



Research Article

The relationships between cut-off low blockings and durability of spring frosts across Iran

Farzaneh Jafari¹, Gholamrezaq Barati^{1*} , Mohammad Moradi²

1-Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2-Institute of Meteorology, Institute of Meteorology and Atmospheric sciences, Tehran, Iran

Received: 09 May 2019 Accepted: 01 Jan 2020

Extended Abstract

Introduction

Weak westerlies over high and mid latitudes cause cut-off low blockings (CB) and CBs create durable phenomenon such as frost waves. Iran, in the south of mid latitudes is engaged with annual spring frost waves. So far, most of the researches in Iran have been done with statistical and synoptic methods, but most of these studies, especially the synoptic ones, are case study samples. The apparent role of large-scale atmospheric systems such as cut-off low blockings in the emergence and durability of spring frost-waves, requires great research to undertaken throughout Iran and in a long period. So our goal was the study of effects of cut-off lows on frost durability over Iran.

Materials and Methods

For this purpose, the data of minimum daily temperature of 69 weather stations from March 20th 1968 to June 21st 2014 was collected from the meteorological organization of Iran. It was determined that 114 spring frosts with a duration between 3 to 25 days exist and in the next step 47 enduring ones based on tables of daily temperatures and fluctuation of their frequencies were determined. All of these 114 waves were determined based on the frost duration criteria which lasted at least two consecutive days and their spatial criteria occurrence in more than two stations. This allowed the determination of the most durable frost index wave of each year during spring. Analyzing the peak-days of all index waves, distinguished the waves affected by the cut-off low blocking system. The final synoptic patterns were designed for analysis by examining the 500 hPa maps of the distinct days.

Results and Discussion

The height contours on 500 hPa air-charts from ENCEP/ENCAR showed cut-off low blockings were dominant patterns during the peak days of the most enduring frosts (18 ones). The first results indicate that the appearance of this blocking which directs the cold air flows to Iran from high latitudes has minimized over the last three decades. Designed synoptic patterns show that during the peak days of spring, frosts affected by cut-off low blockings, appeared around Caspian Sea, especially its eastern basin and stayed for many days and then divided into two branches including the main one in northern latitudes and minor in southern ones. Although the southern branch of these winds appeared relatively weaker than the main and northern one, but its effects were cold and sub-zero airflow from the Scandinavian Basin, Eastern Europe, Caucasus Basin and the Ural Mountains towards northwest, north, and sometimes northeast of Iran, and penetrated till Central Iran.

Citation: Jafari, F. et al, 2020. The relationships between cut-off low blockings and durability of spring frosts across Iran, *Res. Earth. Sci:* 11(1), (208-222) DOI: 10.52547/esrj.11.1.208

* Corresponding author E-mail address: G_barati@sbu.ac.ir





Researches in Earth Sciences

Journal homepage: <https://esrj.sbu.ac.ir>



Lack of high summits and mountains, lower inclination of sunlight and proximity to the southern warm waters are factors that have moderated the violence of these flows in the southern coastal provinces and there have been no reports of temperatures of zero and below zero degrees Celsius. The results showed four factors including “the diagonal move of cut-off lows from Southern Scandinavia to Pamir Plateau” and “eastward movement of troughs from Mediterranean Basin” both at 500 hPa level and “the position of Zagros mountains” and “the entrance of cold high pressure tongues of Siberia” at the surface, caused the symmetric influence of durable frosts over west and east of Iran.

Conclusion

Based on this research, the decrease in the occurrence of cut-off low blockings during the last three decades in Iran can be justified by the tangible and searchable expansion of warm air territory from low latitudes to the high latitudes in Southwestern Asia.

Keywords: Spring frosts, Cut-off low, Blocking, Iran.



روابط بندال‌های کم‌فشار بریده و دوام یخبندان‌های بهاره ایران

فرزانه جعفری^۱، غلامرضا براتی^{۱*}، محمد مرادی^۲

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- پژوهشکده هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۲/۱۹

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۱

چکیده

بادهای غربی ضعیف در عرض‌های جغرافیایی بالا و میانی سبب بندال‌های کم‌فشار بریده می‌شوند و این بندال‌ها پدیده‌های جوی بادوام مانند موج‌های یخبندان را پدید می‌آورند. ایران در جنوب عرض‌های میانی هر ساله درگیر موج‌های یخبندان بهاره است. هدف ما در این تحقیق بررسی اثرات بندال‌های بریده بر دوام یخبندان در ایران بود. برای رسیدن به این هدف داده‌های دمای کمینه روزانه ۶۹ ایستگاه هواشناسی طی ۲۰ مارس ۱۹۶۸ تا ۲۱ ژوئن ۲۰۱۴ (برابر با فصل بهار در تقویم ایران) از سازمان هواشناسی تهیه شد. بر پایه جداول پراکنش دماهای گزارش شده و نمودارهای تغییرات فراوانی آنها، تعداد ۱۱۴ موج با دوام ۳ تا ۲۵ روز شناسایی شد. بررسی نقشه‌های هوای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال طی روزهای اوج بادوام‌ترین یخبندان‌ها نشان داد که سامانه غالب در ۱۸ موج یخبندان بندال‌ها از نوع کم‌فشار بریده بوده‌اند. این سامانه‌ها در پیرامون دریای خزر با مرکزیت شرق این دریا نمایان و برای روزهای متمادی ماندگار شدند و بادهای غربی را به دو شاخه اصلی در شمال و فرعی در جنوب تقسیم کردند. نتایج نشان داد چهار عامل شامل «جابجایی مورب کم‌فشارهای بریده از جنوب اسکانندیناوی به سوی فلات پامیر» و «حرکت شرق‌سوی ناوه‌ها»، هر دو در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و «موقعیت رشته کوه زاگرس» و «مسیرهای ورود زبانه‌های هوای سرد پرفشار سیبری»، هر دو در تراز دریای آزاد؛ زمینه‌ساز نفوذ متقارن امواج یخبندان در غرب و شرق ایران بوده‌اند.

واژه‌های کلیدی: یخبندان بهاره، کم‌فشار بریده، بندال، ایران.

مقدمه

یخبندان از دیدگاه کشاورزی، کاهش دمای هوا به زیر نقطه انجماد تعریف شده است (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۰) ولی به لحاظ جوی (Ruddell et al, 2013) و مسعودیان و دارند، ۱۳۹۲) پدیده جوی یخبندان را کاهش دمای هوا به زیر صفر دانسته‌اند. در تعاریفی دقیق‌تر روز یخبندان روزی تعریفی شده است که دمای کمینه به صفر (Gough et al, 2014) و یا به زیر صفر (Arkadiusz et al, 2015) برسد. در این میان، بندال‌ها پدیده‌هایی از جو هستند که ناشی از کاهش سرعت بادهای غربی بوده، دوام شرایطی مانند سرما و یخبندان را در پی دارند. سامانه‌های بندال از مسیر اصلی گردش بادهای غربی بریده شده، ممکن است روزها و حتی هفته‌ها در یک ناحیه مستقر شوند (Croc-Maspoli et al, 2007). در تحقیق پالمن و نیوتن (Palmén and Newton, 1969) آمده است زمانی که یک ناوه هوای سرد به سمت استوا توسعه یافت و از منبع اصلی خود در عرض‌های بالاتر بریده شد؛ گردشی بسته و چرخندی در تروپوسفر میانی و بالایی شکل گرفته، کم‌ارتفاع‌های بریده پدید می‌آیند. از این سامانه‌ها، سینگلتن و ریسون (Singleton and Reason, 2007) با عبارت «منحنی‌های ارتفاعی بسته در اطراف کانون‌های کم‌ارتفاع در ترازهای میانی و بالایی» و نیتو و همکاران (Nieto et al, 2007) با عبارت «پیچک‌های چرخندی بسته و جدا شده از جریان اصلی رودباد» یاد کرده‌اند. موج یخبندان (Peterson et al, 2013)، دمای پایین (Andrei and Roman, 2012)، دماهای سردتر در عرض‌های میانه (Cohen et al, 2014)، ناهنجاری باد و به همراه آن فرارفت سرما (Pezza and Ambrizzi, 2005) و جریان‌های شمالی (Kim and Byun, 2016)، از جمله تعابیر

