

## 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

(تاریخ دریافت: ۹۷/۱۱/۲۶، تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۲۲)

### 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 ۸۵۰، ۵۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال به تحلیل همدیدی سه مورد رگبار برف پرداخته شد. با استفاده از داده‌های سودار، نقشه‌های هلیستی، پروفایل قائم رطوبت نسبی و سرعت قائم تحلیل دینامیکی این پدیده انجام شد. بیشینه مقدار هلیستی 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 پیچشی (هلیستی)، 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، هلیستی، ناپایداری برشی میان مقیاس

### مقدمه

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 هلیستی قائم روی منطقه توفان برف در تراز بالا منفی و در تراز پایین مثبت است که شرایط مناسبی برای وقوع توفان برف است (رزو و همکاران، ۲۰۱۰). با استفاده از داده‌های NCEP توفان سنگین برف تاریخ ۴ مارس ۲۰۰۷ مورد مطالعه قرار گرفته و هلیستی افقی و قائم محاسبه گردیدند. تغییرات هلیستی نشان دادند که مرکز حداقل هلیستی در ترازهای بالا و هلیستی مثبت در تراز پایین روی منطقه بارش سنگین می‌باشند (کاو<sup>۲۰۰۸</sup>). محاسبه هلیستی با استفاده از معادلات اندازه حرکت با تحلیل ابعادی مورد تحلیل قرار گرفته است و اثر عوامل مختلف بر تغییرات هلیستی بررسی شده است که در میان عوامل مؤثر، علاوه بر اثر شناوری اثرهای سولنوئید، نیروی گرادیان فشار و تاوایی نیز اثرات

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 برف‌گیر ایجاد می‌کند. کاهش دید افقی به هنگام بارش برف (ریتالاک، 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). هلیستی<sup>۱</sup> تراز ۸۵۰ تا

<sup>1</sup> Helicity

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. بیشینه 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 (عادلی، ۱۳۸۴). با روش محاسبه پارامترهای فیزیکی، روشی برای پیش‌بینی برف‌های سامانه‌ای بسیار سنگین، با مطالعه ۱۵ سیستم مختلف جوی روی استان کبک کانادا ارائه شده است (هدایتی دزفولی، ۱۳۷۴). فراوانی و احتمال ریزش برف را در گستره‌های دمایی مختلف برای ۱۵ ایستگاه همدیدی 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 بیشینه را بدست آورده‌اند که در ارتفاع حدود ۳۰۰۰ 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

مهمی بر تغییرات هلیسیتی دارند در حالی که نیروی کوریولیس فقط زمانی که مقیاس افقی بزرگ باشد تاثیرگذار است (هویجوان و شوتینگ<sup>۲۰۰۳</sup>). با استفاده از تحلیل داده‌های NCEP<sup>۱</sup>، رابطه بین هلیسیتی و مناطقی با برف سنگین برای توفان‌های برف در بهار و زمستان سال ۲۰۰۹ استان هیلونگجینگ تحلیل شده است (رن، ۲۰۱۱). تغییرپذیری هلیسیتی هنگام وقوع تاوه بررسی شده است و هلیسیتی، چشش قائم باد افقی تراز پایین در میان مقیاس و مقیاس توفان در مناطقی که گردباد اتفاق می‌افتد 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 تر نسبت به برف خشک با استفاده از مشاهدات و خروجی رادار انجام گرفته است (یوتار و همکاران، ۲۰۰۶). ملل‌های 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 بندآمده-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 (تیموئی 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

<sup>۱</sup> HYFA (Hydrology Frequency Analysis)

مطالعه موردی بجنورد

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 تا ارتفاع حدود ۳ کیلومتری لایه جو ناپایدار است طبق مطالعات انجام شده آستانه حداقل مقدار هلیسیتی  $157 \text{ m}^2/\text{s}^2$  برای ارتفاع  $0-1000 \text{ m}$  و بیشینه مقدار هلیسیتی (برای مقادیر بیش از  $250 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) در ارتفاع  $0-3000 \text{ m}$  است (دیوید جونز و همکاران، ۱۹۹۰). در این مطالعه از داده‌های هلیسیتی  $0-3000 \text{ m}$  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

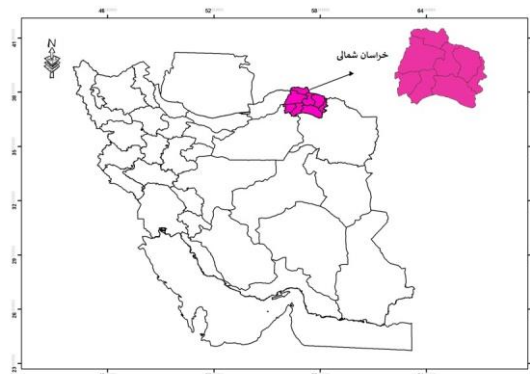
#### بارش و شرایط وقوع آن

در حالت اشباع، بخار آب به قطره‌های آب و یا ذرات یخ تبدیل شده که به شکل ابر دیده می‌شوند. اگر در شرایطی از جو، این قطره‌های 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 انبوهی در ابرهای کومولوس رشد یافته و بارش برف می‌تواند به شکل رگبار یا رگبار شدید باشد (اهرنس، 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 تاربوک، 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:

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

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



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 ۵۰، ۸۵۰ 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 ۰۰، ۰۶، ۱۲ و ۱۸ UTC برای روزهای وقوع رگبار برف استفاده گردید. با توجه به

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

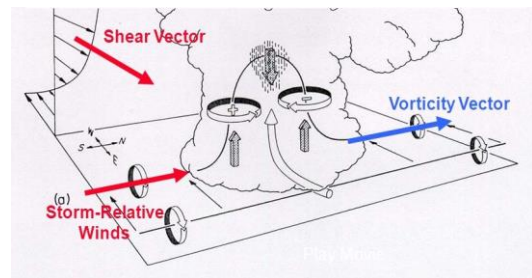
<sup>2</sup> Global Forecasting System\_ Analytical (<https://nomads.ncdc.noaa.gov/data/gfsanl/>)

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).

