

## تحلیل روند یخبندان‌های بهاره، پاییزه و طول فصل بدون یخبندان و بررسی احتمال رخداد آن بر پایه شاخص دورپیوندی انسو در نمونه‌های اقلیمی ایران

جلیل هلالی<sup>۱</sup>، ابراهیم اسعدی اسکویی<sup>۲\*</sup>، توران حسین زاده<sup>۳</sup>، مجید چراغعلی زاده<sup>۴</sup>، منصوره کوهی<sup>۵</sup>

۱- گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران،

کرج، ایران

۲- استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، پژوهشکده اقلیم‌شناسی و تغییر اقلیم، مشهد، ایران

۳ و ۴- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۵- استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، پژوهشکده اقلیم‌شناسی و تغییر اقلیم، مشهد، ایران

### چکیده

رخداد پدیده‌های حدی اقلیمی از جمله یخبندان سالانه باعث خسارت به بخش‌های کشاورزی می‌گردد. بررسی روند رخداد این پدیده از نظر تاثیر تغییرات اقلیمی و همچنین مدیریت آن می‌تواند در کاهش خسارت‌های احتمالی مفید باشد. در این مطالعه تلاش شد وضعیت آخرین یخبندان‌های بهاره، اولین یخبندان پاییزه و طول دوره بدون یخبندان با شدت‌های مختلف در نمونه‌های اقلیمی ایران در دوره بلندمدت اقلیمی ۱۹۶۰-۲۰۱۹ مورد ارزیابی قرار گرفته و با استفاده از شاخص دورپیوندی ENSO احتمالات رخداد آن بررسی و ارزیابی گردد. در نهایت روند این تاریخ‌ها و طول دوره بدون یخبندان با روش من-کندال اصلاح شده و تخمینگر شیب سن تعیین گردید. نتایج نشان داد زودترین و دیرترین یخبندان‌های بهاره در ایستگاه تهران و سقز به ترتیب در روزهای ۵۱ تا ۶۴ و ۹۴ تا ۱۰۹ جولایوسه؛ دیرترین و زودترین یخبندان پاییزه در ایستگاه تهران و سقز به ترتیب در ۳۴۶ تا ۳۶۱ و ۲۹۷ تا ۳۰۸ روز جولایوسه رخ داده است. بیشترین و کمترین طول فصل بدون یخبندان با شدت‌های مختلف در ایستگاه تهران (با اقلیم خشک) و سقز (اقلیم مدیترانه‌ای) به ترتیب ۲۸۱ تا ۳۱۰ و ۱۸۸ تا ۲۱۴ روز در سال است. همچنین نتایج نشان داد احتمال رخداد تاریخ یخبندان بهاره، پاییزه و در نتیجه طول دوره بدون یخبندان در فازهای مختلف ENSO نسبت به دوره بلندمدت با تقدم یا تاخر همراه است که بسته به شدت یخبندان و نوع اقلیم متفاوت است. بنابراین با توجه به قابل پیش‌بینی بودن فازهای مختلف ENSO می‌توان از آن به عنوان نوعی سامانه پشتیبانی تصمیم در امر مدیریت یخبندان‌های بهاره، پاییزه و طول دوره بدون یخبندان استفاده کرد. تحلیل روند نیز نشان می‌دهد رخداد آخرین یخبندان بهاره، اولین یخبندان پاییزه و طول دوره بدون یخبندان بسته به نوع اقلیم و شدت یخبندان در دوره ۶۰ ساله متفاوت است به طوری که در بهار زودتر و پاییز دیرتر رخ داده است. بر اساس نتایج روند طول دوره بدون یخبندان در ایستگاه تهران و مشهد افزایشی و ایستگاه‌های اصفهان و سقز کاهش‌ی است.

**کلید واژه‌ها:** روند، سامانه پشتیبانی تصمیم، طول دوره بدون یخبندان، یخبندان بهاره، یخبندان پاییزه.

## مقدمه

روند کاهش شاخص‌های مرتبط با یخبندان را در دوره ۱۹۵۱-۲۰۰۳ اثبات کردند. مطالعه ساری‌صراف و همکاران (۱۳۸۹) نشان می‌دهد رخداد دیرتر یخبندان‌های بهاره و زودتر یخبندان‌های پاییزه موجب کاهش طول فصل رشد به میزان ۱/۶ روز در سال شده است. Rahimi و همکاران (۲۰۱۷) روند رخداد آخرین یخبندان بهاره در ایران را در دهه بعد از ۱۹۸۰ روند کاهش ۱/۴ روز در دهه ذکر کرده‌اند. Biazar and Banan Ferdosi (۲۰۲۰) نشان دادند که تاریخ رخداد آخرین یخبندان بهاره در بخش غربی دریای کاسپین زودتر و در بخش شرقی دیرتر اتفاق خواهد افتاد. به عقیده Helali و همکاران (۲۰۲۱a) روند رخداد یخبندان و سرمازدگی‌های بهاره به طرف اوایل بهار و اواخر زمستان جابجا شده است. تاخیر یا تقدم در رخداد یخبندان بهاره و پاییزه موجب تغییر دوره بدون یخبندان و تغییرات فنولوژیکی در گیاهان خواهد شد (Cooter and LeDuc, ۱۹۹۵؛ Meehl و همکاران، ۲۰۱۲؛ Zhong و همکاران، ۲۰۱۷). فصل بدون یخبندان فاصله زمانی آخرین یخبندان بهاری و اولین یخبندان پاییزی است که بر طول دوره‌های فنولوژی و در نتیجه الگوهای کشت منطقه تاثیرگذار است (Menzel و همکاران، ۲۰۰۳؛ Vitasse و همکاران، ۲۰۱۴). به عنوان نمونه در مطالعه Zhang و همکاران (۲۰۲۰) در ایالات متحده رخداد زودتر آخرین یخبندان‌های بهاری، رخداد دیرتر یخبندان‌های زودرس پاییزه و طولانی‌تر شدن طول فصل بدون یخبندان دیده می‌شود. نمونه مشابه این وضعیت در کشور ایران نیز دیده می‌شود (Keikhosravi و همکاران، ۲۰۲۱). در مطالعات انجام شده خلاءهایی دیده می‌شود که از آن جمله عدم استفاده از داده‌های بلندمدت اقلیمی، عدم طبقه‌بندی شدت یخبندان‌ها و بررسی احتمال وقوع این پدیده است. بنابراین هدف اصلی این مطالعه بررسی روند رخداد این پدیده در آستانه‌های مختلف یخبندان (ضعیف، متوسط و شدید) و همچنین احتمال وقوع در فازهای مختلف شاخص دورپیوندی ENSO و کل دوره ۶۰ ساله با روش ویبول می‌باشد. در مطالعه Helali و همکاران (۲۰۲۱b) تاثیر فاز و شدت الگوی دورپیوندی ENSO بر بی‌هنجاری بارشی نشان داده است که این شاخص قادر است این بی‌هنجاری‌ها را از دیدگاه سینوپتیکی-دینامیکی توجیه کند. از آنجایی که مقدار و نوع