گونگونگی هستند که محققان برای بندال و پیامدهای آن در تحقیقات خود استفاده کرده‌اند. خسارات یخبندان‌ها اعم از تابشی و همرفتی، طیفی از بخش‌های اقتصادی و اجتماعی (Simmonds and Rashid, 2001) مانند انتقال سوخت (لشکری و کیخسروی، ۱۳۸۷) و بخش کشاورزی (Rahimi et al, 2007) و علیجانی و براتی، ۱۳۷۵) را به ویژه طی فصل بهار (Yue et al, 2016) در بر می‌گیرد. آسیب‌زایی و خسارت-باری یخبندان‌ها به ویژه از نوع دیررس یا بهاره در ایران مورد استناد محققان بسیاری است. آسیب دیدن ۴۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی از موج یخبندان در البرز مرکزی طی سال ۲۰۰۲ (Rahimi et al, 2007)، خسارات وارد به محصولات سیب دشت مشهد از یخبندان‌های فروردین ماه سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۴ (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۰)، دویست و شصت میلیارد ریال خسارت سرمازدگی فروردین ماه یکهزار و سیصد و نود و سه به باغ‌های چارمحال و بختیاری (جام جم، ۱۳۹۳) و خسارات یخبندان و سرما به باغ‌های سیب، انگور و گردوی آذربایجان غربی (بازگیر و همکاران، ۱۳۹۵) از آن جمله است. مرور مجموعه تحقیقات در دسترس و مرتبط با موضوع این تحقیق نشان می‌دهد که برخی محققان اثر بندال را بر رخداد دماهای پایین، امواج سرما و رخداد یخبندان در مقیاس جهانی یا نیمکره‌ای کار کرده‌اند. از این دسته می‌توان به تحقیق هاسکین و بریسفورد (Hoskins and Berrisford, 1988) و مرتبط با نقش سامانه بندال در انتقال هوای فوق‌العاده سرد، تحقیق بارپیدرو (Barriopedro et al, 2006) مرتبط با بیشتر بودن فراوانی بندال‌ها در نیمکره شمالی و طی فصول زمستان و بهار نسبت به فصول دیگر، تحقیقات پال و ونلی

دسته‌ای دیگر از تحقیقات به رخداد موج‌های یخبندان و یا سامانه بندالی موثر در خاور و جنوب خاوری آسیا مربوط هستند. از این دسته می‌توان به کار پارک و همکاران (Park et al, 2014) مرتبط با یورش‌های هوای سرد تحت پوشش الگوی بندال در شرق آسیا و تحقیق هونگ و لی (Hong and Li, 2008) مرتبط با نقش بندال‌های شکل گرفته روی پیرامون دریاچه بایکال و رخداد دماهای بسیار سرد طی ماه فوریه در شرق آسیا اشاره کرد. در این تحقیق، پارک و همکاران (Park et al, 2014)، بر پایه داده‌های پنجاه و دو ساله در خاور آسیا، محققان دریافتند که در زمان حاکمیت الگوی بندال؛ شدت، تداوم و فراگیری امواج یخبندان بیشتر است. در تحقیقی دیگر لو و همکاران (Lu et al, 2010)، رخداد سه موج یخبندان متوالی در خاور و جنوب خاوری آسیا طی زمستان و بهار ۲۰۰۵ بعد از ۱۸ زمستان گرم متوالی بررسی کردند. در این تحقیق از جمله به بندال اورال اشاره شده است در این دسته تحقیق کیم و بیون (Kim and Byun, 2016) دارای منطقه مورد مطالعه کوچکی در حد کشور کره است. ایشان با بررسی هم‌دیدگی تغییرپذیری فضایی آخرین یخبندان‌ها در کشور کره، بیان کردند که نفوذ بندال S معکوس به سمت جنوب، وزش‌های شمالی و شمال خاوری از خاور دریا، گسترش سریع و ناگهانی پشته قوی به سمت عرض‌های جنوبی و حرکات غیرمعمول جنوب سوی تاوه قطبی واقع در شمال اقیانوس آرام از دلایل رخداد یخبندان‌های دیررس شدید در کشور کره بوده است. در دسته تحقیقات منطقه‌ای، نتایجی مرتبط با خاورمیانه و در نتیجه ایران نیز قابل استفاده است. نمونه این تحقیقات، کار لو و یو (Luo and Yao, 2015) است. ایشان در تحلیل شرایط جوی توفان برف دسامبر ۲۰۱۳،

(Pfahl and Wernli, 2012) و بوچر و همکاران (Buehler et al, 2012) مرتبط با نقش الگوهای بندال اطلس شمالی در رخداد دماهای فرین سرد و تحقیق نیتو و همکاران (Nieto et al, 2007) مرتبط با نقش سامانه‌های کم‌فشار بریده در نیمکره شمالی در رخداد مخاطرات وزش هوای سرد و رخداد یخبندان‌های شدید در نیمکره شمالی اشاره کرد. تلاش دسته‌ای دیگر از محققان، مقیاسی منطقه‌ای داشته است. برای نمونه لژناس (Lejenäs, 1989) نفوذ سامانه‌های بندالی متوالی از شمال اقیانوس اطلس را در رخداد دماهای بسیار سرد مانند رخداد دمای ۴۲- درجه سلسیوس در زمستان سال ۱۹۴۱ اروپا طی جنگ جهانی دوم موثر یافت. این مخاطره جوی به جان سپردن بسیاری از سربازان در شرق اروپا انجامید. همچنین تحقیقات بررسی نقش سامانه‌های شکل گرفته از انواع بندال‌ها روی اقیانوس اطلس شمالی در رخداد یخبندان (Cattiaux et al, 2010) و سرماهای فرین (Sillmann et al, 2011; Porebska and Zdunek, 2013) در اروپا مرتبط با الگوهای بندال اقیانوس اطلس قابل اشاره هستند. در تحقیقی دیگر برونر و همکاران (Brunner et al, 2017) به بررسی ارتباط بندال‌های جوی و دماهای فرین اروپا در فصل بهار پرداختند و دریافتند که بیش از ۸۰ درصد روزهای سرد جنوب شرق اروپا، زمانی رخ داده است که الگوی بندال شمال شرق اقیانوس اطلس و اسکاندیناوی حاکم بوده است. در این زمینه از تحقیقاتی که سرزمینی کوچک را در حد کشور رومانی مقیاس مکانی گرفته‌اند؛ کار آندری و رومان (Andrei and Roman, 2012) قابل ذکر است. ایشان سامانه‌های موثر در رخداد دماهای پایین فصل سرد این کشور را الگوهای بندال روی شرق اقیانوس اطلس از نوع رکس و امگایی یافتند.

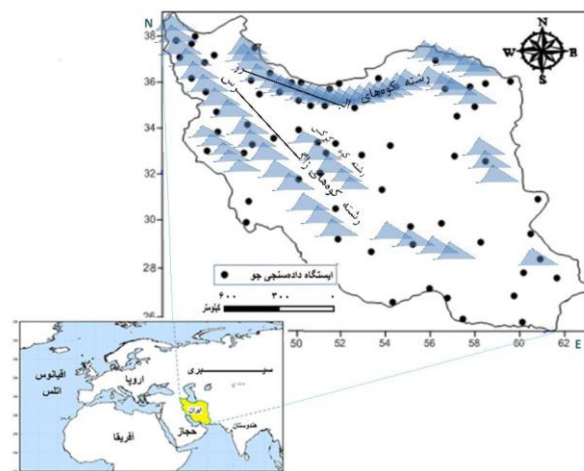
کاهش خسارات در مراحل بعد اعتماد بیشتری کرد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق با روش محیطی به گردشی انجام شد. پیش از این برای بررسی سرماهای فرین ایران (مسعودیان و دارند، ۱۳۹۰) این روش استفاده شده است. افزایش فراوانی ایستگاه‌های دارای گزارش دمای کمینه صفر و زیر صفر درجه سلسیوس طی روزهای متوالی و بدون وقفه معیاری است که (علیجانی و براتی، ۱۳۷۵)، پیش از این برای تعیین موج یخبندان توسط استفاده کرده‌اند. مفهوم «موج» برای سرما و یخبندان، در تحقیقات متعدد (Peterson et al, 2013; Thomas et al, 2013; Pezza et al, 2005 یارمرادی و همکاران، ۱۳۹۷) و در این تحقیق «موج یخبندان»، وقوع دمای کمینه صفر و زیر صفر در بیش از دو ایستگاه هواشناسی برای بیش از دو روز تعریف شد. این معیار در برخی تحقیقات با عبارت مجموعه‌ای از ایستگاه‌ها (Tomczyk et al, 2015) مورد توجه بوده است. همچنین معیار دوام بیش از دو روز را پیش از این محققانی چون روستا و همکاران (Rousta et al, 2016)؛ هژبرپور و علیجانی، ۱۳۸۶) استفاده کرده‌اند. تهیه داده‌های دمای کمینه روزانه ۶۰ ایستگاه هواشناسی ایران از ۲۰ مارس ۱۹۶۸ تا ۲۱ ژوئن ۲۰۱۴ برابر با ۲۹ اسفند ۱۳۴۷ تا ۳۱ خرداد ۱۳۹۳ از سازمان هواشناسی ایران و تعیین پهنه‌ی همدید مورد مطالعه در این تحقیق از صفر تا ۸۰ درجه شمالی و از میانه اقیانوس اطلس در نیمکره غربی تا آلاسکا امکان شناسایی سامانه‌های بندال موثر بر رخداد یخبندان را در ترازهای میانی و رددسپهر فراهم کرد. شکل ۱ پراکنش موقعیت ایستگاه‌های

