

## تحلیل همدیدی - دینامیکی رگبارهای برف در خراسان شمالی طی دوره آماری ۲۰۱۱-۲۰۱۳ مطالعه موردی بجنورد

مهری هاشمی دوین\*<sup>۱</sup>، علی الهی گل<sup>۲</sup>، مصطفی هادی زاده<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری هواشناسی، رییس پیش‌بینی اداره کل هواشناسی خراسان شمالی

۲- دانشجوی دکتری هواشناسی دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران، پیش‌بین مسوول اداره کل هواشناسی خراسان شمالی

۳- کارشناس ارشد هواشناسی، پیش‌بین مسوول، اداره کل هواشناسی خراسان شمالی

(دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۶، بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۲۲، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۳، انتشار آنلاین: ۱۳۹۹/۰۲/۲۳)

### چکیده

رگبار برف پدیده‌ای است که در خراسان شمالی موجب مشکلاتی در جاده‌های کوهستانی می‌گردد. هدف این مطالعه تحلیل سه مورد رگبار برف در بجنورد طی سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۱۳ است. در این تحقیق از داده‌های ایستگاه همدیدی بجنورد تاریخ وقوع رگبار برف طی دوره سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۱۳ مشخص و سپس با استفاده از نقشه‌های همدیدی سطح زمین و سطوح ۵۰۰، ۸۵۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال به تحلیل همدیدی سه مورد رگبار برف پرداخته شد. با استفاده از داده‌های سودار، نقشه‌های هلیسیتی، پروفایل قائم رطوبت نسبی و سرعت قائم تحلیل دینامیکی این پدیده انجام شد. بیشینه مقدار هلیسیتی در مورد مطالعاتی تاریخ ۱۷ مارس ۲۰۱۲ به  $348(m^2/s^2)$  رسیده که نشان از شدت ناپایداری جو در طی وقوع این پدیده است. تغییرات مولفه قائم سرعت باد سودار در مورد مطالعاتی سوم بسیار شبیه ناپایداری‌های برشی میان مقیاس است. نقشه‌های سطح مقطع قائم رطوبت نسبی و سرعت قائم باد برای منطقه مورد مطالعه نشان دهنده افزایش رطوبت نسبی همراه با تقویت حرکات صعودی و نزولی است که موجب تقویت ناپایداری‌های درون ابر و بارش رگباری گردید. این مطالعه نشان می‌دهد که وجود ناپایداری‌های جوی، عواملی همانند کاهش دما، افزایش فشار، افزایش رطوبت، افزایش سرعت وزش باد در راستاهای مختلف به ویژه حرکات صعودی و نزولی، بالا رفتن میزان تاوایی پیشی (هلیسیتی)، تغییر ناگهانی سمت و سرعت وزش باد که تشدید شرایط ناپایدار را سبب می‌شود از عوامل اصلی شکل‌گیری و تقویت رگبار برف در منطقه است.

**کلید واژه‌ها:** رگبار برف، بجنورد، سودار، هلیسیتی، ناپایداری برشی میان مقیاس

### مقدمه

مناسی برای وقوع توفان برف است (رزاو و همکاران، ۲۰۱۰). با استفاده از داده‌های NCEP توفان سنگین برف تاریخ ۴ مارس ۲۰۰۷ مورد مطالعه قرار گرفته و هلیسیتی افقی و قائم محاسبه گردیدند. تغییرات هلیسیتی نشان دادند که مرکز حداقل هلیسیتی در ترازهای بالا و هلیسیتی مثبت در تراز پایین روی منطقه بارش سنگین می‌باشد (کاو<sup>۱</sup>، ۲۰۰۸). محاسبه هلیسیتی با استفاده از معادلات اندازه حرکت با تحلیل ابعادی مورد تحلیل قرار گرفته است و اثر عوامل مختلف بر تغییرات هلیسیتی بررسی شده است که در میان عوامل مؤثر، علاوه بر اثر شناوری اثرهای سولنوئید، نیروی گرادیان فشار و تاوایی نیز اثرات مهمی بر تغییرات هلیسیتی دارند در حالی که نیروی کوریولیس فقط زمانی که مقیاس افقی بزرگ باشد تاثیرگذار است (هویجوان و شوتینگ<sup>۲</sup>، ۲۰۰۳). با استفاده از تحلیل داده‌های NCEP، رابطه بین هلیسیتی و مناطقی با برف سنگین برای توفان‌های برف در بهار و زمستان سال ۲۰۰۹ استان هیلونگجینگ تحلیل شده است (رن<sup>۳</sup>، ۲۰۱۱).

یکی از پدیده‌های هواشناسی که به ندرت در خراسان شمالی اتفاق می‌افتد پدیده رگبار برف است. بارش برف به عنوان یکی از منابع اصلی بیلان آب، جریان‌های سطحی بهاری، سفره‌های آب زیرزمینی، رودخانه‌ها و چشمه‌ها، موهبتی الهی محسوب می‌شود. از سویی دیگر، این فرایند در بعضی سال‌ها مشکلات متعدد و شرایط نامطلوبی را در مناطق برف گیر ایجاد می‌کند. کاهش دید افقی به هنگام بارش برف (ریتلاک، ۱۳۷۰)، انباشتگی برف، کولاک برف، یخبندان و لغزندگی سطح جاده‌ها، از عوامل بازدارنده ترافیکی درون شهری و جاده‌ای هستند که برطرف کردن آن‌ها به واکنش‌های سریع عملیات اصلاحی نیاز دارد (خانا، ۲۰۰۵). هلیسیتی<sup>۱</sup> تراز ۸۵۰ تا ۲۰۰ هکتوپاسکال در روز وقوع توفان برف در ایالت جینجیانگ چین در تاریخ ۲۰-۱۹ ماه مارس ۲۰۰۹ با استفاده از داده‌های NCEP مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج آن‌ها نشان داد که هلیسیتی قائم روی منطقه توفان برف در تراز بالا منفی و در تراز پایین مثبت است که شرایط

<sup>1</sup> Helicity

تغییر پذیری هلیسیتی هنگام وقوع تاوه بررسی شده است و هلیسیتی، چینش قائم باد افقی تراز پایین در میان مقیاس و مقیاس توفان در مناطقی که گردباد اتفاق می افتد برای چهار مورد مطالعاتی محاسبه شده و نتایج نشان دادند که هلیسیتی از لحاظ زمانی و مکانی بسیار متغیر است. بنابراین پیش‌بینی گردباد با استفاده از هلیسیتی به تنهایی مشکل است و فقط توفان‌هایی که مقدار قابل توجهی هلیسیتی دارند می‌توانند گردباد تولید کنند (مارکوسکی، ۱۹۹۸). مطالعه و مقایسه اندازه و سرعت ریزش برف ترنسب به برف خشک با استفاده از مشاهدات و خروجی رادار انجام گرفته است (یوتار و همکاران، ۲۰۰۶). مدل‌های وقوع برف شدید در شرق ونکوور ایالت بریتیش کلمبیای کانادا طبقه‌بندی شده‌اند. با استفاده از داده‌های ده ساله (۲۰۰۹-۲۰۰۰) مشخصات ۸۱ توفان برف طی این ده سال مطالعه شده‌اند تا بتوان سامانه آب و هوایی که موجب برف شدید می‌شوند را نسبت به سامانه آب و هوایی که موجب بارش برف متوسط می‌گردند تشخیص داد. در پایان سامانه‌ها را به ۴ الگوی اصلی تقسیم‌بندی شده‌اند که عبارتند از: جبهه بند آمده- کم فشار پشت به باد- فرارفت هوای گرم و توفان همرفتی (وو و همکاران، ۲۰۱۳). هلیسیتی حدی و همرفت‌های شدید در توفان بونی مورد مطالعه قرار گرفته است و مقادیر بزرگ هلیسیتی در چارک شمال و شمال شرق این توفان به دست آمده است. طی این توفان مقدار CAPE نیز به  $861 \text{ J/kg}^{-1}$  رسیده است (مولیناری و همکاران، ۲۰۰۸). با استفاده از محاسبه هلیسیتی موج گرانی مورد مطالعه قرار گرفته و نتیجه‌گیری شده است که عبور موج گرانی موجب دو برابر شدن هلیسیتی در فاصله زمانی کمتر از یک ساعت می‌گردد. به طوری که هنگام عبور ناوه مقدار هلیسیتی سریع افزایش می‌یابد و پس از رد شدن ناوه هلیسیتی فوراً کاهش می‌یابد (تیموثی و همکاران، ۲۰۰۸).