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

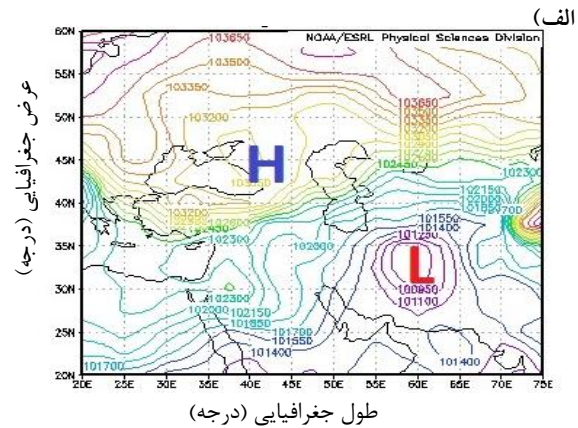
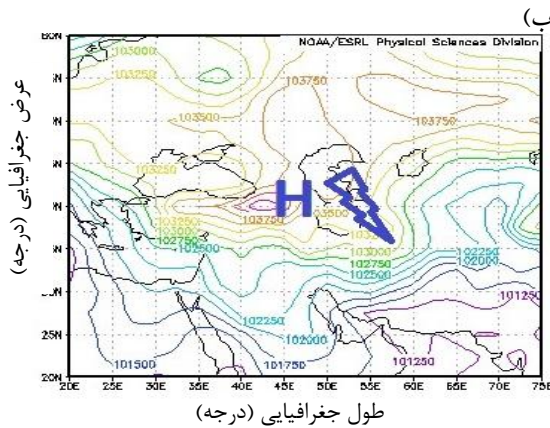
## بحث و نتایج

### تحلیل هم‌دیدگی و خروجی سودار برای رگبار برف

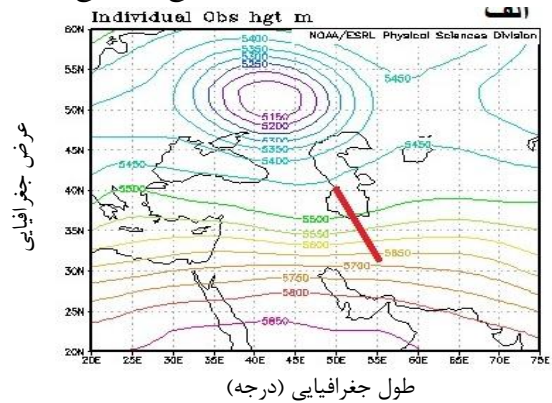
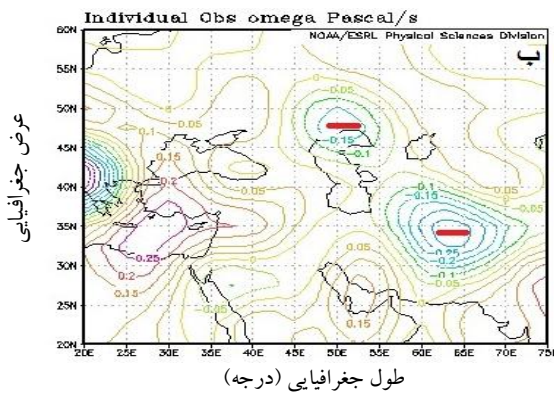
مورد اول (۲۰۱۲/۰۲/۱۱ تا ۲۰۱۲/۰۲/۲۲) (۱۳۹۰/۱۱/۲۲)

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 گردبادان 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).

<sup>1</sup> Storm Relative Helicity



شکل ۲- نقشه سطح زمین تاریخ (الف) ۲۰۱۲/۰۲/۱۱ (ب) ۲۰۱۲/۰۲/۱۲ ساعت ۰۰ UTC



شکل ۳- (الف) نقشه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (ب) سرعت قائم تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال تاریخ ۲۰۱۲/۰۲/۱۱ ساعت ۰۰ UTC

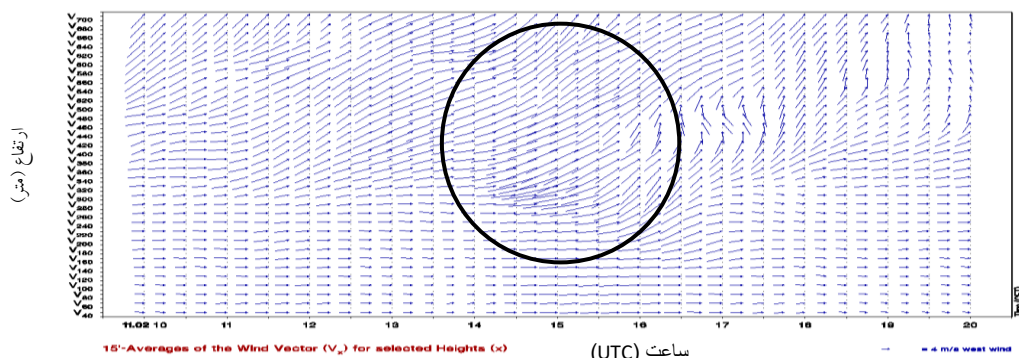
باد در روز ۲۰۱۲/۰۲/۱۱ را نشان می‌دهد، که اندازه بردار نشان دهنده سرعت وزش باد و جهت بردار جهت وزش باد را نشان می‌دهد. سرعت وزش باد از حدود ساعت ۱۴ در ارتفاع حدود ۴۰۰ متری افزایش می‌یابد و این تغییرات موجب شکل‌گیری رگبار برف در این ساعت گردیده است. پروفایل قائم سرعت وزش باد در لایه ۴۰ تا ۷۰۰ متری زمین در حدود ساعت ۱۶ نشان دهنده چپش 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.

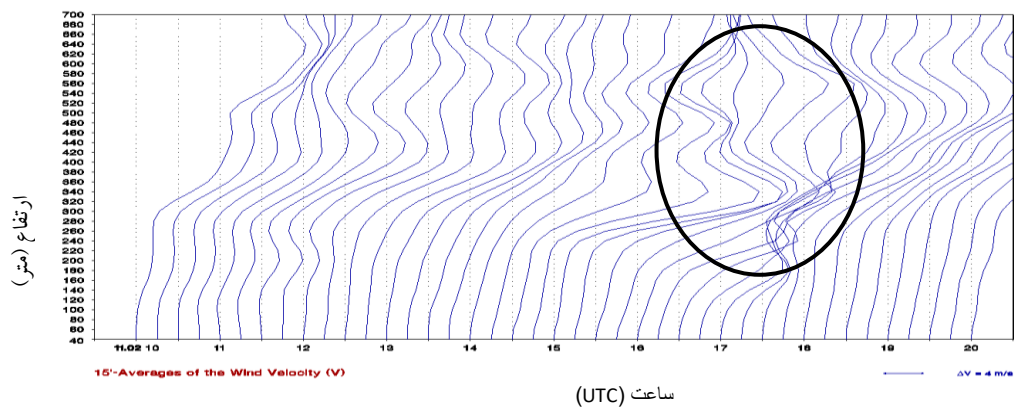
شکل ۴ خروجی دستگاه سودار بجنورد است که تغییرات بردار

