

صص ۷۹-۹۳

پایش پوشش برف و الگوبندی سامانه‌های برف‌زا در شهرستان خلخال**مهدی فروتن**

دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

برومند صلاحی*

استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۱۹

چکیده

بررسی پوشش برف و شناخت الگوهای برف‌زا می‌تواند برنامه‌ریزان محیطی را از رفتار این پدیده آگاه نماید. در این پژوهش، با فراخوانی داده‌های ماهواره مودیس در محیط گوگل ارث انجین و با استفاده از شاخص NDSI، وضعیت پوشش برف شهرستان خلخال در سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۲۲ بررسی شد. به‌منظور الگوبندی سامانه‌های برف‌های شهرستان خلخال، داده‌های مربوط به گزارش برف سنگین از سازمان هواشناسی ایران دریافت گردید. سپس با روش تحلیل خوشه‌ای بر روی مقادیر فشار تراز دریا در روزهای دارای فرین برفی، دو الگوی کلی برای سامانه‌های برف‌های شهرستان خلخال تعیین گردید. آنگاه با انتخاب یک روز نماینده از هر الگو، وضعیت فشار تراز دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، دما، وزش زمینگرد دما، فرا رفت رطوبت، جریان باد و سرعت باد تحلیل گردید. نتایج نشان داد که ذخایر برفی در نواحی مرکزی و شمالی شهرستان خلخال بخصوص در فصول زمستان به بیشینه گستردگی خود می‌رسند. نتایج همچنین نشان داد که دو الگوی کلی برای انتقال توده هوای سرد و بارش برف به منطقه مورد مطالعه وجود دارد که هرکدام مکانیزم‌های خاص خود را دارند. الگوی اول تحت تأثیر شیب گرادیان فشار و رود بادهای غربی است درحالی‌که الگوی دوم تحت تأثیر سیستم‌های پرفشار سیبری، فرونشست هوا و بادهای شمالی است.

واژگان کلیدی: الگوبندی، پوشش برف، تحلیل همدید، شهرستان خلخال.

مقدمه

از ویژگی‌های اقلیم کوهستانی شمال غرب ایران زمستان‌های سرد و خشن و برفی آن است (قویدل رحیمی، ۱۳۹۰: ۴۶). برف یکی از پارامترهای مؤثر در سیکل هیدرولوژیکی است و در اکثر مناطق کوهستانی به‌عنوان منبع اصلی آب‌های سطحی و زیرزمینی به حساب می‌آید به‌گونه‌ای که ۹۰ درصد جریان رودخانه‌ها در برخی از مناطق کوهستانی غرب کشور به علت رواناب ناشی از ذوب برف است (MowahhedDanesh, ۱۹۹۷؛ به نقل از خوش‌خو، ۱۳۹۵: ۵۱۸). حدود یک‌سوم آب مورد نیاز برای کشاورزی در دنیا ناشی از ذوب برف‌ها است و بیش از یک میلیارد نفر از ساکنان کره زمین آب شرب

خود را از ذوب برف تأمین می‌کنند (فتح زاده و زارع‌بیدکی، ۱۳۹۱). طبق محاسبات و گزارش هواشناسی، به‌صورت میانگین جهانی از هر سانتی‌متر برف تازه، به‌طور متوسط ۰/۷ میلی‌متر آب حاصل می‌شود (فهمیمی نژاد و همکاران، ۱۳۹۱: ۲۸۲). با افزایش دما در فصل بهار، پوشش برف شروع به ذوب شدن می‌کند و آب موجود در پوشش برف آزاد می‌شود. اگر بارندگی روی پوشش برف رخ دهد، فرایند ذوب برف تسریع می‌یابد که در نهایت منجر به سیل می‌شود و تلفات جانی و خسارات اقتصادی سنگینی را به دنبال می‌آورد (۲۰۶: Sui and Koehler, ۲۰۰۱)؛ بنابراین آگاهی از میزان ذخایر برفی حوضه‌های کوهستانی در جهت بهره‌برداری از آب معادل برف، کنترل سیلاب‌ها، ذخیره‌سازی و تأمین آب موردنیاز پایین‌دست ضروری است (فتاحی و وظیفه دوست، ۱۳۹۰). از دیگر اشکال تهدید برف در مناطق کوهستانی پدیده بهممن است. در مناطق کوهستانی پر از برف ممکن است با ریزش بهممن، زندگی مردم و زیرساخت‌ها تهدید شود (Schweizer et al, ۳۲۹۴:۲۰۲۱)؛ بنابراین با پیش‌بینی‌ها و ارائه هشدارها به‌صورت روزانه برای مردم در مورد سطح خطر سقوط بهممن، به همراه آموزش و نجات کارآمد، می‌توان از افزایش تلفات ناشی از بهممن جلوگیری نمود (Schirmer et al, ۷۶۲:۲۰۰۹). سطح پوشش برف متأثر از عوامل پیچیده هواشناسی و توپوگرافی می‌باشد از جمله این عوامل ارتفاع، شیب، دما و جهت است که چگونگی ذوب برف، انباشت و تغییرپذیری سطح پوشش برف را در مکان و زمان کنترل می‌نماید (قنبرپور و همکاران، ۱۳۸۴: ۵۰۴). پوشش برف به‌واسطه خصوصیات متفاوت نسبت به سایر سطوح، از قبیل ضریب انتقال حرارتی پایین و انعکاس بالا فاکتور مهمی در سیستم آب‌وهوایی کره زمین محسوب می‌شود (باراحمدی و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۹۴)؛ و به دلیل آلدوی بالا اثر مستقیمی بر روی دمای سطح زمین از راه بازتابندگی انرژی خورشیدی دارد. در فرایند تبادل گرما و رطوبت میان زمین و اتمسفر، پوشش برف و رطوبت خاک مهم‌ترین پارامتر به شمار می‌آیند. وجود برف در حوضه، رطوبت موجود در سطح را افزایش می‌دهد و در نتیجه منجر به رواناب سیل می‌شود. برای پایش این پدیده استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ابزاری مناسب به حساب می‌آید و با ظهور سنجنده‌های با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالاتر مانند لندست و مودیس ویژگی‌های سطوح برفی با دقت بیش‌تر بررسی می‌شود (تصدیقیان و رحیم‌زادگان، ۱۳۹۶: ۱۶۴).

بنابراین، با ارائه یک نگاه جامع به شرایط جوی، به هنگام وقوع ریزش برف می‌توان عوامل مؤثر از قبیل فشار هوا، دما، حرکت باد و رطوبت را تعیین کرد و الگوهای جوی مرتبط با وقوع ریزش برف را شناسایی نمود. در این زمینه مطالعات فراوانی انجام گرفته از جمله می‌توان به کار پژوهشی (Esteban et al, ۲۰۰۵)، اشاره کرد که به بررسی الگوهای گردش اتمسفری مربوط به روزهای بارش برف سنگین با شدت حداقل ۳۰ سانتی‌متر برف در یک دوره ۲۴ ساعته در آندورا پرداختند. آن‌ها ۷ الگوی گردش جوی را با استفاده از تجزیه و تحلیل خوشه‌ای شناسایی نمودند و بیان داشتند که اکثر آن‌ها با یک جز آنالنتیک باد و برخی دیگر با یک جریان مدیترانه‌ای با هوای سرد قاره‌ای ترکیب و باعث رخداد برف سنگین شده‌اند (Bednorz et al, ۲۰۱۱)، شرایط سینوپتیکی رخداد پوشش برف در زمین‌های پست مرکزی اروپا را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان با تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی الگوهای گردشی ناشی از بارش شدید و پایداری برف