رخداد پدیده‌های حدی اقلیمی به خصوص یخبندان سالانه خطرات جبران‌ناپذیری در بخش کشاورزی و منابع طبیعی وارد می‌کند (Xiao و همکاران، ۲۰۱۸؛ Sangüesa-Barreda و همکاران، ۲۰۲۱؛ Kollas و همکاران، ۲۰۱۴؛ هلالی و رسولی، ۱۳۹۵) این پدیده با شدت‌های ضعیف تا شدید اتفاق می‌افتد که در میزان خسارت وارده موثر خواهد بود (خلیلی، ۱۳۹۳؛ Helali و همکاران، ۲۰۲۱a). به این دلیل این پدیده حدی اقلیمی در اقصی نقاط جهان از دیدگاه‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است (بررسی آغاز و پایان یخبندان آفاشریعتمداری و همکاران، ۱۳۹۵؛ احتمال رخداد، Watkins, ۱۹۹۹؛ تحلیل روند و تاثیر شاخص‌های بزرگ مقیاس اقلیمی به خصوص ENSO<sup>1</sup> و NAO<sup>2</sup> بر وقوع آن Zhang و همکاران، ۲۰۲۰؛ Helali و همکاران، ۲۰۲۱a). وضعیت اقلیمی هر منطقه علاوه بر تاثیرپذیری از عوامل محلی می‌تواند تحت تاثیر شاخص‌های بزرگ مقیاس مثل الگوهای دورپیوندی نیز باشد (Ahmadi, ۲۰۱۴) که در واقع به ارتباط همزمان یا با تاخیر بین عناصر اقلیمی یک مکان با نوسانات الگوهای فشاری و دمایی سطح دریا در نقاط دیگر تعریف می‌شود (قویدل رحیمی و همکاران، ۱۳۹۳). بنابراین متغیرهای مرتبط با دما به خصوص پدیده یخبندان نیز از این پدیده مستثنی نیستند (Helali و همکاران، ۲۰۲۱a؛ رضایی بنفشه و همکاران، ۱۳۹۸). اکثر مطالعات روند کاهش طول دوره یخبندان را نشان می‌دهند (Scheifinger و همکاران، ۲۰۰۳؛ Mateescu و همکاران، ۲۰۰۷؛ Bootsma, ۱۹۹۴؛ Griffiths and Bradley, ۲۰۰۷؛ Brown و همکاران، ۲۰۱۰؛ رضایی بنفشه و همکاران، ۱۳۹۸؛ Helali و همکاران، ۲۰۲۱a). این کاهش روند رخداد موجب افزایش طول دوره رشد یا دوره بدون یخبندان نیز می‌گردد (Plummer, ۱۹۹۹). کشور ایران در منطقه‌ای از آسیا قرار گرفته است که اقلیم آن خشک و نیمه خشک بوده و در بخش‌های متعددی از آن پدیده یخبندان‌های پاییزه و بهاره به وفور رخ داده و موجب خسارت می‌شود که در مطالعات متعدد نیز اثبات شده است. به عنوان نمونه رحیم‌زاده و همکاران (۱۳۸۸)

<sup>1</sup> El Nino Southern Oscillation Index

<sup>2</sup> North Atlantic Oscillation

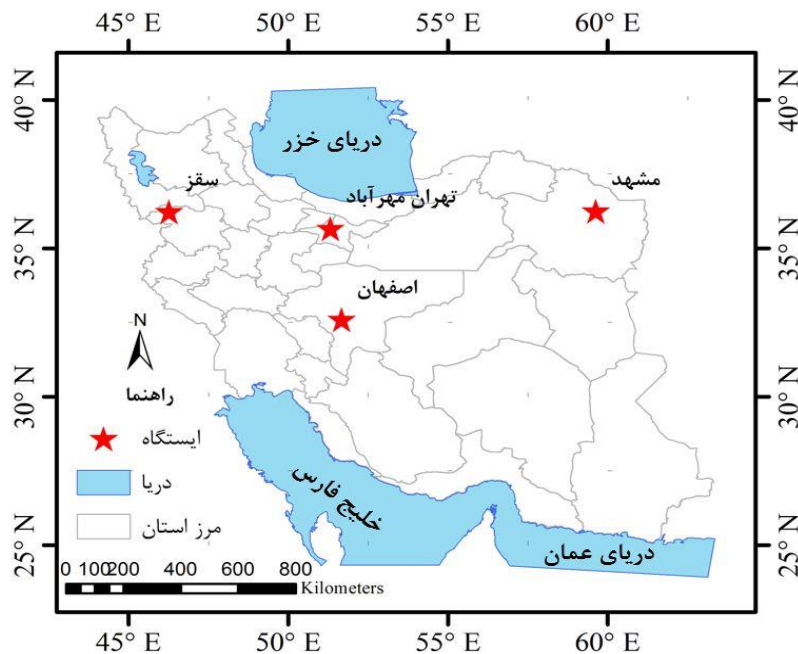
شاخص ENSO چند ماه قبل از رخداد یخبندان قابل پیش‌بینی است می‌تواند به عنوان نوعی سامانه پشتیبانی تصمیم<sup>۱</sup> در مدیریت تاریخ رخداد یخبندان با شدت‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد به طوری که در مطالعه Helali و همکاران (۲۰۲۱ا) مشخص شده است بی‌هنجاری رخداد یخبندان و سرمازدگی‌های بهاری در شدت‌های مختلف ENSO نسبت به فازهای مختلف آن شدیدتر است. یکی از خلاءهای این مطالعه عدم استفاده از مفهوم احتمال رخداد با استفاده از توزیع‌های احتمالاتی تجربی مثل ویبول است. این نوع تحلیل بر پایه کل دوره آماری و فازهای مختلف ENSO می‌تواند وضعیت رخداد این پدیده را مشخص نماید.

#### مواد و روش بررسی

##### منطقه مورد مطالعاتی و طول دوره آماری

موقعیت کشور ایران از لحاظ توپوگرافیکی به صورتی است که بخش غربی تا جنوبی را رشته کوه زاگرس و نوار شمالی را رشته کوه البرز احاطه کرده و موجب تشکیل دو پهنه فراخشک دشت کویر و کویر لوت در فلات مرکزی ایران شده است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد در اکثر مناطق اقلیمی و جغرافیایی ایران پدیده سرمازدگی و یخبندان با شدت‌های مختلف رخ می‌دهد ولی مناطق با عرض‌های جغرافیایی بالا و همچنین مرتفع پتانسیل یخبندان و سرمازدگی بالایی دارند (ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۹۱؛ Maryanaji و همکاران، ۲۰۱۸؛ Helali و همکاران، ۲۰۲۱ا؛ Hosseini و همکاران، ۲۰۲۱). با توجه تنوع اقلیمی کشور ایران تلاش شد در این مطالعه ایستگاه‌های منتخب از هر اقلیم با طول دوره آماری بلندمدت که رخداد یخبندان در آن‌ها بیشتر شایع است انتخاب گردد. در جدول شماره ۱ مشخصات جغرافیایی و اقلیمی (روش دمارتن) و شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه ارائه شده است.

<sup>1</sup> Decision Support System



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه در گستره ایران

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی و مشخصات اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه بر اساس روش دومارتن

ردیف	نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا	شاخص اقلیمی	نوع اقلیم
۱	اصفهان	۳۲/۶۲	۵۱/۶۷	۱۵۵۰	۴/۷	فراخشک
۲	تهران (مهرآباد)	۳۵/۶۸	۵۱/۳۲	۱۱۹۱	۸/۵	خشک
۳	مشهد	۳۶/۲۷	۵۹/۶۳	۹۹۹	۱۰/۶	نیمه خشک
۴	سقز	۳۶/۲۵	۴۶/۲۷	۱۵۲۳	۲۳/۷	مدیترانه‌ای

داده‌های مورد استفاده و استخراج دماهای بحرانی سرمازدگی در این مطالعه از داده‌های کمینه روزانه ۴ ایستگاه سینوپتیک با طول دوره آماری ۶۰ ساله از ۱۹۶۱-۲۰۲۰ در نمونه‌های اقلیمی مختلف در مناطق جغرافیایی مختلف استفاده شد. ایستگاه‌های فوق دارای داده کامل آماری بوده و نیاز به بازسازی نداشتند. دماهای بحرانی آخرین یخبندان بهاره و اولین یخبندان پاییزه براساس معیار توصیه شده توسط سازمان هواشناسی جهانی (۰/۰ تا کمتر از ۲/۲- درجه سلسیوس) و تاریخ رخداد آن بر اساس روز جولوسوس استخراج گردید که در آن یخبندان ضعیف (۰/۰ تا ۱/۱- درجه سلسیوس)، متوسط (۱/۱- تا ۲/۲- درجه سلسیوس) و شدید (کمتر از ۲/۲- درجه سلسیوس) در نظر گرفته شد (خلیلی، ۱۳۹۳). سپس اختلاف بین آخرین یخبندان بهاره و اولین یخبندان پاییزه به عنوان طول دوره بدون یخبندان تعریف گردید.