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

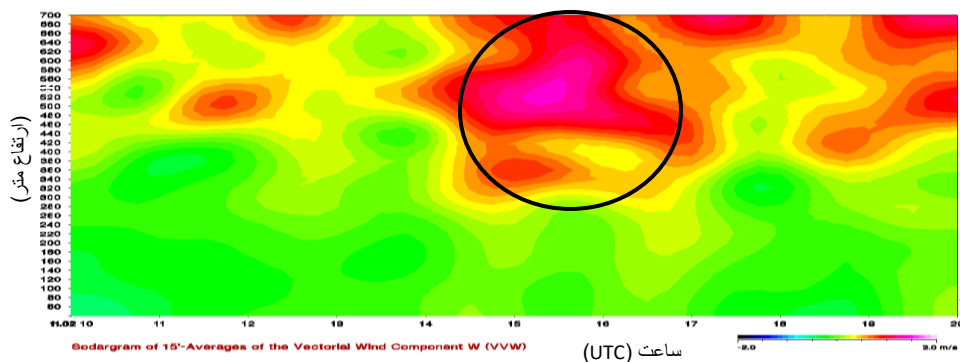
تاریخ	شروع UTC	نوع پدیده	تغییر دما (درجه سلسیوس)	تغییر رطوبت (درصد)	تغییر فشار (هکتوپاسکال)	تغییر دید (متر)	بیشینه سرعت باد (متر بر ثانیه)	جهت باد بیشینه (درجه)	ارتفاع برف (متر)
۲۰۱۲/۰۲/۱۱	۱۶	رگبار برف	-۲	٪۱۱	۰/۴	-۱۵۰۰	۰۹	۲۹۰	۱۰
۲۰۱۲/۰۳/۱۰-۱۱	۷	رگبار برف	-۰/۸	٪۲/۹	۰/۶	-۷۰۰۰	۱۱	۱۷۰	۲
۲۰۱۲/۰۳/۱۷-۱۸	۲۱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



شکل ۴- بردار سرعت باد در روز ۲۰۱۲/۰۲/۱۱ در ارتفاع ۴۰ تا ۷۰۰ متری از سطح زمین

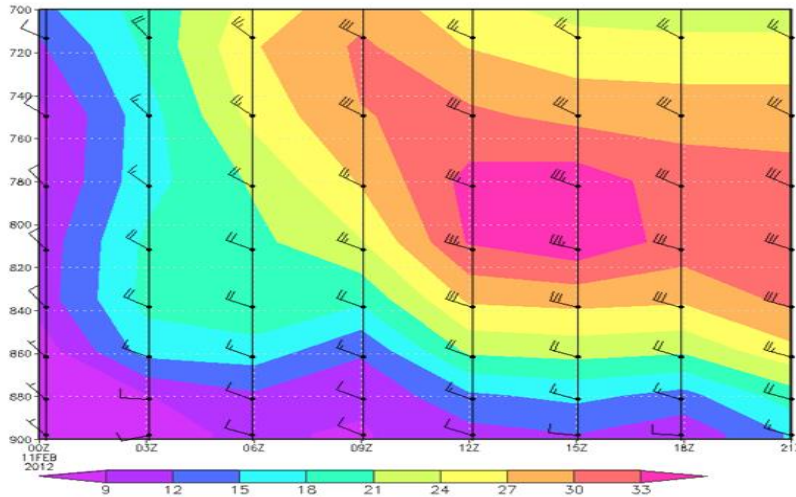


شکل ۵- پروفایل قائم تغییرات باد روز ۲۰۱۲/۲/۱۱ در ارتفاع ۴۰ تا ۷۰۰ متری از زمین



شکل ۶ تغییرات مولفه قائم سرعت باد در این روز را نشان می دهد که در ارتفاع حدود ۴۰۰ متری تغییرات صعودی قابل ملاحظه مولفه قائم سرعت باد بخوبی مشاهده می گردد

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



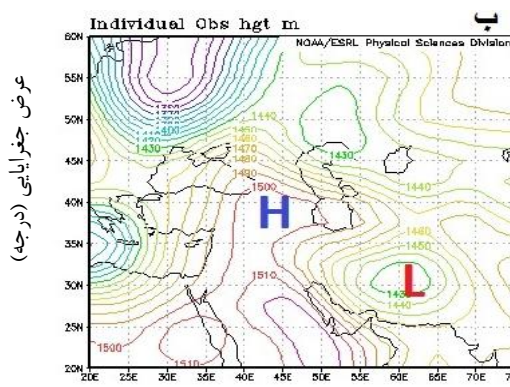
شکل ۷- خروجی مدل منطقه ای Wrf نمایه قائم سرعت باد (برحسب نات) در روز ۲۰۱۲/۲/۱۱

برف گردیده است (شکل ۹ الف). الگوی سرعت قائم تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان دهنده حرکات صعودی شدید (مقادیر منفی امگا) از شمال شرق کشور می‌باشد که نشان دهنده عبور توفان تندی از روی منطقه می‌باشد (شکل ۹ ب).

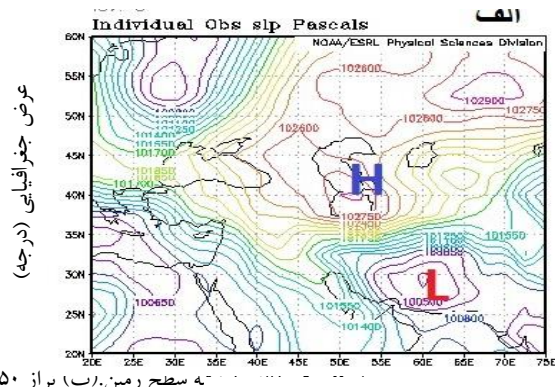
بررسی خروجی سودار در روز ۲۰۱۲/۰۳/۱۱ مطابق شکل ۱۰ نشان می‌دهد که در حدود ساعت ۳ UTC سرعت وزش باد در ارتفاع حدود ۴۰۰ متری افزایش یافته و در ساعت ۷، ۱۰، ۱۱ و ۲۰ UTC رگبار برف اتفاق افتاده است. در تمام موارد ابتدا یک حرکت صعودی و سپس حرکت نزولی (گاهی ناگهانی) سبب وقوع بارش رگباری برف شده است