در هر منطقه و تهیه نقشه‌های فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰ متر به این نتیجه دست یافتند که بارش برف‌های سنگین معمولاً به علت جبهه‌های سرد در قسمت‌های سردتر مدیترانه‌ای بوده است و یکی دیگر از مکان‌های معمول سیکلون‌ها که سبب وقوع برف می‌شوند منطقه دریای بالتیک است که در آن جبهه‌های هواشناسی به‌طور مرتب نمایان می‌شوند. (Rittger et al, ۲۰۱۳) به ارزیابی روش‌های نقشه‌برداری پوشش برف از MODIS پرداختند آن‌ها با استفاده از ۱۷۲ تصویر شرایط پوشش برف و پوشش گیاهی از مناطق کوه‌های راکی کلرادو، ریوگرانده بالایی، سیرا نوادا کالیفرنیا و هیمالیا نپال باندهای MOD10A1 و MODSCAG مورد مقایسه قرار دادند و نتیجه گرفتند در دوره‌های انتقالی در طول انباشتگی و ذوب شدن برف MODSCAG عملکرد خود را در تمام طبقات پوشش زمین و در طیف وسیع‌تری از خواص سطح زمین حفظ نموده و به‌طور میانگین در تمام مناطق میزان خطای RMSE آن به ۰/۱۰ رسیده و این میزان خطا برای MOD10A1 برابر با ۰/۲۳ بوده است. (Farukh and Yamada, ۲۰۱۴)، رویدادهای شدید بارش برف در طول سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۱ در شهر ساپورو در شمال ژاپن را مورد بررسی قرار دادند و با استفاده از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و خوشه‌بندی K-means و پس از ترسیم نقشه‌های همدیدی به این نتیجه دست یافتند که الگوهای گردش هفت رویداد بارش برف با فرا رفت توده هوای بسیار سرد از شرق سیبری، رطوبت بسیار زیاد غیرعادی با باد شدید شمالی و پایین‌ترین هسته سرد عمیق ۵۰۰ هکتوپاسکال بر فراز هوکایدو جنوبی مرتبط بوده است. (Merino et al, ۲۰۱۴)، الگوی گردشی جوی بارش برف در شبه‌جزیره ایبری شمال غربی و تأثیر آن‌ها بر روند روز برف، با استفاده از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تکنیک‌های خوشه‌ای و همچنین آزمایش من‌کنندال مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه دست یافتند که اکثر ایستگاه‌ها روند منفی داشته و تعداد روزهای بارش برف کاهش می‌یابد. (Suriano and Leathers, ۲۰۱۷)، با رویکرد اقلیمی سینوپتیک، الگوهای همدیدی که منجر به بارش برف اثر دریاچه می‌شوند برای منطقه دریاچه‌های بزرگ شرقی در طول فصل‌های نوامبر تا مارس ۱۹۵۰-۲۰۰۹ شناسایی نمودند و بیان داشتند که اکثر انواع سینوپتیک اثر دریاچه در ارتباط با یک فرورفتگی سطح بالایی در شرق ایالات متحده رخ می‌دهد. این فرورفتگی با الگوی سطح بالایی مرتبط با فاز منفی نوسان قطب شمال (AO^۲) و نوسان اقیانوس اطلس شمالی (NAO^۳) یا الگوی مثبت اقیانوس آرام/آمریکای شمالی (PNA^۴) سازگار است. (Martin and Germain, ۲۰۱۷)، ارتباط میان الگوهای پیوند از دور و برف‌های رخ داده در زمستان را در نیوهامپشایر در ایالات متحده آمریکا را مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که شاخص NAO پیش‌بینی کننده خوبی برای بارش برف است اما اطلاعاتی در مورد مسیر طوفان‌ها نمی‌دهد. برعکس شاخص ENSO^۵ ارتباط کمی با بارش برف دارد اما رابطه مثبتی با نسبت بارش برف تولیدشده توسط فرورفتگی‌های ساحلی و رابطه منفی با طوفان‌های دریاچه‌های بزرگ دارد. (Brown, ۲۰۱۹)، تغییرات

-
- 1- Principal Component Analysis
 - 2- Arctice Oscillation
 - 3- North Atlantic Oscillation
 - 4- Pacific/North American
 - 5- El Nino Southern Oscilation

مکانی و زمانی پوشش برف را در بریتانیا مورد واکاوی قرار دادند. ایشان از تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از رگرسیون غیرخطی (لجستیک) نشان داد که تغییرات میانگین در پوشش برف سالانه به‌جای مقادیر بارندگی به‌شدت با میانگین دما مرتبط است و با یک پیش‌بینی مجموعه مرکزی از مدل آب‌وهوای HadRM3 نشان داد که متوسط پوشش برف سالانه عمدتاً به مناطق کوهستانی بریتانیا تا دهه ۲۰۵۰ محدود می‌شود. (Capozzi et al, ۲۰۲۲)، در یک پژوهشی به مطالعه رابطه تغییرپذیری بارش برف زمستانی با الگوهای پیوند از دور در کوه‌های آپنین در ایتالیا بین سال‌های ۱۸۸۴-۲۰۱۵ پرداختند و نشان دادند نوسان قطب شمال (AO)، اقیانوس اطلس شرقی روسیه غربی (EAWR^۱)، الگوی مدیترانه شرقی (EMP^۲)، نوسان اقیانوس اطلس شمالی (NAO) و الگوی اسکاندیناوی (SCAND)، نقش مؤثری در تنوع جوی زمستانی اروپا دارند همچنین بیان داشتند کاهش فراوانی و مقادیر بارش برف بین دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۹۰ را می‌توان به روند مثبت شاخص‌های AO و NAO نسبت داد و افزایش میزان متوسط بارش برف را می‌توان با روند معکوس شاخص AO و با شیوع یک الگوی خنثی یا منفی EAWR توضیح داد. (Patlakas et al, ۲۰۲۳)، تأثیر دمای سطح دریا با بارش شدید برف مدیترانه شرقی در ژانویه ۲۰۲۲ مورد تجزیه و تحلیل سینوپتیکی قرار دادند سناریوهای مختلف نشان دادند که ناهنجاری‌های مثبت SST^۳ منجر به بارش شدید برف در ارتفاعات بالاتر می‌شود، در حالی که ناهنجاری‌های منفی منجر به طولانی‌تر شدن پوشش برف در ارتفاعات پایین‌تر و مناطق ساحلی می‌شود.

خوش‌اخلاق و همکاران (۱۳۹۵)، عوامل مؤثر بر رخداد پدیده برف دریاچه‌ای و تأثیرات آن بر ریزش برف‌های سنگین در حاشیه جنوب غربی دریای خزر مورد واکاوی قرار دادند و ۷ موج بارش برف سنگین را با استفاده از آمار بارش روزانه و ارتفاع برف شناسایی نمودند و پس از بررسی نقشه‌های سینوپتیکی به این نتیجه دست یافتند که هرگاه توده‌های پرفشار با هسته‌های قوی و سرد از روی دریای خزر گذر کرده بین سطح آب و توده هوای عبوری شار گرمای نهان و شار رطوبت مبادله شده و الگوی بندال نیز باعث انتقال و تداوم این شارهای سطحی شده در نهایت در سواحل جنوب غربی خزر برف‌های سنگین رخ داده است. رضایی بنفشه و همکاران (۱۳۹۶)، الگوهای همدید ریزش برف کرمانشاه را مورد مطالعه قرار دادند و با استفاده از داده‌های روزانه ایستگاه برف‌سنجی کرمانشاه برای دوره آماری ۱۹۵۱ تا ۲۰۰۴ و همچنین داده‌های روزانه فشار و دمای سطح دریا و سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال از سری داده‌های NCEP/NCAR و تحلیل خوشه‌ای بر روی آن‌ها به این نتیجه رسیدند بارش برف در غرب ایران بر اثر ورود سامانه‌های مختلف از قبیل ۱- گسترش تاوه قطبی به سمت عرض‌های پائین ۲- قرار گرفتن منطقه در زیر ناوه مدیترانه ۳- گسترش پرفشار سیبری و تبت به طرف شمال شرق و شرق ایران ۵- شکل‌گیری پرفشار اروپایی در شمال غرب ایران ۶- نفوذ زبانه‌های کم‌فشار سودان به سمت غرب ایران بوده است.