در ادامه بر مبنای الگوی دورپیوندی ENSO اقدام به محاسبه تاریخ آخرین یخبندان بهاره و اولین یخبندان پاییزه با شدت‌های مختلف گردید. به منظور طبقه‌بندی شدت پدیده ENSO از شاخص دورپیوندی نینوی اقیانوسی<sup>۱</sup> (ONI) در منطقه Nino 3.4 (۵ درجه شمالی و ۵ درجه جنوبی و ۱۷۰-۱۲۰ غربی) استفاده شد. فاز گرم یا النینو (سرد یا لانینا) این شاخص وقتی است که مقدار متوسط سه ماهه آن در ۵ ماه متوالی بالاتر از ۰/۵+ (کمتر از ۰/۵-) باشد. النینوی ضعیف، متوسط و قوی (لانینای ضعیف، متوسط و قوی) زمانی است که این شاخص به ترتیب ۰/۵+ تا ۰/۹+، ۱/۰+ تا ۱/۴+ و بیشتر از ۱/۵+ (۰/۵- تا ۰/۹-، ۱/۰- تا ۱/۴- و کمتر از ۱/۵-) باشد. سپس، احتمال آخرین یخبندان بهاره و زودترین یخبندان پاییزه و طول دوره فصل رشد نیز با استفاده از معادله ویبول به صورت زیر استخراج گردید:

تحلیل احتمال رخداد در کل دوره و فازهای مختلف ENSO

<sup>1</sup> Oceanic Nino Index

فرض صفر بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری‌های زمانی دلالت دارد و پذیرش فرض یک نشانگر وجود روند در سری‌ها می‌باشد. در این روش ابتدا اختلاف بین تک تک مشاهدات با یکدیگر محاسبه شده و تابع علامت بر آن اعمال و پارامتر S به شرح زیر استخراج گردید:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (2)$$

که n تعداد مشاهدات سری،  $x_j$  و  $x_k$  به ترتیب داده‌های زام k و k ام سری می‌باشد. در مرحله بعد تابع علامت به شرح زیر محاسبه شد:

$$\text{sgn}(n) = \begin{cases} +1 & \text{if } \dots (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } \dots (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } \dots (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

سپس با استفاده از معادله ۴ واریانس محاسبه گردید:

$$\begin{cases} \text{Var}(S) = \frac{n - (n-1)(2n+5) - \sum_{t=1}^m t(t-1)(2t-5)}{18} & \dots \text{if } \dots n > 10 \\ \text{Var}(S) = \frac{n - (n-1)(2n+5)}{18} & \dots \text{if } \dots n < 10 \end{cases} \quad (4)$$

روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن روند نزولی در نظر گرفته می‌شود (حجاس و همکاران، ۱۳۸۷). در نهایت شیب تغییرات تاریخ رخداد سرمازدگی و یخبندان نیز با روش Sen محاسبه شد. اساس این روش محاسبه شیب میانه سری زمانی و قضاوت نمودن در مورد حقیقی بودن این شیب در سطوح معناداری مختلف می‌باشد. برای محاسبه این متغیر آماری در مرحله اول شیب بین هر جفت داده سری زمانی با کمک رابطه ۷ به دست آمد:

$$Q = \frac{X_j - X_i}{j - i} \quad \text{for } 1, \dots, N \quad (5)$$

که  $N$  برابر با تعداد جفت داده‌ها بوده و با معادله ۸ محاسبه می‌شود (n تعداد داده‌های سری زمانی):

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \quad (6)$$

سپس سری شیب‌های به دست آمده از کوچک‌ترین به بزرگ‌ترین مرتب شده و میانه (Qmed) یا همان شیب خط

$$P = \frac{m}{n+1} \quad (7)$$

که در آن P احتمال رخداد (عکس دوره بازگشت)، m شماره ردیف و n تعداد سال‌های آماری مورد استفاده می‌باشد.

### تحلیل روند

به منظور بررسی نوع و معناداری روند از روش Mann-Kendall اصلاح شده (Mann, ۱۹۴۵; Kendall, ۱۹۷۵) و شیب روند از تخمینگر شیب Sen (Sen, ۱۹۶۸) استفاده گردید. Helali و همکاران (۲۰۲۱a) با این روش وضعیت یخبندان و سرمازدگی‌های ایران را مطالعه کرده و نشان دادند این دو روش می‌توانند برای روندیابی مورد استفاده قرار گیرند. در این مطالعه پیش از تحلیل روند اثر خودهمبستگی توسط آزمون pre-whitening حذف گردید (Yue و همکاران، ۲۰۰۲). در روش Mann-Kendall اصلاح شده

که n تعداد داده‌های مشاهده‌ای، m معرف تعداد سری‌های دارای داده تکراری و t فراوانی داده‌های با ارزش یکسان است. در نهایت آماره Z به کمک یکی از روابط زیر به دست آمد:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \dots \text{if } \dots S > 0 \\ 0 & \dots \text{if } \dots S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \dots \text{if } \dots S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

در یک آزمون دو دامنه برای روندیابی سری داده‌ها، فرض صفر در حالتی پذیرفته می‌شود که رابطه زیر برقرار باشد:

$$|Z| \leq Z_{\alpha/2} \quad (9)$$

که  $\alpha$  سطح معناداری و  $Z_{\alpha}$  آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معناداری  $\alpha$  است. در صورتی که آماره Z مثبت باشد

آستانه‌های دمایی مختلف متغیر بوده است. با این نتایج مشخص می‌گردد با رخداد زودتر یخبندان بهاره و دیرتر یخبندان پاییزه طول فصل بدون یخبندان افزایش یافته است. برعکس این وضعیت نیز دیده می‌شود.

یک محاسبه کارآمد و کامل از تمام سناریوهای سازگار نیاز به یک نرم افزار ارزیابی دارد که الگوریتم سی آی بی را به داده‌های متقابل تاثیر می‌رساند. نرم‌افزار سناریو ویزارد توسط مرکز ارزیابی فناوری، زیرن و زیروس و به منظور حمایت از روش CIB توسعه داده شده و مورد استفاده و آزمایش قرار گرفته است و در پروژه‌های کاربردی و روش‌های آزمایشگاهی توسعه یافته است. سناریو ویزارد امکان استفاده از روش ارزیابی CIB را فراهم می‌کند، یعنی تولید یک ماتریس متقابل، محاسبه سناریوهای سازگار و تجزیه و تحلیل نتایج سناریو ([cross-impact.de](http://cross-impact.de)).

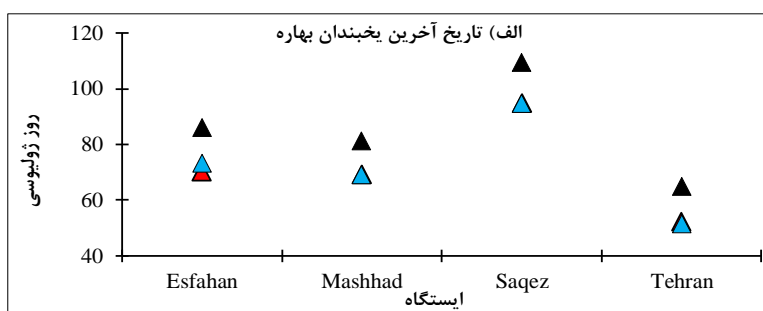
اکنون باید بر اساس ادبیات موضوع، مصاحبه با خبرگان یا تحقیقات مناسب درباره اثر متغیر xi از توصیفگر X روی متغیر Yi از توصیفگر Y داوری کرد. در این داوری فقط اثر مستقیم لحاظ می‌شود. آثار غیرمستقیم توسط نرم‌افزار ایجاد می‌شود. نحوه امتیازدهی در این روش از به صورت امتیازهای ۳- (تاثیر محدودکننده قوی)، ۲- (تاثیر محدودکننده متوسط)، ۱- (تاثیر محدودکننده ضعیف)، ۰ (بدون تاثیر)، ۱ (تاثیر تقویت‌کننده ضعیف)، ۲ (تاثیر تقویت‌کننده متوسط)، ۳ (تاثیر تقویت‌کننده قوی) است.