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

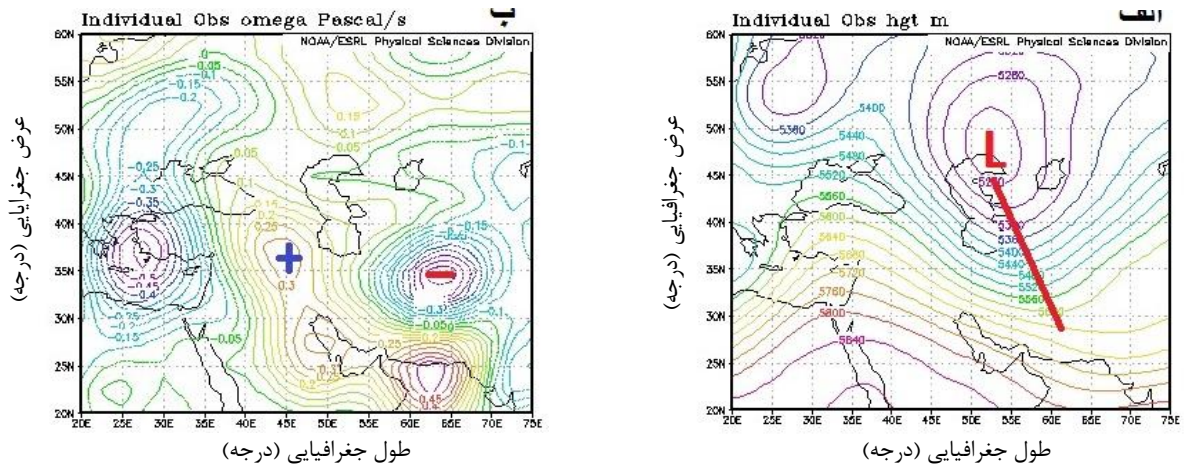
نقشه سطح زمین الگوی کاملاً مناسبی را برای ناپایداری‌ها نشان می‌دهد، مرکز کم فشار که همراه با توده هوای گرم و مرطوبی از سمت شرق و جنوب شرق وارد کشور شده و مرکز پرفشار سبیری که به عرض‌های پایین کشیده شده است نیز نوار شمالی را تحت تاثیر قرار داده که موجب تضاد دمایی شدیدی در شمال شرق کشور و افزایش گرادیان 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 ناه 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 می‌باشد که موجب رگبار



طول جغرافیایی (درجه)

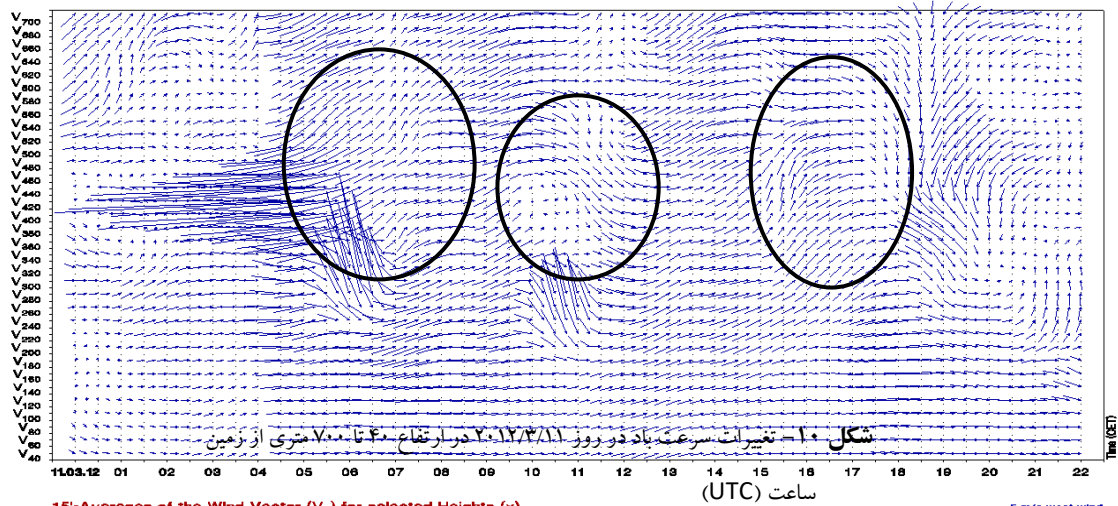


طول جغرافیایی (درجه)



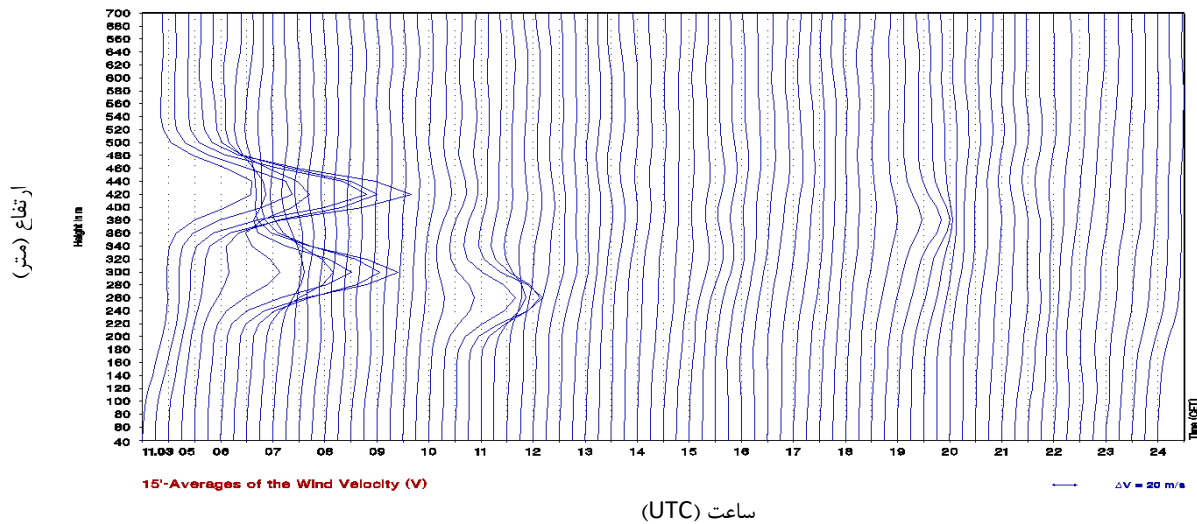
شکل ۹- الف) نقشه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، ب) سرعت قائم تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (بر حسب پاسکال بر ثانیه)