کاشکی و حاجی محمدی (۱۳۹۶)، سیستم‌های سینوپتیکی جو در زمان رخداد برف سنگین ۳۱ ژانویه تا ۳ فوریه

1- Eastern Atlantic Western Russia
2- Eastern Mediterranean Pattern
3- Sea Surface Temperature

۲۰۱۴ در استان‌های شمالی ایران را مورد واکاوی قرار دادند و با استفاده از داده‌های دمای هوا، ارتفاع ژئوپتانسیل، فشار تراز دریا، باد مداری و نصف‌النهاری، امگا و دمای سطح آب از سری داده‌های NCEP/NCAR به این نتیجه رسیدند استقرار پرفشار در شرق اروپا، استقرار سیستم مانع در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، تشکیل ناوه عمیق با محور شمال شرق - جنوب غرب بر روی دریای خزر باعث قرارگیری منطقه در زیر تاوایی مثبت شده و نیز انتقال رطوبت از جنوب دریاچه به توده‌هوای سرد و تشکیل جبهه در منطقه خزری شرایط ریزش برف سنگین مهیا شده است. در گاهیان و علیجانی (۱۳۹۶)، به بررسی سینوپتیکی و دینامیکی بارش برف در بهمن‌ماه سال ۱۳۹۲ در ایران با تأکید بر نقش پدیده بلاکینگ پرداختند. آن‌ها پس از اخذ داده‌های مربوطه از سایت NCEP و ترسیم نقشه‌های سینوپتیکی در نرم‌افزار GRADS به این نتیجه رسیدند که عواملی همچون ۱- متأثر شدن ایران از تراف قوی و عمیق سمت راست بلوکینگ امگا با یک پشته بسیار قوی تا عرض‌های ۷۰ درجه شمالی ۲- استقرار مرکز پرفشار قوی در شمال دریای خزر و ریزش هوای سرد از عرض‌های بالا ۳- کسب رطوبت از دریای خزر شرایط را برای ریزش برف فراهم نموده است. خالدی و همکاران (۱۳۹۶)، با رویکرد محیطی به گردشی به بررسی همدیدی برف سنگین جلگه گیلان در بهمن‌ماه ۱۳۹۲ پرداختند. برای این کار آن‌ها با استفاده از داده‌های روزانه ایستگاه‌های هواشناسی استان گیلان برای روزهای دهم تا چهاردهم ۱۳۹۲ و با استفاده از داده‌های NCEP و ترسیم نقشه‌های جوی به این نتیجه رسیدند که تشکیل پرفشار در شمال اروپا که با جریان جنوب سوی خود بر روی دریای خزر مستقر شده بود باعث اختلاف شدید دمایی بین آب دریا و توده‌هوای ورودی و در نهایت همرفت شدید و صعود قوی بر روی منطقه پژوهش و بارش برف سنگین شده است. خوان‌سالاری و همکاران (۱۳۹۷)، عوامل دینامیکی مؤثر بر بارش سنگین برف روز ششم ژانویه ۲۰۰۸ در تهران را مورد بررسی قرار دادند آن‌ها با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA-Interim و مدل پیش‌بینی عددی میان‌مقیاس WRF^۱، تأثیر چهار عامل شامل بی‌هنجاری PV ترازهای زیرین (کشانه PV) و میانی وردسپهر و دو رشته‌کوه البرز و زاگرس را مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه دست یافتند که در بارش این روز کشانه PV با ۷۶/۵ درصد دارای بیش‌ترین تأثیر بوده و پس از آن رشته‌کوه البرز نقش داشته است و اثر رشته‌کوه زاگرس و بی‌هنجاری PV تراز میانی وردسپهر ناچیز بوده است. شادپور و همکاران (۱۳۹۷)، برف‌های سنگین گیلان را طی دوره آماری (۱۹۸۶-۲۰۱۶) با استفاده از روش تحلیل عاملی مورد تحلیل آماری و همدیدی قرار دادند نتایج کار پژوهش آن‌ها نشان داد در ترازهای میانی جو از شمال غرب ایران تا شمال سودان و مصر یک ناوه عمیقی که راستای شمال شرقی - جنوب غربی داشته است شکل گرفته و رطوبت دریای مازندران به منطقه شارش یافته است همچنین پشته واقع در اروپای مرکزی و دریای سیاه نیز منجر به پایداری این سامانه گشته است. فتاحی و مقیمی (۱۳۹۸)، اثر تغییرات اقلیمی بر روند برف شمال غرب ایران را مورد مطالعه قرار دادند آن‌ها ابتدا به‌منظور پایش سطح پوشش برف از تصاویر ماهواره‌ای اپتیکال سنجنده MODIS و برای تشخیص سطوح پوشیده شده از برف از شاخص NDSI بهره بردند و نشان دادند بیش‌ترین مساحت تحت پوشش برف در ماه‌های دسامبر،

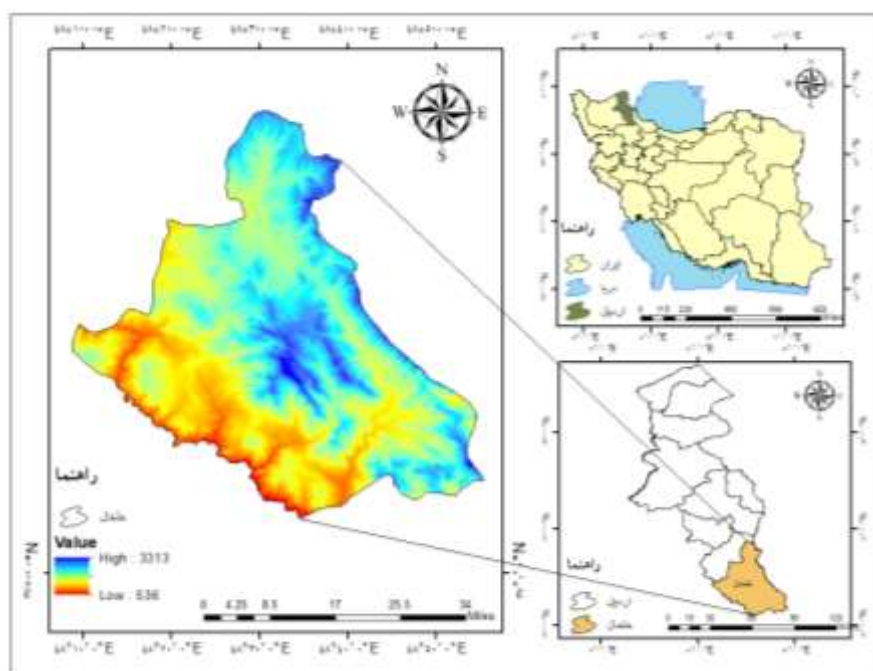
ژانویه، فوریه تا مارس (۱۰ آذرماه الی ۱۰ فرودین ماه) در سطح منطقه مشاهده شده و حداکثر سطح پوشیده شده از برف در ژانویه رخ داده است و روند تغییرات سطح پوشش برف در کل دارای روند کاهشی بوده است سپس به بررسی نمایه‌های حدی دما در دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ و دوره پایه با رویکرد تغییر اقلیم در منطقه شمال غرب کشور با بهره‌گیری از خروجی‌های مدل گردش عمومی جو تحت سناریوی A2 و مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG نشان دادند تعداد روزهای یخبندان نیز نسبت به دوره پایه روندی کاهشی داشته است. با توجه به نتیجه هر دو مورد افزایش گرمایش جهانی تقویت می‌یابد.

بر اساس بررسی‌های انجام شده چنین استنباط می‌شود که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Modis جهت پایش پوشش برف مرسوم بوده و روش‌های خوشه‌ای یکی از تکنیک‌هایی است که برای طبقه‌بندی و الگوبندی سامانه‌های برف‌زا انجام می‌گیرد لذا سعی بر این است که رفتار این پدیده در شهرستان خلخال با این روش‌ها مورد بررسی قرار داد.

داده‌ها و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

موقعیت جغرافیایی خلخال در جنوب شرقی استان اردبیل واقع گشته است. مختصات جغرافیایی آن ۴۸ درجه و ۳۲ دقیقه طول جغرافیایی و ۳۷ درجه و ۳۷ دقیقه عرض جغرافیایی است. میانگین ارتفاع آن از سطح دریا ۱۷۹۷ متر است. خلخال منطقه‌ای کوهستانی با آب‌وهوای معتدل و نسبتاً سرد است. در شرق خلخال کوه‌های تالش قرار گرفته و همچون سدی میان دریای خزر و استان گیلان و اردبیل است. (صفریان زنگیر و همکاران، ۱۳۹۸). شکل ۱، نقشه موقعیت جغرافیایی شهرستان خلخال را در کشور ایران و استان اردبیل نشان می‌دهد.