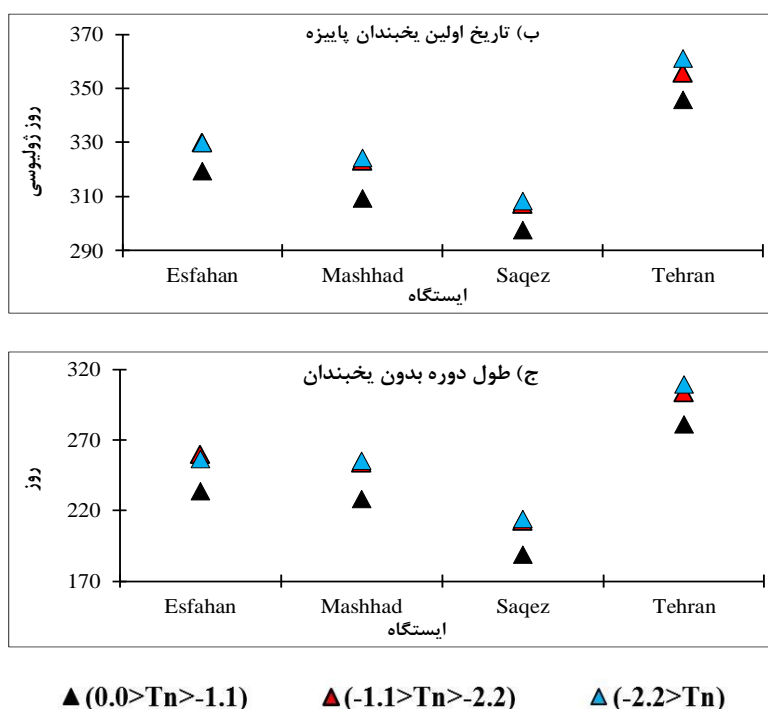
روند با توجه به فرد یا زوج بودن N<sup>۲</sup> محاسبه می‌شود (Gocic and Trajkovic, ۲۰۱۳).

## نتایج و بحث

میانگین تاریخ یخبندان‌های بهاره و پاییزه و طول فصل بدون یخبندان

در شکل ۲ نتایج میانگین تاریخ رخداد آخرین یخبندان‌های بهاره (شکل ۲-الف)، زودترین یخبندان‌های پاییزه (شکل ۲-ب) و طول فصل بدون یخبندان (شکل ۲-ج) نشان داده شده است. براساس نتایج به دست آمده در ایستگاه تهران زودترین یخبندان‌های بهاره رخ داده است که در ۵۱ تا ۶۴ روز جولایوسی بوده در حالی که دیرترین آن در ایستگاه سقز در ۹۴ تا ۱۰۹ جولایوسی بوده است. به این ترتیب دیرترین زودترین یخبندان بهاره در اقلیم مدیترانه‌ای و خشک رخ داده است. این وضعیت در اولین یخبندان پاییزه برعکس است طوری که دیرترین یخبندان پاییزه در ایستگاه تهران در ۳۴۶ تا ۳۶۱ جولایوسی و زودترین آن در ایستگاه سقز در ۲۹۷ تا ۳۰۸ روز جولایوسی است. این وضعیت باعث تغییرات زیاد در طول دوره بدون یخبندان می‌شود که نتیجه آن در شکل ۲-ج ارائه شده است. در این شکل مشخص می‌شود بیشترین طول فصل بدون یخبندان در ایستگاه تهران (با اقلیم خشک) به مقدار ۲۸۱ تا ۳۱۰ روز و کمترین آن در سقز (با اقلیم مدیترانه‌ای) به مقدار ۱۸۸ تا ۲۱۴ روز در





شکل ۲- میانگین تاریخ رخداد آخرین و اولین یخبندان‌های بهاره و پاییزه و متوسط طول دوره بدون یخبندان در ایستگاه‌های مورد مطالعه ( $T_n$  آستانه دماهای بحرانی)

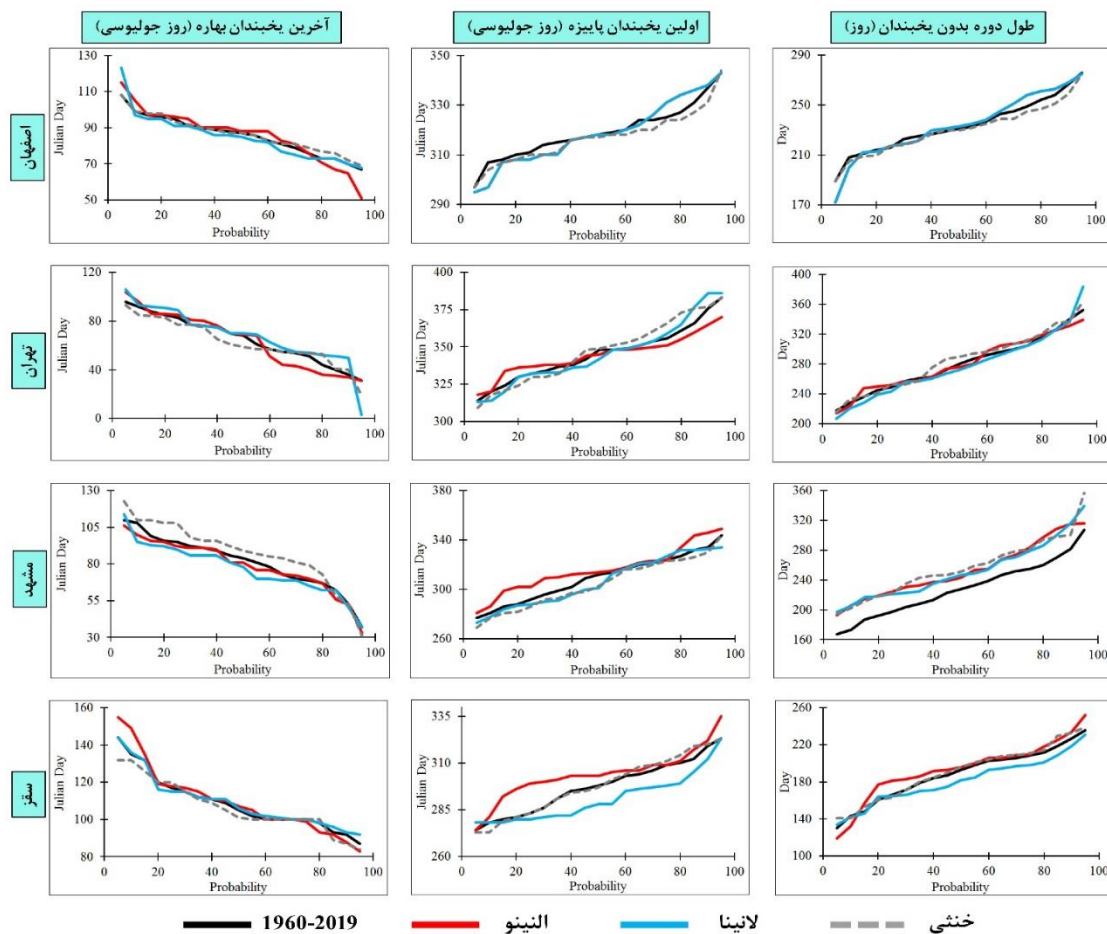
به طوری که در ایستگاه اصفهان در فاز لانینا، تهران در احتمالات پایین در النینو و در احتمالات بالا فاز خشتی، در ایستگاه مشهد و سقز در فاز النینو دیرتر رخ داده است. با توجه به رخداد تاریخ‌های یخبندان‌های ضعیف بهاره و پاییزه انتظار بر این است که طول دوره بدون یخبندان ضعیف نیز بسته به نوع فاز ENSO طولانی‌تر یا کوتاه‌تر گردد. بر این اساس نتایج نشان می‌دهد اختلاف طول دوره بدون یخبندان در ایستگاه اصفهان و تهران در فازهای مختلف ENSO نسبت به بلندمدت کم است در حالی که در ایستگاه مشهد در همه فازها طولانی‌تر از میانگین طولانی‌مدت است در حالی که در ایستگاه سقز در فاز النینو طولانی‌تر و در فاز لانینا کوتاه‌ترین طول فصل بدون یخبندان دیده می‌شود (شکل ۳). در مورد یخبندان با شدت متوسط نیز نتایج نشان می‌دهد در فازهای مختلف ENSO با تقدم یا تاخر همراه است. دیرترین یخبندان بهاره متوسط در ایستگاه‌های اصفهان و تهران در فاز لانینا، در ایستگاه مشهد در احتمالات کم در فاز النینو و در احتمالات بالا در فاز لانینا، و در ایستگاه سقز در فاز خشتی دیده می‌شود. این در حالی است که تاریخ رخداد یخبندان زودرس پاییزه در