تاریخ ۲۰۱۲/۰۳/۱۱ ساعت ۱۲ UTC



شکل ۱۰- تغییرات سرعت باد در روز ۲۰۱۲/۳/۱۱ در ارتفاع ۴۰ تا ۷۰۰ متری از زمین  
 15°-Averages of the Wind Vector ( $V_x$ ) for selected Heights (x) ساعت (UTC) = 5 m/s west wind

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



ارتفاع (متر)

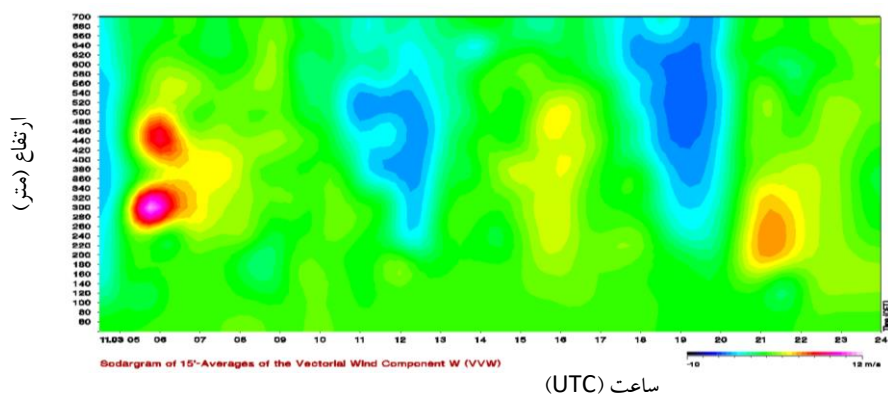
15°-Averages of the Wind Velocity (V) ساعت (UTC) = 20 m/s

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

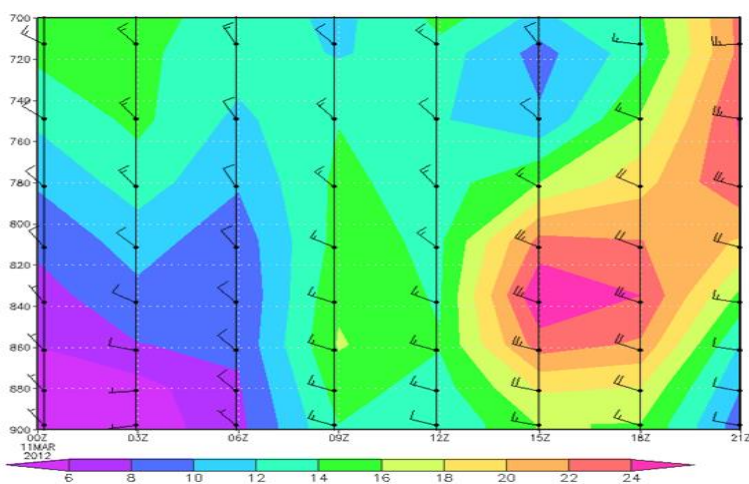


مقایسه با نتایج سودار نشان دهنده افزایش سرعت وزش باد در ترازهای پایین است.

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 می دهد. خروجی مدل Wrf نیز برای