شکل ۱: نقشه موقعیت جغرافیایی خلخال در ایران و استان اردبیل

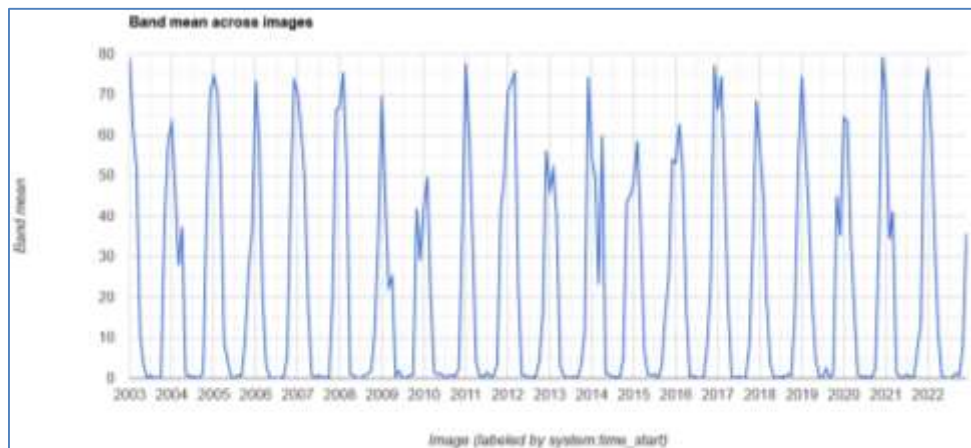
روش پژوهش

امروزه از تصاویر ماهواره‌ای به دلیل وضوح بالا و هماهنگی در بسیاری از تحقیقات جوی بهره برده می‌شود یکی از این سنجنده‌های پرکاربرد مودیس است که تصاویر متنوعی را در بخش جوی و اقیانوسی ارائه می‌دهد (قاسمی فر و همکاران، ۱۳۹۸: ۴۴۷). در این پژوهش نیز به‌منظور بررسی تغییرات پوشش برف در ایام سال ابتدا با استفاده از فراخوانی داده‌های تصاویر ماهواره مودیس (MOD10A1) و شاخص NDSI در محیط گوگل ارث انجین و کدنویسی در آن روند رخداد این پدیده در شهرستان خلخال از سال (۲۰۲۲-۲۰۰۳) مشخص شد و نقشه میانگین پوشش برف سال‌های مذکور و پوشش برف ماه‌های زمستان که بیشینه مشاهدات را در برداشت ترسیم گردید سپس سعی شد تا عوامل جوی رخداد این پدیده شناسایی و الگوبندی شود لذا به تهیه داده‌های هواشناسی که در برگرنده کدهای (۷۰-۷۹) بود از اداره هواشناسی کل اخذ شد. در ادامه کار، در روزهایی که تعداد ۶ الی ۸ بار این کدها ثبت شده بودند انتخاب و برای این روزها میزان فشار تراز سطح دریا از سایت نوا برداشته شد و از روی این مقادیر الگوبندی سامانه‌های برف‌زا با روش خوشه‌ای انجام گرفت. روش تحلیل خوشه‌ای به روش ward از روش‌های ادغام برحسب متوسط گروهی با مجذور فاصله اقلیدسی است (خورشید دوست و قویدل رحیمی، ۱۳۸۷: ۷۷). در ادامه یک روز نماینده از هر الگو انتخاب گردید و برای این روزها داده‌های slp^1 ، hgt^2 ، $uwnd^3$ ، $vwnd^4$ ، air^5 ، $shum^6$ از سایت مرکز ملی پیش‌بینی محیطی آمریکا (NCEP/NCAR) اخذ شد و نقشه‌های ترکیبی فشار تراز سطح دریا با ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، وضعیت دما با وزش زمینگرد دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، فرا رفت رطوبت با جریان باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و سرعت باد سطح زمین و تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال در محیط نرم‌افزار گرسس ترسیم و تحلیل گردید.

یافته‌های پژوهش

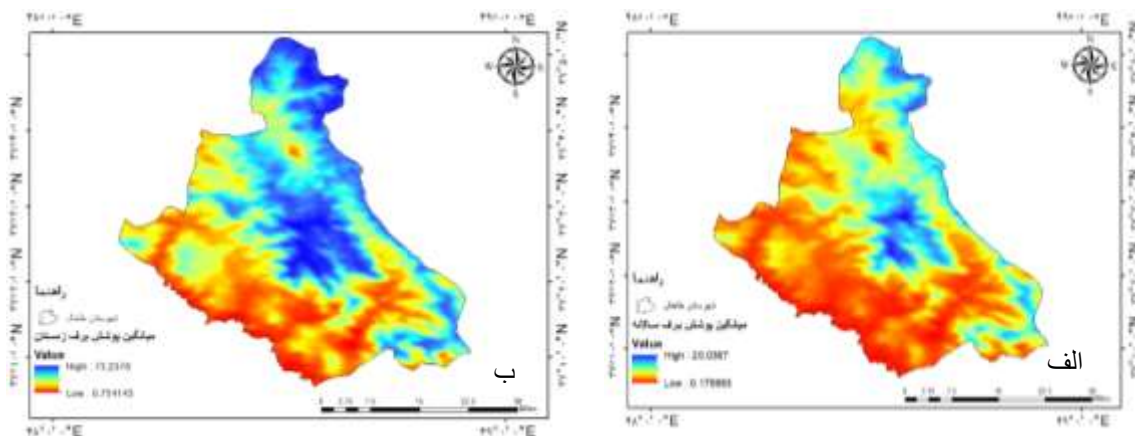
شکل ۲، روند شاخص NDSI را برای ایام سال‌های (۲۰۲۲-۲۰۰۳) در شهرستان خلخال نشان می‌دهد. طبق این شکل در می‌یابیم از ماه‌های آذر تا اسفندماه میانگین باندهای نشان‌دهنده پوشش برف به بیشینه خود رسیده است این نوسان در هر یک از سال‌های مورد بررسی سیکل حرکتی متفاوتی داشته و با کمی تلورانس کاهشی و افزایشی روبرو بوده است.

-
- 1- Sea Level Pressure
 - 2- Geopotential Height
 - 3- Zonal Wind / باد مداری
 - 4- Meridional Wind / باد نصف‌النهاری
 - 5- دمای هوا
 - 6- Specific Humidity / رطوبت مطلق



شکل ۲: طیف باند پوشش برف شهرستان خلخال با داده‌های ماهواره مودیس در سال‌های (۲۰۲۲-۲۰۰۳)

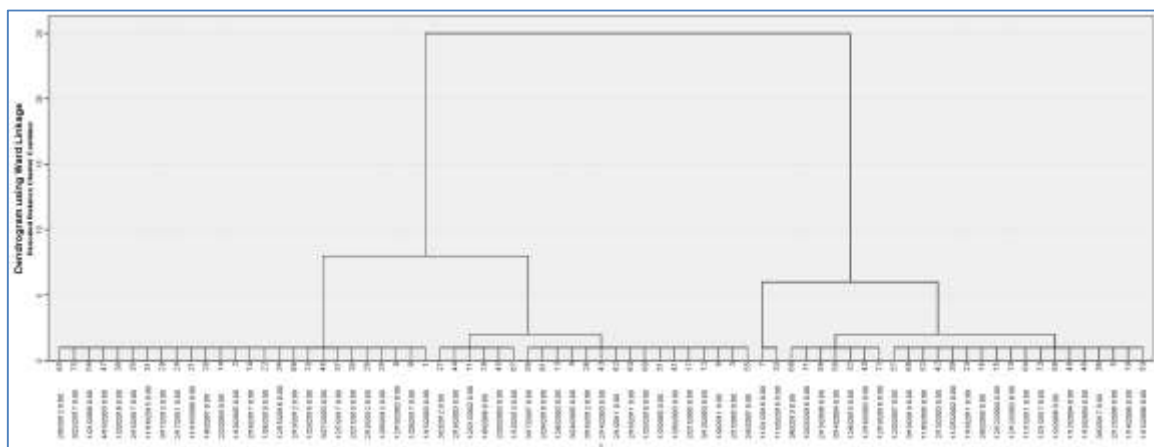
بر اساس داده‌های ماهواره مودیس (MOD10A1) و شاخص NDSI نقشه میانگین پوشش برف سالانه در شکل ۳ الف، به نمایش درآمده و مشخص است تراکم این پدیده در نواحی مرکزی و بخش‌هایی از شمال شهرستان درست در مناطق مرتفع واقع شده و بیشینه آن به بیش از ۲۰ میلی‌متر به‌طور متوسط رسیده است. با توجه به این‌که بیشینه مشاهده طیف این پدیده در فصل زمستان رخ داده لذا تصاویر پوشش برف این فصل برای سال‌های مذکور (شکل ب) نمایش داده شد و مشخص است تراکم مکانی این پدیده نسبت به میانگین سالانه گسترده‌تر شده و بیشینه آن به بیش از ۷۲ میلی‌متر رسیده است.



شکل ۳: الف) نقشه میانگین پوشش برف سالانه، ب) نقشه پوشش برف فصول زمستان سال‌های (۲۰۲۲-۲۰۰۳)

با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی ward با فاصله اقلیدسی بر روی مقادیر فشار تراز دریای روزهای نماینده، ۲ الگوی سامانه‌ای مولد برف‌زا از هم تفکیک شدند و این دو خوشه هرکدام به دو زیر خوشه مجزا تقسیم شده است که در شکل ۴، به‌وضوح مشخص است. می‌توان گفت از ۷۵ روز فرین مورد مطالعه ۲۷ روز مربوط به خوشه اول حاصل نفوذ سامانه‌های پرفشار روی اروپا بوده و ۴۸ روز دیگر مربوط به خوشه دوم متأثر از نفوذ سامانه پرفشار سیبری بوده است؛ از نظر توزیع فصلی نیز می‌توان گفت ۵۵ روز نماینده در فصل زمستان رخ داده که بیش‌ترین آمار مربوط به

دی‌ماه با ۲۰ روز نماینده است. در رتبه‌بندی فصول دیگر، ۱۸ روز نماینده مربوط به فصل پاییز و ۱ روز هم مربوط به فصل بهار بوده است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ۲ الگوی کلی در ریزش برف‌های سنگین شهرستان خلخال مؤثر بوده و در ادامه به تحلیل یک روز نماینده از هر الگو پرداخته خواهد شد.

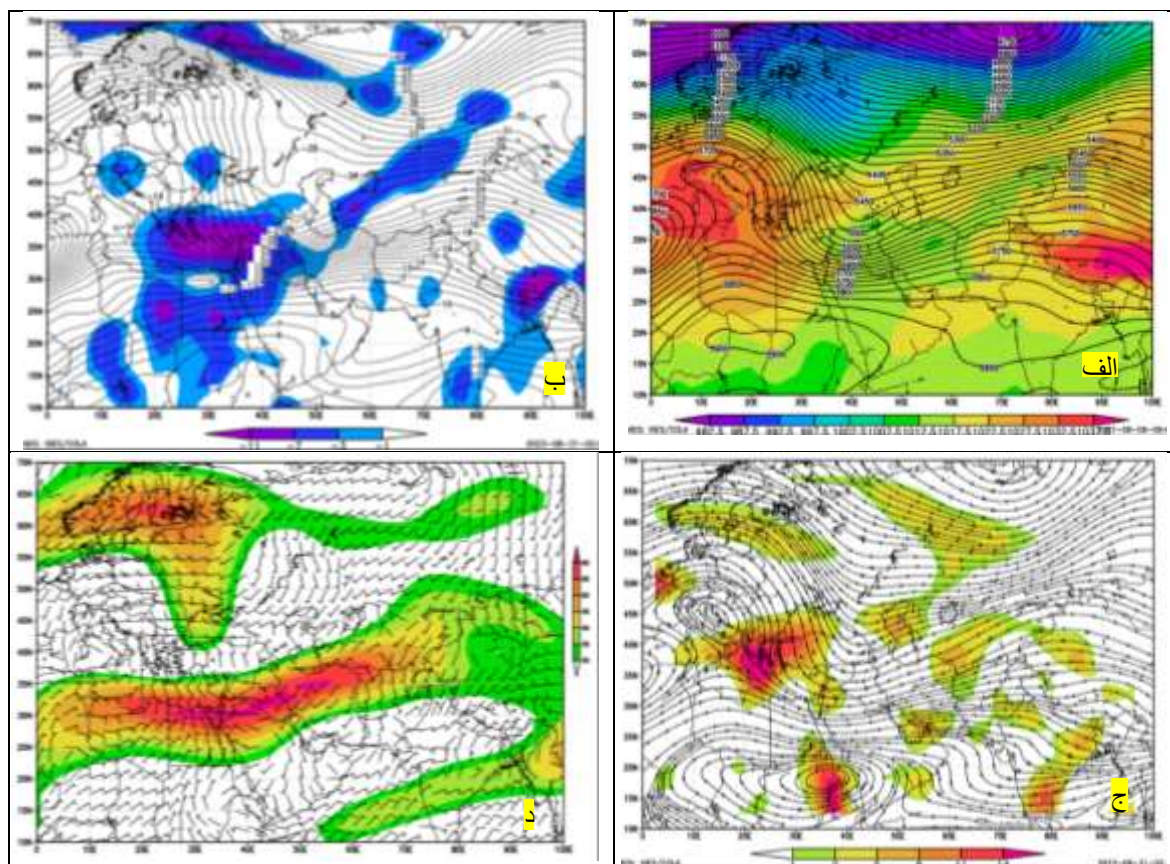


شکل ۴: نمودار دندروگرام خوشه‌ای سلسله مراتبی ward بر روی مقادیر فشار تراز دریای روزهای فرین

تحلیل سینوپتیکی برف سنگین مورخه ۱۵/ ژانویه/ ۲۰۰۳

شکل ۵ الف، نقشه فشار تراز دریا (شکل رنگی) و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال روز پانزدهم ژانویه ۲۰۰۳ را نشان می‌دهد که در این روز شاهد ریزش بارش برف سنگین در شهرستان خلخال بوده‌ایم. در این روز در روی اروپا سامانه پرفشاری با قدرت مرکزی ۱۰۳۷/۵ هکتوپاسکال تشکیل یافته است اما در روی ایران مشاهده می‌کنیم زبانه کم‌فشار سودانی بر کل پهنه جغرافیایی ایران گسترده شده و همین عامل باعث ایجاد شیب گرادیان فشار بین پرفشار یادشده با کم‌فشار روی ایران شده است از طرفی حرکت برون‌گرد پرفشار روی اروپا منجر به حرکت توده‌های سرد شمال اروپا به سمت ایران و منطقه مورد مطالعه شده است. وضعیت ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز نشان می‌دهد پشته واقع در شمال اروپا و ریزش جریانات سرد شمالی از طریق دامنه شرقی این پدیده نقش مهمی در هجوم بادهای سرد شمالی به عرض‌های جنوبی داشته و در ادامه یک ناوه‌ای در غرب ایران پدید آمده و محور فرود آن در عراق واقع گشته است. با توجه به این که منطقه مطالعاتی در جلوی محور فرود این ناوه قرار گرفته و به علت چرخندگی مثبت هوا و تقویت واگرایی در وردسپهر در این دامنه، وضعیت چرخندی و صعود هوا بر منطقه حاکم گشته است. این وضعیت مشابه نتایج (Ghavidel and Jafari Hombari, 2020)، است همان‌طور که علل رخداد بارش‌های سنگین ۱ آپریل ۲۰۱۹ در غرب ایران را در سطح دریا ناشی از شیب فشار شدید بین کم‌فشار واقع در شمال عربستان و غرب ایران و پرفشار هسته‌های سرد سیبری و اروپا و جبهه بین این سامانه‌ها دانسته‌اند. در شکل ب، وزش زمینگرد دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل رنگی) به همراه دمای این تراز ترسیم گشته و مشاهده می‌شود یک هسته‌ای از هوای سرد از سمت غرب ایران وارد نیمه غربی کشور شده و می‌توان گفت منشأ این توده هوا از مرکز پرفشار جنوب اروپا سرچشمه گرفته و

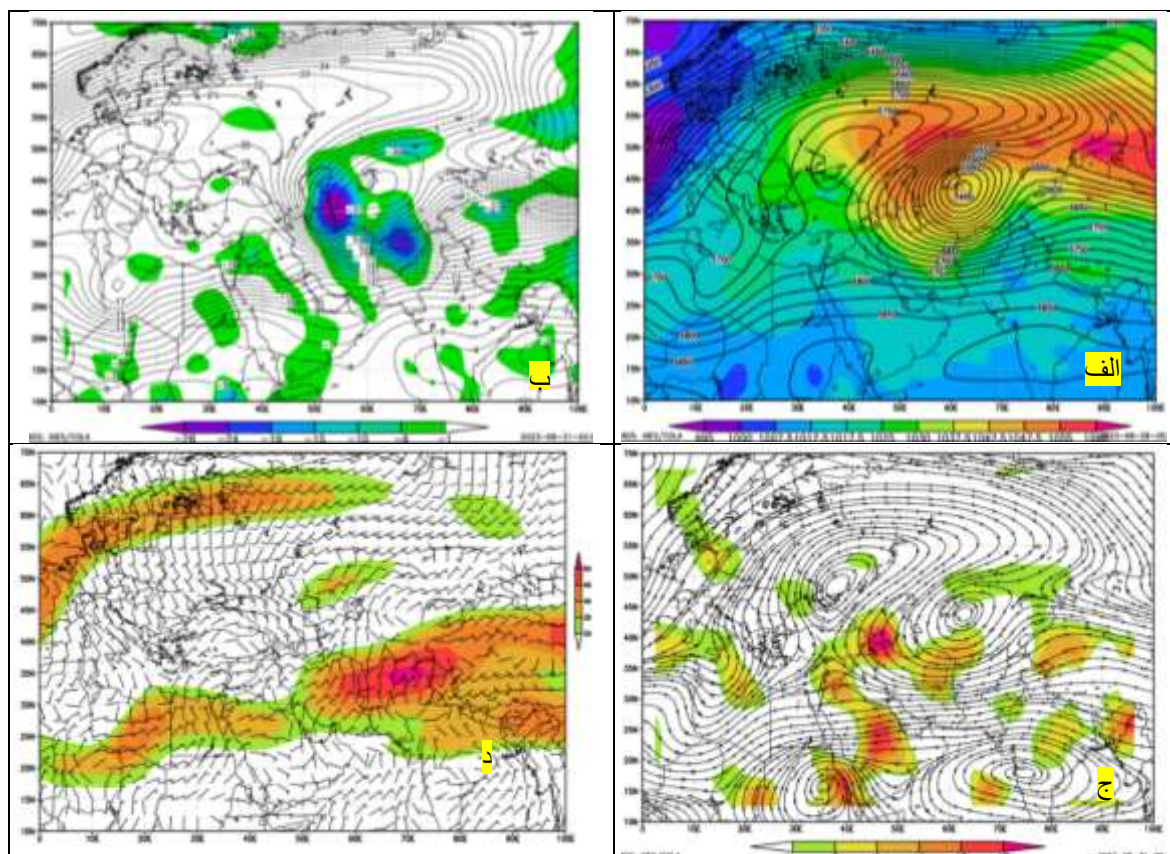
توسط حرکت برون‌گرد آن به سمت شرق روانه شده است. این توده هوا توانسته منطقه مورد مطالعه را تحت حصار خود قرار دهد ولی به‌طور کامل بر آن چیره نشده است در نهایت میزان دمای منطقه مورد مطالعه در تراز مذکور به -26 درجه سانتی‌گراد رسیده است. وضعیت فرا رفت رطوبت تراز 500 هکتوپاسکال در شکل ج، نشان می‌دهد یک هسته‌ای از همگرایی رطوبتی در شرق دریای مدیترانه تشکیل یافته که بیشینه آن به بیش از 14 گرم در کیلوگرم رسیده است و گذر جریان بادهای غربی از روی این مراکز رطوبتی باعث شار آن به سمت اتمسفر منطقه مورد مطالعه شده است. با دقت در نقشه د که شکل رنگی سرعت باد تراز 250 هکتوپاسکال و میله‌های خاردار سرعت باد تراز سطح زمین را نمایش می‌دهد در می‌یابیم در روی پشته واقع در شمال اروپا سرعت باد به بیش از سرعت رود باد رسیده و توده هوای سرد عرض‌های شمالی با سرعت هرچه تمام به سمت عرض‌های پایین حرکت نموده‌اند در ادامه مشابه این وضعیت در کانال ناوه واقع در غرب ایران مشاهده می‌شود که هسته‌های رود باد اکثر مناطق ایران را تحت سیطره خود قرار داده است و سرعت باد تراز مذکور در منطقه مورد مطالعه به 45 متر بر ثانیه رسیده است اما سرعت و جهت باد سطح زمین توسط میله‌های خاردار نشان می‌دهد در روی منطقه مورد مطالعه بادهایی با سرعت 15 گره (معادل نزدیک $7/71$ متر بر ثانیه) و با جهت شمال شرق سو در وزش بوده است.



شکل ۵: نقشه ترکیبی فشار تراز دریا (رنگی) با ارتفاع ژئوپتانسیل تراز 500 هکتوپاسکال، (ب) وزش زمینگرد دما با وضعیت دمای تراز 500 هکتوپاسکال، (ج) فرا رفت رطوبت با جریان باد تراز 500 هکتوپاسکال، (د) سرعت باد تراز 250 هکتوپاسکال و سمت و سرعت باد تراز سطح زمین روز ۱۵ ژانویه ۲۰۰۳

تحلیل سینوپتیکی برف سنگین مورخه ۲۱ نوامبر ۲۰۱۶

بارش برف سنگین روز ۲۱ نوامبر ۲۰۱۶ در شهرستان خلخال به‌عنوان روز نماینده الگوی دوم انتخاب گردید و در شکل ۶ الف، وضعیت فشار تراز دریا با ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به‌صورت ترکیبی به تصویر کشیده شده است. در این شکل در وهله اول شاهد حاکمیت سامانه پرفشار سیبری بر آسیای مرکزی و نیمه شمالی ایران هستیم که کانون آن به ۱۰۶۰ هکتوپاسکال رسیده و زبانه ۱۰۴۲/۵ هکتوپاسکال آن بر فراز منطقه مورد مطالعه کشیده شده است. با توجه به شرایط واچرخندی هوا وضعیت جو پایدار و نزولی بوده است و از طرفی حرکت ساعت‌گرد این سامانه منجر به انتقال جریان توده هوای سرد سیبری به سمت منطقه مورد مطالعه شده است. با توجه به وضعیت ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در می‌یابیم در شمال ایران یک بلوکینگ دوقطبی تشکیل یافته و هسته سردچال آن در مجاورت دریاچه آرال واقع گشته است و انشعاب خطوط ارتفاع هم‌فشار یک کانال ناوهای را در جنوب هسته مذکور تشکیل داده و توده هوای سرد سیبری از طریق این کانال بر منطقه مورد مطالعه هجوم آورده است. از طرفی دیگر با توجه به این که منطقه مورد مطالعه در پشت محور فرود این ناوه قرار گرفته وضعیت چرخندگی منفی و واچرخندی بر جو منطقه مستولی گشته و سبب فرونشست هوا شده است. در بررسی امواج سرمایی شمال غرب ایران توسط قویدل رحیمی و همکاران (۱۳۹۵)، نیز نتایج مشابه با تحلیل مذکور بوده و ایشان بیان داشتند حاکمیت پرفشار و ناوه عمیق در ریزش هوای سرد عرض‌های شمالی نقش داشته و بلوکینگ موجب سرازیر شدن توده هوای سرد از عرض‌های بالاتر به شمال غرب شده است. در شکل ب، وضعیت وزش زمینگرد دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به‌صورت رنگی مشخص است یک توده هوای سردی که منشأ آن سیبری بوده است در شرق دریای خزر استقرار یافته و قسمت‌های شمالی و نیمه شرقی ایران را تحت پوشش خود قرار داده است این هسته باعث کاهش دمای منطقه مورد مطالعه بین ۱- تا ۶- درجه سانتی‌گراد شده و میزان دمای حاکم بر جو منطقه نیز ۲۵- درجه سانتی‌گراد را تجربه کرده است. وضعیت فرا رفت رطوبت تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز در شکل ج، نمایان است و مشاهده می‌شود یک هسته‌ای از همگرایی رطوبتی که کانون‌های آن به‌صورت پیوسته و زنجیره‌وار در شمال و غرب ایران کشیده شده‌اند و بیشینه کانون آن با ۲۰ گرم در کیلوگرم رطوبت در روی منطقه مورد مطالعه حاکم شده و از طرفی دیگر عبور جریان بادهای شمالی که از سمت سیبری در وزش بوده است در انتقال توده هوای سرد و رطوبت دریای خزر نقش مؤثری داشته است. توجه به سرعت باد تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال در شکل د، نشان می‌دهد به غیر از شمال غرب ایران در سایر نواحی رود باد حاکم بوده و کانون آن در شرق ایران به ۵۰ متر بر ثانیه رسیده است؛ اما در سطح زمین بادهای با جهت جنوب غرب سو و سرعتی معادل ۲۰ گره (معادل ۱۰/۲۸ متر بر ثانیه) در روی منطقه مورد مطالعه توسط میله‌های خاردار به اصطلاح barb نشان داده شده است.



شکل ۶: الف) نقشه ترکیبی فشار تراز دریا (رنگی) با ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، ب) وزش زمینگرد دما با وضعیت دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، ج) فرافت رطوبت با جریان باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، د) سرعت باد تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال و سمت و سرعت باد تراز سطح زمین روز ۲۱ نوامبر ۲۰۱۶

نتیجه‌گیری

نتایج پایش پوشش برف شهرستان خلخال با داده‌های ماهواره مودیس (MOD10A1) و شاخص NDSI برای سال‌های (۲۰۰۳-۲۰۲۲) نشان داد روند مشاهدات باندهای شاخص مذکور در ماه‌های فصل زمستان به بیشینه خود رسیده لذا میانگین پوشش برف این فصل به همراه متوسط سالانه به نمایش در آمد و مشخص شد میزان ذخایر برفی در نواحی مرکزی و شمالی شهرستان در قسمت‌های مرتفع متمرکز یافته است به طوری که در فصل زمستان تراکم و گسترش بیش‌تری نسبت به میانگین سال‌های مورد مطالعه داشته است اما در جهت الگوبندی سامانه‌های جوی برف‌زا این نتایج به دست آمد که ریزش برف‌های شهرستان خلخال از ۲ الگوی کلی حاصل می‌شود. در الگوی اول در اروپا شاهد تشکیل سامانه پرفشار و در روی ایران نفوذ سامانه کم‌فشار سودانی باعث ایجاد شیب گرادیان فشار بین این مراکز فشار شده و حرکت ساعت‌گرد پرفشار جنوب اروپا منجر به انتقال توده هوای سرد جنب قطبی به سمت منطقه مورد مطالعه شده است. وضعیت ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در این الگو نشان داد در شمال اروپا پشته‌ای به وجود آمده و کانال تاوه قطبی در جلوی محور فراز آن منتهی به ریزش جریان‌ات سرد شمالی به سمت عرض‌های پایین شده است در ادامه یک ناوهای در روی عراق به وجود آمده و منطقه مورد مطالعه در دامنه شرقی آن قرار گرفته و تقویت

واگرایی در وردسپهر و چرخندگی مثبت هوا وضعیت چرخندی را حاکم نموده است. با توجه به وضعیت زمینگرد دما و شار رطوبت تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در این الگو در می‌یابیم یک هسته رطوبتی و یک توده هوای سردی در شرق دریای مدیترانه تشکیل یافته و توسط بادهای غربی که سرعت آن‌ها به سرعت رود باد رسیده حمل شده و به سمت منطقه مورد مطالعه شارش یافته‌اند. در الگوی دوم نقش پرفشار سیبری بسیار پررنگ بوده و این سامانه با نفوذ به نیمه شمالی ایران و با حرکت برون‌گرد خود منجر به استقرار کانون توده هوای سرد سیبری در شرق دریای خزر و تجمع هسته رطوبتی دریای خزر در شمال غرب ایران شده و با توجه به وضعیت ارتفاع ژئوپتانسیل و جریان باد متوجه می‌شویم در شمال ایران بلوکینگ دوقطبی تشکیل یافته و انشعاب بین این دو قطب باعث ایجاد کانال ناوهای شده و حرکت جریان بادهای غربی و شمالی از این کانال باعث حمل و شار توده هوای سرد سیبری و رطوبت دریای خزر به سمت منطقه مورد مطالعه شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان اذعان نمود نتایج این پژوهش هم‌جهت با نتایج دیگر محققین بوده از جمله این‌که فتاحی و وظیفه دوست (۱۳۹۰)، به‌منظور پایش سطح پوشش برف و دمای سطح برف حوضه‌های آبریز استان گلستان از داده‌های سنجنده MODIS استفاده نمودند و بیان داشتند این تصاویر برای پایش سطح پوشش برف بسیار مناسب هستند. عزیزی و همکاران (۱۳۹۶)، در پایش پوشش برف و تغییرپذیری مکانی و زمانی آن در دامنه‌های جنوبی البرز ادعا داشتند پوشش برف در اوایل پاییز و اواخر زمستان رو به افزایش و در ژانویه و به‌ویژه فصل بهار به‌طور فزاینده‌ای در حال کاهش بوده است. امیدوار (۱۳۹۵)، در جهت بررسی و تحلیل هم‌دید ریزش برف در استان یزد، بیان داشتند سه الگوی هم‌دید شامل ترکیب سامانه‌های شرق مدیترانه با سودانی، ماندگاری هوای سرد در منطقه توسط پدیده بلوکینگ و تراف عمیق شرق مدیترانه و دریای سرخ، نفوذ پرفشار سیبری و ایجاد سردچال در نواحی شمالی و مرکزی ایران در وقوع این پدیده نقش داشته است.

منابع

- ۱- امیدوار، کمال (۱۳۹۵): بررسی و تحلیل هم‌دید-دینامیک ریزش برف در استان یزد. اطلاعات جغرافیایی، ۹۸: ۲۵-۴۲.
- ۲- تصدیقیان، مسعود؛ رحیم‌زادگان، مجید (۱۳۹۶): ارزیابی و بهبود الگوریتم تشخیص پوشش برف از تصاویر سنجنده modis. تحقیقات منابع آب ایران، ۱: ۱۶۳-۱۷۷.
- ۳- خالدی، شهریار؛ کمالی، سمیه؛ محمدی، فهیمه (۱۳۹۶): بررسی هم‌دید برف سنگین جلگه گیلان در بهمن ۱۳۹۲ و تأثیر آن بر سنجش مدیریت بحران. مجله مخاطرات محیط طبیعی، ۱۴: ۳۵-۴۶.
- ۴- خوان‌سالاری، سکینه؛ محب‌الحجه، علی‌رضا؛ احمدی گیوی، فرهنگ (۱۳۹۷): عوامل دینامیکی مؤثر بر بارش سنگین برف در تهران: مطالعه موردی. مجله فیزیک زمین و فضا، ۱: ۱۷۹-۱۹۸.