#### احتمال رخداد یخبندان و طول دوره بدون یخبندان در فازهای ENSO

نتیجه احتمال رخداد یخبندان و طول دوره بدون یخبندان در دوره ۶۰ ساله و فازهای مختلف ENSO در شکل‌های ۳ (آخرین یخبندان بهاره)، شکل ۴ (اولین یخبندان پاییزه) و شکل ۵ (طول دوره بدون یخبندان) در شدت‌های مختلف یخبندان ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در اقلیم‌های مختلف، احتمال رخداد تاریخ یخبندان‌های بهاره و پاییزه و طول فصل بدون یخبندان در فازهای مختلف ENSO نسبت به دوره ۶۰ ساله تغییر می‌کند به طوری که در هر فاز ENSO و احتمال مشخص نسبت به دوره بلندمدت با تاخر یا تقدم همراه است. به عنوان نمونه، تاریخ رخداد تاریخ رخداد یخبندان ضعیف در ایستگاه اصفهان در فاز النینو، ایستگاه تهران در فاز لانینا، ایستگاه مشهد فاز خشتی و ایستگاه سقز فازهای النینو در احتمالات پایین و لانینا در احتمالات بیشتر از ۸۰ درصد با تقدم همراه بوده و زودتر رخ داده است. این در حالی است که این وضعیت برای اولین یخبندان ضعیف پاییزه هم صدق می‌کند

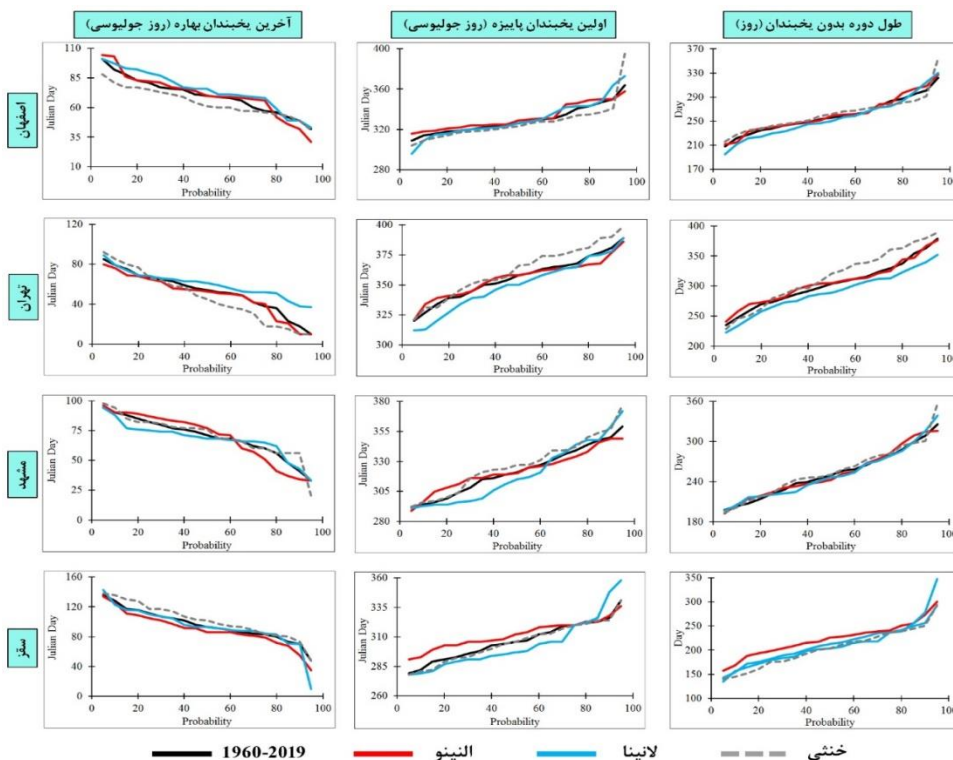
مشهد تفاوت زیادی با یکدیگر ندارند ولی طولانی‌ترین طول دوره یخبندان در ایستگاه تهران در فاز خشتی و سقز در فاز النینو دیده می‌شود (شکل ۴). تاریخ رخداد یخبندان‌های شدید بهاره و پاییزه و طول دوره بدون یخبندان نیز تغییر خواهد کرد که نتایج آن مشابه با تاریخ رخدادهای یخبندان ضعیف و متوسط است (شکل ۵).

ایستگاه اصفهان تفاوتی بین فازهای مختلف ENSO با میانگین بلندمدت دیده نمی‌شود ولی زودترین مقدار آن در ایستگاه‌های تهران در فاز لائینا، مشهد فاز خشتی و سقز فاز النینو دیده می‌شود. با توجه به تغییرات دیده شده در تاریخ رخداد یخبندان بهاره و پاییزه طول دوره بدون یخبندان نیز دچار تغییر می‌شود. بر اساس تغییرات تاریخ رخداد یخبندان پاییزه و بهاره دوره بدون یخبندان در ایستگاه اصفهان و