نفوذ و شکل‌گیری بندال بریده کم‌فشار را موجب سرمای فراگیر و توفان برف در منطقه خاورمیانه و جنوب شرقی اروپا می‌دانند. از جمله نخستین تحقیقاتی که در زمینه بندال در ایران انجام شده است، تعیین اثر ناوه و بندالی شدن الگوی هوا در شرق (لشکری، ۱۳۸۷) و غرب (لشکری و کیخسروی، ۱۳۸۷) ایران به ترتیب بر رخداد سرمای فراگیر ۱۳۸۲ و سرمای دی ماه ۱۳۸۵ است. در کارهای بعدی (ویسی، ۱۳۸۷؛ قویدل رحیمی، ۱۳۸۸؛ عزیزی و خلیلی، ۱۳۹۰؛ درگاهیان و همکاران، ۱۳۹۳؛ امیدوار، ۱۳۹۵؛ عزیزی و همکاران، ۱۳۹۷) به ترتیب اثر پیدایی الگوی بندال را بر رخداد موج یخبندان در استان کردستان، تداوم سرمای شدید در آذربایجان، اثر آشکار الگوی امگا را بر سرماهای ژانویه ایران، اثر سامانه بندال را در رخداد دماهای کمتر از نرمال و سرانجام اثر بندال را بر رخداد سرما در ایران مرکزی و نیمه شمالی ایران بررسی کرده‌اند. بررسی تحقیقات انجام شده در بخش‌های مختلف ایران نشان می‌دهد که عموم محققان، امواج یخبندان و سرما را به شکل موردی مانند شمال غرب ایران (نظری‌پور و ریگی، ۱۳۹۴؛ صلاحی، ۱۳۹۵)، غرب ایران (یارمرادی و همکاران، ۱۳۹۷)، ایران مرکزی (براتی و همکاران، ۱۳۹۵) و شرق یعنی خراسان (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۰) و با روش‌های مختلف کار کرده‌اند ولی جایگاه مطالعه همدید این پدیده با تاثیر سامانه بندال در مقیاس کل ایران و طی بازه چنددهساله در عرصه این تحقیقات خالی بوده است. انتخاب بازه ۴۷ ساله در این تحقیق، در جهت پر کردن این خلا تحقیقی بوده است تا بر پایه الگوهای همدید طراحی شده، بتوان به سازوکار رخداد یخبندان‌ها در مرحله نخست و امکان پیش‌بینی و احیانا

برگزیده را در قلمرو ایران و موقعیت ایران را در مقیاس همدید نشان می‌دهد.



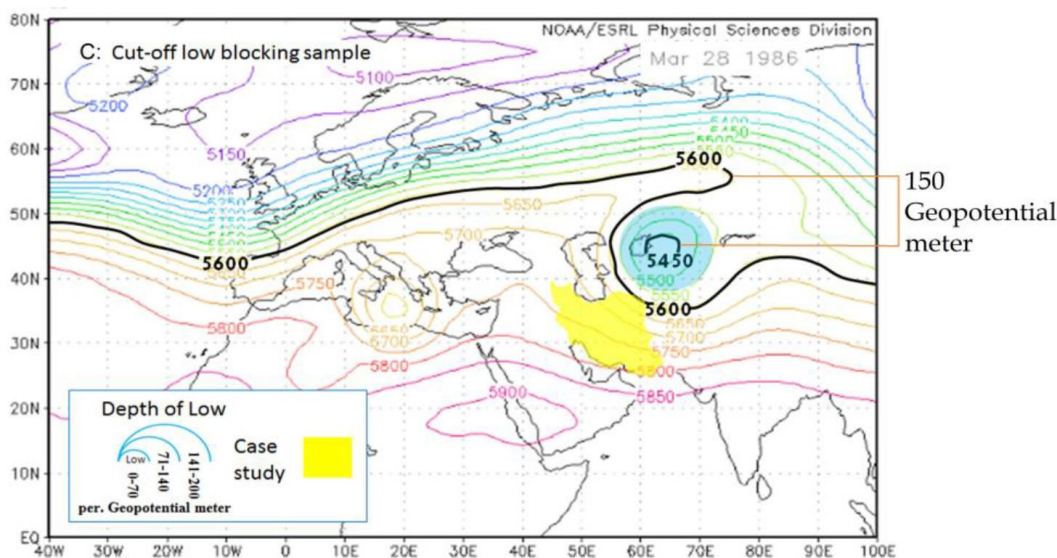
شکل ۱: موقعیت ایران و ایستگاه‌های برگزیده

چندروزه طی روز اوج یخبندان موقعیت‌یابی شود، نتایج بهتری به دست می‌آید. این شیوه در این تحقیق نوآورانه نیست. پیش از این از نمایه اوج برای بررسی همدید بارندگی‌های روزانه در غرب ایران (جهانبخش و ذوالفقاری، ۱۳۸۱) نمایه‌های آغاز و پایان برای بررسی همدید موج‌های گرما در مرکز و شمال یونان (Brikas et al, 2006) و نمایه‌های آغاز، دوام و پایان برای بررسی همدید موج یخبندان در ایران (نظری‌پور و ریگی، ۱۳۹۴) استفاده کرده‌اند. چنانکه در شکل ۲ دیده می‌شود طی سال ۱۹۷۶ یخبندان دیگری نیز از ۱۵ فروردین تا ۲۳ فروردین رخ داده است که دوام آن ۲ روز کمتر از موج بادوام است. روز اوج یخبندان بادوام سال ۱۳۵۵، هشتمین روز از فصل بهار است. با تعیین ۴۷ مورد یخبندان بادوام و تعیین تاریخ‌های آغاز و پایان هر یک از آنها از مرکز واکاوی داده‌های جو (NCEP/NCAR)، نقشه‌های هوای ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال روزهای اوج آنها تهیه شد و بر پایه ملاحظات زیر الگوهای بندال کم‌فشار بریده موثر تهیه گردید. شایان ذکر است که با توجه به پویایی بودن سامانه مورد بررسی،

با تنظیم جداول مقادیر روزانه دمای صفر و زیر صفر درجه سلسیوس برای ایستگاه‌های دارای یخبندان (از این پس ادی) و آشکارسازی تغییرات روزانه فراوانی آنها، جمعا ۱۱۴ موج یخبندان برای ایران شناسایی شد. بعد از شناسایی امواج یخبندان، اقدام به تعیین بادوام‌ترین موج یخبندان هر سال در فصل بهار (از این پس یخبندان بادوام) شد. برای هر یخبندان بادوام سه ویژگی کلی شامل شماره پیوسته موج یخبندان از آغاز بازه آماری تا آخر، دوام بر حسب روز و تاریخ وقوع و سه ویژگی جزئی شامل فراوانی ادی‌ها، میانگین دمای آنها و نوع الگوی بندال مربوط به روز اوج تعیین شد. در بخش همدید، کار شناسایی بندال موثر بر رخداد یخبندان بادوام از روز اوج تا روز اول (به شکل قهقرایی) و سپس از روز اوج تا روز پایان (با روش پیش‌رو) انجام شد. از آنجا که گاه سامانه‌های همدید اعم از ناهه‌های تراز میانی، پرفشارها و کم‌فشارهای مهاجر، به شکل زنجیره‌ای یعنی دوتایی و گاه بیشتر و با فاصله نسبتا کم به سمت شرق یعنی ایران می‌آیند؛ تجربه نشان می‌دهد چنانچه سامانه موثر بر رخداد یک موج