شکل ۱۲ - تغییرات قائم سرعت باد در روز ۲۰۱۲/۳/۱۱ در ارتفاع ۴۰ تا ۷۰۰ متری از زمین

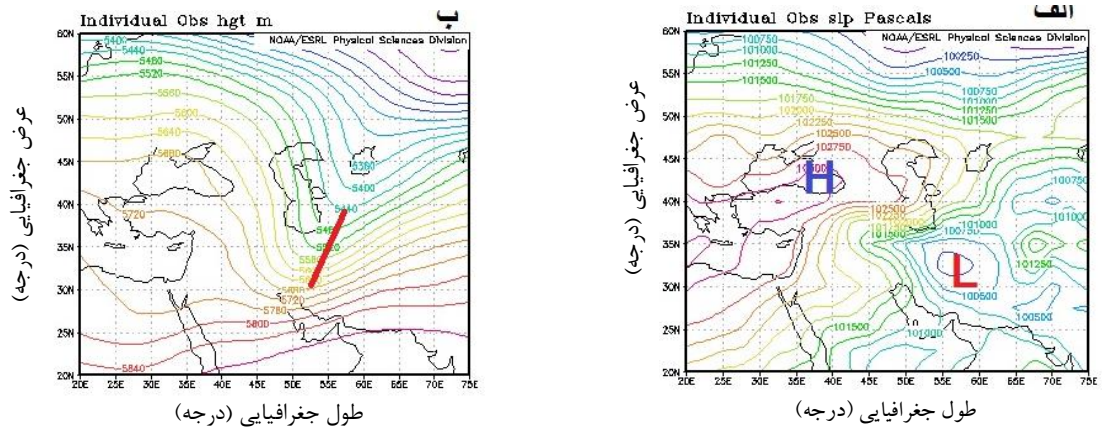


شکل ۱۳ - خروجی مدل منطقه ای Wrf نمایه قائم سرعت باد (برحسب نات) در روز ۲۰۱۲/۳/۱۱

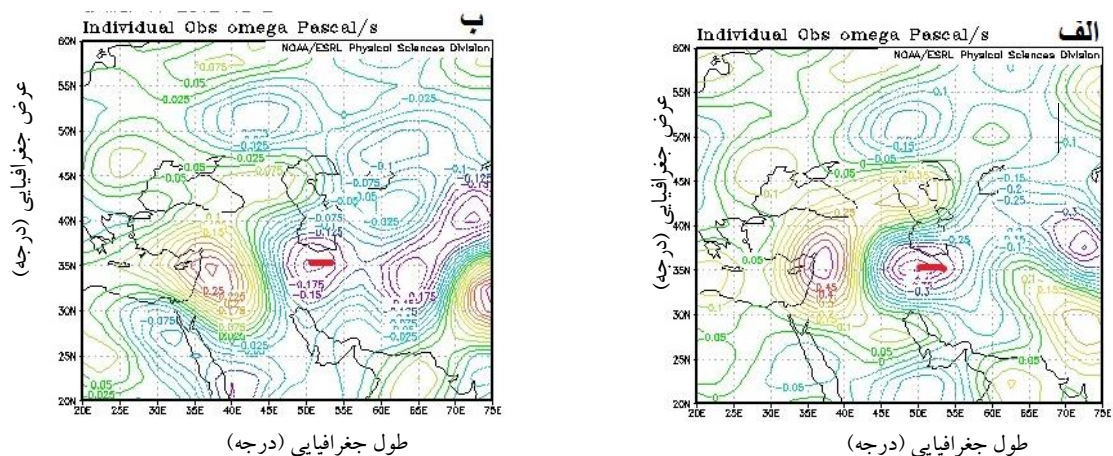
نقشه سرعت قائم تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۱۵ الف) به خوبی بیانگر حرکات شدید بالاسو در نوار شمالی است که طی ساعات پایانی روز هفدهم این جریانات بیشتر در شمال شرق حاکم گردید و تقویت ناپایداری ها تا سطوح فوقانی بوده به طوری که این حرکات بالاسو تا تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال نیز کشیده شده است (شکل ۱۵ ب). شکل ۱۶ تغییرات سمت و سرعت وزش باد از ساعت UTC ۱۵ روز ۱۷ ام تا UTC ۵ روز ۱۸/۳/۲۰۱۲ در بجنورد نشان می دهد. از ساعت ۱۴ روز ۱۷ ام تغییرات سرعت باد بطور محسوسی قابل مشاهده است که در این ساعت سرعت باد افزایش یافته و در

مورد سوم (۱۸-۲۰۱۲/۰۳/۱۷-۲۸/۱۲/۲۷/۱۳۹۰) معادل با ۱۷ ماه مارس، نفوذ کم فشار از سمت شرق به کشور و نفوذ زبانه پرفشار اروپایی بر نوار شمالی کشور موجب گرادیان شدید فشاری در شمال کشور گردید (شکل ۱۴ الف). در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز الگوی مشابه نشان دهنده امتداد جو ناپایدار تا سطوح فوقانی می باشد. در تراز میانی جو عبور ناوه عمیقی را طی این دو روز نشان می دهد 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).

شود که در حال تغییر از حالت نزولی به صعودی است. حدود ساعت ۲۱ UTC تغییر جهت وزش باد نیز به خوبی مشاهده می



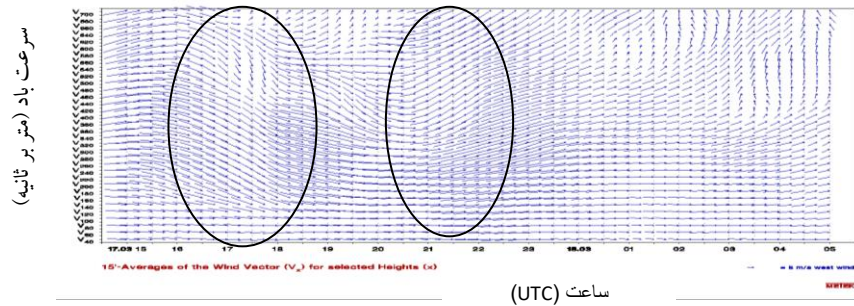
شکل ۱۴- (الف) نقشه سطح زمین (ب) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ساعت ۱۲ UTC روز ۲۰۱۲/۰۳/۱۷



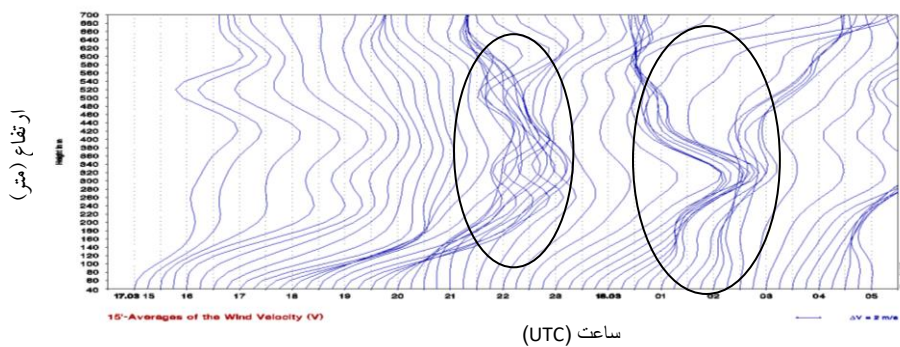
شکل ۱۵- (الف) سرعت قائم تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (بر حسب پاسکال بر ثانیه) (ب) تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال تاریخ ۲۰۱۲/۰۳/۱۷ ساعت ۱۲ UTC

این ساعات رگبار برف بوقوع پیوسته است. معمولاً قبل از وقوع چنین ناپایداری هایی در سطح زمین، تغییرات قابل ملاحظه ای در ارتفاع های 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.

قبل از ساعت ۱ UTC نیز یک حرکت صعودی دیگر ایجاد شده است که پس از آن سرعت وزش باد کم شده و گلوله های برفی شکل گرفته و پس از این صعود شتاب دار در اثر کاهش سرعت وزش باد در لایه های پایین بصورت رگباری ریزش نموده اند. بیشترین تغییر در پروفایل قائم سرعت باد در ساعت ۲۱ روز ۱۷ ام و ساعت ۱ تا ۲ روز ۱۸/۳/۲۰۱۳ در شکل ۱۷ مشاهده می شود که در



شکل ۱۶- تغییرات بردار سرعت باد با ارتفاع در روز ۱۷ و ۲۰۱۲/۳/۱۸

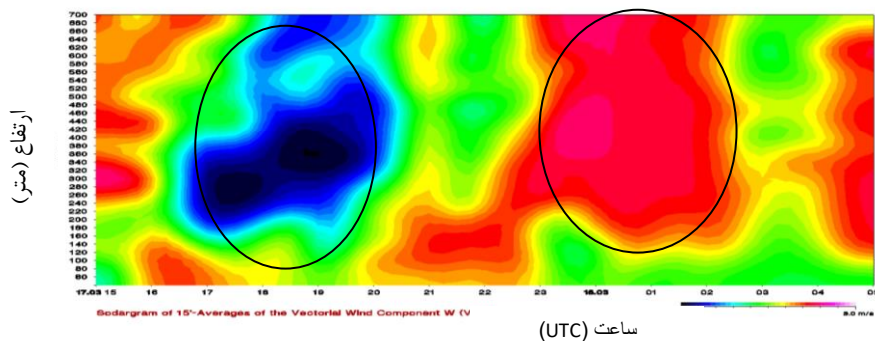


شکل ۱۷- پروفایل قائم تغییرات سرعت باد در روز ۱۷ و ۲۰۱۲/۳/۱۸ در ارتفاع ۴۰ تا ۷۰۰ متری