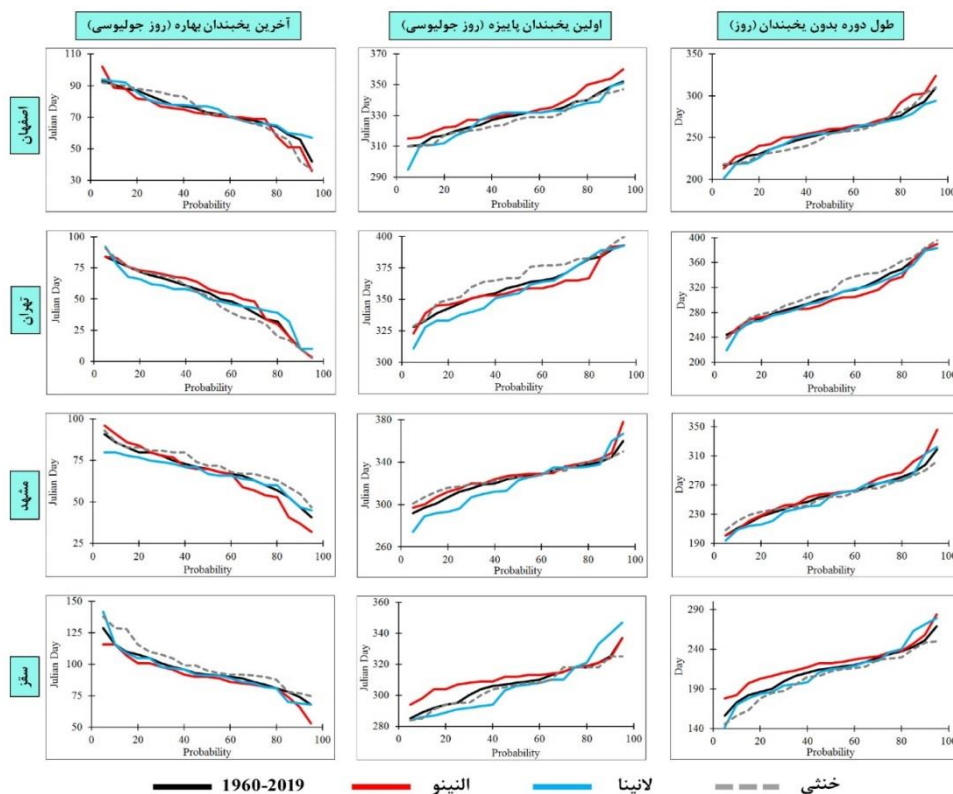
شکل ۳- احتمال رخداد تاریخ آخرین یخبندان بهاره، اولین یخبندان پاییزه و طول دوره بدون یخبندان ضعیف در دوره ۶۰ ساله و فازهای مختلف ENSO





شکل ۴- احتمال رخداد تاریخ آخرین یخبندان بهاره، اولین یخبندان پاییزه و طول دوره بدون یخبندان متوسط در دوره ۶۰ ساله و

فازهای مختلف ENSO



شکل ۵- احتمال رخداد تاریخ آخرین یخبندان بهاره، اولین یخبندان پاییزه و طول دوره بدون یخبندان شدید در دوره ۶۰ ساله و

فازهای مختلف ENSO

## تحلیل روند

نتایج تحلیل روند در طی دوره ۶۰ ساله نشان در جدول ۲ ارائه شده است که در آن مقادیر ارائه شده شیب سن و معناداری به روش من-کنندال اصلاح شده با علامت ستاره نشان داده شده است (\* و \*\*) به ترتیب معنادار در سطح ۹۵ و ۹۹ درصد. بررسی نتایج نشان می‌دهد رخداد آخرین یخبندان بهاره بسته به نوع اقلیم و شدت یخبندان با تاخر و تقدم همراه است. در ایستگاه اصفهان رخداد آخرین یخبندان بهاره از نظر آماری معنادار نیست ولی بسته به شدت یخبندان با تقدم و تاخیر همراه است به طوری که یخبندان‌های ضعیف و شدید به مدت ۱/۸ تا ۲/۰ روز زودتر و یخبندان متوسط ۵/۵ روز دیرتر شروع شده است. در ایستگاه تهران رخداد همه یخبندان‌ها زودتر شروع شده است که مقدار آن بین ۱۸/۶ تا ۴۴/۳ روز در ۶۰ سال است که روند رخداد یخبندان ضعیف از نظر آماری معنادار است. در ایستگاه مشهد نیز رخداد آخرین یخبندان بهاره در همه شدت‌ها زودتر بوده و از نظر آماری معنادار است به طوری که مقدار آن بین ۱۸/۳ تا ۳۶/۶ روز در ۶۰ سال است. نتایج به دست آمده در ایستگاه سقز برخلاف سه ایستگاه قبل با تاخیر ۱۰/۷ تا ۲۸/۰ روزه در همه شدت‌های مختلف یخبندان همراه است که از نظر آماری رخداد یخبندان بهاره متوسط و شدید معنادار است. به این ترتیب بیشترین روند رخداد یخبندان در ایستگاه‌های اصفهان، تهران، مشهد و سقز به ترتیب +۵/۵، -۴۴/۳، -۳۶/۶ و +۲۸/۰ روز در ۶۰ سال در یخبندان‌های متوسط، ضعیف، ضعیف و شدید می‌باشد (اعداد منفی رخداد زودتر و اعداد مثبت رخداد دیرتر).

بررسی نتایج تاریخ رخداد یخبندان پاییزه نیز بر اساس نوع اقلیم، ایستگاه و شدت یخبندان متفاوت است. در حالی که رخداد آخرین یخبندان‌های پاییزه اصفهان زودتر شروع می‌شود (۰/۲- تا ۱۰/۰- روز در ۶۰ سال)، در ایستگاه‌های تهران و مشهد دیرتر است. در ایستگاه تهران تاریخ رخداد اولین یخبندان‌های پاییزه ضعیف، متوسط و شدید به ترتیب ۲۹/۳، ۲۲/۲ و ۳۰/۱ روز و ایستگاه مشهد ۳۹/۸، ۲۴/۱ و ۲۹/۵ روز در ۶۰ سال دیرتر بوده است که همگی از نظر آماری روند معناداری هستند. بر خلاف نتایج به دست آمده در اقلیم‌های فراهشک، خشک و نیمه خشک، در اقلیم

مدیترانه‌ای سقز رخداد یخبندان پاییزه ضعیف زودتر (۶/۲- روز در ۶۰ سال) و یخبندان‌های پاییزه متوسط تا شدید دیرتر (۱/۴- تا ۱۰/۵- روز در ۶۰ سال) به وقوع پیوسته است ولی از نظر آماری این روندها معنادار نیستند. رخداد دیرتر یا زودتر آخرین یخبندان‌های بهاره و اولین یخبندان‌های پاییزه توانسته است بر طول دوره بدون یخبندان تاثیرگذار باشد. نتایج نشان می‌دهد روند طول دوره بدون یخبندان بر مبنای یخبندان‌های ضعیف، متوسط و شدید به ترتیب +۰/۲، -۱۵/۴ و -۹/۴ روز در دوره ۶۰ ساله تغییر کرده است، بنابراین طول دوره بدون یخبندان در ایستگاه اصفهان در طی ۶۰ سال کمتر شده است ولی از نظر آماری معنادار نیست. در ایستگاه تهران و مشهد طول دوره بدون یخبندان در همه شدت‌های یخبندان افزایش چشمگیری نشان می‌دهد به طوری که بر مبنای یخبندان‌های ضعیف، متوسط و شدید در ایستگاه مشهد ۷۸/۰، ۴۴/۹ و ۴۸/۸ روز در طی ۶۰ سال افزایش یافته است. در ایستگاه سقز روند طول دوره بدون یخبندان کاهش ۶/۳- تا ۴۰/۵- روز در ۶۰ سال را نشان می‌دهد که تنها بر پایه یخبندان شدید این روند از نظر آماری معنادار است. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص گردید رخداد زودتر یخبندان‌های بهاره و دیرتر یخبندان‌های پاییزه در ایستگاه‌های تهران و مشهد باعث افزایش طول فصل بدون یخبندان شده است در حالی که در دو ایستگاه اصفهان و سقز وضعیت متفاوتی دیده می‌شود و به عبارتی کاهش طول دوره بدون یخبندان رخ داده است. افزایش طول دوره بدون یخبندان را می‌توان به تغییرات اقلیمی و گرمایش کره زمین مرتبط دانست (ربانی و کرمی، ۱۳۸۸؛ طاووسی و درخشی، ۱۳۸۹؛ Watkins، ۱۹۹۱) در حالی که کاهش طول دوره بدون یخبندان را می‌توان به دلیل خصوصیات جغرافیایی و محلی دانست (میرموسوی و حسین‌بابایی، ۱۳۹۰؛ بذرافشان، ۱۳۹۱؛ رحیم‌زاده و همکاران، ۱۳۸۸) که نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد.