ارتفاع آنها از صفر تا ۲۰۰ ژئوپتانسیل متر تعیین شد. این مقادیر در ۳ طبقه شامل بندال‌های کم‌عمق (کمتر از ۷۰ ژئوپتانسیل‌متر)، بندال‌های متوسط (از ۷۱ تا ۱۴۰ ژئوپتانسیل‌متر) و بندال‌های با عمق زیاد (بیش از ۱۴۰ ژئوپتانسیل‌متر) جای گرفت. برای نمایش این سه طبقه روی الگوهای همدید، از نماد دایره‌های آبی با سه شعاع متفاوت از کوچک به بزرگ استفاده شد. در این الگوها، امتداد بندال کم‌فشار بریده نیز به صورت منحنی ممتد با رنگ آبی در زیر هر دایره رسم شد.

در این تحقیق دو عبارت «کم‌فشار بریده» و «کم‌ارتفاع بریده» به یک معنا به کار رفته است. جهت طراحی الگوهای همدید این سامانه‌ها، میزان اختلاف ارتفاع بر حسب ژئوپتانسیل‌متر میان کانون بندال کم‌فشار بریده و بیرونی‌ترین پربند آزاد پیرامون آن محاسبه شد. برای نمونه، شکل (۳ الف) نشان می‌دهد که میان کانون کم‌فشار بریده با ارتفاع ۵۴۵۰ ژئوپتانسیل‌متر در شرق دریاچه آرال و پربند آزاد پیرامون آن، میزان اختلاف ارتفاع ۱۵۰ ژئوپتانسیل‌متر است. با شناسایی ۱۸ مورد بندال کم‌فشار بریده و تعیین مقادیر اختلاف یاد شده، دامنه تغییر اختلاف

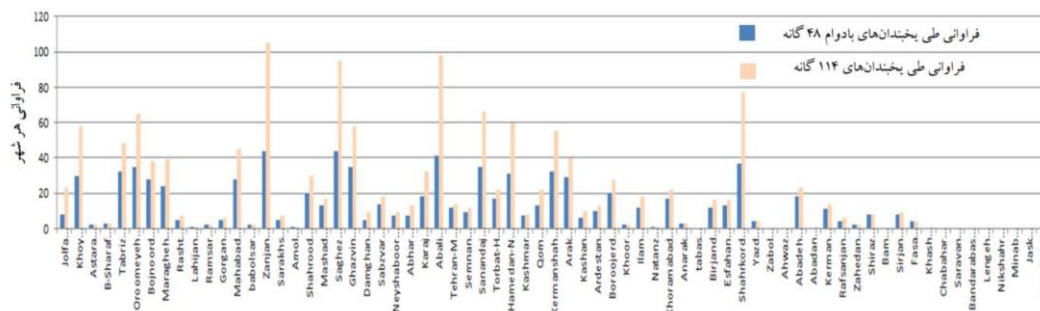


شکل ۲: طراحی الگوهای عمق، کانون و امتداد بندال‌های کم‌فشار بریده

صحت سنجه‌هایی است که در گزینش ۴۸ موج یخبندان بادوام از مجموعه ۱۱۴ موج به کار گرفته شده است. شهرهای زنجان و سقز، مشترکا با ۴۴ بار رخداد، بالاترین فراوانی یخبندان‌های بادوام را داشته‌اند. در این میان فسا جنوبی‌ترین شهری است که دارای گزارش یخبندان بوده، شهرهای پایین‌تر تا سواحل جنوبی ایران یخبندان نداشته‌اند.

نتایج

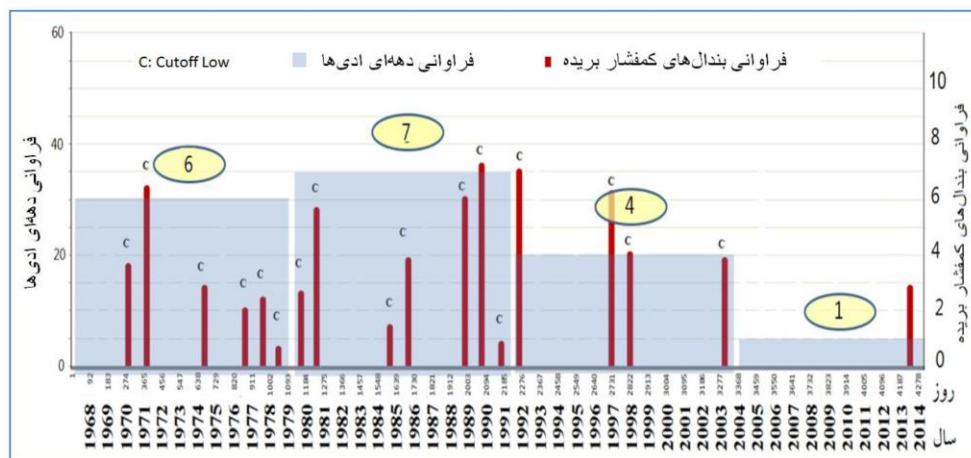
شکل ۳، فراوانی رخداد دمای صفر و زیر صفر سلسیوس را طی روز اوج برای هر یک از شهرهای منتخب به ترتیب از سمت چپ به سمت راست با کاهش عرض جغرافیایی و به تفکیک فراوانی طی مجموع یخبندان‌های تعیین شده یعنی ۱۱۴ موج (با میله‌های روشن) و یخبندان‌های بادوام یعنی ۴۸ موج (با میله‌های تیره) نشان می‌دهد. هماهنگی آشکار این دو سری، به تنهایی گویای



شکل ۳: فراوانی رخداد دمای صفر و زیر صفر طی روز اوج یخبندان‌های بهاره ایران در هر یک از شهرهای برگزیده طی یخبندان‌های بادوام (۴۷ مورد) و طی همه یخبندان‌ها (۱۱۴ مورد).

دهه مورد بررسی، بتدریج از سال ۱۹۸۶ تا سال ۲۰۱۴، نقش الگوهای بن‌دال کم‌فشار بریده در رخداد یخبندان‌های بادوام‌تر، کم‌رنگ‌تر شده است. هم‌زمان با این رخداد، فراوانی میانگین دهه‌ای ادی‌ها نیز کاهش یافته است. مرتبط با این موضوع محققانی چون سیلمن و همکاران (Sillmann et al, 2011) به تغییر موقعیت بن‌دال‌ها و کاهش اثر سرمایشی آنها در شمال شرق اروپا، لیما و امبریزی (Lima and Ambrizzi, 2002)، به کاهش فراوانی و شدت بن‌دال‌ها روی ژاپن و نیز (قویدل و همکاران، ۱۳۹۵) به تضعیف ناو‌های عمیق عامل یخبندان در ایران از سال ۲۰۰۵ به بعد اشاره کرده‌اند.

در بخش همدید، شکل ۴ نشان می‌دهد که مجموعه ۱۸ مورد یخبندان بادوام متأثر از الگوی کم‌فشار بریده، چه پراکنشی طی ۴ بازه ۱۱ تا ۱۲ ساله (۱۹۶۸ تا ۲۰۱۴) داشته‌اند. بلندترین میله یعنی گسترده‌ترین یخبندان بادوام، مربوط به ۲۵ مارس ۱۹۶۸ با فراوانی ۴۷ ادی و کوتاه‌ترین میله یعنی کوچک‌ترین یخبندان بادوام، مربوط به ۲۹ مارس سال ۱۹۷۹ با فراوانی ۳ ادی بوده است. کاهش سرعت بادهای غربی (Huang et al, 2007) و به دنبال آن تشکیل الگوی بن‌دال از جمله عواملی هستند که می‌توانند به یخبندان‌هایی بادوام از چند روز تا چند هفته بینجامند. شکل ۴ نشان می‌دهد که طی چهار



شکل ۴: نمودار سامانه‌های مؤثر بر رخداد یخبندان‌های بادوام بهاره ایران و فراوانی ادی هر یخبندان طی دوره ۱۳۹۳-۱۳۴۷

جدول ۱، مشخصات ششگانه یخبندان‌های بادوام را بر حسب کاهش دوام آنها نشان می‌دهد. سردترین روز اوج، میان یخبندان‌های مورد بررسی، مربوط به یخبندان بادوام با شماره پیوسته

۴۹ است که در تاریخ ۲۱ مارس ۱۹۹۰ برابر با نخستین روز از فصل بهار در تقویم ایرانی است. این روز با میانگین دمایی ۴/۶۲- یعنی پایین‌ترین دما در مجموعه یخبندان‌ها مشخص شده است.