به هنگام ریزش برف، دما به طور میانگین در بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه استان کردستان منفی است. به سبب گذر دما از مقادیر مثبت به منفی، فراوانی بارش برف در دماهای  $0^\circ\text{C}$  تا  $0/5^\circ\text{C}$  بیش از گستره‌های دیگر است. بارش برف در دماهای بیش از  $3^\circ\text{C}$  در سطح ایستگاه‌های استان به ندرت رخ می‌دهد. پیشینه احتمال بارش برف در دماهای مثبت، حدود ۲۵ درصد، برای دماهای بین  $1^\circ\text{C}$  -  $0/3^\circ\text{C}$  است (پدرام و همکاران، ۱۳۹۰). با استفاده از نرم‌افزار هایفا<sup>۱</sup> رژیم بارش برف

در شمال غرب کشور، مقدار و فراوانی بارش برف در این منطقه محاسبه و تعیین شده است (عادل، ۱۳۸۴). با روش محاسبه پارامترهای فیزیکی، روشی برای پیش‌بینی برف‌های سامانه‌ای بسیار سنگین، با مطالعه ۱۵ سیستم مختلف جوی روی استان کبک کانادا ارایه شده است (هدایتی دزفولی، ۱۳۷۴). فراوانی و احتمال ریزش برف را در گستره‌های دمایی مختلف برای ۱۵ ایستگاه همدمی کشور مشخص شده و به منظور پیش‌بینی ریزش برف، رابطه‌ای تجربی میان دمای نقطه شبنم و کمبود اشباع برای هر ایستگاه به دست آورده شده است (پدرام، ۱۳۷۵). توفان استوایی گونو با استفاده از محاسبات هلیسیتی و شار هلیسیتی در لایه مرزی مورد مطالعه قرار گرفته و بیشترین مقدار هلیسیتی در طی روزی که توفان گونو شدت داشته به دست آمده است. آن‌ها همخوانی خوبی بین ارتفاع لایه مرزی تلاطمی و سطح شار هلیسیتی پیشینه را بدست آورده‌اند که در ارتفاع حدود  $3000$  متری است (خان سالاری و همکاران، ۱۳۹۰). ارتباط بین هلیسیتی و کمیت‌های هواشناختی که به طور معمول در جو اندازه‌گیری می‌شوند، بررسی شده است (احمدنیا، ۱۳۸۷). هدف از این مطالعه شناخت بهتر پدیده رگبار برف جهت پیش‌بینی بهتر و دقیق‌تر آن می‌باشد زیرا معمولاً وقوع این پدیده با وزش باد همراه بوده و گاهی سبب کولاک برف می‌گردد و باعث می‌شود اختلال در رفت و آمد جاده‌ای و هوایی ایجاد نماید. بنابراین شناخت و پیش‌بینی به موقع آن می‌تواند به مسئولین جهت برنامه‌ریزی و آگاه‌سازی مردم کمک نماید.

### منطقه مورد مطالعه

استان خراسان شمالی از نظر موقعیت جغرافیایی، از شمال با کشور ترکمنستان، از شرق و جنوب با استان خراسان رضوی، از جنوب غربی با استان سمنان و از غرب با استان گلستان هم مرز است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی استان خراسان شمالی در کشور را نشان می‌دهد. برای مطالعات سینوپتیکی محدوده‌ای با طول جغرافیایی ۲۵ تا ۶۵ درجه‌ی شرقی و عرض جغرافیایی ۲۰ تا ۵۰ درجه‌ی شمالی انتخاب شده است تا علاوه بر ایران، منطقه‌ی مدیترانه، جنوب ایران و بخش‌هایی از شرق را نیز در برگیرد تا منشا شکل‌گیری سامانه‌ی همدمی مشخص گردد. برای مطالعه رگبارهای برف سطح مقطع قائم رطوبت نسبی و سرعت قائم ترسیم شده و ناپایداری‌ها در موقعیت بجنورد،  $37/4$  و  $57/3$  محاسبه

<sup>1</sup> HYFA (Hydrology Frequency Analysis)

شده است و ساختار قائم رطوبت نسبی و سرعت قائم از تراز ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ هکتوپاسکال بررسی شده است.

در ارتفاع ۰-۳۰۰۰ m است (دیوید جونز و همکاران، ۱۹۹۰). در این مطالعه از داده‌های هلیسیتی ۰-۳۰۰۰ مدل GFS استفاده شده است که پارامتر مناسبی برای تشخیص توفان برف می‌باشد. همچنین ناپایداری برشی میان مقیاس نیز در نظر گرفته شده است (تامپسون و همکاران، ۲۰۰۲).

### مبانی نظری

#### بارش و شرایط وقوع آن

در حالت اشباع، بخار آب به قطرک‌های آب و یا ذرات یخ تبدیل شده که به شکل ابر دیده می‌شوند. اگر در شرایطی از جو، این قطرک‌های آب یا بلورهای یخ رشد کنند سنگین شده و به سمت زمین سقوط می‌کنند. برف نوعی بارش از ذرات بلور یخ است که در درون ابر رشد یافته به صورت پره برف ریزش می‌کند. پره برف‌ها انبوهشی در ابرهای کومولوس رشد یافته و بارش برف می‌تواند به شکل رگبار یا رگبار شدید باشد (هرنس، ۲۰۱۰). با ادامه‌ی رشد کریستال‌های یخ، سطح فوق اشباع در ابر گسترش می‌یابد و کریستال‌های یخ (برف) به سرعت بزرگ و سنگین می‌شوند و به سمت پائین حرکت می‌کنند. (لوتگنس و تاروک، ۱۹۹۸). در این مطالعه سعی شده است با توجه به نمونه‌های اندک اتفاق افتاده در استان به بررسی شرایط وقوع آن پرداخته شود.

کمیت هلیسیتی معیاری از چرخش در هر نقطه از میدان جریان است و در واقع معیاری از هم راستایی بردار سرعت و تاوایی است، به گونه‌ای که اگر بردار سرعت و تاوایی بر هم عمود باشند، مقدار هلیسیتی صفر خواهد بود و اگر در یک راستا باشند، هلیسیتی بیشترین مقدار را خواهد داشت و اندازه هلیسیتی درجه‌ای است که جهت حرکت سیال با تاوایی سیال تطابق دارد (شکل ۲). بنابراین هلیسیتی کاملاً به تاوایی مرتبط است و از لحاظ ریاضی:

$$HEL = V \cdot W = V \cdot \nabla \times V \quad (1)$$

که  $V$  بردار سرعت شاره و  $W$  بردار تاوایی است. همچنین هلیسیتی ضرب اسکالر بردارهای سه بعدی سرعت و تاوایی است. بهترین تفسیر



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان خراسان شمالی در ایران

### مواد و روش‌ها

#### داده‌ها

در این مطالعه ابتدا با استفاده از داده‌های ایستگاه سینوپتیک بجنورد و سودار فرودگاه بجنورد سه مورد رگبار برف که طی دوره آماری سال ۲۰۱۱-۲۰۱۳ رخ داده را انتخاب گردید و سپس به کمک نقشه‌های برگرفته از سایت NOAA<sup>۱</sup> تحلیل همدیدی این سه مورد مطالعاتی با استفاده از الگوهای فشاری تراز دریا بر حسب هکتوپاسکال و ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰۸۵۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال بر حسب دکامتر انجام شد. با استفاده از داده‌ها و خروجی سودار بجنورد تحلیل تغییرات سرعت و جهت باد در هنگام وقوع رگبار برف بر روی ایستگاه انجام شد و به دلیل میان مقیاس بودن پدیده رگبار برف از داده‌های GFS\_ANL<sup>۲</sup> (داده‌های بازتحلیل شده) با تفکیک مکانی ۰/۵ درجه و در چهار نوبت در روز، در ساعت‌های ۱۲،۰۶،۰۰ و ۱۸ UTC برای روزهای وقوع رگبار برف استفاده گردید. با توجه به میان مقیاس بودن این پدیده برای مطالعه ناپایداری‌ها پارامترهایی مانند: رطوبت نسبی بر حسب درصد، سرعت قائم بر حسب پاسکال بر ثانیه، هلیسیتی بر حسب مترمربع بر مجذور ثانیه محاسبه و تحلیل شدند. آستانه مشخصی برای مقادیر هلیسیتی در پیش‌بینی توفان‌های چند سلولی وجود ندارد و با توجه به این که تار ارتفاع حدود ۳ کیلومتری لایه جو ناپایدار استو طبق مطالعات انجام شده آستانه حداقل مقدار هلیسیتی  $157 \text{ m}^2/\text{s}^2$  برای ارتفاع ۰-۱۰۰۰ و بیشینه مقدار هلیسیتی (برای مقادیر بیش از

<sup>2</sup> Global Forecasting System\_ Analytical (https://nomads.ncdc.noaa.gov/data/gfsanl/)

<sup>1</sup> https://esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.rea.nalysis.html

مورد اول (۲۰۱۲/۰۲/۱۱ معادل با ۱۳۹۰/۱۱/۲۲)

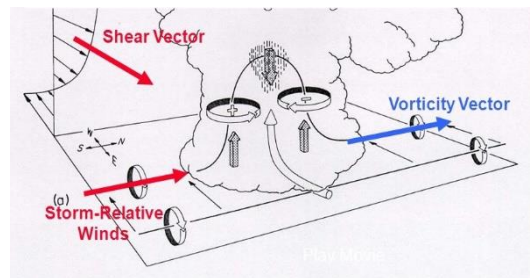
نقشه سطح زمین در تاریخ ۲۰۱۲/۰۲/۱۱ ساعت ۰۰ UTC استقرار مرکز کم فشاری را در سمت شرق کشور نشان می‌دهد که همراه با هوای نسبتاً گرم و مرطوبی می‌باشد و مرکز پرفشاری نیز در شرق دریای سیاه مستقر است که زبانه آن نوار شمالی کشور را تحت تاثیر قرار داده است و موجب ایجاد گردان شدید فشاری و تشکیل جبهه در شمال شرق کشور گشته و ۱۲ ساعت بعد ناپایداری‌ها در شمال شرق کشور تقویت شده و رگبار برف طی ساعات بعد از ظهر رخ داده است (شکل ۲ الف). در تاریخ ۲۰۱۲/۰۲/۱۲ ساعت ۰۰ UTC زبانه پرفشار کاملاً شمال شرق و شرق کشور را پوشانده که موجب ریزش هوای سرد بر روی این مناطق گشته است (شکل ۲ ب).