جدول ۲- روند رخداد یخبندان‌های بهاره و پاییزه و طول دوره بدون یخبندان				
نوع پدیده	ایستگاه	شدت یخبندان		
		ضعیف	متوسط	شدید
آخرین یخبندان بهاره	اصفهان	-۱/۸	۵/۵	-۲/۰
	تهران	** -۴۴/۳	-۱۸/۶	-۲۰/۳
	مشهد	** -۳۶/۶	** -۲۱/۱	** -۱۸/۳
	سقز	۱۰/۷	* ۱۹/۸	** ۲۸/۰
اولین یخبندان پاییزه	اصفهان	-۰/۲	-۱۰/۰	-۶/۲
	تهران	** ۲۹/۳	* ۲۲/۲	** ۳۰/۱
	مشهد	** ۳۹/۸	* ۲۴/۱	** ۲۹/۵
	سقز	۶/۲	-۱/۴	-۱۰/۵
طول دوره بدون یخبندان	اصفهان	۰/۲	-۱۵/۴	-۹/۴
	تهران	** ۷۷/۶	** ۴۰/۸	** ۴۰/۳
	مشهد	** ۷۸/۰	** ۴۴/۹	** ۴۸/۸
	سقز	-۶/۳	-۲۹/۸	** -۴۰/۵
** و * به ترتیب روند معنادار در سطح ۹۹ و ۹۵ درصد				

با توجه به ماهیت تنوع اقلیمی و جغرافیایی ایران این مطالعه تلاش کرد وضعیت رخداد تاریخ یخبندان‌های ضعیف، متوسط و شدید بهاره و پاییزه و در نتیجه طول دوره بدون یخبندان را در دوره ۶۰ ساله و فازهای مختلف ENSO در چند نمونه اقلیمی که پراکنش جغرافیایی مناسب داشته باشد مورد بررسی قرار دهد. استفاده از شاخص‌های دورپیوندی به خصوص ENSO به دلیل اینکه قابل پیش‌بینی است می‌تواند به عنوان یک سامانه پشتیبانی تصمیم در تعیین تاریخ رخداد یخبندان (Helali و همکاران، ۲۰۲۱a) و بارش (Helali و همکاران، ۲۰۲۱b) مورد استفاده قرار گیرند نتایج به دست آمده نشان می‌دهد زودترین و دیرترین یخبندان‌های بهاره در ایستگاه تهران و سقز به ترتیب در ۵۱ تا ۶۴ و ۹۴ تا ۱۰۹ جولای؛ دیرترین و زودترین یخبندان پاییزه در ایستگاه تهران و سقز به ترتیب در ۳۴۶ تا ۳۶۱ و ۲۹۷ تا ۳۰۸ روز جولای در یخبندان‌های با شدت مختلف دیده می‌شود. این وضعیت تغییرات زیاد طول دوره بدون یخبندان را موجب شده است که در نتیجه آن بیشترین و کمترین طول فصل بدون یخبندان در ایستگاه تهران (با اقلیم خشک)

و سقز (اقلیم مدیترانه‌ای) به ترتیب ۲۸۱ تا ۳۱۰ و ۱۸۸ تا ۲۱۴ روز در یخبندان‌های مختلف دیده می‌شود. بنابراین با رخداد زودتر یخبندان بهاره و دیرتر یخبندان پاییزه طول فصل بدون یخبندان افزایش یافته که حالت برعکس آن نیز دیده می‌شود که با نتایج به دست آمده ساری صراف و همکاران (۱۳۸۹) متفاوت و با نتایج به دست آمده Zhang و همکاران (۲۰۲۰) در ایالات متحده و Keikhosravi و همکاران (۲۰۲۱) در ایران همسو است. به عنوان یک سامانه پشتیبانی الگوی پیوندازدور ENSO توانسته است در پیش‌بینی یخبندان و طول دوره بدون یخبندان موثر باشد به طوری که تاریخ رخداد یخبندان‌های با شدت مختلف و همچنین طول دوره بدون یخبندان در فازهای مختلف ENSO نسبت به میانگین طولانی مدت ۶۰ ساله دارای اختلاف است که این امر می‌تواند در مدیریت پیش‌بینی تاریخ یخبندان‌ها مفید باشد. این نتیجه مطالعه انجام شده توسط Helali و همکاران (۲۰۲۱a) را نیز تایید می‌کند که تاکید دارد شاخص ENSO به عنوان سامانه پشتیبانی تصمیم در امر پیش‌بینی یخبندان مورد استفاده قرار گیرد.

### نتیجه گیری

نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان داد رخداد یخبندان‌های بهاره و پاییزه و در نتیجه طول دوره بدون یخبندان با شدت‌های مختلف دارای روند است به طوری که آخرین یخبندان بهاره عمدتاً زودتر و اولین یخبندان پاییزه دیرتر اتفاق افتاده است که می‌تواند همراستا با تغییرات اقلیمی باشد ولی در ایستگاه سقز این وضعیت برعکس است که می‌تواند به دلایل محلی و جغرافیایی باشد. در نتیجه رخداد زود هنگام یا دیر هنگام یخبندان‌ها طول دوره بدون یخبندان نیز دچار تغییر شده است که می‌تواند بر خصوصیات اکولوژیکی مناطق مورد مطالعه تاثیرگذار باشد. با توجه به روند تغییرات اقلیمی لازم است وضعیت تاریخ یخبندان‌ها و همچنین طول دوره بدون یخبندان نیز در آینده تحت مدل‌های جدید از جمله CMIP6 و سناریوهای SSP مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. در بحث پیش بینی تاریخ رخداد یخبندان‌های مختلف الگوی دورپیوندی ENSO می‌تواند به عنوان معیار و نوعی سامانه پشتیبانی تصمیم مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به تعدد الگوهای دورپیوندی و همچنین اثرات متقابلی که این الگوها بر یکدیگر دارند لازم است در مطالعات آتی بررسی اثرات همزمان الگوی دورپیوندی بر رخداد یخبندان انجام شده و از دیدگاه سینوپتیکی و دینامیکی مورد ارزیابی قرار گیرد.

### منابع

- Ahmadi, M., 2014, Analyzing on the relationship among Teleconnection Patterns (TP) and Iran's Precipitation Characteristics (IPC). PhD Thesis, Geographical and Remote sensing Department, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University.
- Biazar, S.M. and Banan Ferdosi, F., 2020, An investigation on spatial and temporal trends in frost indices in Northern Iran, Theoretical and Applied Climatology, 141:907-920. DOI: 10.1007/s00704-020-03248-7

همچنین استفاده از فازها و شدت‌های مختلف ENSO بی-هنجاری بارش حوضه‌های آبریز ایران را از دیدگاه سینوپتیکی-دینامیکی تحلیل کرده و نشان داده است که این شاخص می‌تواند توجیه کننده این بی‌هنجاری‌ها باشد (Helali و همکاران، ۲۰۲۱b).