جدول ۱: مشخصات بادوام‌ترین یخبندان‌های بهاره ایران طی بازه ۱۹۶۸-۲۰۱۴

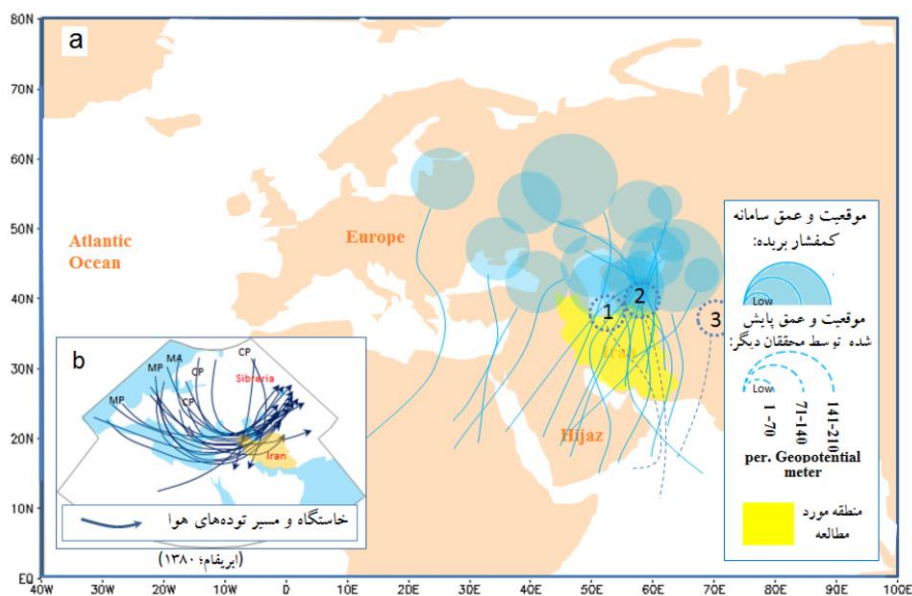
مشخصات طی روز اوج				دوام (روز)	شماره پیوسته	رتبه
فرآوانی شهرها	میانگین دمای شهرها	عمق کم‌فشار	تاریخ			
۳۵	-۲/۷	۱۷.۵	۹۲/۰۳/۲۵	۲۴	۵۶	۱
۳۲	-۴/۱	۱۰۰	۷۲/۰۳/۲۱	۲۰	۱۰	۲
۳۱	-۳/۶	۱۷	۹۷/۰۳/۲۱	۱۵	۷۰	۳
۲۸	-۳/۲	۱۰۰	۸۱/۰۴/۰۳	۱۵	۳۰	۴
۳۰	-۳/۳	۷۵	۸۹/۰۳/۳۱	۱۴	۴۸	۵
۱۳	-۲/۲	۲۰۰	۸۰/۰۴/۱۸	۱۴	۲۹	۶
۳۶	-۴/۶	۱۵	۹۰/۰۳/۲۱	۱۳	۴۹	۷
۱۹	-۳/۴	۷۵	۰۳/۰۳/۲۹	۱۲	۸۸	۸
۱۴	-۲/۴	۷۵	۷۵/۰۳/۳۱	۱۲	۱۸	۹
۱۴	-۲/۲	۱۰۰	۱۳/۰۳/۲۵	۱۵	۱۱۱	۱۰
۱۹	-۱/۶	۱۵۰	۸۶/۰۳/۲۸	۱۱	۴۱	۱۱
۲۰	-۲/۷	۱۲۵	۹۸/۰۳/۲۱	۹	۷۳	۱۲
۷	-۱/۳	۶۴	۸۵/۰۳/۲۸	۱۲	۳۸	۱۳
۴	-۱/۲	۲۵	۹۱/۰۳/۲۸	۱۳	۵۳	۱۴
۱۸	-۲/۷	۱۲.۵	۷۱/۰۳/۲۳	۸	۷	۱۵
۳	-۱	۱۰۰	۷۹/۰۳/۲۹	۸	۲۶	۱۶
۱۲	-۰/۹	۱۰۰	۷۸/۰۴/۱۵	۶	۲۵	۱۷
۱۰	-۰/۳	۷۵	۷۷/۰۴/۱۷	۳	۲۳	۱۸

بندال از نوع کم‌فشار بریده رخ داده است و موج‌های یخبندان ناشی از این نوع بندال‌ها، به‌طور متوسط ۱۱ ممیز ۴ روز طول کشیده‌اند. از مجموع ۴۸ مورد یخبندان بادوام، بادوام‌ترین آنها طی مارس ۱۹۹۱ با تاثیر الگوی کم‌فشار بریده، ۲۴ روز طول کشیده است. شکل (۵ الف)، الگوی موقعیت بندال‌های کم‌فشار بریده در تراز میانی وردسپهر

لاست و همکاران (Llasat et al, 2007)، کم فشارهای بریده را استخرهای هوای سرد می‌دانند که از گردش بسته هوا در عرض‌های میانی و وردسپهر میانی و نیز بنا به نظر نیتو و همکاران (Nieto et al, 2007) از ناوه عمیق بادهای غربی پدید آمده‌اند. نتایج تحقیق کنونی نشان می‌دهد که طی بازه ۴۷ ساله مورد مطالعه، تعداد ۱۸ مورد

توده‌های هوای CP و CA را به ایران تسهیل می‌کند. در تحقیقات متعدد، نفوذ این توده‌ها به ایران با تعبیر ورود هوای سرد از روسیه به ایران (امیدوار و ابراهیمی، ۱۳۹۱)، گردش پادساعتگرد هوا از عرض‌های بالا (نظری‌پور و ریگی، ۱۳۹۴)، شارش هوای سرد شمالی (هژبرپور و علیجانی، ۱۳۸۶) و فرارفت هوای سرد (منتظری و مسعودیان، ۱۳۸۹؛ عزیزی و همکاران، ۱۳۸۸) بیان شده است. هماهنگ با یافته‌های تحقیق کنونی، شکل (۵ ب)، مسیر توده‌های هوای سرد را از سه خاستگاه سیبری، جنوب اسکاندیناوی و جنوب انگلستان به سمت غرب طی سال‌های ۱۹۸۳ و ۱۹۸۴ نشان می‌دهد (ابریفام، ۱۳۸۰). کانون ناو‌ها عموماً در ۲۰ تا ۷۰ درجه شرقی و ۴۰ تا ۶۰ درجه عرض شمالی است. بررسی‌ها نشان داد عموماً با عمیق شدن ناو‌های دارای راستای نصف‌النهاری از دوام یخبندان‌ها کاسته می‌شود. در هر حال عموم کانون‌های کم‌فشار در عرض‌های شمالی‌تر و در بیرون از ایران بوده‌اند.

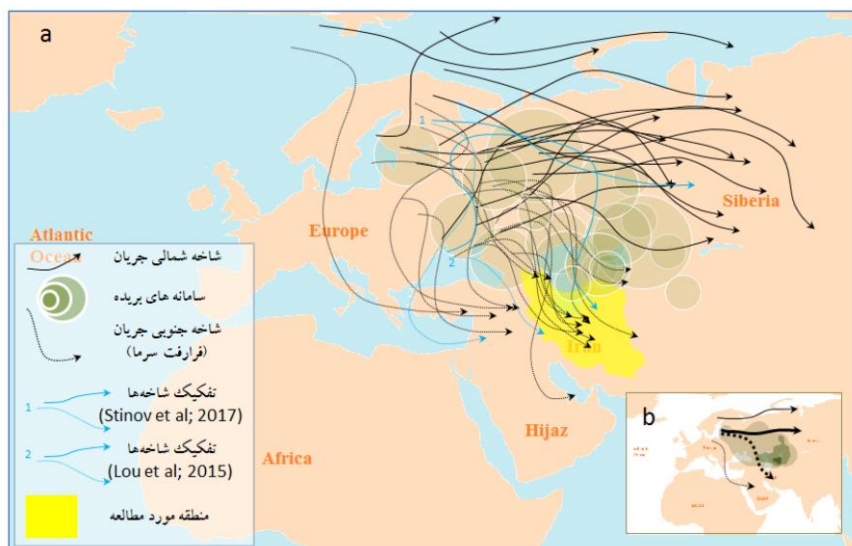
است. کانون هر کم‌فشار به شکل دایره‌ای آبی نمایش داده شده است. بزرگی و کوچکی هر دایره بر حسب واحد، گویای عمق کم‌فشار بوده، منحنی آبی زیر هر دایره، گویای امتداد ناو‌ه مربوط به آن طی روز اوج هر یخبندان بادوام در فصل بهار است. در بیشتر یخبندان‌ها، محور ناو‌ه روی ایران دارای راستایی شمال شرقی-جنوب غربی است. نتایج این الگو با نتایج محققان دیگر نیز قابل تطبیق است. موقعیت‌های ۱ و ۲ مربوط به کم‌ارتفاع‌های بریده ۲۳ فوریه ۱۹۹۱ (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۷) و موقعیت ۳ مربوط به یخبندان فراگیر ۲۴ آذر ۱۳۸۲ (لشکری، ۱۳۸۷) است. اگر قایل باشیم که سرچال جوی روی نقشه‌های هوا دست‌کم دو معیار کمی برای بقا نشان می‌دهد که شامل میزان اختلاف ارتفاع کانون کم‌ارتفاع با پیرامون و طول محور ناو‌ه زیر آن است؛ در این صورت روی الگو مشاهده می‌کنیم که از غرب به شرق با دور شدن این سامانه از پهنه‌های آبی محور‌ها کوتاه‌تر شده‌اند. چنانکه در الگو دیده می‌شود راستای غالب محورهای ناو‌ه، ورود و دوام



شکل ۵: موقعیت بندان‌های کم‌فشار بریده عامل یخبندان‌های بادوام (الف) و خاستگاه و مسیر توده‌های هوای سرد در غرب ایران (ب).

مسیرها و اثر منفی دریای نسبتاً گرم مازندران در پراکنش آنها مشهود است. در مجموع الگو نشان می‌دهد که تشکیل سامانه‌های بریده در شمال مرزهای ایران و هم‌عرض دریای مازندران (شکل ۶ ب)، احتمال رخداد یخبندان را با جریان‌های شمالی‌تر و به تبع سردتر افزایش می‌دهد تا تشکیل این سامانه‌ها در موقعیت‌های شمال این دریا و اروپای شرقی. در حالت دوم شاخه‌های جنوبی بادهای غربی ناچار می‌شوند در یک گردش بزرگ چپگرد، مسافتی را از روی پهنه‌های آبی سیاه و مدیترانه بگذرند و قاعدتاً تعدیل شوند.

الگوی جریان‌های هوا (شکل ۶ الف)، نشان می‌دهد که استخرهای هوای سرد عامل یخبندان (دایره‌های دایره‌های دارای لبه سفید)، محدوده‌ای را از اروپای خاوری تا دریاچه بالخاش دربر گرفته‌اند. جریان یکپارچه باد از کناره باختری این سامانه‌های بریده، دو شاخه می‌شود. عموماً شاخه شمالی قوی‌تر و شاخه جنوبی که عامل یورش سرما و یخبندان بهاره روی ایران است، ضعیف‌تر است. ضعف شاخه جنوبی از جمله به دلیل اختلاف دمای کمتر ستون هواست که خود می‌تواند ناشی از عرض جغرافیایی پایین باشد. روی الگو، اثر مثبت رشته کوه زاگرس در هم‌آیی



شکل ۶: الگوی جریان هوا در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (الف) و مسیرهای غالب (ب) طی روزهای یخبندان ناشی از سامانه بندال کم‌فشار بریده

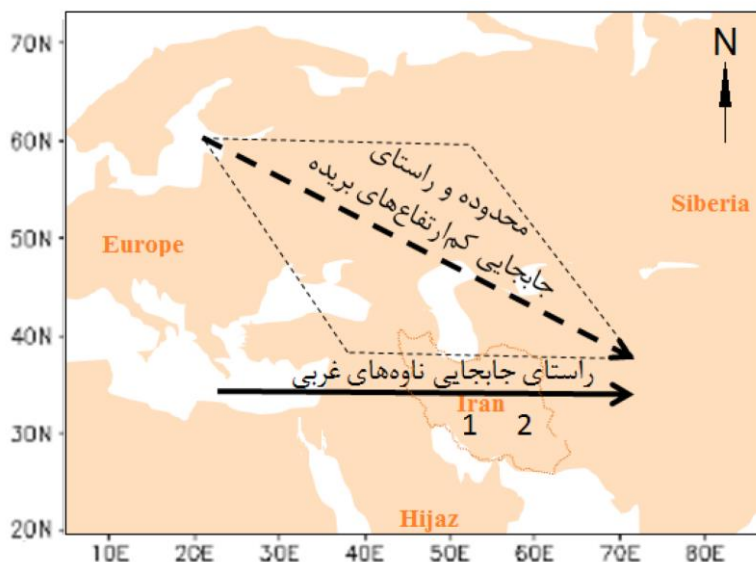
نتیجه‌گیری

خطر یخبندان بهاره که خسارت‌بارترین نوع یخبندان به‌ویژه برای محصولات کشاورزی است؛ گستره‌ای را در ایران از کرانه‌های رودهای اترک و ارس تا فسا در استان فارس تهدید می‌کند. هر چند به لحاظ هم‌دیدگی عوامل رخداد یک موج یخبندان، طیفی از بندال‌ها شامل کم‌فشار بریده، دوقطبی، امگا، رکس، الگوی ناوه غربی و حتی

نکته آخر اینکه در این تحقیق الگوی ناوه غربی و الگوی جریان‌های مداری بحث نشد چراکه جزو الگوهای بندال نبودند ولی گفتنی است که محققان بسیار از جمله (قویدل و همکاران، ۱۳۹۵) به نقش الگوی ناوه غربی در رخداد موج‌های سرما در شمال غرب ایران و یا بخش‌هایی از آن مانند جنوب شرق (خسروی و همکاران، ۱۳۹۴) اشاره کرده‌اند.

(موقعیت ۱ در شکل ۷) و مسیرهای باز ورود توده‌های هوای سرد و خشک سیبری در شرق (موقعیت ۲ در شکل ۷) و در تراز میانی جو شامل راستای مورب جابجایی کم‌فشارهای بریده از جنوب شبه‌جزیره اسکاندی به سوی فلات پامیر (محدوده خط‌چین در شکل ۷) و راستای مداری جابجایی ناو‌های غربی است. به سخن دیگر برآیند هم‌افزایی این چهار عامل گو اینکه از یک جنس و در یک تراز نیستند، نفوذ متقارن جنوب‌سوی امواج سرما و یخبندان در شرق و غرب ایران است.

الگوی مداری جریان است ولی نتایج این تحقیق هماهنگ با تحقیقات متعدد در سطح جهانی و ایران مشخص کرد که به لحاظ زمانی فراوانی رخداد بندال کم‌فشار بریده در بازه‌ای حدوداً ۵۰ ساله به نحو آشکاری رو به کاهش است. این کاهش قاعدتاً با گرمایش جهانی آب‌وهوا توجیه می‌شود. همچنین به لحاظ مکانی الگوهای طراحی شده شرایطی را نشان داد که کاهش مخاطره یخبندان بهاره در شرق و غرب ایران و در امتداد عرض جغرافیایی، آشکارا متاثر از فاصله تا آب‌های گرم جنوب است. این شرایط در سطح زمین به ترتیب شامل وجود ناهمواری‌های زاگرس در غرب



شکل ۷: محدوده و راستای جابجایی کم ارتفاع‌های بریده و ناو‌های بادهای غربی

منابع

-امیدوار، ک.، ۱۳۹۵. بررسی و تحلیل همدید-
دینامیک ریز برف در استان یزد، مجله اطلاعات
جغرافیایی سپهر، دوره ۲۵، شماره ۹۸، ص ۲۵-
۴۲.
-بازگیر، س.، محمدی، ح.، شریفی، ل. و سلیمانی،
ن.، ۱۳۹۵. تحلیل مخاطره یخبندان و سرمازدگی
محصولات باغی آذربایجان غربی، مدیریت
مخاطرات محیطی، شماره ۳(۴)، ص ۳۶۵-۳۷۸.