در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز الگو مشابه با سطح زمین می‌باشد. در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز عبور ناوه عمیقی را نشان می‌دهد که طی این دو روز بتدریج از شمال شرق کشور عبور کرده است (شکل ۳ الف). نقشه‌های سرعت قائم در تراز میانی جو بیانگر این است که حرکات صعودی (امگای منفی) تا ارتفاعات بالا کشیده شده و موجب فراروی رطوبت به ارتفاعات بالا و سرد شدن آن گشته و نهایتاً موجب ریزش برف بر روی منطقه گردیده است (شکل ۳ ب).

برای تحلیل چرخش توفان  $SRH^1$  است که برای یک لایه‌ای با عمق  $h$  چنین تعریف می‌شود:

$$SRH = -\int_0^h K \cdot (V - c) \times \frac{\partial V}{\partial z} dz \quad (2)$$

که در اینجا  $V$  سرعت افقی هوا است و  $C$  سرعت توفان می‌باشد (دیوید جونز و همکاران، ۱۹۹۰). جدول یک مقادیر هلیسیتی و ارتباط آن با توفان را نشان می‌دهد.



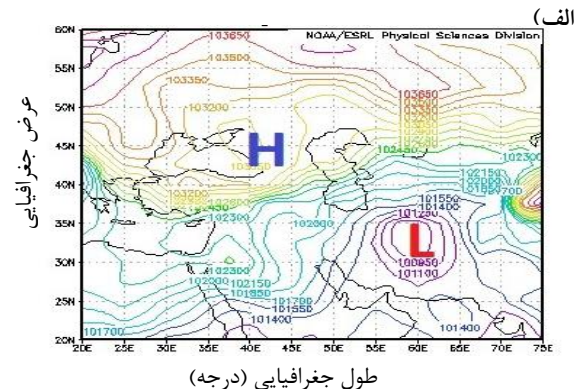
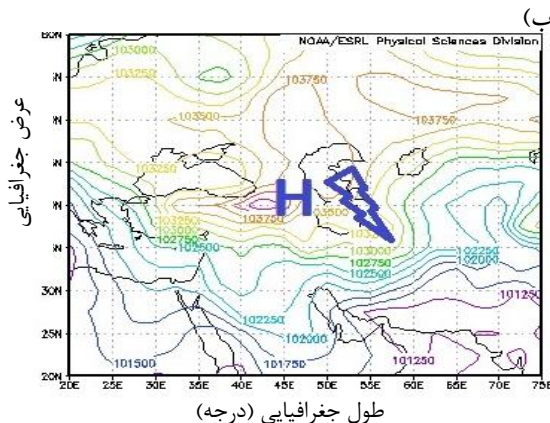
شکل ۲- نمای شماتیک از هلیسیتی و بردار تاوایی و بردار باد

جدول ۱- رابطه بین هلیسیتی و ناپایداری جو

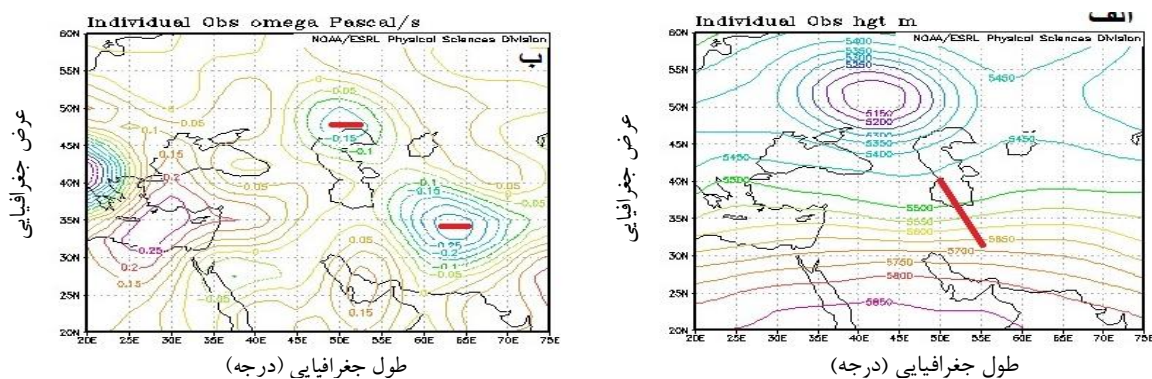
هلیسیتی	ناپایداری
$300 < HEL < 150$	امکان تشکیل توفان
$400 < HEL < 300$	توفان شدید ناشی از ابرباخته
$HEL < 400$	توفان شدید گردبادی ناشی از ابرباخته

## بحث و نتایج

### تحلیل همدیدی و خروجی سودار برای رگبار برف



<sup>1</sup> Storm Relative Helicity



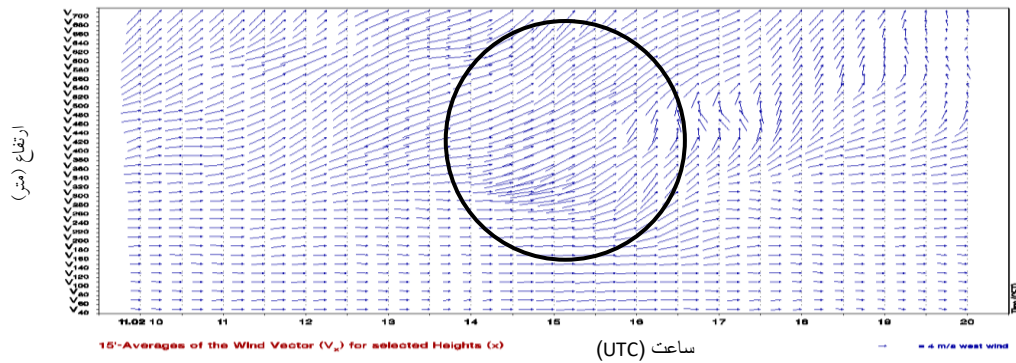
شکل ۴- الف) نقشه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (ب) سرعت قائم تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال تاریخ ۲۰۱۲/۰۲/۱۱ ساعت ۰۰ UTC

سرعت وزش باد و جهت بردار جهت وزش باد را نشان می‌دهد. سرعت وزش باد از حدود ساعت ۱۴ در ارتفاع حدود ۴۰۰ متری افزایش می‌یابد و این تغییرات موجب شکل‌گیری رگبار برف در این ساعت گردیده است. پروفایل قائم سرعت وزش باد در لایه ۴۰ تا ۷۰۰ متری زمین در حدود ساعت ۱۶ نشان دهنده چینه‌ش قابل ملاحظه باد در این روز می‌باشد (شکل ۵).

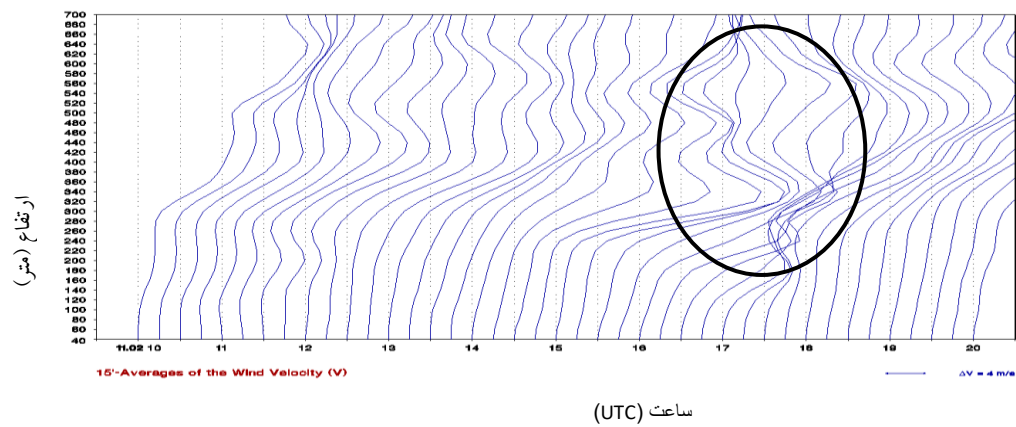
تغییرات پارامترهای هواشناسی نظیر فشار، دما، دید افقی و رطوبت نسبی هنگامی که رگبار برف در ایستگاه شروع شده در جدول ۲ آورده شده است که کاهش دما، افزایش رطوبت، کاهش دید و افزایش فشار را نشان می‌دهد (جدول ۲). در این مورد با توجه به این که بارش‌ها در اکثر ساعات برف سنگین بوده است ارتفاع برف بیشتر بوده است. شکل ۴ خروجی دستگاه سودار بجنورد است که تغییرات بردار باد در روز ۲۰۱۲/۰۲/۱۱ را نشان می‌دهد، که اندازه بردار نشان دهنده

جدول ۲- تغییرات پارامترهای هواشناسی ایستگاه سینوپتیک بجنورد در هنگام وقوع رگبار برف