با توجه به گرمایش کره زمین و تغییرات اقلیمی انتظار بر این است که تاریخ رخداد یخبندان‌های بهاره و پاییزه و در نتیجه طول دوره بدون یخبندان نیز روند داشته باشد. بررسی نتایج نشان می‌دهد رخداد آخرین یخبندان بهاره، اولین یخبندان پاییزه و طول دوره بدون یخبندان بسته به نوع اقلیم و شدت یخبندان در دوره ۶۰ ساله با تاخر و تقدم همراه است به طوری که تاریخ رخداد آخرین یخبندان بهاره در ایستگاه اصفهان بین ۱/۸- تا ۵/۵+، تهران بین ۱۸/۶- تا ۴۴/۳-، مشهد بین ۱۸/۳- تا ۳۶/۶- و سقز ۱۰/۷+ تا ۲۸/۰+ روز در ۶۰ سال روند داشته است (اعداد منفی رخداد زودتر، اعداد مثبت رخداد دیرتر). این وضعیت در مورد زودترین یخبندان پاییزه نیز قابل مشاهده است به طوری که در ایستگاه اصفهان بین ۰/۲- تا ۱۰/۰-، تهران بین ۲۲/۲+ تا ۳۰/۱+، مشهد بین ۲۴/۱+ تا ۳۹/۸+، و سقز بین ۶/۳- تا ۴۰/۵- روز در ۶۰ سال تغییر کرده است (اعداد منفی رخداد زودتر، اعداد مثبت رخداد دیرتر). با توجه به نتایج به دست آمده مشخص گردید رخداد زودتر یخبندان‌های بهاره و دیرتر یخبندان‌های پاییزه در ایستگاه‌های تهران و مشهد باعث افزایش طول فصل بدون یخبندان شده است در حالی که در دو ایستگاه اصفهان و سقز کاهش طول دوره بدون یخبندان قابل مشاهده است که با نتایج مطالعات انجام شده تطبیق دارد (Zhang و همکاران، ۲۰۲۰؛ Keikhosravi و همکاران، ۲۰۲۱) افزایش طول دوره بدون یخبندان به دلیل تغییرات اقلیمی است در حالی که کاهش طول دوره بدون یخبندان می‌تواند به دلیل خصوصیات جغرافیایی و محلی باشد (رحیم‌زاده و همکاران، ۱۳۸۸؛ میرموسوی و حسین-بابایی، ۱۳۹۰؛ بذرافشان، ۱۳۹۱؛ Helali و همکاران، ۲۰۲۱a).

- variability of the start, end, and length of the frost-free season across Iran, *Clim Res* 84:59-73. DOI: 10.3354/cr01659
12. Kendall, M.G., 1975, Rank correlation methods. Grifn, London
  13. Kollas, C., Körner, C. and Randin, C. F., 2014, Spring frost and growing season length co-control the cold range limits of broad-leaved trees. *J. Biogeogr.* 41:773–783.
  14. Mann, H.B., 1945, Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, 13:245–259
  15. Maryanaji, Z., Rezaei, S. and Abbasi, H., 2018, Predict changes in start and end of the Frost in the west of the Iran. *Geography and Planning* 63:265-281.
  16. Mateescu, M., Haidu, I., Veronica, S., and Tugui, O., 2007, Recent Evolution of Some Agro climatic Indices in Transylvania, *Climate change, Bulletin USAMV-CN*, 63–64.
  17. Meehl, G.A., Arblaster, J.M. and Branstator, G., 2012, Mechanisms contributing to the warming hole and the consequent US east–west differential of heat extremes. *J Clim* 25:6394–6408
  18. Menzel, A., Gert, J., Rein, A., Helfried, S. and Nicole, E. 2003, Variations of the climatological growing season (1951–2000) in Germany compared with other countries. *Int. J. Clim.* 23: 793–812.
  19. Plummer, N., 1999, Marine Climate-metadata and Standards, In *International Workshop for port Meteorologicla Officers from RAs II and V, Melbourne, Australia*, pp. 8-12
  20. Rahimi, J., Ebrahimpour, M. and Khalili, A., 2013, Spatial changes of extended De Martonne climatic zones affected by climate change in Iran. *Theor Appl Climatol* 112 (3-4):409-418
  21. Rahimi, J., Khalili, A. and Bazrafshan, J., 2017, Analysis of late spring frost dates over Iran under current climate and future scenarios, *Model. Earth Syst. Environ.*, 3. Bootsma, A., 1994, Long term (100 yr) climatic trends for agriculture at selected locations in Canada, *Climatic Change*, 26: 65–88.
  4. Brown, P.J., Bradley, R.S. and Keimig, F., 2010, Changes in Extreme Climate Indices for the Northeastern United States, 1870–2005, *Journal of Climate*, 23:6555-6572. DOI: 10.1175/2010JCLI3363.1
  5. Cooter, E., and LeDuc, S., 1995, Recent frost date trends in the northern United States, *International Journal Climatology*, 15: 65-75.
  6. Gocic, M. and Trajkovic, S., 2013, Analysis of Changes in Meteorological Variables Using Mann-Kendall and Sen's Slope Estimator Statistical Tests in Serbia. *Global and Planetary Change*, 100: 172-182. DOI:10.1016/j.gloplacha.2012.10.014
  7. Griffiths, M. L. and Bradley, R. S., 2007, Variations of twentieth century temperature and precipitation extreme indicators in the northeast United States, *J. Climate*, 20: 5401-5417.
  8. Helali, J., Momenzadeh, H., Oskouei, E.A., Lotfi, M. and Hosseini, S.A., 2021a, Trend and ENSO-based analysis of last spring frost and chilling in Iran. *Meteorol Atmos Phys.*, 133:1203-1221. DOI: 10.1007/s00703-021-00804-2
  9. Helali, J., Momenzadeh, H., Salimi, S., Hosseini, S.A., Lotf, M., Mohamadi, S.M., Maghami Moghim, G., Pazhoh, F. and Ahmadi, M., 2021b, Synoptic-dynamic analysis of precipitation anomalies over Iran in different phases of ENSO, *Arabian Journal of Geosciences*, 14:2322
  10. Hosseini, S.M., Karbalaee, A. Hosseini, S.A. 2021, Spatiotemporal changes of early fall and late spring frost and its trend based on daily minimum temperature in Iran. *Arab J Geosci* 14, 304.
  11. Keikhosravi Kiany, M.S., Masoodian, S.A. and Balling Jr., R.C., 2021, *Climatology and*

- Processes, 16(9): 1807–1829. doi:10.1002/hyp.1095
30. Zhang, Y., Gowda, P., Brown, D., Rice, C., Zambreski, Z., Kutikoff, S. and Lin, X., 2020, Time-varying trends in frost indicators in the U.S. Southern Great Plains, *Int J Climatol.*, 1–15. DOI: 10.1002/joc.6803
  31. Zhong, S., Yu, L., Winkler, J.A., Tang, Y., Heilman, W.E. and Bian, X., 2017, The impact of climate change on the characteristics of the frost-free season over the contiguous USA as projected by the NARCCAP model ensembles, *Climate Research*, 72: 53-72. DOI: 10.3354/cr01450.
  22. Sangüesa-Barreda, G., Di Filippo, A., Piovesan, G., Rozas, V., Di Fiore, L., García-Hidalgo, M., García-Cervigón, A.I., Muñoz-Garachana, D., Baliva, M. and Olano, J.M., 2021, Warmer springs have increased the frequency and extension of late-frost defoliations in southern European beech forests, *Science of the Total Environment* 775, 145860, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145860
  23. Scheifinger, H., Menzel, A., Koch, E. and Peter, C., 2003, Trends of spring time frost and phenologicla dates in central Europe, *Theoretical and Applied Climatology*, 74: 41–51
  24. Sen, P.K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *J Am Stat Assoc.* 63(324):1379–1389
  25. Vitasse, Y., Lenz, A., Körner, C., 2014, The interaction between freezing tolerance and phenology in temperate deciduous trees. *Frontiers in Plant Science*, 5, 541. DOI:10.3389/fpls.2014.00541
  26. Wallace, J. M. and Gutzler, D.S., 1981, Teleconnections in the Geopotential Height Field during the Northern Hemisphere Winter, *Monthly Weather Review*, 109: 784-812
  27. Watkins, C., 1991, The Annual Period of Freezing Temperatures in Central England: 1850-1989, *Inter. J. Climatology*, 10: 889-896
  28. Xiao, L., Liu, L., Asseng, S., Xia, Y., Tang, L., Liu, B., Cao, W. and Zhu, Y., 2018, Estimating spring frost and its impact on yield across winter wheat in China, *Agricultural and Forest Meteorology* 260–261:154–164.
  29. Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., and Cavadias, G., 2002, The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological*