دهد. بیشترین انحراف معیار دمای یخبندان (۲/۳ تا ۲/۸ درجه سلسیوس) در جنوب باختری و بخش‌هایی از شمال پهنه دیده می‌شود. کم‌ترین انحراف معیار دمای یخبندان (۰/۵ تا ۱/۱ درجه سلسیوس) در بخش‌هایی از باختر و مرکز روی داده - است. در سایر بخش‌های پهنه انحراف معیار دمای یخبندان‌های دیررس بین ۱/۴ تا ۲/۳ درجه‌ی سلسیوس است.

#### ۴- نتیجه‌گیری و بحث

در این پژوهش با به‌کارگیری روش‌های آماری و زنجیره مارکوف یخبندان‌های دیررس در باختر ایران شناسایی شد. با نگرش به وابستگی روی داده‌های فرین به ویژگی‌های جغرافیایی هر ناحیه و نیاز به آستانه‌ای نسبی برای تعریف دیررس بودن، یخبندان دیررس برای هر نقطه روزی تعریف شد که در آن نقطه احتمال رخداد یخبندان ۱۰ درصد و کم‌تر باشد. بر این پایه تاریخ آغاز یخبندان دیررس در منطقه بین ۷ اسفند تا ۱۵ اردیبهشت است نخستین یخبندان‌های دیررس در جنوب باختری یعنی پست‌ترین بخش منطقه دید می‌شود. در این بخش به دلیل ارتفاع کم‌بیش کم‌تر، یخبندان‌های دیررس، زودتر از بهار گاه‌شماری و در زمستان روی می‌دهد؛ بنابراین سخت‌ترین یخبندان‌ها در این بخش رخ می‌دهد و در بخش‌هایی از شمال منطقه که دارای بیش‌ترین ارتفاع و بیش‌ترین عرض جغرافیایی هستند؛ یخبندان‌های دیررس، دیرتر و در ماه اردیبهشت رخ می‌دهد. رخداد این یخبندان‌ها در موسم گرم باعث شده است تا یخبندان‌های این بخش ضعیف‌تر باشند. تاریخ‌های آغاز یخبندان دیررس که با به‌کارگیری آستانه‌ای نسبی و بر پایه دانش احتمال طراحی شده

بخش‌ها میانگین دمای یخبندان‌ها بیش‌تر بین ۱/۸- تا ۰/۹- بوده است. با چشم‌پوشی از ناحیه‌ی کوچک جنوب باختری، می‌توان گفت که نیمه‌ی شمالی پهنه‌ی موردبررسی، یخبندان‌های سخت‌تری داشته است.

در شکل ۶ ب، دمای سخت‌ترین یخبندان‌های دیررس در طول دوره آماری آمده است. کم‌ترین دماها یا به گفتار دیگر سخت‌ترین یخبندان‌های دیررس (۱۵/۵- تا ۱۲- درجه سلسیوس)، مربوط به جنوب باختری و بخش‌هایی از شمال پهنه است. رویداد یخبندان‌های با سختی بیش‌تر، نسبت در جنوب باختری منطقه و همچنین میانگین دمای کم برای یخبندان‌های این ناحیه که در شکل ۵ الف دیده شد؛ می‌تواند به دلیل زمان رخداد آن‌ها باشد. به یاد داریم که تاریخ آغاز یخبندان‌های دیررس در این ناحیه اسفندماه است. از این‌رو سامانه‌های بزرگ‌مقیاسی که سرما را به کشور وارد می‌کنند با شدت بیش‌تر و دمای کم‌تری عمل می‌کنند؛ بنابراین رخداد یخبندان دیررس در این ناحیه همراه با دماهای کم‌تری نسبت به نواحی دیگر خواهد بود. همچنین رخداد دماهای پایین در جنوب باختری پهنه‌ی موردبررسی به معنی وجود دمای بیش‌تر در دیگر نواحی، به شکل هم‌زمان با یخبندان‌های یادشده نیست. چراکه هماهنگ با رخداد چنین دماهایی در جنوب باختری منطقه، نواحی دیگر نیز که از ارتفاع و عرض جغرافیایی بالاتری برخوردار هستند؛ می‌توانند دماهای بسیار سردتری را تجربه کرده باشند. با این‌همه، چنین سرماهایی برای نواحی دیگر پیش از زمان آغاز یخبندان‌های دیررس آن‌ها روی داده است. از این‌رو نمی‌توان آن‌ها را به‌عنوان یخبندان دیررس به‌شمار آورد. بخش دیگری که پیشینه‌ی سختی یخبندان دیررس را نشان می‌دهد در شمال منطقه‌ی موردبررسی دیده می‌شود. در این ناحیه شیب تغییرات دمای یخبندان‌ها نیز نسبت به نواحی دیگر بیش‌تر است. سختی یخبندان‌های ناحیه‌ی یادشده افزون بر عرض جغرافیایی بالا برآمده از اثر ارتفاع زیاد است. افزایش سریع شیب تغییرات دما در این ناحیه نشان می‌دهد که نقش بلندی‌ها در کاهش دما بیش از عرض جغرافیایی بوده است. در بخش‌هایی از باختر، خاور، مرکز و جنوب، میانگین دمای یخبندان‌های دیررس بین ۴/۵- تا ۱/۵- درجه سلسیوس است. نواحی یادشده بخش‌های پر ارتفاع منطقه هستند و یخبندان‌های دیررس آن‌ها در ماه فروردین روی می‌دهد، بنابراین میانگین دمای یخبندان‌های دیررس این منطقه بیش‌تر و سختی یخبندان‌های رخ داده نسبت به جنوب باختری کم‌تر است.

ارتفاع در پژوهش‌های دیگری نیز گزارش شده است. برای نمونه بوئر و همکاران (۱۹۹۳) ارتفاع را بهترین عامل پیشینی کننده یخبندان دانسته‌اند. از این رو به کارگیری آستانه‌های نسبی برای آشکارسازی یخبندان‌های زودهنگام و دیررس پیشنهاد می‌شود.

است با ویژگی‌های جغرافیایی منطقه هماهنگی مناسبی دارد؛ به گونه‌ای که در نواحی گرم‌تر همچون زمین‌های پست رخدادهای یخبندان دیررس در پایان زمستان و در نواحی سردتر همچون بلندی‌های منطقه در آغاز بهار است. هماهنگی رخداد یخبندان با



## منابع

۱. جامعی، جاوید، مسگری، ابراهیم، عاشری، امامعلی، پاییز و زمستان ۱۳۹۳، پیش‌بینی سرما و یخبندان‌های دیررس بهاره‌ی حوضه زاب با استفاده از مدل پرسپترون چندلایه، مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، شماره ۲۳، صص: ۱۷۴-۱۵۸.
۲. طاووسی، تقی، درخشی جعفر، تابستان ۱۳۸۹، تحلیل آماری احتمال وقوع و دوره‌های بازگشت یخبندان زودرس و دیررس در زاهدان، مجله فضای جغرافیایی، شماره ۳۰، صص: ۱۰۴-۸۹.
۳. عساکره، حسین، پاییز ۱۳۸۷، بررسی احتمال تواتر و تداوم روزهای بارانی در شهر تبریز با استفاده از مدل زنجیره مارکوف، تحقیقات منابع آب، شماره ۲، صص: ۵۶-۴۶.
۴. عساکره، حسین، مازینی، فرشته، بهار ۱۳۸۹، بررسی احتمال وقوع روزهای خشک در استان گلستان با استفاده از مدل زنجیره مارکوف، جغرافیا و توسعه، شماره ۱۷، صص: ۲۴-۹.
۵. عساکره، حسین، بهار ۱۳۸۹، احتمال تواتر و تداوم یخبندان‌های زودرس و دیررس در شهر زنجان، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۱، صص: ۱-۱۶.
۶. عساکره، حسین، شادمان، حسن، زمستان ۱۳۹۱، تحلیل هم‌دید موج‌های گرمایی فراگیر در ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان، ۴۳۳ ص.
۷. علیجانی، بهلول، محمودی، پیمان، ریگی چاهی، اله بخش، خسروی، پرویز، پاییز ۱۳۸۹، بررسی تداوم روزهای یخبندان در ایران، با استفاده از مدل زنجیره مارکوف، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۳، صص: ۲۰-۱.
۸. علیزاده، امین، ۱۳۸۷، اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، ۱۳۸۷، چاپ بیست و هشتم، ۸۱۱ ص.
۹. منتظری، مجید، تابستان ۱۳۸۹، تحلیل آماری یخبندان‌های کشاورزی در شهرستان نجف‌آباد، فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی، شماره ۴، صص: ۳۸-۲۷.
۱۰. میرموسوی، سیدحسین، سیامک، خنجر، بهمن ۱۳۸۸، مدل سازی بارش کرمانشاه جهت تحلیل دوره‌های خشکی متوالی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان، ۲۰۱ ص.
۱۱. میرموسوی، سید حسین، حسین بابایی، مصطفی، پاییز ۱۳۹۰، مطالعه توزیع زمانی-مکانی احتمال وقوع یخبندان در استان زنجان، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره پیاپی ۴۳، شماره ۳، صص: ۱۸۴-۱۶۷.
12. Baron, W.R., Gordon, G.A., Borns Jr, H.W. and Smith, D.C., 1984. Frost-free record reconstruction for eastern Massachusetts, 1733-1980. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2), pp.317-319.
13. Boer, R., Campbell, L.C. and Fletcher, D.J., 1993. Characteristics of frost in a major wheat-growing region of Australia. *Australian Journal of Agricultural Research*, 44(8), pp.1731-1743.
14. Bootsma, A., 1976. Estimating minimum temperature and climatological freeze risk in hilly terrain. *Agricultural Meteorology*, 16(3), pp.425-443.
15. Kassomenos, P. H. A. Flocas, S. Lykoudis, and M Petrakis. 1997. A study of forst events in areas characterized by the absence of observations. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 62.pp. 249-256.
16. Kim, J.A. and Byun, H.R., 2016. Spatiotemporal variability of the latest frosts in Korean Peninsula and causes of atmospheric circulation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 128(5), pp.663-675.
17. Laughlin, G.P. and Kalma, J.D., 1987. Frost hazard assessment from local weather and terrain data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 40(1), pp.1-16.
18. Madelin, M. and Beltrando, G., 2005. Spatial interpolation-based mapping of the spring frost hazard in the Champagne vineyards. *Meteorological Applications*, 12(1), pp.51-56.
19. Thom, H.C.S. and Shaw, R.H., 1958. Climatological analysis of freeze data for Iowa. *Monthly Weather Review*, 86(7), pp.251-257.
20. Vavrus, S., Walsh, J.E., Chapman, W.L. and Portis, D., 2006. The behavior of extreme cold air outbreaks under greenhouse warming. *International Journal of Climatology*, 26(9), pp.1133-1147.

21. Vitasse, Y., Schneider, L., Rixen, C., Christen, D., & Rebetez, M. 2018. Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 60-69.
22. Watkins, C., 1991. The annual period of freezing temperatures in central England: 1850–1989. *International journal of climatology*, 11(8), pp.889-896.
23. Waylen, P.R., 1988. Statistical analysis of freezing temperatures in Central and Southern Florida. *International Journal of Climatology*, 8(6), pp.607-628.
24. Waylon, P. R. and Leboutillier, D. W. 1989: stochastic analysis of cold seplls *Appl. Meteor.* 27(1), pp: 67-76.