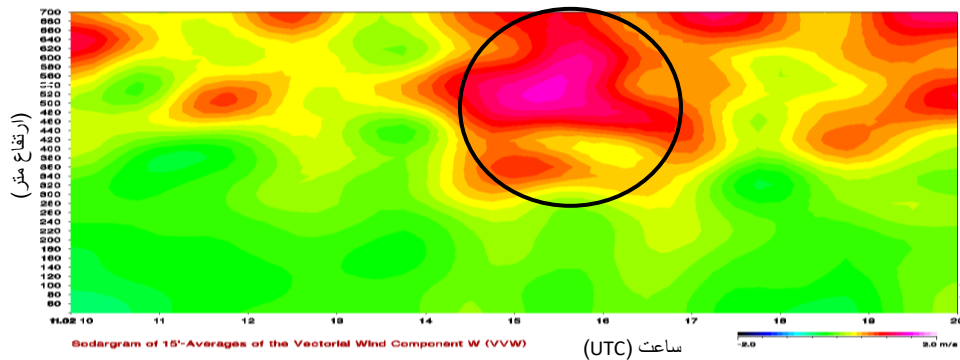
تاریخ	شروع UTC	نوع پدیده	تغییر دما (درجه سلسیوس)	تغییر رطوبت (درصد)	تغییر فشار (هکتوپاسکال)	تغییر دید (متر)	بیشینه سرعت باد (متر بر ثانیه)	جهت باد پیشینه (درجه)	ارتفاع برف (سانتی متر)
۲۰۱۲/۰۲/۱۱	۱۶	رگبار برف	-۲	٪۱۱	۰/۴	-۱۵۰۰	۰۹	۲۹۰	۱۰
۲۰۱۲/۰۳/۱۰-۱۱	۷	رگبار برف	-۰/۸	٪۲/۹	۰/۶	-۷۰۰۰	۱۱	۱۷۰	۲
۲۰۱۲/۰۳/۱۷-۱۸	۲۱	رگبار برف	-۳/۶	٪۱۱	۱/۱	-۵۰۰۰	۱۵	۲۷۰	۳



شکل ۵- بردار سرعت باد در روز ۲۰۱۲/۰۲/۱۱ در ارتفاع ۴۰ تا ۷۰۰ متری از سطح زمین

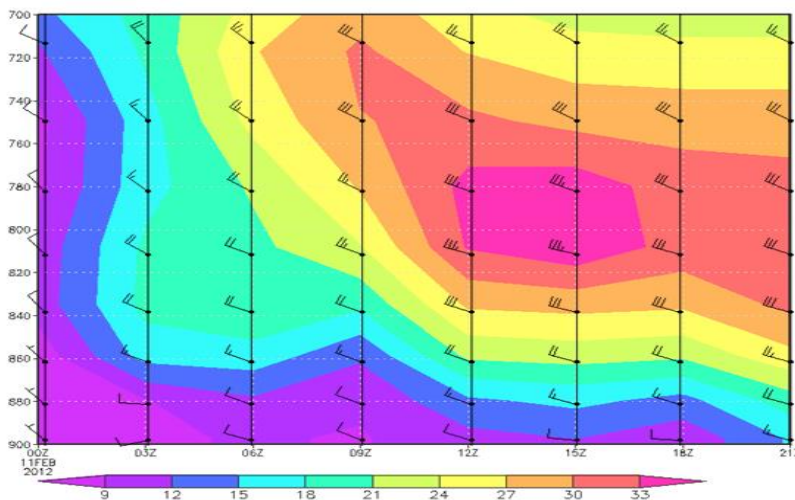


شکل ۶- پروفایل قائم تغییرات باد در روز ۲۰۱۲/۰۲/۱۱ در ارتفاع ۴۰ تا ۷۰۰ متری از زمین



شکل ۷ تغییرات مولفه قائم سرعت باد در این روز را نشان می‌دهد که در ارتفاع حدود ۴۰۰ متری تغییرات صعودی قابل ملاحظه مولفه قائم سرعت باد بخوبی مشاهده می‌گردد

شکل ۷ تغییرات سرعت باد خروجی مدل Wrf است که افزایش سرعت باد را در ساعات‌های بعد از ظهر نشان می‌دهد.



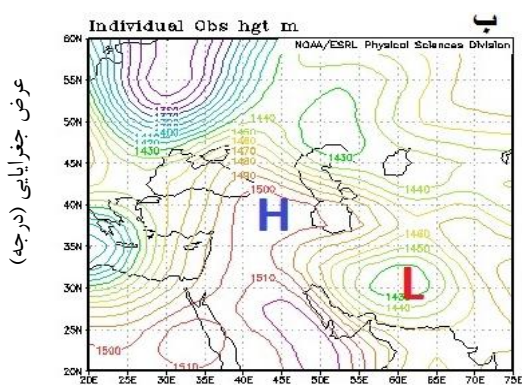
شکل ۸- خروجی مدل منطقه ای wrf نمایه قائم سرعت باد(برحسب نات) در روز ۲۰۱۲/۲/۱۱

(شکل ۹ الف). الگوی سرعت قائم تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان دهنده حرکات صعودی شدید (مقادیر منفی امگا) از شمال شرق کشور می باشد که نشان دهنده عبور توفان تدری از روی منطقه می باشد (شکل ۹ ب).

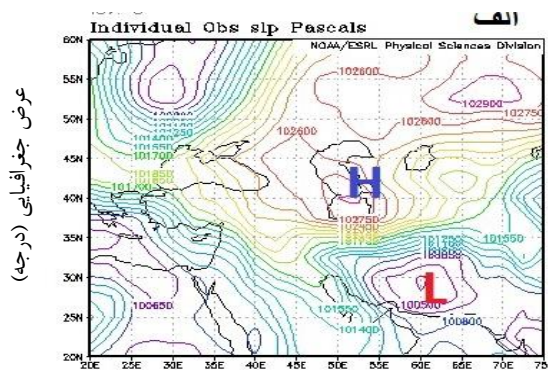
بررسی خروجی سودار در روز ۲۰۱۲/۰۳/۱۱ مطابق شکل ۱۰ نشان می دهد که در حدود ساعت ۳ UTC سرعت وزش باد در ارتفاع حدود ۴۰۰ متری افزایش یافته و در ساعت ۷ UTC، ۱۰، ۱۱ و ۲۰ UTC رگبار برف اتفاق افتاده است. در تمام موارد ابتدا یک حرکت صعودی و سپس حرکت نزولی (گاهی ناگهانی) سبب وقوع بارش رگباری برف شده است.

مورد دوم (۲۰۱۲/۰۳/۱۱ معادل با ۱۳۹۰/۱۲/۲۱)

نقشه سطح زمین الگوی کاملاً مناسبی را برای ناپایداری ها نشان می دهد، مرکز کم فشار که همراه با توده هوای گرم و مرطوبی از سمت شرق و جنوب شرق وارد کشور شده و مرکز پرفشار سبیری که به عرض های پایین کشیده شده است نیز نوار شمالی را تحت تاثیر قرار داده که موجب تضاد دمایی شدیدی در شمال شرق کشور و افزایش گرادیان فشاری گردید (شکل ۸ الف). در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز الگویی مشابه با سطح زمین حاکم بوده است (شکل ۸ ب). در تراز میانی جو نیز ناوه عمیقی از شمال شرق تا شرق کشور با کجی منفی عبور نموده است که نشان دهنده جوی کاملاً ناپایدار و حاکم بودن کم فشار دینامیکی در منطقه می باشد که موجب رگبار برف گردیده است

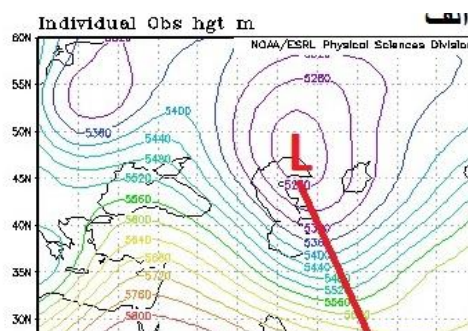
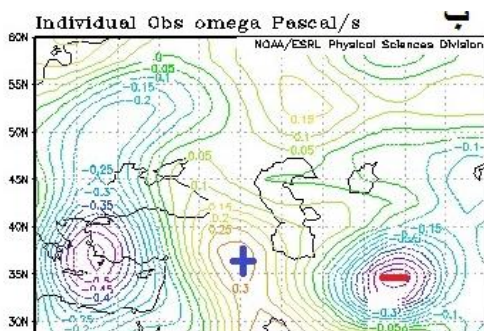


طول جغرافیایی (درجه)



طول جغرافیایی (درجه)

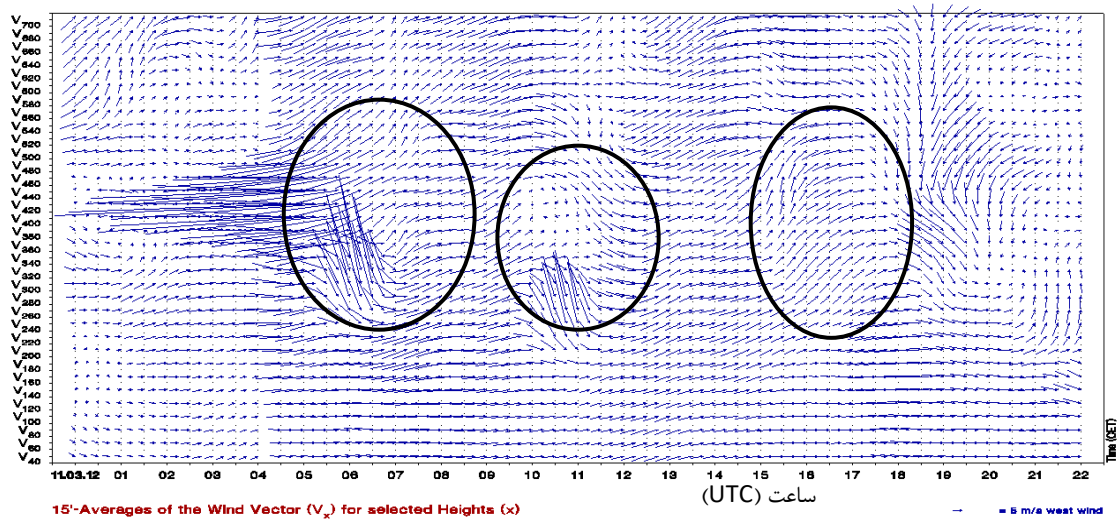
شکل ۹- (الف) نقشه سطح زمین. (ب) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال ساعت ۱۲ UTC روز ۲۰۱۲/۰۳/۱۱