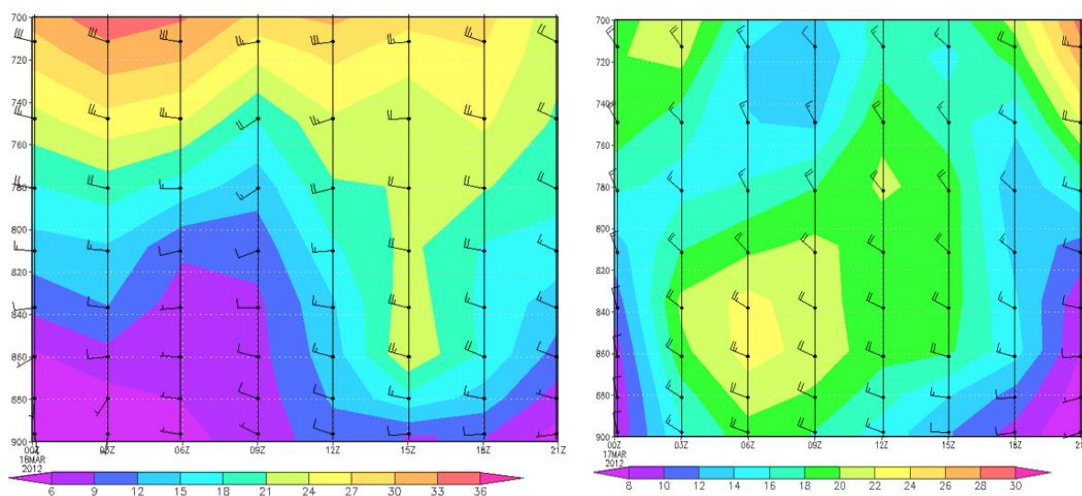
نخستین بار توسط دو فیزیکدان مشهور به نام‌های لرد کلونین و هرمان فون هلمهولتز توصیف شد. چنین شرایطی در شکل‌های ۴ و ۹ و ۱۴ بخوبی مشاهده می‌شود که در همه آن‌ها تغییر سرعت و جهت حرکت وجود داشته و مشترک است. شکل ۱۹ خروجی مدل برای تاریخ ۱۸ و ۲۰۱۲/۳/۱۷ نشان می‌دهد. افزایش سرعت وزش باد را در ارتفاع پایین نشان می‌دهد. 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 می‌دهد. تغییرات صعودی و نزولی حاکم در لایه مرزی جو در این شکل بخوبی مشاهده می‌گردد. این شکل بسیار شبیه ناپایداری‌های برشی میان مقیاس است که زمانی رخ می‌دهد که سیال در حال جریان، تحت تنش برشی قرار گیرد و یا سرعت سیال در ناحیه لایه مرزی دو سیال متفاوت باشد.

نمونه‌هایی از این پدیده در حرکت لایه بالایی آب در اثر وزش باد، حرکت ابرها و آب اقیانوس‌ها دیده می‌شود. این پدیده



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

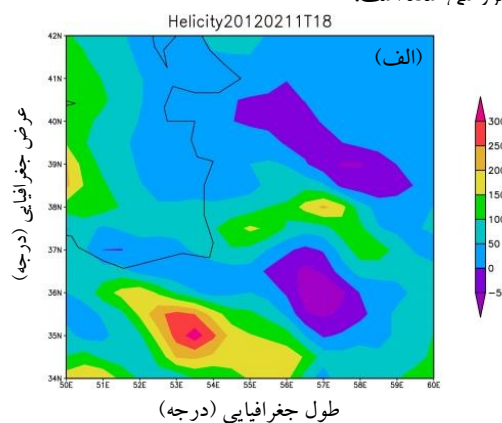
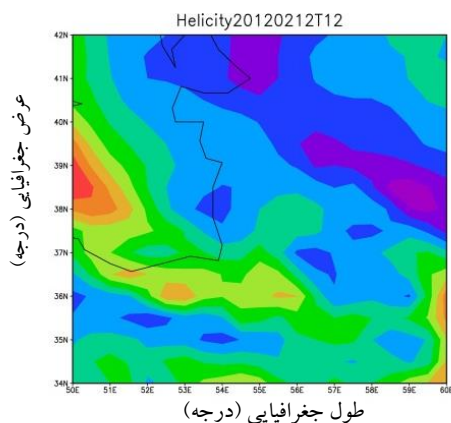


شکل ۱۹- خروجی مدل منطقه‌ای Wrf نمایه قائم سرعت باد (برحسب نات) در روز (راست) ۱۷ و (چپ) ۲۰۱۲/۳/۱۸

### 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 ۲۰ الف و ب).

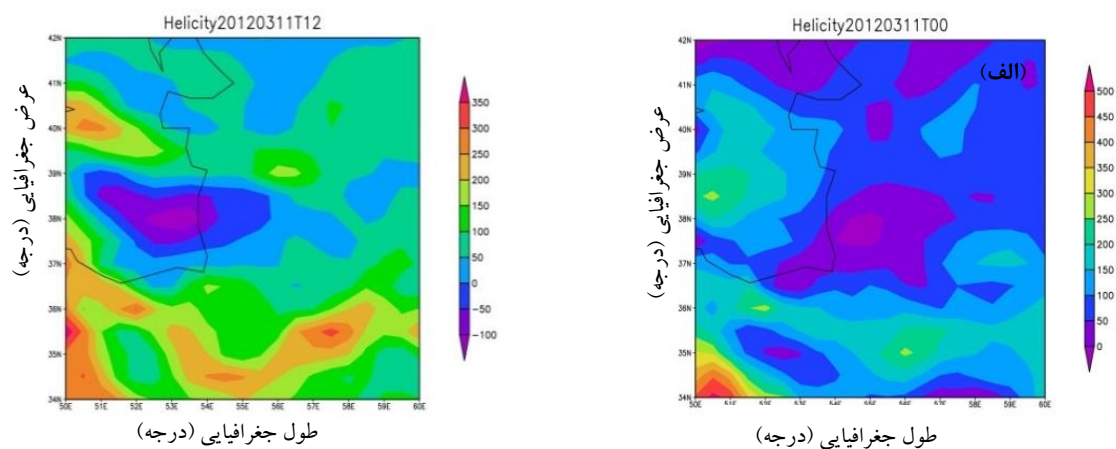
برای مطالعه دینامیکی رگبار برف در ایستگاه بجنورد با استفاده از داده‌های GFS به مطالعه تغییرات مقادیر هلیسیتی در زمان وقوع رگبار برف پرداخته و با ترسیم سطح مقطع قائم سرعت عمودی و رطوبت وضعیت رطوبت در سطوح مختلف در زمان وقوع رگبار برف بررسی شده است.