-ابریفام، م.ر.، ۱۳۸۰. تحلیل سینوپتیک توده‌های
هوای ورودی به غرب ایران، پایان‌نامه کارشناسی-
ارشد جغرافیای طبیعی، دانشگاه رازی.
-امیدوار، ک. و ابراهیمی، ع.، ۱۳۹۱. تحلیل
همدیدی موج سرمای شدید ۱۶ تا ۲۵ دیماه
۱۳۸۶ در ایران مرکزی، مجله جغرافیا و
برنامه‌ریزی محیطی، دوره ۲۳، شماره ۱، ص ۸۱-
۹۸.

- براتی، غ.، احمدی، م.، میرزایی، ا. و بیتار، م.، ۱۳۹۵. ترازایی زبانه‌های پرفشار سیبری هنگام رخداد سرماهای بحرانی در ایران مرکزی، پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۷(۲۶)، ص ۱۱۷-۱۲۹.
- صلاحی، ب.، ۱۳۹۵. پیش‌بینی و تحلیل یخبندان‌های سبک و سنگین ایستگاه‌های منتخب استان اردبیل با استفاده از خروجی ریزگردان لارس دلبیوجی در دهه‌های آینده، پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۷(۲۷)، ص ۱-۲۷.
- روزنامه جام‌جم، ۱۳۹۳. پانصد و شصت میلیارد ریال خسارت سرمازدگی به باغ‌های چهارمحال و بختیاری، <http://jamejamonline.ir/online>
- جهانبخش اصل، س. و ذوالفقاری، ح.، ۱۳۸۱. بررسی الگوهای سینوپتیک بارندگی‌های روزانه در غرب ایران، مجله تحقیقات جغرافیایی، شماره ۶۴، ص ۲۳۴-۲۵۸.
- خسروی، م.، صفرزایی، ن. و آرامش، م.، ۱۳۹۴. تحلیل هم‌دید یخبندان‌های زمستانه منطقه سیستان - مورد یخبندان ژانویه سال ۲۰۰۸، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۱۹، شماره ۵۲، ص ۱۱۳-۱۴۰.
- درگاهیان، ف.، علیجانی، ب. و محمدی، ح.، ۱۳۹۳. شناسایی الگوهای هم‌دید سامانه‌های بندالی مؤثر بر دمای ایران، مجله پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، شماره ۲۳، ص ۸۱-۹۲.
- رحیمی، م.، فرج زاده، م. و کمالی، غ.، ۱۳۹۰. مدل‌سازی خطر خسارت یخبندان بهاره درختان میوه مطالعه موردی: محصول سیب، مکان دشت مشهد، مجله پژوهش‌های زراعی ایران، شماره ۲(۲)، ص ۲۷۳-۲۸۴.
- عزیزی، ق.، اکبری، ط.، داوودی، م. و اکبری، م.، ۱۳۸۸. تحلیل هم‌دید موج سرمای شدید دی
- ماه ۱۳۸۶ ایران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۱، شماره ۷۰، ص ۱-۱۹.
- عزیزی، ق. و خلیلی، م.، ۱۳۹۰. نقش بلاکینگ در رخداد سرماهای فرین ایران، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۷، ص ۳۹-۵۵.
- عزیزی، ق.، مرادی، م. و رضایی، ح.، ۱۳۹۷. اقلیم‌شناسی کم‌ارتفاع‌های بریده مؤثر بر ایران و ارتباط آن با ENSO و NAO، مجله تحقیقات جغرافیایی، شماره ۳۳(۱)، ص ۱۵۹-۱۷۳.
- علیجانی، ب. و براتی، غ.، ۱۳۷۵. تحلیل سینوپتیک یخبندان بهاره‌ی سال هزار و سیصد و شصت و شش ایران، مجله تحقیقات جغرافیایی، شماره ۴۰، ص ۱۲۱-۱۳۵.
- قویدل رحیمی، ی.، ۱۳۸۸. تحلیل هم‌دید دماهای دوره سرد سال در منطقه شمال غرب ایران، رساله دکتری اقلیم‌شناسی، راهنمایی جواد خوشحال، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، گروه جغرافیا، دانشگاه اصفهان.
- قویدل رحیمی، ی.، فرج‌زاده، م. و مطلبی‌زاد، س.، ۱۳۹۵. تحلیل آماری و سینوپتیک امواج سرمای منطقه شمال غرب ایران، مجله تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، دوره ۱۶، شماره ۴۰، ص ۲۹-۴۶.
- لشکری، ح. و کیخسروی، ق.، ۱۳۸۷. تحلیل سینوپتیکی موج سرمای ۸-۱۵ دیماه ۱۳۸۵ در ایران، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۱۴(۱)، ص ۱۵۱-۱۷۷.
- لشکری، ح.، ۱۳۸۷. تحلیل سینوپتیک موج سرمای فراگیر ۱۳۸۲ در ایران، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۶۶، ص ۱-۱۸.
- مسعودیان، س.ا. و دارند، م.، ۱۳۹۱. واکاوای ناهنجاری‌های فشار تراز دریا در روزهای همراه با

تلفیقی) در رخداد موج یخبندان آذر ۱۳۸۲ در ایران، مجله جغرافیا و آمایش شهری- منطقه‌ای، شماره ۱۷، ص ۱۰۳-۱۱۸.

-ویسی، م.، ۱۳۸۷. تحلیل سینوپتیک دوره‌های یخبندان در استان کردستان، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، به راهنمایی فرامرز خوش اخلاق، دانشکده جغرافیا، گروه اقلیم‌شناسی، دانشگاه تهران.

-هژبرپور، ق. و علیجانی، ب.، ۱۳۸۶. تحلیل هم‌دید یخبندان‌های استان اردبیل، مجله جغرافیا و توسعه، دوره ۵، شماره ۱۰، ص ۸۹-۱۰۶.

-یارمرادی، ز.، کیخسروی، ق. و نصیری، ب.، ۱۳۹۷. بررسی امواج سرمای ناحیه غرب ایران، پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۹(۳۵)، ص ۵۱-۶۷.

رخداد سرماهای فرین ایران، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۲۳، ص ۱-۱۴.

-مسعودیان، س.ا. و دارند، م.، ۱۳۹۲. تحلیل هم‌دید یخبندان‌های فراگیر و بادوام ایران، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۲، ص ۱۲۹-۱۴۰.

-مسعودیان، س.ا. و دارند، م.، ۱۳۹۰. تحلیل هم‌دید سرماهای فرین ایران، مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۲۲، ص ۱۶۵-۱۸۵.

-منتظری، م. و مسعودیان، س.ا.، ۱۳۸۹. شناسایی الگوهای فرارفت دمایی ایران در سال‌های سرد، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۲، شماره ۴، ص ۷۹-۹۴.

-نظری پور، ح. و ریگی، ا.ب.، ۱۳۹۴. اندرکنش سامانه کم‌فشار اسکاندیناوی با سامانه‌های فشار زیاد سیبری - اروپا و شمال غرب ایران (پرفشار

-Andrei, S. and Roman, I., 2012. Severe weather phenomena in southern Romania in association with blocking circulation over Euro-Atlantic area during the cold season: Journal of Romanian Reports in Physics, v. 64(1), p. 246-262.

-Arkadiusz, M.T., Katarzyna, S. and Agnieszka, M., 2015. Frost periods and frost-free periods in Poland and neighbouring countries: Open Geosci, v. 7, p. 812-823.