عرض جغرافیایی (درجه)

عرض جغرافیایی (درجه)

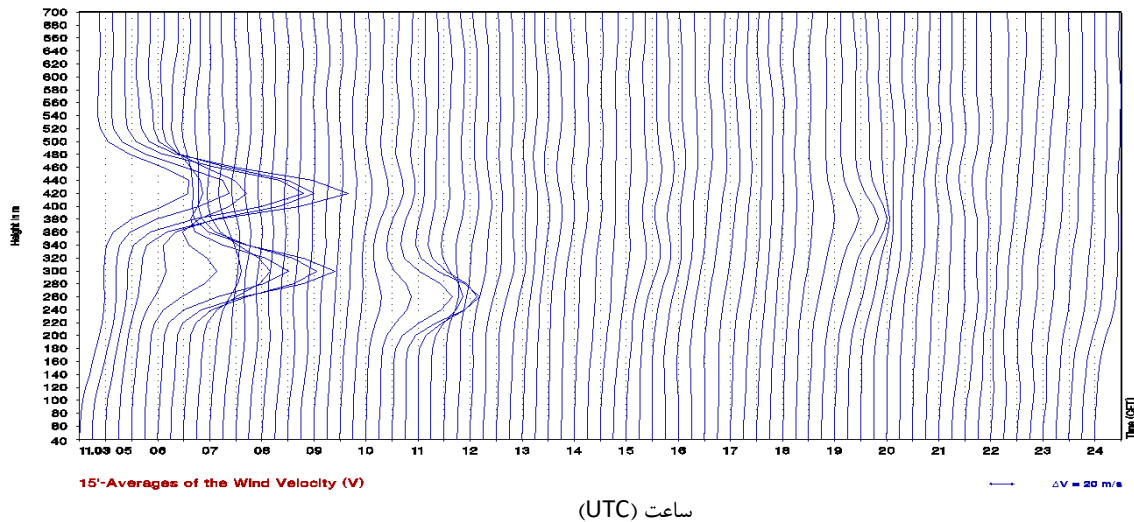
طول جغرافیایی (درجه)  
**شکل ۱۰-** نقشه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال. (ب) سرعت قائم تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (بر حسب پاسکال بر ثانیه)  
 تاریخ ۲۰۱۲/۰۳/۱۱ ساعت ۱۲ UTC



**شکل ۱۱-** تغییرات سرعت باد در روز ۲۰۱۲/۳/۱۱ در ارتفاع ۴۰ تا ۷۰۰ متری از زمین

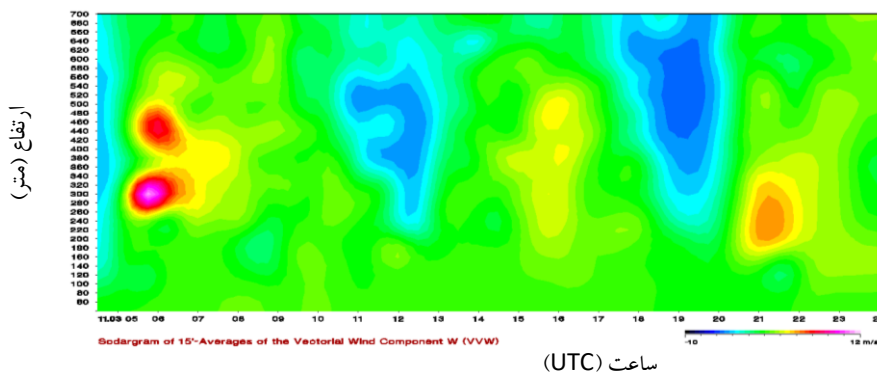
پروفایل قائم تغییر سرعت باد با ارتفاع در ساعت‌های وقوع رگبار برف یعنی ۷ و ۱۰ و ۱۱ و ۲۰ UTC به خوبی در شکل ۱۱ قابل مشاهده است

ارتفاع (متر)

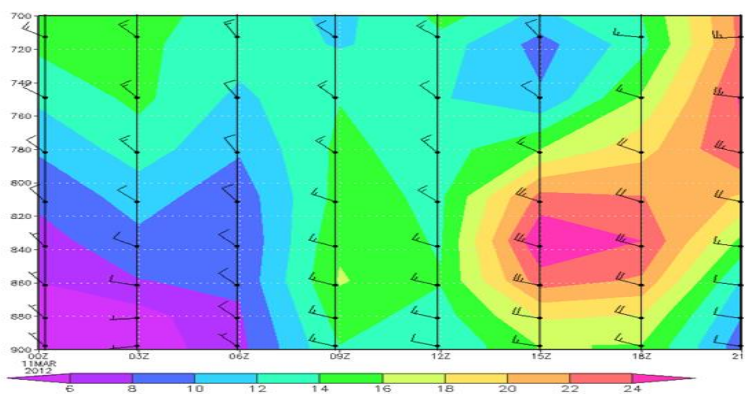


**شکل ۱۲- پروفایل قائم تغییرات سرعت باد در روز ۲۰۱۲/۳/۱۱**

تغییرات مولفه قائم سرعت باد در شکل ۱۲ در روز ۲۰۱۲/۳/۱۱ به خوبی حرکات صعودی و نزولی موجود در جو در این روز در ساعات وقوع رگبار برف را نشان می‌دهد. خروجی مدل Wrf نیز برای مقایسه با نتایج سودار نشان دهنده افزایش سرعت وزش باد در ترازهای پایین است.



**شکل ۱۳ - تغییرات سرعت قائم باد در روز ۲۰۱۲/۳/۱۱ در ارتفاع ۴۰ تا ۷۰۰ متری از زمین**



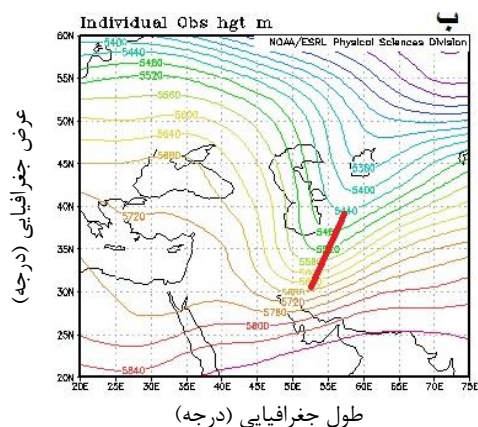
**شکل ۱۴- خروجی مدل منطقه‌ای Wrf نمایه قائم سرعت باد (برحسب نات) در روز ۲۰۱۲/۳/۱۱**

مورد سوم (۱۸-۲۰۱۲/۰۳/۱۷ معادل با ۲۸-۱۳۹۰/۱۲/۲۷) طی روز ۱۷ ماه مارس، نفوذ کم فشار از سمت شرق به کشور و طول جغرافیایی (درجه) نفوذ زیانه پرفشار اروپایی بر نوار شمالی کشور موجب گرا دیان شدید

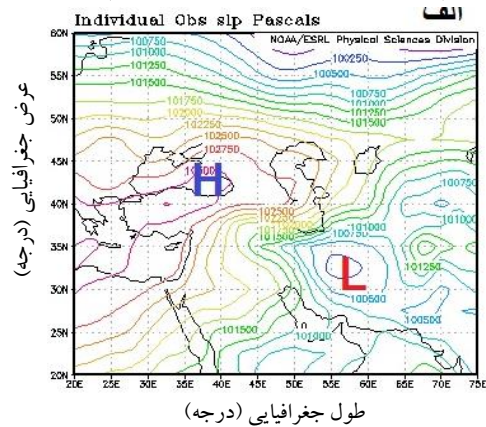
ناپایداری‌ها تا سطوح فوقانی بوده به طوری که این حرکات بالاسو تا تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال نیز کشیده شده است (شکل ۱۵.ب). شکل ۱۶ تغییرات سمت و سرعت وزش باد از ساعت ۱۵ UTC روز ۱۷ ام تا ۵ UTC روز ۲۰۱۲/۳/۱۸ در بجنورد نشان می‌دهد. از ساعت ۱۴ روز ۱۷ ام تغییرات سرعت باد بطور محسوسی قابل مشاهده است که در این ساعت سرعت باد افزایش یافته و در حدود ساعت ۲۱ UTC تغییر جهت وزش باد نیز به خوبی مشاهده می‌شود که در حال تغییر از حالت نزولی به صعودی است.

فشاری در شمال کشور گردید (شکل ۱۴.الف). در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز الگوی مشابه نشان دهنده امتداد جو ناپایدار تا سطوح فوقانی می‌باشد. در تراز میانی جو عبور ناوه عمیقی را طی این دو روز نشان می‌دهد که نیمه شمالی کشور را تحت تاثیر گذاشته است و طی ساعات پایانی روز هفدهم تقویت ناپایداری ترازهای مختلف موجب وقوع رگبار برف گردید (شکل ۱۴.ب).

نقشه سرعت قائم تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۱۵.الف) به خوبی بیانگر حرکات شدید بالاسو در نوار شمالی است که طی ساعات پایانی روز هفدهم این جریانات بیشتر در شمال شرق حاکم گردید و تقویت

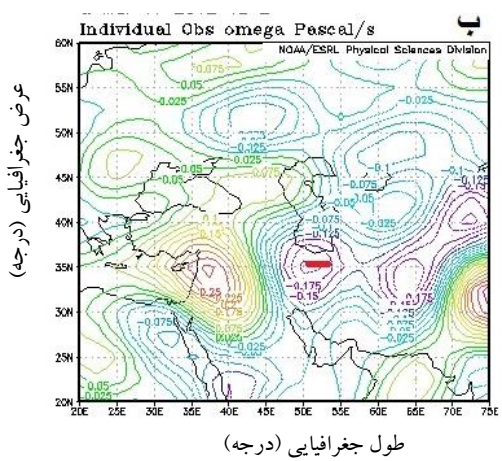


طول جغرافیایی (درجه)

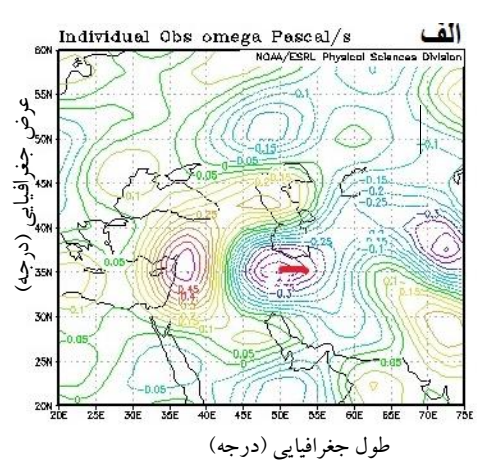


طول جغرافیایی (درجه)

شکل ۱۵- الف) نقشه سطح زمین (ب) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ساعت ۱۲ UTC روز ۲۰۱۲/۰۳/۱۷



طول جغرافیایی (درجه)



طول جغرافیایی (درجه)

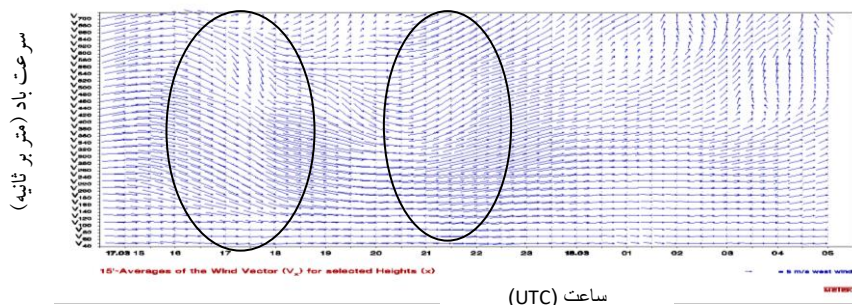
شکل ۱۶- الف) سرعت قائم تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (بر حسب پاسکال بر ثانیه) (ب) تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال تاریخ ۲۰۱۲/۰۳/۱۷

ساعت ۱۲ UTC

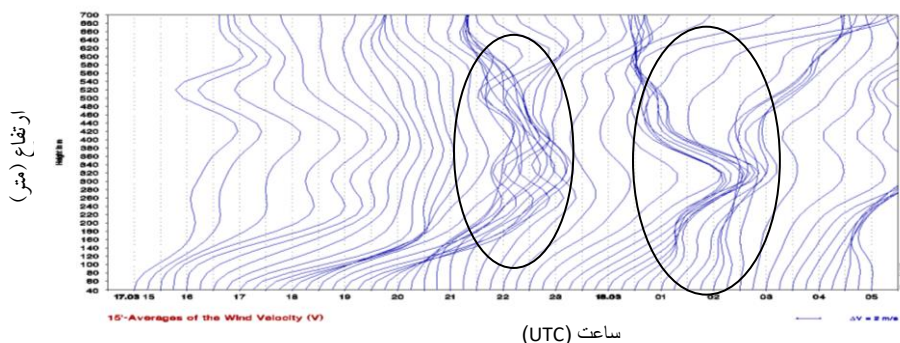
بیشترین تغییر در پروفایل قائم سرعت باد در ساعت ۲۱ روز ۱۷ ام و ساعت ۱ تا ۲ روز ۲۰۱۲/۳/۱۸ در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که در این ساعات رگبار برف بوقوع پیوسته است. معمولاً قبل از وقوع چنین ناپایداری‌هایی در سطح زمین، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در ارتفاع‌های

قبل از ساعت ۱ UTC نیز یک حرکت صعودی دیگر ایجاد شده است که پس از آن سرعت وزش باد کم شده و گلوله‌های برفی شکل گرفته و پس از این صعود شتاب دار در اثر کاهش سرعت وزش باد در لایه‌های پایین بصورت رگباری ریزش نموده اند.

بالاتر صورت می گیرد. که در اینجا در ساعت حدود ۱۴ روز ۲۰۱۳/۳/۱۷ تغییر شدید و ناگهانی سمت و سرعت باد در ارتفاع بالاتر از ۵۵۰ متری رخ داده است.



شکل ۱۷ - تغییرات بردار سرعت باد با ارتفاع در روز ۱۷ و ۲۰۱۲/۳/۱۸

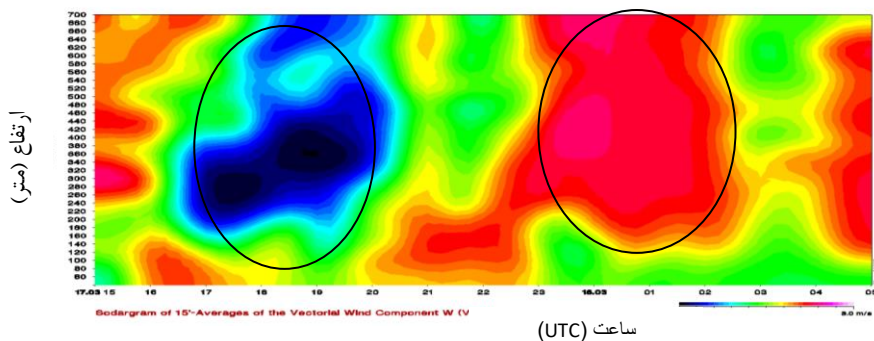


شکل ۱۸- پروفایل قائم تغییرات سرعت باد در روز ۱۷ و ۲۰۱۲/۳/۱۸ در ارتفاع ۴۰ تا ۷۰۰ متری

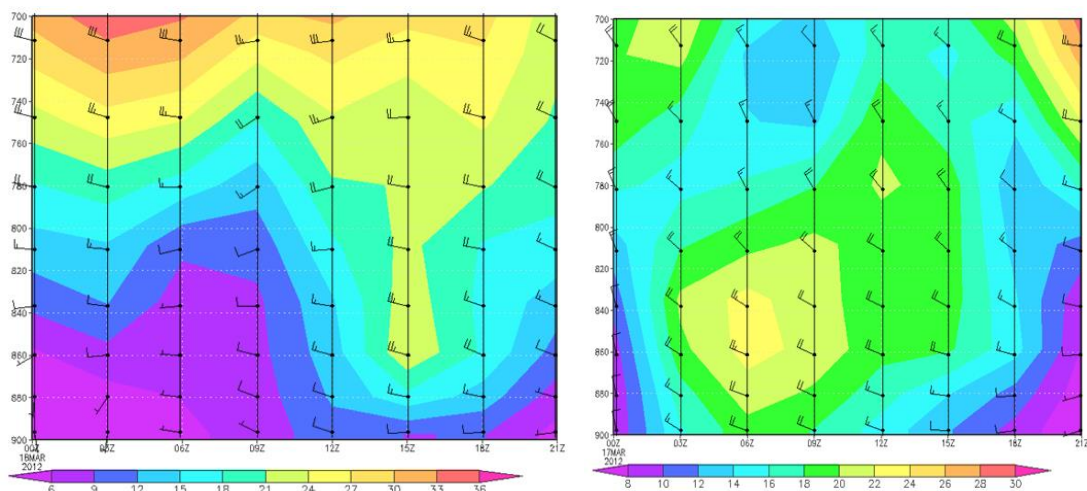
نخستین بار توسط دو فیزیکدان مشهور به نام های لرد کلونین و هرمان فون هلمهولتز توصیف شد. چنین شرایطی در شکل های ۴ و ۹ و ۱۴ بخوبی مشاهده می شود که در همه آنها تغییر سرعت و جهت حرکت وجود داشته و مشترک است. شکل ۱۹ خروجی مدل برای تاریخ ۱۸ و ۲۰۱۲/۳/۱۷ نشان می دهد. افزایش سرعت وزش باد را در ارتفاع پایین نشان می دهد. بیشینه سرعت وزش باد طی روز ۱۷ ام بوده است که بیشینه مقدار هلیسیتی و ناپایداری نیز طی همین روز رخ داده است.

شکل ۱۸ مولفه قائم سرعت وزش باد در روز ۱۷ تا ۲۰۱۲/۳/۱۸ از ساعت ۱۵ UTC روز ۱۷ ام تا ساعت ۵ UTC روز ۲۰۱۲/۳/۱۸ را نشان می دهد. تغییرات صعودی و نزولی حاکم در لایه مرزی جو در این شکل بخوبی مشاهده می گردد. این شکل بسیار شبیه ناپایداری های برشی میان مقیاس است که زمانی رخ می دهد که سیال در حال جریان، تحت تنش برشی قرار گیرد و یا سرعت سیال در ناحیه لایه مرزی دو سیال متفاوت باشد.