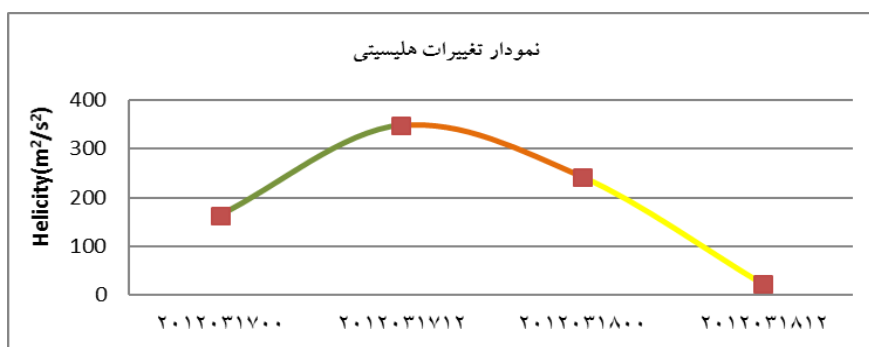
شکل ۲۰- نقشه هلیسیتی روز ۲۰۱۲/۰۲/۱۱ ساعت ۱۸ UTC (ب) ۲۰۱۲/۰۲/۱۱ ساعت ۱۲ UTC (الف)

شکل ۲۲ آورده شده است که به بیشینه مقدار خود یعنی  $(m^2/s^2)$  ۳۴۸ رسیده است.

در مورد مطالعاتی دوم نیز در ساعاتی که ناپایداری ها تقویت گشته مقدار هلیسیتی نیز در ایستگاه بجنورد از  $35 (m^2/s^2)$  به  $100 (m^2/s^2)$  رسیده است (شکل ۲۱ الف و ب). در مورد مطالعاتی سوم با وقوع رگبار برف در ایستگاه تغییرات پارامترهای هواشناسی نسبت به دو مورد دیگر قابل ملاحظه بوده است. تغییرات مقدار هلیسیتی در نمودار



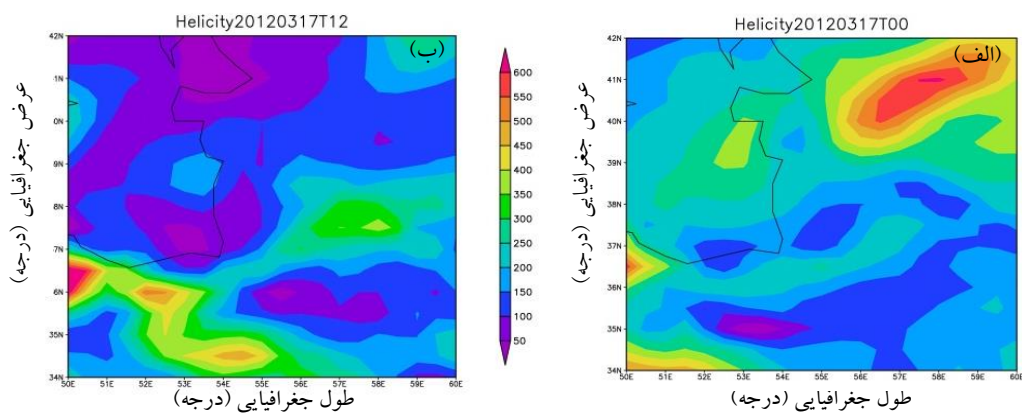
شکل ۲۱- نقشه هلیسیتی روز ۲۰۱۲/۰۳/۱۱ (الف) ساعت ۰۰ UTC (ب) ساعت ۱۲ UTC



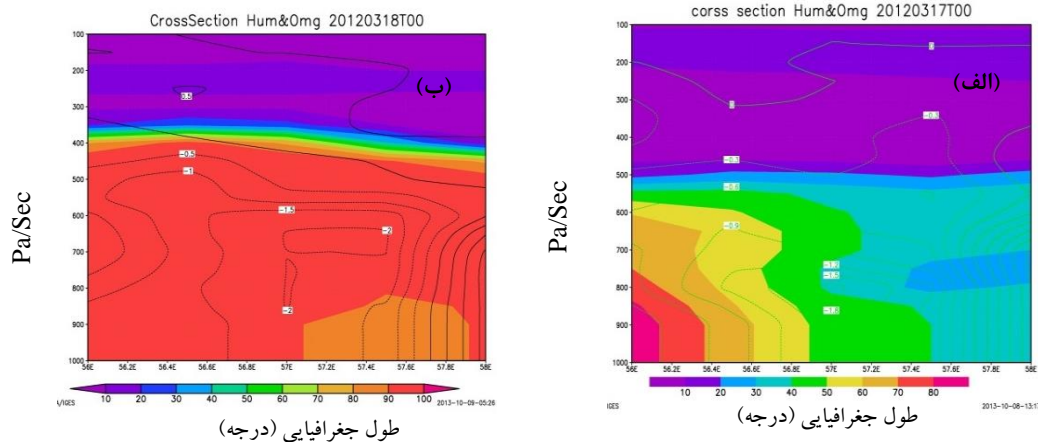
شکل ۲۲- نمودار تغییرات مقادیر هلیسیتی در طی ساعات وقوع رگبار برف تاریخ ۲۰۱۲/۰۳/۱۷

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



شکل ۲۴- نقشه سطح مقطع قائم رطوبت نسبی و سرعت قائم باد (بر حسب پاسکال بر ثانیه، ساعت ۰۰ UTC 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 بجزورد 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  $348 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$  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  $3 \text{ کیلومتری}$  را در توفان بنی  $1303 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$  و حداقل آن را  $204 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$  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.

### فهرست 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.

مطالعه موردی بجنورد

- 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.
- 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.
- 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 Meteorological Sinica; 61(6), pages 684-691.2003.
- 12- Klemp, J. B., 1987: Dynamics of tornadic thunderstorms. Ann. Rev. Fluid Mech., 19, 369-402.