- ۵- خورشید دوست، علی محمد؛ قویدل رحیمی، یوسف (۱۳۸۷): آشکارسازی تغییرات بارش ماهانه ایستگاه اهر در ارتباط با الگوهای پیوند از دور، فصلنامه جغرافیایی سرزمین، علمی - پژوهشی، ۵(۲۰): ۶۵-۸۲.
- ۶- خوش اخلاق، فرامرز؛ فرید مجتهدی، نیما؛ نگاه، سمانه؛ فروغ؛ هادی نژاد صبوری، شبنم؛ اسعدی اسکویی، ابراهیم (۱۳۹۵): پدیده برف دریاچه‌ای و نقش آن در رخداد برف‌های سنگین کرانه جنوب غربی دریای خزر. فصلنامه علمی - پژوهشی فضای جغرافیایی، ۵۳: ۲۲۹-۲۵۱.
- ۷- خوش‌خو، یونس (۱۳۹۵): شبیه‌سازی عمق برف با استفاده از مدل برف تک لایه (slsm) در ایستگاه سقر. تحقیقات آب و خاک ایران، ۳: ۵۱۷-۵۲۷.
- ۸- درگاهیان، فاطمه؛ علیجانی، بهلول (۱۳۹۶): بررسی سینوپتیکی و دینامیکی بارش برف بهمن ۹۲ در ایران با تأکید بر نقش بلاکینگ. مجله مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲: ۱۹-۳۶.
- ۹- رضایی بنفشه، مجید؛ جهانبخش، سعید؛ حقیقی، اسماعیل (۱۳۹۶): بررسی الگوهای همیدی ریزش برف در کرمانشاه. فصلنامه علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی، ۵۹: ۱۰۳-۱۱۹.
- ۱۰- شادپور، آرش؛ لشکری، حسن؛ برنا، رضا (۱۳۹۷): تحلیل همید- آماری برف‌های سنگین استان گیلان. فصلنامه جغرافیایی طبیعی، ۴۲: ۱-۱۴.
- ۱۱- صفریان زنگیر، وحید؛ زینالی، بتول؛ جعفر زاده علی‌آباد، لیل (۱۳۹۸): ارزیابی شرایط همیدی وقوع بارش‌های منجر به سیلاب در شهرستان خلخال با رویکرد محیطی به گردشی در بازه زمانی ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۵. دو فصلنامه علمی- پژوهشی، پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری، ۱: ۸۹-۱۰۴.
- ۱۲- عزیزی، قاسم؛ رحیمی، مجتبی؛ محمدی، حسین؛ خوش‌اخلاق، فرامرز (۱۳۹۶): تغییرات زمانی- مکانی پوشش برف دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی (پژوهش‌های جغرافیایی)، ۳: ۳۸۱-۳۹۳.
- ۱۳- فتاحی، ابراهیم؛ شوکت مقیمی (۱۳۹۸): اثر تغییرات اقلیمی بر روند برف شمال غرب ایران. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۵۴: ۴۷-۶۳.
- ۱۴- فتاحی، ابراهیم؛ وظیفه دوست، مجید (۱۳۹۰): برآورد دمای سطح برف و گستره پوشش برف با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS (مطالعه موردی: حوضه‌های استان گلستان). تحقیقات جغرافیایی، ۳: ۱۴۹-۱۶۸.
- ۱۵- فتح زاده، علی؛ زارع‌بیدکی، رفعت (۱۳۹۱): برآورد توزیع آب معادل برف در زمان اوج انباشت برف با استفاده از مدل درجه - روز. مجله تحقیقات آب‌و خاک ایران، ۴۳: ۱۷۱-۱۷۷.
- ۱۶- فهیمی نژاد، الهام؛ حجازی زاده، زهرا؛ علیجانی، بهلول؛ ضیائیان، پرویز (۱۳۹۱): تحلیل سینوپتیکی و فضایی توفان برف استان گیلان (فوریه ۲۰۰۵). مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، ۱۹: ۲۸۱-۳۰۲.
- ۱۷- قاسمی‌فر، الهام؛ فرج زاده اصل، منوچهر؛ قویدل رحیمی، یوسف؛ علی‌اکبری بیدختی، عباسعلی (۱۳۹۸): صحت سنجی ماسک ابر سنجنده مادیس با معرفی ماسک ابر ناحیه‌ای بر اساس داده‌های سنجنده AVHRR، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۱(۳): ۴۴۷-۴۶۸.
- ۱۸- قنبرپور، محمدرضا؛ محسنی ساروی، محسن؛ تقفیان، بهرام؛ احمدی، حسن؛ عباس‌پور، کریم (۱۳۸۴): تعیین مناطق مؤثر در انباشت و ماندگاری سطح پوشش برف و سهم ذوب برف در رواناب. مجله منابع طبیعی ایران، ۳: ۵۰۳-۵۱۵.
- ۱۹- قویدل رحیمی، یوسف (۱۳۹۰): تعیین آستانه آماری و تحلیل سینوپتیک دماهای ابر سرد مراغه، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۱(۲۲): ۴۵-۶۲.
- ۲۰- قویدل رحیمی، یوسف؛ فرج زاده اصل، منوچهر؛ مطلبی‌زاد، سلماز (۱۳۹۵): تحلیل آماری و سینوپتیک امواج سرمایی منطقه شمال غرب ایران، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۶(۴۰): ۲۹-۴۶.
- ۲۱- کاشکی، عبدالرضا؛ حاجی محمدی، حسن (۱۳۹۶): بررسی سیستم‌های سینوپتیک جو در زمان رخداد برف سنگین در استان‌های شمالی برف ایران. تحقیقات منابع آب ایران، ۲: ۲۸۱-۲۸۹.
- ۲۲- یاراحمدی، داریوش؛ فتح‌نیا، امان‌اله؛ شرافت، مهدی (۱۳۹۹): ارزیابی دمایی خط برف و شناسایی مناطق دارای پتانسیل ریزش برف در کوه‌های البرز با تصاویر NOAA-AVHRR. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۵۶: ۱۹۳-۲۰۴.

- 23- Bednorz, E. (2011): Synoptic Conditions Of The Occurrence Of Snow Cover In Central European Lowlands. *International Journal Of Climatology*, 31: 1108-1118.
- 24- Brown, I. (2019): Snow Cover Duration And Extent For Great Britain In A Changing Climate: Altitudinal Variations And Synoptic-Scale Influences. *International Journal Of Climatology*, 39: 4611-4626.
- 25- Capozzi, V; C. De Vivo, G. Budillon. (2022): Synoptic Control Over Winter Snowfall Variability Observed In A Remote Site Of Apennine Mountains (Italy), 1884–2015. *Articles*, 16: 1741–1763.
- 26- Esteban, P; PD. Jones, J. Martin-Vide, M. Mases. (2005): Atmospheric Circulation Patterns Related To Heavy Snowfall Days In Andorra, Pyrenees. *International Journal Of Climatology*, 25: 319-329.
- 27- Farukh, MA; TJ. Yamada. (2014): Synoptic Climatology Associated With Extreme Snowfall Events In Sapporo City Of Northern Japan. *Atmospheric Science Letters*, 15: 259-265.
- 28- Ghavidel, Y; Jafari Hombari, F. (2020): Synoptic Analysis Of Unexampled Super-Heavy Rainfall On April 1, 2019, In West Of Iran. *Natural Hazards*, 104: 1567-1580.
- 29- Martin, JP; D. Germain. (2017): Large-Scale Teleconnection Patterns And Synoptic Climatology Of Major Snow-Avalanche Winters In The Presidential Range (New Hampshire, USA). *International Journal Of Climatology*, 37: 109-123.
- 30- Merino, A; S. Fernandez, L. Hermida, L. Lopez, J. Sanchez, E. García-Ortega, E. Gascón. (2014): Snowfall In The Northwest Iberian Peninsula: Synoptic Circulation Patterns And Their Influence On Snow Day Trends. *The Scientific World Journal*, 2014: 1-14.
- 31- Patlakas, P; I. Chanotis, M. Hatzaki, J. Kouroutzoglou, HA. Flocas. (2023): The Eastern Mediterranean Extreme Snowfall Of January 2022: Synoptic Analysis And Impact Of Sea-Surface Temperature. *Weathers*, 99: 1-9.
- 32- Rittger, K; TH. Painter, J. Dozier. (2013): Assessment Of Methods For Mapping Snow Cover From MODIS. *Advances In Water Resources*, 51: 367-380.
- 33- Schirmer, M; M. Lehning, J. Schweizer. (2009): Statistical Forecasting Of Regional Avalanche Danger Using Simulated Snow-Cover Data. *Journal Of Glaciology*, 55: 761 – 768.
- 34- Schweizer, J; CH. Mitterer, B. Reuter, F. Techel. (2021): Avalanche Danger Level Characteristics From Field Observations Of Snow Instability. *Articles*, 15: 3293–3315.
- 35-Sui, J; G. Koehler. (2001): Rain-On-Snow Induced Flood Events In Southern Germany. *Journal Of Hydrology*, 252: 205-220.
- 36- Suriano, ZJ; DJ. Leathers. (2017): Synoptic Climatology Of Lake-Effect Snowfall Conditions In The Eastern Great Lakes Region. *International Journal Of Climatology*, 37: 4377-4389.