نمونه هایی از این پدیده در حرکت لایه بالایی آب در اثر وزش باد، حرکت ابرها و آب اقیانوس ها دیده می شود. این پدیده



شکل ۱۹- تغییرات مولفه قائم سرعت باد در روزهای ۱۷ و ۲۰۱۲/۳/۱۸

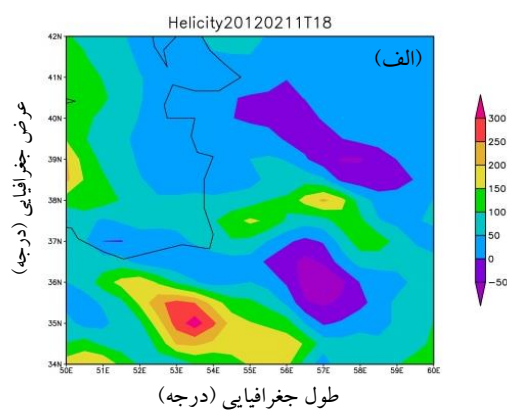
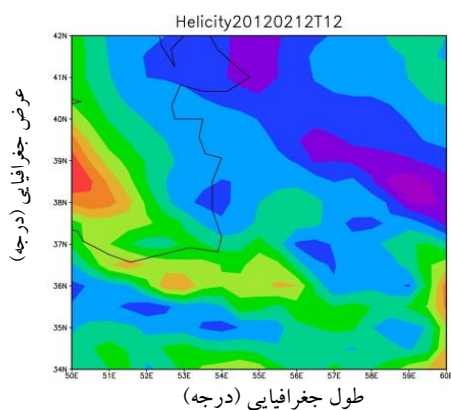


شکل ۲۰- خروجی مدل منطقه‌ای WRF نمایه قائم سرعت باد (برحسب نات) در روز (راست) ۱۷ و (چپ) ۲۰۱۲/۳/۱۸

### تحلیل دینامیکی رگبار برف

نتایج این مطالعات نشان دادند که در مورد مطالعاتی اول در محدوده ایستگاه بجنورد، در ساعات شدت ناپایداری ها هلیسیتی افزایش یافته و به  $126 (m^2/s^2)$  رسیده و پس از عبور این سامانه به  $22 (m^2/s^2)$  رسیده است (شکل الف و ب).

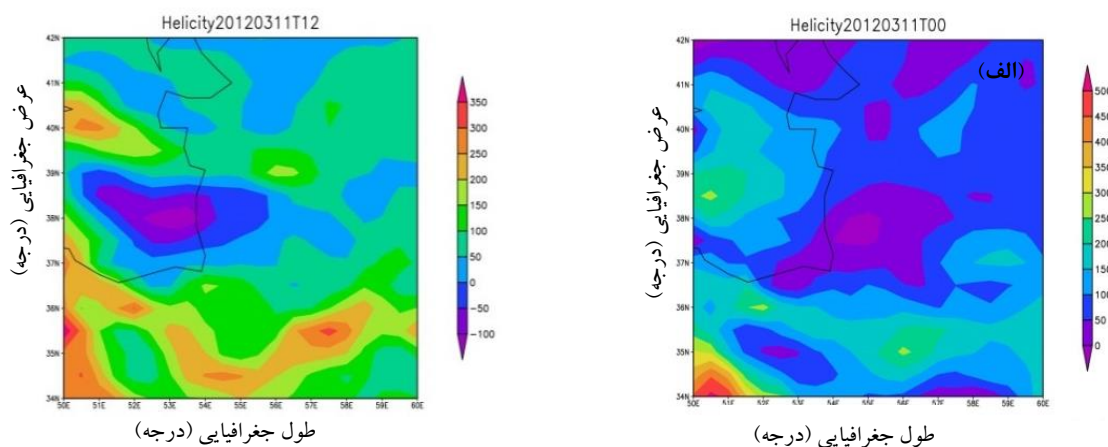
برای مطالعه دینامیکی رگبار برف در ایستگاه بجنورد با استفاده از داده‌های GFS به مطالعه تغییرات مقادیر هلیسیتی در زمان وقوع رگبار برف پرداخته و با ترسیم سطح مقطع قائم سرعت عمودی و رطوبت وضعیت رطوبت در سطوح مختلف در زمان وقوع رگبار برف بررسی شده است.



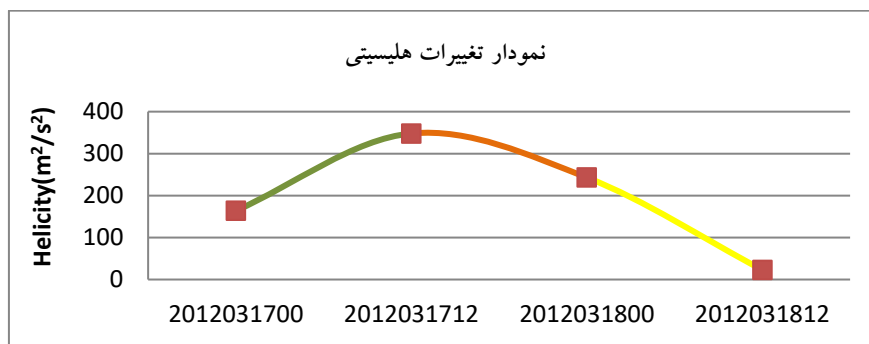
شکل ۲۱- (الف) نقشه هلیسیتی روز ۲۰۱۲/۰۲/۱۱ ساعت ۱۸ UTC (ب) ۲۰۱۲/۰۲/۱۱ ساعت ۱۲ UTC

ایستگاه تغییرات پارامترهای هواشناسی نسبت به دو مورد دیگر قابل ملاحظه بوده است. تغییرات مقدار هلیسیتی در نمودار شکل ۲۲ آورده شده است که به بیشینه مقدار خود یعنی  $348 (m^2/s^2)$  رسیده است.

در مورد مطالعاتی دوم نیز در ساعاتی که ناپایداری ها تقویت گشته مقدار هلیسیتی نیز در ایستگاه بجنورد از ۳۵ به  $100 (m^2/s^2)$  رسیده است (شکل الف و ب). در مورد مطالعاتی سوم با وقوع رگبار برف در



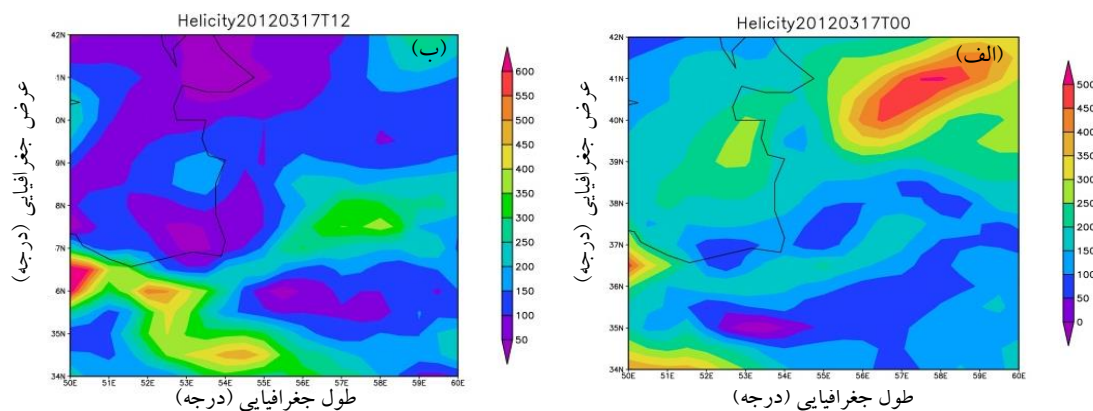
شکل ۲۲- نقشه هلیسیتی روز ۲۰۱۲/۰۳/۱۱ (الف) ساعت ۰۰ UTC (ب) ساعت ۱۲ UTC



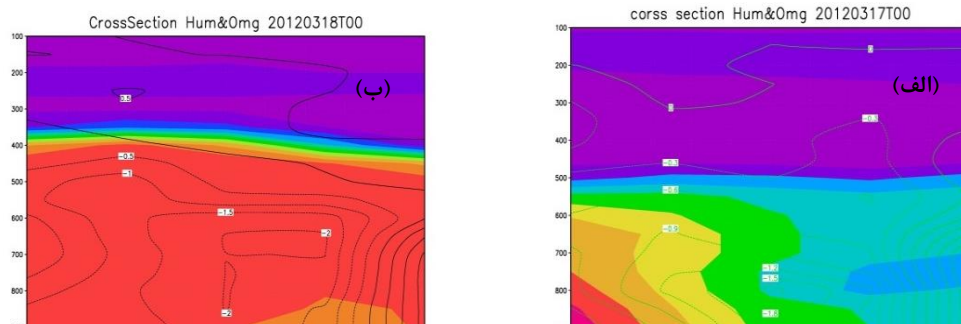
شکل ۲۳- نمودار تغییرات مقادیر هلیسیتی در طی ساعات وقوع رگبار برف تاریخ ۲۰۱۲/۰۳/۱۷

با تقویت این سامانه مقدار رطوبت نسبی در لایه‌های مختلف و مقدار سرعت قائم (پاسکال بر ثانیه) افزایش یافته است (شکل ۲۴ الف و ب).

با مقایسه نقشه هلیسیتی روز وقوع رگبار برف در ساعات قبل از تشدید رگبار و در زمان تشدید یافتن رگبار برف افزایش مقدار هلیسیتی را می‌توان به خوبی دید (شکل ۲۳ الف و ب).



