



پروپوزیشن گاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی







Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 11, Issue 3 - Number 43, Fall 2022


<https://geoeh.um.ac.ir>

 <https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.72822.1116> 

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره چهل و سوم، پاییز ۱۴۰۱، صص ۲۶۷-۲۵۱

مقاله پژوهشی

جنبه‌های سینوپتیک و دینامیک طوفان برف با کولاک گسترده در ایران-۱۴ تا ۲۰ بهمن ۱۳۵۰

 مهدی صداقت^۱-استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

حمید نظری‌پور- استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

علیرضا صادقی‌نیا- استادیار گروه آموزشی جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۲۸ تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۱/۱۳

چکیده

کولاک، شکل شدید طوفان‌های برفی است که در عرض‌های میانی و بالای نیمکره شمالی در فصل زمستان رخ می‌دهد. فاجعه ویرانگر کولاک برف ۱۴ تا ۲۰ بهمن سال ۱۳۵۰ (۳ تا ۹ فوریه ۱۹۷۲)، با بیش از ۴۰۰۰ کشته در ایران به عنوان سهمگین‌ترین بوران دنیا یکی از آن موارد است. در این بررسی، جنبه‌های هم‌دید و دینامیک جو در زمان رخداد این پدیده با بهره‌گیری از داده‌های باز تحلیل شده پایگاه NCEP/NCAR و ECMWF بررسی شده است. متغیرهای مورد استفاده شامل ارتفاع ژئوپتانسیل، فشار تراز دریا، دمای هوا، نم و یخ، نم نسبی و مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد می‌باشند. مازاد بر آن، پارامترهای شاخص اُمگا، تاوایی نسبی و شاخص مداری رودباد، جهت تبیین عملکرد سامانه جو محاسبه شده‌اند. یافته‌ها بیانگر حاکمیت الگوی جوی بلاکینک از نوع رکس در دو فاز جداگانه از ۳ تا ۶ فوریه و از ۷ تا ۹ فوریه بوده است. تاوه قطبی در تزریق هوای سرد به عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر و کاهش محسوس دما پیش از رخداد طوفان برف و کولاک کاملاً تأثیرگذار بوده است. بنابراین، اشباع اتمسفر و تأمین رطوبت مورد نیاز

Email: sedaghat.me@pnu.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۷۰۱۵۵۴۸

نحوه ارجاع به مقاله:

صداقت، مهدی؛ نظری‌پور، حمید؛ صادقی‌نیا، علیرضا (۱۴۰۱). جنبه‌های سینوپتیک و دینامیک طوفان برف با کولاک گسترده در

ایران-۱۴ تا ۲۰ بهمن ۱۳۵۰. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۱(۲). صص ۲۶۷-۲۵۱.

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.72822.1116>

بارش برف از طریق سرمایش رخ داده است. شاخص مداری رودباد بیانگر حرکت معنی‌دار هسته رودباد جنب‌حاره‌ای در زمان رخداد این پدیده فرین جوی است.

کلیدواژه‌ها: طوفان برف، کولاک، بلاکینگ رکس، شاخص مداری رودباد، تاوه قطبی.

۱- مقدمه

برف و یخ همراه با طوفان باد از جمله مهم‌ترین مخاطرات هواشناختی در فصل زمستان می‌باشند. در واقع بارش برف سنگین پتانسیل قابل توجهی از خسارت به ویژه برای زیرساخت‌های حمل‌ونقل را دارد. در مناطق کوهستانی، بهمن ناشی از انباشت برف یک خطر بالقوه به شمار می‌رود. علاوه بر این، تجمع برف مرطوب بر روی خطوط انتقال برق، باعث خسارت و خرابی به منابع تغذیه گردیده و جریان انتقال برق را مختل می‌کند. همچنین، بارش برف سنگین و ذوب شدن آن می‌تواند سیلاب‌های بزرگی را ایجاد کند. با این وجود، بارش و انباشت برف در حوضه‌های سرآب کوهستانی منبع آب حیاتی به ویژه برای محیط‌های نیمه‌خشک به شمار می‌رود. همچنین بارش برف امکان توسعه فعالیت‌های اقتصادی مربوط به توریسم (گردشگری) زمستانی را در مناطق کوهستانی فراهم می‌کند. هنوز هم تعیین (شناسایی) و اندازه‌گیری برف از مشکلات بسیار سخت در هیدرومتئورولوژی مدرن به شمار می‌رود. تعیین مرز سودمندی و ناسودمندی پدیده‌های جوی از جمله بارش برف بسیار پیچیده است. عوامل بسیار متعددی در این میان تعیین‌کننده هستند. به‌طور کلی، شرایط محیطی، امکانات و سطح آمادگی سه معیار مهم تعیین درجه خطر بارش برف تلقی می‌شوند. در نبود و ضعف این شرایط، بارش‌های برف به رویدادی مخاطره‌آمیز و مصیبت‌زا تبدیل می‌شوند. بزرگی و عظمت رویدادها که از آن‌ها به عنوان «رویدادهای فرین» نام برده می‌شود در ایجاد خسارت بسیار تأثیرگذار است. کولاک ناشی از طوفان‌های برف نمونه‌ای از این رویدادهای فرین به شمار می‌آید که از مخرب‌ترین فاجعه‌های طبیعی محسوب می‌شود (لیو و همکاران^۱، ۲۰۱۴؛ ونگ و همکاران^۲، ۲۰۱۴). کولاک، به انتقال برف توسط نیروی باد گفته می‌شود که علاوه بر اینکه یکنواختی پوشش برف را مختل و مانع از عملکرد همه اشکال حمل‌ونقل، تخریب خطوط ارتباطی و انتقال برق گردیده و شرایط اضطراری را ایجاد می‌کند. علاوه بر آن، کولاک، اغلب باعث تلفات جانی نیز می‌گردد. آستانه شدت عواملی که باعث ایجاد طوفان برفی می‌شوند هنوز به خوبی شناخته نشده است (لیو و همکاران، ۲۰۲۱).

یکی از نادرترین این رویدادها به استناد گزارش‌های تاریخی، در سرزمین ایران اتفاق افتاده است. عنوان شده است که کولاک ناشی از طوفان برف در میانه بهمن ۱۳۵۰، بعد از یک دوره خشکسالی طولانی مدت، بخش وسیعی از کشور ایران را در برف و یخبندان فرو برده که سرانجام منجر به مرگ بیش از ۴۰۰۰ نفر شده است. برخی، این

1 Liu et al

2 Wang et al

رویداد را به عنوان سخت‌ترین و مصیبت‌بارترین بوران در تاریخ نوشته شده بشر می‌دانند. این رویداد با دوره‌ای از سرمای خیلی شدید و یخبندان گسترده از ۱۴ بهمن ۱۳۵۰ با بارش سنگین برف در نیمه شمالی آغاز و به تدریج به سمت شرق و نواحی جنوبی گسترش یافته است. بر طبق گزارش‌های غیر رسمی در بعضی شهرها بارش برف تا ۳۶ ساعت تداوم یافته و در تمامی مناطق روستایی شمال غرب تا مرکز ایران ارتفاع برف به ۱۲ متر رسیده است. همچنین اُفت دما به حدی بوده که دمای فیروزکوه به منفی ۳۶ و دما در خراسان نیز به منفی ۳۷ درجه رسیده است. بنا به گزارش روزنامه‌ها، سه‌شنبه ۱۹ بهمن ماه ۱۳۵۰ وضع کشور به شکل کاملاً بحرانی درآمده و در بسیاری از شهرها وضع فوق‌العاده اعلام شده است.^۱ در گزارش سایت بلائیای ویرانگر بیان شده است که تقریباً همه خشکی‌های ایران (۱/۶۳۶/۰۰۰ کیلومتر مربع) در زیر پوششی از برف ناپدید شده‌اند.^۲

بنا به اظهار برخی محققان، در جریان رخداد این کولاک، نزدیک به ۲۰۰ روستا به طور کامل از روی نقشه ناپدید شده‌اند. طبق گزارش روزنامه‌ها، مصیبت‌بارترین حوادث شامل؛ مدفون شدن ۱۲ روستا در منطقه سمیرم، مرگ بیش از هزار نفر در ارتفاعات گیلان، مدفون شدن یک قطار بزرگ با تمام سرنشینان است.^۳ بر اساس گزارش روزنامه اطلاعات، شهر اردکان واقع در استان یزد و روستاهای اطراف آن از جمله مناطقی بوده‌اند که تأثیرات زیادی را بر اثر بوران متحمل شده‌اند. همچنین در روستاهای کاکان یاسوج و کمهر سپیدان فارس هیچ فردی زنده باقی نمانده است. در شمال غرب نیز، در نزدیکی مرز ایران و ترکیه، روستای شکلاب به همراه صد نفری که در آن ساکن بودند در زیر انبوه برف دفن شده‌اند.^۴ با اتمام بوران شدید برف در ۲۴ بهمن ماه ۱۳۵۰، شیوع بیماری‌های چون آنفولانزا و سرماخوردگی‌های شدید سبب افزایش تلفات انسانی گردیده است.

پیشینه مطالعاتی مخاطره‌های مرتبط با برف بر خلاف سایر مخاطرات طبیعی از جمله باران سنگین، سیلاب، گرد و غبار، یخبندان، موج گرما و سرما بسیار اندک است. این اندک پژوهش‌ها عمدتاً در مقیاس محلی و به ندرت منطقه‌ای انجام گرفته است. به عنوان نمونه، عوامل دینامیکی و همدیدی مؤثر در رخداد بارش سنگین برف ۲۷ و ۲۸ ژانویه ۲۰۱۸، استان تهران توسط **قصابی و همکاران (۱۳۹۹)** بررسی شده است. نتایج این بررسی، گسترش زبانه پرفشار سیبری تا فلات ایران در تقابل با سامانه کم‌فشار مدیترانه و زبانه کم‌فشار سودانی در نیمه جنوبی و مرکز ایران را عامل گرادیان دمای شدید و بارش برف سنگین معرفی کرده است. در مطالعه‌ای دیگر، تحلیل همدید-ماهواره‌ای دو مخاطره برف سنگین در استان کرمان در ژانویه سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ توسط **رضایی و همکاران (۱۳۹۹)** انجام شده است. در این بررسی، مدت ماندگاری و مساحت پوشش برف از تصاویر سنجنده مادیس استخراج و نتایج تحلیل‌های همدید نیز نفوذ پرفشار سیبری را عامل اصلی رخداد معرفی نموده است. **مرادی و رنجبر سعادت‌آباد**

1 <https://www.nytimes.com/1972/02/11/archives/missing-put-at-6000-in-iranian-blizzard.html>

2 <https://devastatingdisasters.com/iran-blizzard-1972/>

3 <https://www.mentalfloss.com/article/29930/40-years-ago-iran-was-hit-deadliest-blizzard-history>

4 <https://www.asriran.com/fa/news/517848/>

(۱۳۹۹) به‌طور تطبیقی دو رویداد سیلاب سیستان و بلوچستان و برف سنگین گیلان که به فاصله یک ماه در زمستان سال ۱۳۹۸ اتفاق افتاد را به لحاظ همدید مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج این بررسی نشان داده است که علی‌رغم تفاوت‌های ظاهری، این دو رویداد از نظر مکانیسم تشکیل و تقویت مشابه بوده‌اند و علت تفاوت در خروجی بارش این دو سامانه به تشکیل سامانه اول در شرق دریای سرخ و فرارفت هوای گرم و مرطوب دریای عرب و عمان و سامانه دوم در شمال شرق مدیترانه و فرارفت هوای سرد دریای خزر مربوط بوده است. **شمسی‌پور و همکاران (۱۳۹۹)** الگوبندی و تحلیل همدید رخداد کولاک برف‌های شدید شمال‌غرب ایران را مطالعه نموده‌اند. روش نام‌بردگان برای شناسایی کولاک‌های شدید برف، کدهای هواشناسی مرتبط با کولاک شدید برف (۳۷ و ۳۹) از ۱۱ ایستگاه هواشناسی شمال‌غرب ایران بوده است. نتایج این پژوهش نشان داده است که عامل ارتفاع بیشترین تأثیر را بر شدت، فراوانی و تفاوت‌های مکانی رخداد کولاک برف دارد. الگوهای همدید رخداد کولاک نیز شامل ۵ الگوی؛ تشکیل مرکز کم‌ارتفاع بریده، عبور ناوه بلند از ایران، ناوه عمیق شرق مدیترانه، سامانه بندالی نوع رکس و امگا بوده‌اند. الگوهای همدید و کمیت‌های پویایی و گرم‌پویایی مؤثر در رخداد کولاک فراگیر برف در شمال‌غرب ایران توسط **خوشحال‌دستجردی و کامیار (۱۳۹۶)** بررسی شده است. در بررسی نام‌بردگان، کولاک فراگیر در شمال‌غرب ایران به عنوان روزی لحاظ شده است که حداقل ۵۰ درصد ایستگاه‌های هواشناسی محدوده مورد مطالعه، کدهای هواشناسی ۳۶ تا ۳۹ را ثبت کرده باشند. نتایج این بررسی برای ۱۱ مورد کولاک فراگیر، دو الگوی همدید شامل شیو فشار بین پرفشار شمال اروپا و کم‌فشار مدیترانه در تراز زیرین و گسترش ناوه شمال روسیه در تراز بالا را نشان داده است. ناهنجاری‌های همدیدی مؤثر بر رخداد بارش برف ژانویه ۲۰۱۴ در استان فارس توسط **نارنگی فرد و مزیدی (۱۳۹۶)** بررسی شده است. یافته‌های این بررسی نشان داد که توده هوای پرفشار سیبری نقش اصلی را به‌عنوان الگوی غالب توده هوای سطح زمین بر عهده داشته است. در تراز میانی جو نیز عمیق شدن ناوه مستقر بر روی منطقه همزمان با استقرار یک پشته ارتفاعی در مرکز اروپا باعث ریزش هوای سرد توسط زبانه خاوری این پشته روی منطقه گردیده است. **خالدی و همکاران (۱۳۹۶)** به بررسی همدیدی برف سنگین منطقه جلگه گیلان در ۱۰ تا ۱۴ بهمن ۱۳۹۲ پرداخته و تأثیر آن را بر مدیریت بحران موردسنجش قرار داده‌اند. نتایج این بررسی نشان داده است که مهم‌ترین عامل گردشی جو در زمان رخداد برف سنگین، مرکز فشارقوی بخش‌های شمالی اروپا بوده است. همچنین نقش واداشت‌های منطقه‌ای، در شکل‌گیری الگوی مکانی مخاطره برف سنگین بهمن ۱۳۹۲ در جلگه گیلان توسط **غفاریان و همکاران (۱۳۹۵)** مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی نشان داده است که واداشت ترمودینامیکی مستقر در شرق گیلان، مؤید تأثیر عوامل منطقه‌ای چون توده هوای پرفشار قطبی شمال شرق دریای خزر بر الگوی مکانی ارتفاع برف است. بررسی اثر بلاکینگ‌ها بر رخداد برف‌های سنگین و مداوم ایران توسط **درگاهیان و علیجانی (۱۳۹۲)** نشان داده است که از بین الگوهای مؤثر بر بارش برف، تنها الگوی بلاکینگ امگا با تراف سمت راست منجر به بارش

برف مداوم و سنگین در ایران شده و ریزش هوای سرد از عرض‌های بالا سبب تقویت این سامانه‌ها گردیده است. طوفان برف رشت نیز که در سال ۲۰۰۵ به تخریب بیش از ۵۰ هزار واحد مسکونی، تجاری، صنعتی، اداری و آموزشی و صدها کیلومتر شبکه برق منجر گردید، توسط **فهیمی نژاد و همکاران (۱۳۹۱)** مورد بررسی قرار گرفته است. الگوی غالب گردشی جو در زمان رخداد این طوفان برف، پرفشار ترکیبی (تلفیق زبانه پرفشار بالکان و پرفشار سبیری) قلمداد شده است. در این بررسی، بارش برفی که ارتفاع آب معادل آن برابر ۷۳ میلی‌متر باشد، به‌عنوان آستانه برف سنگین در منطقه مورد مطالعه تعیین شده است. **امینی‌نیا و همکاران (۲۰۱۰)** شرایط همدید تعداد ۶۶ مورد برف سنگین در شمال‌غرب ایران را بررسی و شش الگوی همدید مقیاس را شناسایی نموده‌اند. با رویکردهای مشابه، الگوهای گردشی بارش برف سنگین در غرب ایران توسط **فتحی و شیراوند (۱۳۹۳)** و همچنین **شکیبا و همکاران (۱۳۹۴)** مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعات، بارش ۱۵ سانتی‌متر ضخامت برف در روز به‌عنوان معیار برف سنگین تعیین و پرفشار سبیری به‌عنوان الگوی غالب گردشی جو در تداوم و تقویت بارش برف سنگین معرفی گردیده است. الگوهای جوی و شرایط دینامیکی رویدادهای برف سنگین جاده‌های کوهستانی زاگرس مرکزی توسط **دوستان و همکاران (۱۳۹۵)** و همچنین شرایط همدید-دینامیکی بارش برف در استان یزد توسط **امیدوار (۱۳۹۵)** مطالعه گردیده است.

از نمونه مطالعات بین‌المللی، **لیو و همکاران (۲۰۲۱)** شرایط ترمودینامیکی و دینامیکی یک رویداد منطقه‌ای بارش برف سنگین بر روی فلات تبت را با استفاده از داده‌های باز تحلیل شده بررسی نموده‌اند. نتایج این بررسی نشان داده است که یک سردچال، ناوه نفوذی جنوبی و یک خط برشی نصف‌النهاری سیستم‌های همدید، دلایل شکل‌گیری پدیده بارش برف سنگین در فلات تبت می‌باشند. از آنجاکه در دهه‌های اخیر، کاهش بارش برف ناشی از اثرات گرمایش جهانی (در میان سایر علل) در بسیاری از مناطق سیاره زمین مشهود بوده است؛ **مرینو و همکاران (۲۰۱۴)** با تجزیه و تحلیل تغییرات در الگوهای سینوپتیک مقیاس، علل هواشناسی کاهش بارش برف در شبه جزیره ایبری را بررسی نموده‌اند. **بائو و یو^۲ (۲۰۱۹)** چگونگی اثرگذاری جریان‌ات جت غربی بر عمق برف در روی فلات تبت را بررسی نموده‌اند. تغییرات مشاهده شده در عمق و تعداد روزهای برف در قسمت‌های شرقی و مرکزی فلات تبت توسط **یو و همکاران^۳ (۲۰۱۱)** مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، هم‌پیوندی نوسان شمالگان و عمق برف پاییزی-زمستانی بر روی فلات تبت توسط **لو و همکاران^۴ (۲۰۰۸)** بررسی شده است. تغییرپذیری سالانه عمق برف بر روی فلات تبت و ناهنجاری‌های گردش جو مرتبط با آن نیز توسط **جیانگ‌یو^۵ (۲۰۱۰)** مورد بررسی قرار گرفته

-
- 1 Merino et al
 - 2 Bao & You
 - 3 You et al
 - 4 Lü et al
 - 5 Jiang-Yu

است. کوی و کیاو^۱ (۲۰۱۶) سرما و بارش شدید برف آمریکای شمالی در ژانویه ۲۰۱۵ را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند.

مقایسه مطالعات خارجی و داخلی مرتبط با رویدادهای بارش برف سنگین، طوفان برفی و کولاک بیانگر تفاوت‌های آشکار در داده‌ها، روش‌شناسی و دیدگاه‌ها می‌باشد. تمرکز مطالعات داخلی عمدتاً به الگوبندی شرایط جوی مرتبط با رویدادهای برف معطوف بوده و شرایط دینامیکی و ترمودینامیکی اغلب نادیده انگاشته شده است. از سوی دیگر، الگوی غالب جوی مرتبط با رویدادهای برف سنگین در ایران عمدتاً پرفشار سیبری معرفی شده است. در اندک مطالعات به بررسی اثر بلاکینگ‌ها در رخداد بارش برف سنگین و مداوم پرداخته شده است. از سوی دیگر، به تغییرات جریان‌ات جت به عنوان عاملی مهم در رخداد بارش برف پرداخته نشده است. بنابراین، بررسی حاضر در راستای افزایش دانسته‌ها درباره مکانیسم‌های جوی مرتبط با گسترده‌ترین و سنگین‌ترین بارش برف و کولاک در ایران انجام گرفته است. رویداد مصیبت‌باری که با بیش از ۴۰۰۰ تلفات انسانی، نام ایران را به عنوان محل سهمگین‌ترین بوران دنیا در کتاب گینس ثبت نموده است (سینگ^۲، ۲۰۰۸ و پوراسلو^۳، ۲۰۱۷). به علت نبود داده‌ها و اطلاعات هواشناسی ایستگاهی این رویداد تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است.

۲- مواد و روش

۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه این پژوهش، شامل گستره سرزمین ایران می‌باشد که با مساحتی بالغ بر ۱/۶۴۸ میلیون کیلومتر مربع در جنوب‌غربی خاورمیانه و در حد فاصل تقریبی ۴۵ تا ۶۴ درجه طول شرقی و ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی واقع شده است. به دلیل دامنه وسیع عرض جغرافیایی و تنوع توپوگرافی، کشور ایران دارای اقلیم متنوعی می‌باشد. به دلیل موقعیت جغرافیایی ویژه، مقدار بارش سالانه آن اندک (حدود ۲۵۰ میلی‌متر) بوده و سرزمینی خشک و نیمه‌خشک شناخته می‌شود. با این وجود از ضریب تغییرات زمانی و مکانی بالای بارش برخوردار است. به گونه‌ای که دامنه مقدار بارش دریافتی در پربارش‌ترین و کم‌بارش‌ترین نقاط آن بین کمتر از ۵۰ و بیشتر از ۱۸۰۰ میلی‌متر می‌باشد. رژیم غالب بارش آن، زمستانه بوده و درصد عمده‌ای از بارش آن متأثر از بادهای غربی و توده‌های مدیترانه‌ای می‌باشد. هرچند شکل غالب بارش، عمدتاً باران (مایع) می‌باشد؛ اما اشکال جامد بارش (به مانند برف) نیز عمدتاً در ارتفاعات و عرض‌های جغرافیایی بالا نمود پیدا می‌کند. پدیده‌های فرین اقلیمی مانند خشکسالی، سیلاب و برف از مهم‌ترین نمودهای اقلیم پیچیده این سرزمین می‌باشند. بر اساس گزارش‌های تاریخی، یکی از گسترده‌ترین و

1 Cui & Qiao

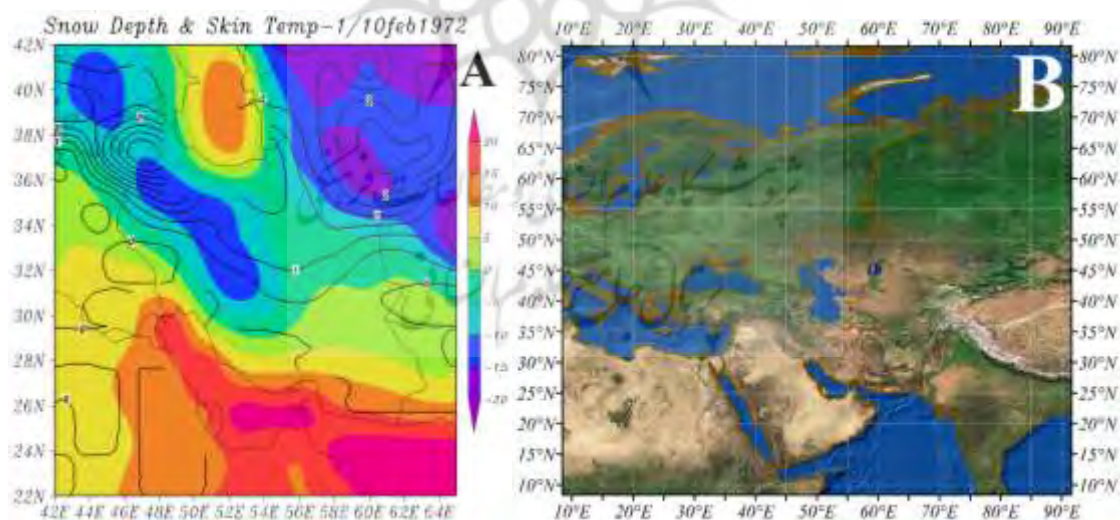
2 Singh

3 Purslow

سنگین‌ترین رویدادهای برف همراه با کولاک در بهمن ۱۳۵۰ در گستره ایران رخ داده است که این پژوهش در پی شناخت و معرفی مکانیسم هواشناختی این رویداد می‌باشد.

۲-۲- روش انجام پژوهش

انتخاب رویداد، بر اساس گزارش‌های تاریخی صورت گرفته است. برای نمایش ساز و کارهای جوی مقیاس همدید و منطقه‌ای از داده‌های باز تحلیل شده مرکز ملی پیش‌بینی محیطی و مرکز ملی پژوهش جوی (NCEP/NCAR) با تفکیک افقی $2/5 \times 2/5$ درجه (کالنی و همکاران^۱، ۱۹۹۶) و برای تبیین ساز و کار محلی در مقیاس میانی از داده‌های مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت جو (ECMWF) با توان تفکیک $0/125 \times 0/125$ درجه (دی و همکاران^۲، ۲۰۱۱) به صورت ۴ بار در روز در چارچوب ۱۰ تا ۹۰ درجه طول جغرافیایی و ۱۰ تا ۸۰ درجه عرض جغرافیایی استفاده شده است (شکل ۱). متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق شامل ارتفاع ژئوپتانسیل، فشار تراز دریا، دمای هوا، نم ویژه، نم نسبی و مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد می‌باشند. همچنین از پارامترهای شاخص آمگا، تاوایی نسبی و شاخص جابه‌جایی رودباد (JMI)^۳، جهت تبیین ساز و کارهای دینامیکی جو در رخداد پدیده طوفان برف و کولاک استفاده گردید. نقشه ترکیبی عمق برف و میانگین دمای هوا در دوره رخداد کولاک بهمن ۱۳۵۰ (مصادف با ۱ تا ۱۰ فوریه ۱۹۷۲) بر اساس داده‌های باز تحلیل شده NCEP/NCAR مطابق با شکل (۱-چپ) بازسازی شده است.



شکل ۱- عمق برف و میانگین دمای محسوس طی روزهای ۱ تا ۱۰ فوریه ۱۹۷۲ (A) و محدوده مورد مطالعه (B)

- 1 Kalnay et al
- 2 Dee et al
- 3 Jet Movement Index

۲-۲-۱- اُمگا

معادله اُمگا (رابطه ۱) یک معادله تشخیصی است که سرعت حرکت عمودی (قائم) جو در مقیاس سینوپتیک را توصیف و بر اساس تئوری شبه ژئوستروفیک در مختصات فشار ($\omega = Dp/Dt$) محاسبه می‌شود. مقادیر منفی سرعت قائم دلالت بر صعود هوا (سرعت قائم بالاسو) و مقادیر مثبت نشان‌دهنده نزولی بودن جریان هوا (سرعت قائم پایین سو) است.

$$\sigma \nabla_H^2 \omega + f^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial p^2} = f \frac{\partial}{\partial p} \left[V_g \cdot \partial (f + \zeta_g) \right] - \nabla_H^2 \left(u_g \cdot \nabla_H \frac{\partial \phi}{\partial p} \right) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در اینجا، f نیروی کوریولیس، σ پایداری استاتیکی، V_g بردار سرعت ژئوستروفیک، ζ_g چرخندگی نسبی ژئوستروفیک، ϕ ژئوپتانسیل، ∇_H^2 عملگر لاپلاسین افقی و ∇_H عملگر دل می‌باشند (هولتون، ۱۹۹۲).

۲-۲-۲- وزش رطوبت

وزش رطوبت را می‌توان به کمک نم ویژه با رابطه (۲) محاسبه کرد.

$$-\vec{V} \cdot \nabla_q \quad \text{رابطه (۲)}$$

در اینجا، q نم ویژه بر حسب گرم بر گرم و \vec{V} بردار باد بر حسب متر بر ثانیه است. هرگاه $-\vec{V} \cdot \nabla_q < 0$ باشد، با گذشت زمان، هوا خشک‌تر خواهد شد. در شرایط مقابل آن، اگر $-\vec{V} \cdot \nabla_q > 0$ باشد، آنگاه با وزش رطوبتی مثبت و مرطوب مواجه هستیم و با گذشت زمان هوا مرطوب‌تر خواهد شد. با ضرب وزش رطوبتی در ضرب مناسب می‌توان یکای آن را تنظیم نمود (رابطه ۳). در یک دستگاه دکالرتی دو بُعدی، وزش رطوبت چنین تعریف می‌شود (مسعودیان و همکاران، ۱۳۹۱).

$$-\left(u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} \right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

۲-۲-۳- تاوایی نسبی

تاوایی نسبی عبارت است از ضرب چلیپایی عملگر ∇ در یک بردار دلخواه مانند \vec{V} . در یک فضای دو بُعدی، تاوایی بردار $\vec{V} = u\hat{i} + v\hat{j}$ به صورت زیر تعریف می‌گردد (رابطه ۴).

$$\nabla \times \vec{V} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} \right) \times (u\hat{i} + v\hat{j}) \quad \nabla \times \vec{V} = \left[\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right] \hat{k} \quad \text{رابطه (۴)}$$

حاصل این عمل، یک کمیت برداری است که مؤلفه تاوایی \vec{V} نامیده می‌شود. مقادیر مثبت این کمیت بیانگر جریان چرخندی و مقادیر منفی بیانگر جریان واچرخندی هستند (مسعودیان و همکاران، ۱۳۹۱).

۲-۴-۴- شاخص جابه‌جایی رودباد

ابتدا، عرض جغرافیایی محور رودباد ($\varphi_{ja}(\lambda)$) از داده‌های میانگین میدان باد مداری در ۳۰۰ هکتوپاسکال شناسایی گردیده است. به این صورت که، در هر طول جغرافیایی (λ)، مشخص می‌کند که مؤلفه مداری باد (u) در کدام عرض جغرافیایی قرار دارد. سپس مشتق مداری آن محاسبه می‌گردد ($d\varphi_{ja}/d\lambda$). این مشتق، بزرگ‌ترین اندازه (ارزش‌های منفی بزرگ) در نقطه‌ای خواهد بود که محور جت قطبی به سمت جت جنب حاره‌ای پرش داشته است. به این ترتیب، شاخص جابه‌جایی رودباد (JMI) به عنوان ناهنجاری عرض جغرافیایی محور جت تعریف می‌شود (هارنیک و همکاران، ۲۰۱۴).

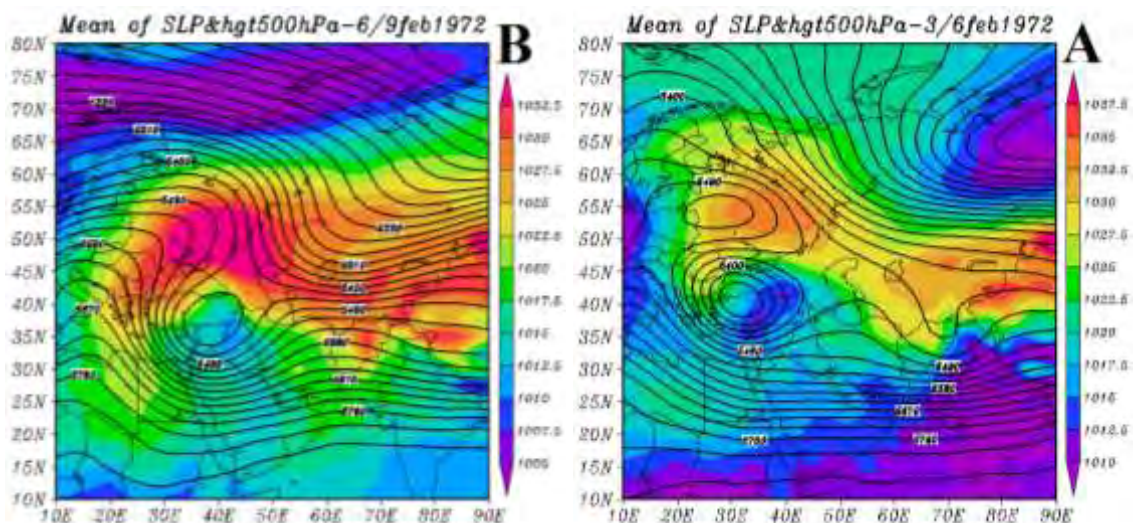
۳- نتایج و بحث

۳-۱- شرایط فشار تراز دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل

تحلیل نقشه‌های ترکیبی میانگین فشار تراز دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل برای دو بازه ۳ تا ۶ و ۶ تا ۹ فوریه ۱۹۷۲ بیانگر غلبه یک سامانه بلاکینگ از نوع رکس در جو منطقه‌ای ایران است (شکل ۲). بلاکینگ رکس شبیه یک ۸ نصفه نیمه یا S معکوس است^۱. یک بلاکینگ رکس با یک زیانه قوی پرفشار در مجاورت یک کم‌فشار قوی شکل می‌گیرد. استقرار پرفشاری قوی در اروپای شرقی و شمال دریای سیاه موسوم به پرفشار قفقازی (حسینی و موحدی، ۲۰۱۴)، همزمان با کم‌فشار قوی مستقر در شرق مدیترانه، باعث شکل‌گیری سامانه بلاکینگ رکس در فوریه ۱۹۷۲ شده است. سامانه مزبور در دو فاز تکامل یافته است. فاز اول از ۲ فوریه تا ۵ فوریه تداوم داشته و فاز دوم از ۶ فوریه تا ۹ فوریه ادامه یافته است. در فاز دوم، شدت سامانه مزبور با جابه‌جایی هسته‌های فشار به سمت شرق و جنوب، تشدید شده است (شکل ۲- راست). در این شرایط، جریان هوای بسیار سرد و خشک عرض‌های منطقه قفقاز در اطراف پشته مستقر در شمال دریای سیاه و سپس در اطراف ناوه در شرق مدیترانه انحنای می‌یابد. این باعث می‌شود که هوا در حلقه‌های نوسانی در امتداد یک طول جغرافیایی حرکت کند و هوا را به عرض جغرافیایی بسیار پایین‌تر می‌کشد. جریان باد به دلیل تحمل چرخش نیمه ۸ گونه، پیشرفت ناچیزی را به سمت شرق ایجاد می‌کند.

1 Harnik et al

2 <http://weather.unisys.com/nam/index.html>

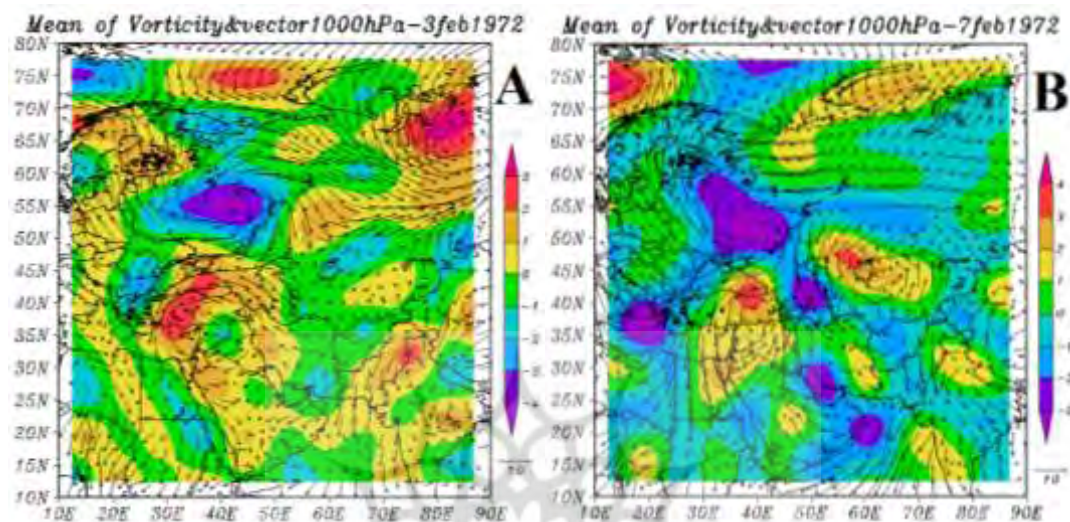


شکل ۲- میانگین فشار تراز دریا و ارتفاع ژنوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ ۳ الی ۶ فوریه ۱۹۷۲ (A) و ۶ الی ۹ فوریه ۱۹۷۲ (B)

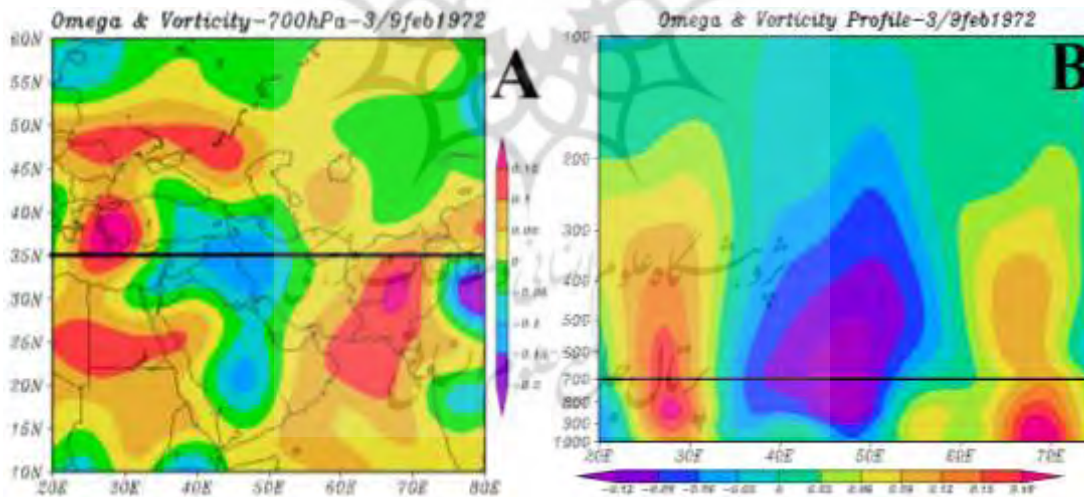
۳-۲- جنبه‌های دینامیک جو در زمان رخداد کولاک

بررسی تاوایی نسبی و بردارهای باد در زمان شروع دو فاز از سامانه طوفان برف و کولاک نشان داد که تاوایی نسبی مثبت ($v \geq +3$) منطبق بر هسته کم فشار مستقر در شرق مدیترانه در ۳ فوریه ۱۹۷۲ بوده است (شکل ۳-راست). بنابراین یک جریان چرخندی قوی بر روی شرق مدیترانه در حال فعالیت بوده است. همزمان، تاوایی منفی ($v \leq -3$)، منطبق بر هسته پرفشار مستقر در شمال دریای سیاه می‌باشد. گستره مکانی چرخندگی منفی بسیار زیادتر از چرخندگی مثبت بوده و بیانگر غلبه سامانه‌های فشار زیاد قوی بر گستره ایران می‌باشد. در فاز دوم از فعالیت سامانه، شدت تاوایی نسبی مثبت افزایش یافته و گستره مکانی آن به سمت شرق جابه‌جا و بر روی شمال غرب ایران واقع شده است (شکل ۳-چپ). در این فاز فعالیت، هسته تاوایی مثبت نیز بر روی نواحی شرقی دریای خزر ایجاد شده است. هسته‌های تاوایی منفی نیز در این فاز، همزمان، بر روی منطقه قفقاز، دریای خزر و خلیج فارس به وجود آمده است. وضعیت شاخص اُمگا در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال برای دوره ۳ تا ۹ فوریه ۱۹۷۲ (شکل ۴-راست) بیانگر برقراری شرایط صعود جریان هوا در منطقه غرب و امتداد نصف‌النهاری آن تا شبه جزیره عربستان می‌باشد. بنابراین شرایط صعود هوا به‌عنوان یکی از مهم‌ترین لازمه‌های هر گونه ریزش‌های جو در منطقه غرب ایران مهیا بوده است. همان‌گونه که در شکل ۴ (راست) مشخص است، حداکثر شدت جریان صعودی هوا در حوالی عرض ۳۵ درجه شمالی، در منطقه غرب و شمال غرب ایران وجود دارد. این منطقه منطبق بر ارتفاعات زاگرس بوده و به دلیل اثر ناهمواریها، شدت صعود جریانات هوا تشدید می‌گردد. وضعیت نیمرخ قائم اُمگا در ترازهای مختلف به خوبی بیانگر وضعیت ناپایداری شرایط جو در نیمه غربی ایران است. همان‌گونه که در شکل ۴ (چپ) مشخص است در حد فاصل

نصف‌النهارهای ۳۸ تا ۵۲ درجه شرقی جریان صعودی هوا برقرار بوده است. شدت و گستره عملکرد این سامانه در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکالی بیشینه می‌باشد. هرچند جریان صعودی هوا از تراز ۹۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکالی در حد بیشینه بوده است.



شکل ۳- تاوایی نسبی و بردارهای باد تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال؛ ۳ فوریه ۱۹۷۲ (A)؛ ۷ فوریه ۱۹۷۲ (B)

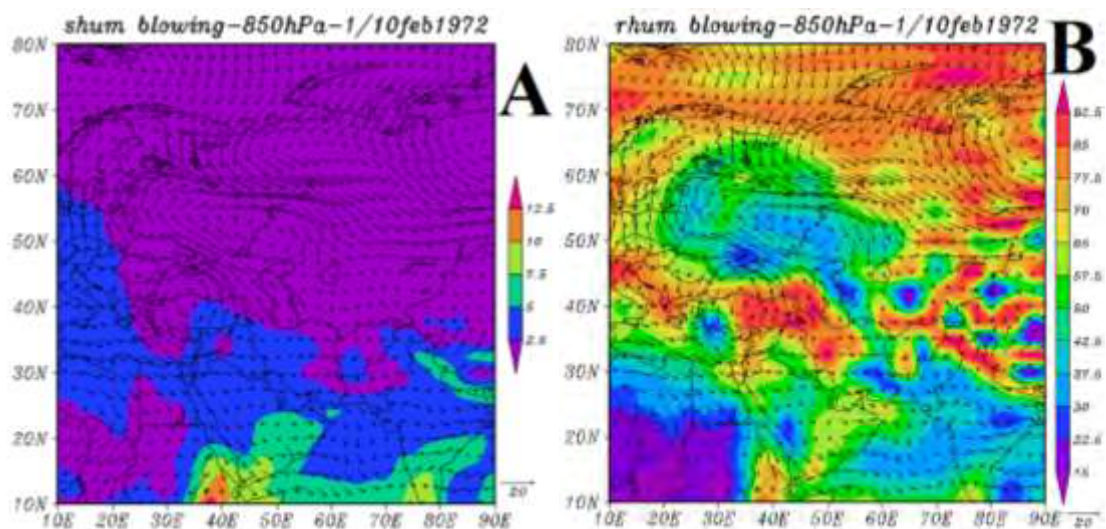


شکل ۴- شخص امگا در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (A)؛ نیمرخ شاخص امگا در عرض ۳۵ درجه شمالی (B)

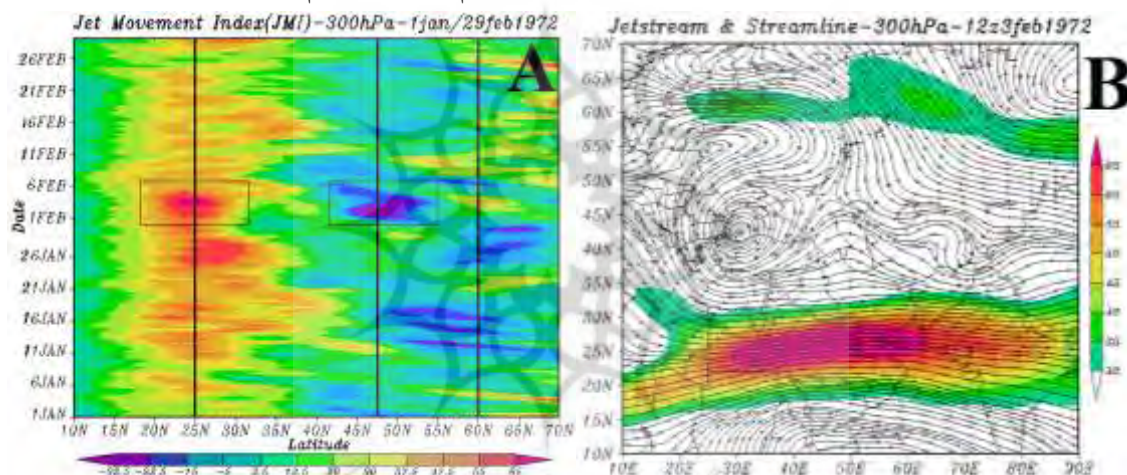
علاوه بر مکانیسم صعود، عامل رطوبت نیز لازمه هر گونه ریزش جوی است. جهت شناخت منابع رطوبتی سامانه، نقشه‌های وزش رطوبتی برای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال تهیه شده است. تجربیات و شواهد علمی بیانگر عمق بیشینه انتقال رطوبت (بخار آب) به جو ایران در این تراز می‌باشد. وضعیت متوسط وزش رطوبتی بر مبنای رطوبت

ویژه (شکل ۵- راست) بیانگر مقادیر کاملاً مثبت است. این شرایط بیانگر آن است که جو ایران با گذشت زمان مرطوب‌تر شده است. وضعیت بردارهای باد، بیانگر تزریق رطوبت از سمت غرب و از بستر دریای مدیترانه به سامانه مزبور می‌باشد. وضعیت متوسط نم نسبی (درصد) نیز بیانگر رطوبت نسبی بالا در جو مناطق شمال‌غرب و غرب ایران می‌باشد (شکل ۵- چپ). تزریق رطوبت به جو ایران از سمت غرب و کاهش محسوس دما در نتیجه جریانات سرد شمالی، سبب افزایش رطوبت نسبی جو ایران به آستانه بارش شده است. در فاز اول از عملکرد سامانه، دمای هوا به شدت افت نموده و این وضعیت تداوم داشته است. کاهش محسوس دمای هوا به زیر ۲۰- درجه سلسیوس، سبب کاهش گنجایش پذیرش رطوبتی هوا و اشباع جو گردیده است. بنابراین، نقش افت محسوس دما در تأمین رطوبت سامانه بارش برف، بسیار بارزتر از تزریق رطوبت می‌باشد.

همان‌گونه که بیان گردید، شاخص جابه‌جایی رودباد (JMI) به‌عنوان ناهنجاری عرض جغرافیایی محور رودباد تعریف می‌گردد. ناهنجاری‌های عرض جغرافیایی محور رودباد از ابتدای ژانویه تا انتهای فوریه ۱۹۷۲ در شکل ۶- راست) نشان داده شده است. محور هر دو رودباد (جنب حاره‌ای و قطبی) در این بازه زمانی پیوسته دارای تغییرپذیری مداری بوده است. هسته محور رودباد قطبی از ۱۰ تا ۲۰ ژانویه با سه هسته باریک با امتداد شمالی جنوبی در بین عرض‌های ۶۰ تا ۴۷/۵ درجه شمالی در نوسان بوده است. ارزش‌های منفی گواهِ پرش محور این رودباد به سمت عرض‌های جغرافیایی پایین بوده است. متنها تداوم و شدت این جابه‌جایی قابل ملاحظه نبوده است. پس از این، محور رودباد قطبی در بالاتر از عرض‌های ۶۰ درجه شمالی واقع شده است. واضح است که در زمان رخداد برف و کولاک سنگین (۳ تا ۹ فوریه ۱۹۷۲) مجدداً محور رودباد قطبی با سمت عرض‌های جنوبی کشیده شده و با ارزش‌های بزرگ منفی تا عرض ۴۰ درجه شمالی جابه‌جایی داشته است. این پرش سریع مداری محور رودباد قطبی به سمت رودباد جنب‌حاره‌ای (با علامت مستطیل نشان داده شده است) در این بازه زمانی به عنوان یکی از مهم‌ترین محرک‌های آغاز فعالیت سامانه طوفان برف و کولاک شناخته می‌شود. تغییرپذیری محور رودباد جنب‌حاره‌ای نیز در حوالی مدار ۲۵ درجه شمالی کاملاً مشهود است. جابه‌جایی مداری محور این رودباد کاملاً با جابه‌جایی مداری محور رودباد قطبی هماهنگ و برعکس آن است. وضعیت هسته روباد و خطوط جریان برای ساعت ۱۲ زولو ۳ فوریه ۱۹۷۲ در شکل ۶- چپ) نشان داده شده است. در این شرایط زمانی، محور رودباد با تمرکز بر مدار ۲۵ درجه شمالی، بر روی شبه جزیره عربستان و خلیج فارس واقع شده است. این وضعیت، بیانگر آغاز عملکرد سامانه برف سنگین و کولاک می‌باشد. گسستگی هسته رودباد جنب‌حاره‌ای و ایجاد هسته‌های مجزا در زمان عملکرد سامانه نیز مشاهده می‌گردد که مجدداً پس از اتمام فعالیت سامانه (۹ فوریه ۱۹۷۲) این شرایط تغییر نموده است.



شکل ۵- وزش رطوبتی ۱ تا ۱۰ فوریه ۱۹۷۲؛ نم ویژه (A) و نم نسبی (B)



شکل ۶- شاخص حرکت رودباد از ۱ ژانویه تا ۲۹ فوریه ۱۹۷۲ (A)؛ موقعیت رودباد و خطوط جریان در تراز

۳۰۰ هکتوپاسکال ۳ فوریه ۱۹۷۲ (B)

۴- جمع بندی

پژوهش حاضر به بررسی مکانیسم‌های هواشناختی رخداد طوفان برفی با کولاک در بازه زمانی ۱۴ تا ۲۰ بهمن ۱۳۵۰ (۳ تا ۹ فوریه ۱۹۷۲) در گستره ایران پرداخته است. برای این منظور جنبه‌های همدید و دینامیک جو مرتبط با رخداد این پدیده هواشناسی از طریق متغیرهای فشار تراز دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل تراز میانی جو، شاخص اُمگا، تاوایی نسبی، شاخص جابه‌جایی رودباد و وزش رطوبتی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل نقشه‌های ترکیبی میانگین فشار تراز دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل برای دو بازه ۳ تا ۶ و ۶ تا ۹ فوریه ۱۹۷۲ بیانگر توسعه و غلبه یک سامانه بلاکینگ از نوع رکس در جو منطقه‌ای ایران بوده است. بنابراین واضح است که عامل اصلی رخداد این بوران

سهمگین و مصیبت‌بار، الگوهای جوی بلاکینگ بوده است. سامانه‌های فشاری دخیل در رخداد این الگوی جوی شامل پرفشار قوی در اروپای شرقی و شمال دریای سیاه موسوم به پرفشار قفقازی و کم‌فشار قوی مستقر در شرق مدیترانه بوده است. فرایند توسعه و تکامل این الگوی جوی شامل دو فاز می‌باشد. فاز آغازین از ۲ فوریه تا ۵ فوریه، و فاز دوم از ۶ فوریه تا ۹ فوریه ادامه یافته است. آرایش سامانه‌های فشار در این الگوی جوی بلاکینگ که موسوم به رکس است، سبب ریزش جریان هوای بسیار سرد و خشک عرض‌های منطقه قفقاز به گستره سرزمینی ایران گردیده و بوران بسیار شدید و سوزناک را در حین بارش برف و بعد از آن ایجاد نموده است.

جنبه‌های دینامیکی جو از طریق بررسی تاوایی نسبی، سرعت حرکت عمودی (قائم) جو، وزش رطوبتی و جابه‌جایی محور رودباد مطالعه گردیده است. بررسی شرایط تاوایی نسبی در زمان آغاز فعالیت سامانه مزبور، گستره‌های تاوایی مثبت و منفی را به ترتیب در شرق مدیترانه و شمال دریای سیاه را نشان داد. در فاز تکامل و تشدید سامانه، هسته تاوایی مثبت که بیانگر جریان چرخندی قوی می‌باشد به سمت شرق جابه‌جا و بر روی نواحی شمال‌غربی ایران مستقر گردیده و تشدید شده است. همزمان در این فاز از فعالیت سامانه، هسته تاوایی مثبت بر روی نواحی شرقی دریای خزر ایجاد شده است. بررسی وضعیت شاخص اُمگا نیز مهبایی شرایط صعود جریان هوا را در بخش غربی و به ویژه در شمال‌غربی ایران نشان می‌دهد. منابع تأمین رطوبت سامانه نیز از طریق نقشه‌های وزش رطوبتی بررسی گردیده و بیانگر مقادیر مثبت وزش رطوبتی جو ایران بوده است. تزریق رطوبت به سامانه عمدتاً از بستر دریای مدیترانه در جریانات غربی صورت گرفته است. علاوه بر آن، افت محسوس دما در نتیجه جریانات بسیار سرد شمالی نیز در اشباع جو بسیار تأثیرگذار بوده است. اُفت محسوس دمای هوا، این امکان را ایجاد کرده که اتمسفر با رطوبت موجود خود به حالت اشباع برسد و چنین حجمی از بارش را فراهم کند. این استدلال از مقادیر نم ویژه پایین و در عین حال نم نسبی بالای ۹۰ درصد در زمان رخداد کولاک قابل درک است. ناهنجاری عرض جغرافیایی رودباد نیز بیانگر تغییرپذیری مداری محور رودبادهای قطبی و جنب‌حاره‌ای در زمان رخداد سامانه بوده است. به گونه‌ای که جابه‌جایی‌های سریع یا به اصطلاح «پرش» محور رودباد به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محرک‌های آغاز فعالیت سامانه جوی مولد برف سنگین و در نهایت طوفان برفی و کولاک قلمداد می‌گردد. از این رو، پیشنهاد می‌گردد، به‌عنوان معیاری جدید جهت ارزیابی بارش‌های سنگین در گستره ایران، مورد توجه بیشتری قرار داده شود.

کتابنامه

- امیدوار، کمال؛ ۱۳۹۵. بررسی و تحلیل همدید- دینامیک ریزش برف در استان یزد. فصلنامه اطلاعات جغرافیایی (سپهر).
<https://doi.org/10.22131/SEPEHR.2016.22136.25-42>. (۹۸)۲۵
- خالدی، شهریار؛ کمالی، سمیه و محمدی، فهیمه؛ ۱۳۹۶. بررسی همدیدی برف سنگین جلگه گیلان در بهمن ۱۳۹۲ و تأثیر آن بر سنجش مدیریت بحران. مجله مخاطرات محیط طبیعی. ۶(۱۴). ۳۵-۴۶.
<https://dx.doi.org/10.22111/jneh.2017.3202>
- خوشحال دستجردی، جواد؛ کامیار، اصغر؛ ۱۳۹۶. شناسایی و تحلیل الگوهای همدید موجد کولاک فراگیر برف در شمال غرب ایران. جغرافیای طبیعی. ۱۰(۳۷). ۱۵-۳۰.
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085656.1396.10.37.2.3>
- درگاهیان، فاطمه؛ علیجانی، بهلول؛ ۱۳۹۲. بررسی اثر بلاکینگ بر رخداد برف‌های سنگین و مداوم ایران. فصلنامه جغرافیایی سرزمین. ۱۰(۳). ۱-۱۴.
- دوستان، رضا؛ اسکندری، مریم و صادقی، سلیمان؛ ۱۳۹۵. تحلیل همدید بارش برف سنگین جاده‌های کوهستانی زاگرس مرکزی (مطالعه موردی: جاده چلگرد-شهرکرد- لردگان). فصلنامه علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی. ۱۶(۵۶). ۲۳۹-۲۲۱.
- <http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-۱۸۰۲-۱-fa.html>
- رضایی، محمد؛ صادقی، علی و پورقیومی، علی؛ ۱۳۹۹. تحلیل همدیدی-ماهواره‌ای مخاطره برف سنگین در استان کرمان. فصلنامه علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی. ۲۰(۷۱). ۱۲۱-۱۳۳.
- <http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-۳۳۰۲-۱-fa.html>
- شکیبا، آمینه؛ صادقی، سلیمان؛ دوستان، رضا؛ ۱۳۹۴. مراکز فعالیت و الگوهای سینوپتیکی بارش برف سنگین در شمال غرب ایران. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۶(۴). ۸۷-۱۰۳.
- <https://doi.org/10.22067/GEO.V4I4.36801>
- شمسی پور، علی اکبر؛ جعفری، ایوب؛ بستانچی، حسام‌الدین؛ ۱۳۹۹. الگوبندی و تحلیل همدید رخداد کولاک برف‌های شدید شمال غرب ایران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. ۷(۲). ۱۸۶-۱۶۹.
- <https://doi.org/10.29252/jsaeh.7.2.169>
- غفاریان، پروین؛ فریدمروودباده‌دی، نیما؛ مرادی، محمد؛ خوش اخلاق، فرامرز؛ عابد؛ حسین؛ نگاه، سمانه؛ ۱۳۹۵. بررسی نقش واداشتهای منطقه‌ای در شکل‌گیری الگوی مکانی مخاطره‌ی برف سنگین بهمن ۱۳۹۲ در جلگه‌ی گیلان. اقیانوس شناسی. ۷(۲۶). ۸۵-۹۷.
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.15621057.1395.7.26.9.0>
- فتاحی، ابراهیم؛ شیراوند، هنگامی؛ ۱۳۹۳. بررسی الگوهای گردش جوی روزهای همراه با بارش برف سنگین در غرب ایران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. ۱(۱). ۹۷-۱۰۷.
- <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-۲۳۱۷-۱-fa.html>

فهیمی نژاد، الهام؛ حجازی زاده، زهرا؛ علیجانی، بهلول و ضیائیان، پرویز؛ ۱۳۹۱. تحلیل سینوپتیکی-فضایی طوفان برف استان گیلان (فوریه ۲۰۰۵). مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای. ۱۰(۱۹). ۳۰۲-۲۸۱.

<https://doi.org/10.22067/geography.v0i0.23260>

قصابی، زهرا؛ فتحی، مانده؛ رضازاده، پرویز و رنجبر سعادت آبادی، عباس؛ ۱۳۹۹. بررسی عوامل دینامیکی و همدیدی مؤثر در رخداد بارش سنگین برف در استان تهران (مطالعه موردی: ژانویه ۲۰۱۸). نیوار. ۴۴(۱۱۰). ۴۲-۲۹.

<https://doi.org/10.30467/nivar.2019.197351.1136>

مرادی، محمد؛ رنجبر سعادت آبادی، عباس؛ ۱۳۹۹. بررسی همدیدی سیلاب سیستان و بلوچستان و برف سنگین گیلان در زمستان ۹۹. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۳(۳۵). ۲۴۳-۲۲۷.

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2020.67338.1000>

مسعودیان، سیدابوالفضل؛ عساکره، حسین؛ محمدی، بختیار؛ حلبیان، امیرحسین؛ ۱۳۹۱. نمایش و پردازش داده‌های جوی. انتشارات دانشگاه اصفهان.

نارنگی فرد، مهدی و مزیدی، احمد؛ ۱۳۹۶. بررسی ناهنجاری‌های همدیدی مؤثر بر رخداد بارش برف در استان فارس (مطالعه موردی: ژانویه ۲۰۱۴). مجله علمی و ترویجی نیوار. ۹۶. ۶۶-۵۸.

<https://doi.org/10.30467/nivar.2017.45152>

Amininia, K., Lashkari, H., & Alijani, B., 2010. Analysis and review of heavy snow synoptic conditions in North West of Iran by using PCA and clustering. *Journal of International Environmental Application and Science*, 5(1), 17-24.

Bao, Y., & You, Q., 2019. How do westerly jet streams regulate the winter snow depth over the Tibetan Plateau? *Climate dynamics*, 53(1), 353-370. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4589-1>

Cui, H. Y., & Qiao, F. L., 2016. Analysis of the extremely cold and heavy snowfall in North America in January 2015. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 9(2), 75-82.

<https://doi.org/10.1080/16742834.2016.1133057>

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... & Vitart, F., 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656), 553-597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>

Harnik, N., Galanti, E., Martius, O., & Adam, O., 2014. The anomalous merging of the African and North Atlantic jet streams during the Northern Hemisphere winter of 2010. *Journal of Climate*, 27(19), 7319-7334. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00531.1>

Holton, J. R. 1992. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. 3d edition, Academic Press.

Hosseini, S., & Movahedi, S., 2014. Sea level pressure climatology in black sea region. *Management Science Letters*, 4(2), 227-236. <http://dx.doi.org/10.5267/j.msl.2013.12.035>

Jiang, X., Zhang, T., Tam, C. Y., Chen, J., Lau, N. C., Yang, S., & Wang, Z., 2019. Impacts of ENSO and IOD on snow depth over the Tibetan Plateau: roles of convections over the western North Pacific and Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(22), 11961-11975. <https://doi.org/10.1029/2019JD031384>

Jiang-Yu, M., 2010. Interannual variability of snow depth over the Tibetan Plateau and its associated atmospheric circulation anomalies. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 3(4), 213-218. <https://doi.org/10.1080/16742834.2010.11446875>

- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., ... & Joseph, D., 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437-472.
[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2)
- Liu, F., Mao, X., Zhang, Y., Chen, Q., Liu, P., & Zhao, Z., 2014. Risk analysis of snow disaster in the pastoral areas of the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 24(3), 411-426.
<https://doi.org/10.1007/s11442-014-1097-z>
- Liu, L., Ma, Y., Yao, N., & Ma, W., 2021. Diagnostic analysis of a regional heavy snowfall event over the Tibetan Plateau using NCEP reanalysis data and WRF. *Climate Dynamics*, 56(7), 2451-2467.
<https://doi.org/10.1007/s00382-020-05598-4>
- Lü, J. M., Ju, J. H., Kim, S. J., Ren, J. Z., & Zhu, Y. X., 2008. Arctic Oscillation and the autumn/winter snow depth over the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D14).
<https://doi.org/10.1029/2007JD009567>
- Merino, A., Fernández, S., Hermida, L., López, L., Sánchez, J. L., García-Ortega, E., & Gascón, E., 2014. Snowfall in the northwest Iberian Peninsula: synoptic circulation patterns and their influence on snow day trends. *The Scientific World Journal*, 2014.
<https://doi.org/10.1155/2014/480275>
- Purslow, F., 2017. *Precipitation*. Weigl Publishers.
- Singh, V., 2008. *Nature's Fury: World's Worst Natural Disasters that Shook the World*. The Energy and Resources Institute (TERI).
- Wang, Y., Wang, J., Li, S., & Qin, D., 2014. Vulnerability of the Tibetan pastoral systems to climate and global change. *Ecology and Society*, 19(4).
<http://dx.doi.org/10.5751/ES-06803-190408>
- You, Q., Kang, S., Ren, G., Fraedrich, K., Pepin, N., Yan, Y., & Ma, L., 2011. Observed changes in snow depth and number of snow days in the eastern and central Tibetan Plateau. *Climate Research*, 46(2), 171-183.
<https://doi.org/10.3354/cr00985>