-Barriopedro, D., García-Herrera, R., Lupo, A.R. and Hernández, E., 2006. A climatology of Northern Hemisphere blocking: Journal of Climate, v.19(6), p. 1042-1063. doi:10.1175/JCLI3678.1.

-Brikas, D.P., Karacostas, T.S., Pennas, P.J. and Flocas, A.A., 2006. The role of the subtropical jet stream during heat wave events over north-central Greece: Meteorology and Atmospheric Physics, v. 94, p. 219-233.

-Buehler, T., Raible, C.C. and Stocker, T.F., 2012. The relationship of winter season North Atlantic blocking frequencies to extreme cold or dry spells in the ERA-40: Tellus, v. 63, p. 212-222,

-Brunner, L., Hegerl, G. and Steiner, A., 2017. Connecting Atmospheric Blocking to European Temperature Extremes in Spring: Journal of Climate, v. 30, p. 585-594.

-Cattiaux, J., Vautard, R., Cassou, C., Yiou, P., Masson-Delmotte, V. and Codron, F., 2010. Winter 2010 in Europe: A cold extreme in a warming climate: Geophysical Research Letters, v. 37(20), p. 1-6.

-Cohen, J., Screen, J.A., Furtado, J.C., Barlow, M., Whittleston, D., Coumou, D. and Jones, J., 2014. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather: Journal of Nature geoscience, v. 7(9), p. 627-642. DOI: 10.1038/NGEO2234.

- Crocì-Maspoli, M., Schwierz, C. and Davies, H.C., 2007. A multifaceted climatology of atmospheric blocking and its recent linear trend: *Journal of Climate*, v. 20(4), p. 633-649. doi:10.1175/JCLI4029.1
- Gough, W.A., Benita, Y.T., Mohsin, T. and Allen, S.H., 2014. Extreme cold weather alerts in Toronto, Ontario, Canada and the impact of a changing climate: *Urban Climate*, v.30, p. 1-9.
- Hong, C. and Li, T., 2008. The Extreme Cold Anomaly over Southeast Asia in February 2008: Roles of ISO and ENSO: *Climate*, v. 22(13), p. 3786-3801.
- Hoskins, B. and Berrisford, P., 1988. A potential vorticity perspective of the storm of 15–16 October 1987: *Weather*, v. 43(3), p.122-129.
- Huang, F., Xiaoyan, T.S. and Cuihua, L.U., 2007. Evolution of dipole-type blocking life cycles: Analytical diagnoses and observations: *Journal of the atmospheric sciences*, v.64(1), p. 52-73.
- Kim, J.A. and Byun, H.R., 2016. Spatiotemporal variability of the latest frosts in Korean Peninsula and causes of atmospheric circulation: *Journal of Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 128(5), p. 663-675.
- Lejenäs, H., 1989. The Severe Winter in Europe 1941-42 the large scale circulation cut off lows and blocking: *Bulletin American Meteorological Society*, v. 70, p. 271-281.
- Lima, N.E. and Ambrizzi, T., 2002. The influence of atmospheric blocking on the Rossby wave propagation in Southern Hemisphere winter flows: *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v.80 (2), p. 139-159.
- Llasat, M.C., Martin, F. and Barrera, A., 2007. From the concept of “Kaltlufttropfen” (cold air pool) to the cut-off low; The case of September 1971 in Spain as an example of their role in heavy rainfalls: *Journal of Meteorology and Atmospheric physics*, v. 96(1), p. 43-60.
- Lu, Q., Zhang, W., Zhang, P., Wu, X., Zhang, F., Liu, Z. and Dale, M.B., 2010. Monitoring the 2008 Cold Surge and Frozen Disasters Snowstorm in South China Based on Regional ATOVS Data Assimilation: *Science China*, v. 53(8), p. 1216-1228.
- Luo, D. and Yao, Y., 2015. The Positive North Atlantic Oscillation with Downstream Blocking and Middle East Snowstorms; The Large-Scale Environment: *Journal of Climate*, v. 28, p. 6398-6418.
- Nieto, R., Gimeno, L., Anel, J., Torre, L., Gallengo, D., Barriopedro, D., Gallego, M., Gordillo, A., Redano, A. and Delgado, G., 2007. Analysis of The Precipitation and Cloudiness Associated with COLS Occurrence in the Iberian Peninsula, *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 96, p. 103-119.
- Peterson, T.C., Heim, J.R., Hirsch, R., Kaiser, D.P., Brooks, H., Diffenbaugh, N.S. and Katz, R.W., 2013. Monitoring and understanding changes in heat waves, cold waves, floods, and droughts in the United state of knowledge: *Journal of Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 94(6), p. 821-834.
- Pezza, A.B. and Ambrizzi, T.É.R., 2005. Cold waves in South America and freezing temperatures in São Paulo: Historical background (1888-2003) and case studies of cyclone and anticyclone tracks: *Journal of Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20(1), p. 141-158.
- Pfahl, S. and Wernli, H., 2012. Quantifying the relevance of atmospheric blocking for colocated temperature extremes in the Northern Hemisphere on (sub-)daily time scales:

- Geophysical Research Letters, v. 39(4), p. 25-43.
- Palmén, E. and Newton, C., 1969. Atmospheric Circulation Systems, Academic Pub, New York, 190 p.
- Porebska, M. and Zdunek, M., 2013. Analysis of extreme temperature events in Central Europe related to high pressure blocking situations in 2001–2011: Meteorologische Zeitschrift, v. 22 (5), p. 533-540.
- Park, T.W., Ho, C.H. and Deng, Y., 2014. A synoptic and dynamical characterization of wave-train and blocking cold surge over East Asia: Clim, v. 43, p.753-770.
- Rahimi, M., Hajjam, S., Khalili, A., Kamali, G.A. and Stigter, C.J., 2007. Risk analysis of first and last frost occurrences in the Central Alborz Region, Iran: International Journal of Climatology, v. 27(3), p. 349-356.
- Rousta, I., Doostkamian, M., Haghghi, E. and Mirzakhani, B., 2016. Statistical-synoptic analysis of the atmosphere thickness pattern of iran's pervasive frosts: Journal of Climate, v. 4(3), p. 41-65. doi.org/10.3390/cli4030041.
- Ruddell, D., Hoffman, D., Ahmad, O. and Brazel, A., 2013. Historical threshold temperatures for Phoenix (urban) and Gila Bend (desert), central Arizona, USA: Journal of Climate Research, v. 559(3), p. 201-215.
- Singleton, A. and Reason, C., 2007. A Numerical Model Study of an Intense Cutoff Low Pressure System Over South Africa: Monthly Weather Review, v. 135, p. 1128-1150.
- Sillmann, J., Croci-Maspoli, M., Kallache, M. and Katz, R.W., 2011. Extreme cold winter temperatures in Europe under the influence of North Atlantic atmospheric blocking: Journal of Climate, v. 24(22), p. 5899-5913.
- Simmonds, I. and Rashid, H.A., 2001. An investigation of a dramatic cold outbreak over southeast Australia: Journal of Australian Meteorological Magazine, v. 50(4), p. 249-260.
- Thomas, C.P., Richard, R., Heim, J.R., Robert, H., Dale, P., Harold, B., Noah, S., Randall, M., Jason, P., Giovannetone, K.G., Thomas, R., Karl, R.W., Katz, K.K., Dennis, L., Gregory, J., McCabe, C.J., Paciorek, K.R., Ryberg, S.S., Viviane, B.S., Silva, B.C., Stewart, A.V., Vecchia, G., Villarini, R.S., Vose, J.W., Michael, W., David, W., Klaus, W., Connie, A.W. And Donald, W., 2013. Monitoring and Understanding Changes in Heat Waves, Cold Waves, Floods, And Droughts in The United States: American Meteorological Society, v. 14, p. 821-834.
- Tomczyk, A.M., Szyga-Pluta, K. and Majkowska, A., 2015. Frost periods and frost-free periods in Poland and neighbouring countries: Journal of Open Geosciences, v. 7(1), p. 812-823.
- Yue, Y., Zhou, Y., Wang, J.A. and Ye, X., 2016. Assessing Wheat Frost Risk with the Support of GIS: An Approach Coupling a Growing Season Meteorological Index and a Hybrid Fuzzy Neural Network Model: Journal of Sustainability, v. 8(12), p. 1308-1326. doi:10.3390/su8121308.