شکل ۲۴- نقشه هلیسیتی روز ۲۰۱۲/۰۳/۱۷ الف. ساعت ۰۰ UTC ب. ساعت ۱۲ UTC



Pa/Sec

Pa/Sec

طول جغرافیایی (درجه)

طول جغرافیایی (درجه)

شکل ۲۵- نقشه سطح مقطع قائم رطوبت نسبی و سرعت قائم باد (بر حسب پاسکال بر ثانیه، ساعت UTC ۰۰

الف. روز ۲۰۱۲/۰۳/۱۷ ب. ۲۰۱۲/۰۳/۱۸

### نتیجه گیری

این مطالعه نشان می‌دهد که وجود ناپایداری‌های جو و عواملی همانند افزایش گرادیان فشار، افزایش رطوبت، افزایش سرعت وزش باد در راستاهای مختلف به‌ویژه صعودی و نزولی، بالا رفتن میزان تاوایی پیچشی (هلیسیتی)، تغییر ناگهانی سمت و سرعت وزش باد که بالا رفتن ناپایداری برشی میان مقیاس را سبب می‌شود از عوامل اصلی شکل‌گیری و تقویت رگبار برف در منطقه است. با توجه به این نکته که در استان خراسان شمالی ایستگاه جو بالا جهت دیدبانی پارامترهای جو فوقانی وجود ندارد بنابراین بهترین راه حل استفاده از داده‌های مدل می‌باشد. به دلیل خرد مقیاس بودن این پدیده بهتر است از ریزمقیاس نمایی داده‌های مدل استفاده شود که در مطالعات بعدی به آن پرداخته خواهد شد. در نقشه‌های همدیدی الگوی کم فشار دینامیکی در سطح زمین و ناوه سطوح فوقانی با کجی منفی و مثبت شرایط ناپایدار مناسبی برای وقوع رگبار برف بوده و نقشه‌های سودار بجنورد نیز حرکات صعودی شدید و پس از آن حرکت نزولی را نشان می‌دهند که مراحل تشکیل و سرد شدن گلوله‌های برفی و نزول آن‌ها را نشان می‌دهند. نقشه‌های هلیسیتی نیز ناپایداری حاکم شده در طی وقوع رگبار برف را به خوبی با افزایش ناگهانی مقدار آن نشان می‌دهند که بیشینه مقدار آن در مورد سوم به  $348 (m^2/s^2)$  رسیده است که در مقایسه با نتایج سایر مطالعات مانند مولیناری برای رگبار برف در منطقه شمال خراسان مقدار قابل قبولی است. مولیناری و همکارش بیشینه مقدار هلیسیتی در لایه تا ۳ کیلومتری را در توفان بنی  $1303 (m^2/s^2)$  و حداقل آن را  $204 (m^2/s^2)$  به دست آورده‌اند (۲۰۰۸). نقشه‌های سطح مقطع قائم رطوبت نسبی و سرعت قائم باد و داده‌های همدیدی همگی نشان از

وجود شرایط مناسب برای وقوع رگبار برف در منطقه می‌باشند که صعود جریانات هوای مرطوب و نزول شدید آن‌ها است و طبق آمار ایستگاه وقوع این پدیده در استان در فصل زمستان اتفاق افتاده است.

### قدردانی و تشکر

بدینوسیله از آقای دکتر بیدختی استاد گرانقدر به سبب راهنمایی‌های ارزنده ایشان و آقای دکتر مهدی کمالی رئیس پایش ایستگاه‌های هواشناسی خراسان شمالی به سبب تشویق به بررسی این پدیده نادر در خراسان شمالی و ارائه برخی اطلاعات همدیدی تشکر می‌گردد.

### منابع

- ۱- احمدنیا، مصطفی، ۱۳۸۷، بررسی برخی جنبه‌های دینامیکی هلیسیتی و کاربرد آن‌ها در تعیین ویژگی‌های سیستم‌های جوی، پایان نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.
- ۲- پدram، مزده، ۱۳۷۵، الگوی سینوپتیکی پیش‌بینی برف بر روی ایران، پایان نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.
- ۳- پدram، مزده و قائمی، هوشنگ و هدایت دزفولی، اکرم و مرتضوی، افسانه، ۱۳۹۰، ریزش برف و ارتباط آن با دما در استان کردستان، مجله تحقیقات جغرافیایی، دوره ۲۶ شماره ۱۰۰، صص ۵۵-۷۰.

- 13- Lutgens, F. K., Tarbuck, E. J. "The Atmosphere. 7th ed. Upper Saddle River", N.J. Prentice-Hall.1998.
- 14- Markowski P., Richardson, Y. "Mesoscale Meteorology in Midlatitudes". WILEY- BLACK WELL. 2010.
- 15- Markowski, P. M., Straka, J. M., Rasmussen, E. N., Blanchard, D. O. "Variability of Storm-Relative Helicity during VORTEX", Monthly Weather Review. 126, pages 2959-2971.1998.
- 16- Molinari, J., Vollaro, D. " Extreme Helicity and Intense Convective Towers in Hurricane Bonnie", Mon. Wea. Rev. 136, pages4355-4372.2008.
- 17- REN. L., Ling-ling. J., Gui-hua. Z., Ling. G. " Analysis on the Helicity Distribution Characteristics of Three Snowstorms in 2009, Heilongjiang Province". Bimonthly of Xinjiang Meteorology. 3, pages21-24.2011.
- 18- Ruzuo, L., Leikai, M., "Helicity Analysis for a Snowstorm Process in Xinjiang during March 19-20".2009. Bimonthly of Xinjiang Meteorology,2, pages32-34. 2010.
- 20- Thompson, Richard L. et al. "Close Proximity Soundings within Supercell Environments Obtained from the Rapid Update Cycle." (2002).
- 21- Timothy, A. C., KNUPP, K.R., "The Interactions of Gravity Waves with Mesocyclones: Preliminary Observations and Theory", MONTHLY WEATHER REVIEW, 136, pages4206-4219.2008.
- 22- Wu, M., Snyder, B., Mo, R., Joe, P., Cannon, A., " Classification and Conceptual Models for Heavy Snowfall Events over East Vancouver Island of British Columbia, Canada". Wea. Forecasting,28, pages 1219-1240.2013.
- 23- Yuter, S. E., Kingsmill, D.E., Nance, L.B., Löffler-Mang, M., "Observations of Precipitation Size and Fall Speed Characteristics within Coexisting Rain and Wet Snow". J. Appl. Meteor. Climatol, 45, pages1450-1464.2006.
- ۴- خان سالاری، سکینه و مزرعه فراهانی، مجید و آزادی، مجید، ۱۳۹۰، بررسی تغییرات هلیسیتی و شار هلیسیتی در توفان استوایی گونو، مجله ژئوفیزیک ایران، ۵(۲)، صص ۹۷-۱۱۵.
- ۵- ریتالاک، ب. ج.، ۱۳۷۰، هواشناسی عمومی، ترجمه احمد نوحی، سازمان هواشناسی کشور.
- ۶- عادل، ام البنین، ۱۳۸۴، کلیماتولوژی بارش برف در شمال غرب کشور. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم اجتماعی دانشگاه تبریز.
- ۷- هدایتی دزفولی، اکرم، ۱۳۷۴، پیش‌بینی ریزش برف‌های متوسط و یا سنگین با استفاده از پارامترهای فیزیکی. پایان نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- 8- Ahrens. C. D. "Essential of Meteorology. An Invitation to the Atmosphere", Sixth Edition. Earth Science Editor: Laura Pople..۲۰۱۰
- 9- B. K. Khanna, B., All you Wanted to Know about Disaster, New India publishing agency, New India ,2005.
- 10- Cao, Sh.M. "Application of Helicity in the Snowstorm on March 4", Journal of Anhui Agricultural Sciences; 36(15), pages 6429-6431,2008.
- 10- Davies-Jones R. P., Burgess D., Foster M. " Test of helicity as a tornado forecast parameter. Preprints", 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB, Canada, Amer.1990.
- 11- Huijuan, L., Shouting, G. " On The Helicity and The Helicity Equation", Acta Meteorologica Sinica; 61(6), pages 684-691.2003.
- 12- Klemp, J. B., 1987: Dynamics of tomadic thunderstorms. Ann. Rev. Fluid Mech., 19, 369-402.

---

## **Synoptic -Dynamic study of snow shower in North Khorasan during 2011-2013 (case study: snow shower over Bojnurd)**

**Mehri Hashemi Devin<sup>\*1</sup>, Ali Elahi Gol<sup>2</sup>, Mostafa Hadizadeh<sup>3</sup>**

1- PhD student of Meteorology, Head of North Khorasan Forecasting Division, cyclone

2- PhD student of Meteorology, senior forecaster, North Khorasan Meteorological Administration

3- Senior Forecaster, North Khorasan Meteorological Administration

(Received: 17 Mar 2018, Revised: 12 Jan 2020, Accepted: 12 May 2020, Published online: 12 May 2020)

### **Abstract**

Snow shower is the phenomena that caused problems in mountainous roads of North Khorasan province. The goal of this paper is the analysis of three case studies of snow shower in Bojnurd during 2011-2013. We used Bojnurd synoptic data to determine three snow shower case studies during 2011-2013 and then analyzed using synoptic maps of surface, 850, 500, and 300 hpa. Dynamical analysis is done by using sodar output data, helicity, the cross section of relative humidity and vertical wind speed. The maximum value of helicity was 348 (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>) on 17.3.2012 which show sever instability during this phenomena. The vertical wind speed from sodar data in the third case study is very similar to meso scale shear instability. The cross section of vertical wind speed and humidity shows an increasing in relative humidity that accompanying with improvement in upward and downward motions which increase instabilities in the clouds and increase snow shower. Finally we concluded that atmospheric instabilities such as temperature reduction, increase in pressure, humidity and wind speed, increasing in helicity, suddenly changes in wind speed and direction which improve instabilities are the main factors of the formation and intensification of snow showers in the region.

**Keywords:** Snow Shower, Bojnurd, Sodar, Helicity, Mesoscale Shear Instability

---

\* Corresponding author:

Email Address: cyclone20076@gmail.com