

پیش‌بینی پتانسیل سقوط بهمن با استفاده از یک مدل پیش‌بینی عددی (مطالعه موردی: منطقه شهرستانک، ۲۶-۲۸ دسامبر ۲۰۱۶)

سحر تاج‌بخش^{۱*} و امیرحسین نیک‌فال^۲

۱. استادیار، گروه کاوش‌های جوی، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

۲. کارشناس هواشناسی، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

(دریافت: ۹۶/۹/۱، پذیرش نهایی: ۹۷/۲/۲۵)

چکیده

بهمن یکی از مهم‌ترین مخاطرات وضع هوا در مناطق کوهستانی و برف‌گیر است و پیش‌بینی صحیح آن در افزایش ایمنی جاده‌های کوهستانی نقش مؤثری دارد. از این‌رو در این تحقیق کوشش شده است ضمن بررسی شرایط همیدی رخداد بهمن در یک مطالعه موردی، مهم‌ترین شاخص‌های پیش‌بینی پتانسیل رخداد بهمن با استفاده از یک مدل پیش‌بینی عددی برآورد و احتمال رخداد بهمن بر اساس یکی روش‌های کاربردی موجود بررسی شود. مطالعه موردی به‌گونه‌ای انتخاب شده که شرایط جوی قابل توجهی برای رخداد بهمن در منطقه دیده نمی‌شود و تنها یک مورد سقوط بهمن در طول ۲۴ ساعت در منطقه شهرستانک جاده چالوس گزارش شده است. مهم‌ترین نتایج این بررسی نشان می‌دهد که الگوهای پیش‌بینی همیدی وضع هوا در این مطالعه، با شرایط جوی واقعی همخوانی دارد و ویژگی مشخصی برای وقوع بهمن در این الگوها دیده نمی‌شود. آستانه‌های معرفی شده برای پتانسیل وقوع بهمن با رخداد واقعی در این مطالعه همخوانی خوبی دارد. وزش باد کمتر از ۹ m/s، بارش برف کمتر از ۳۰ سانتی‌متر در ۲۴ ساعت، افزایش دما کمتر از ۸ °C در ۱۲ ساعت، عدم ماندگاری دما در محدوده ۴- تا ۱۰- °C و آسمان نیمه‌ابری در طول روز بدون بار باران، شرایطی است که بر احتمال رخداد بهمن و نه قطعیت آن (پتانسیل نامشخص وقوع بهمن) تأکید دارد و برای پیش‌بینی پتانسیل بالای وقوع بهمن، آستانه‌های جوی باید بالاتر از مقادیر یاد شده باشند.

واژه‌های کلیدی: بسته برف، ضخامت برف، آب معادل برف، بهمن و مدل پیش‌بینی عددی WRF.

۱. مقدمه

بهمن، به جرمی از برف (گاهی همراه با یخ و سنگ) گفته می‌شود که در حال غلت زدن و پایین آمدن از یک سطح شیب‌دار می‌باشد (انجمن هواشناسی آمریکا، ۲۰۱۵). چگالی برف، آب معادل برف و عمق برف مهم‌ترین ویژگی‌های برف هستند که علاوه بر اندازه‌گیری در ایستگاه‌های برف‌سنجی یا روش‌های سنجش از دور، به کمک مدل‌های ترمودینامیکی مانند مدل بسته برف نیز برآورد می‌شوند (رینن و همکاران، ۲۰۰۸) و کاربرد بنیادی در پیش‌بینی بهمن و سیلاب دارند. این سه عامل نقش مهمی در میزان پوشش برف دارند و هر سه با یکدیگر در ارتباط هستند (آرمسترانگ و بران، ۲۰۱۰). آب معادل برف معرف عمق آبی است که پس از ذوب کامل برف ایجاد می‌شود (انجمن هواشناسی آمریکا،

برخی از پدیده‌های مخاطره‌آمیز وضع هوا در مناطق خاص جغرافیایی رخ می‌دهند که از آن جمله می‌توان به بهمن اشاره کرد. سقوط بهمن در زمستان‌های مناطق کوهستانی ایران محتمل است. از این‌رو، پیش‌بینی پتانسیل سقوط بهمن در جاده‌های کوهستانی و برف‌گیر کشور نقش مؤثری در مدیریت و کنترل جاده‌ها دارد. برف، به علت کنترل و تبادل فرآیندهای رسانایی و تابش میان سطح زمین و جو، مؤلفه اساسی کرایوسفر (Cryosphere) است (میل و گرانجر، ۱۹۸۱؛ بران و همکاران، ۱۹۸۹؛ گوستافسون و همکاران، ۲۰۰۱). برف شدید، ناشی از عملکرد چرخندهای برون‌حاره‌ای است و بهمن محصولی از پدیده برف است که می‌تواند به علت اثرات گرمایی یا مکانیکی در مناطق کوهستانی رخ دهد.

۲۰۱۵). هر چه برف چگال‌تر باشد، آب معادل آن بیشتر است. دما و باد دو عامل بسیار مهم در تغییر چگالی برف هستند. با افزایش سرعت باد، برف چگال‌تر و در نتیجه ارتفاع آب معادل برف بیشتر می‌شود. برای بسیاری از برنامه‌های کاربردی، آب معادل برف، شاخص مهم‌تری از پوشش برف می‌باشد (کامیسو و همکاران، ۲۰۰۳؛ پولیانن، ۲۰۰۶). دیدبانی برف تازه (عمق برف)، به‌ویژه برای پیش‌بینی‌های محلی بهمن، غالباً از اهمیت زیادی برخوردار است (اشرایمر و همکاران، ۲۰۱۱). شاخص‌های عمق، پوشش و آب معادل برف برای مطالعات اقلیمی نیز نقش بسزایی دارند (فری و همکاران، ۲۰۰۵). کاهش آب معادل برف به معنای کاهش بارش یا افزایش ذوب برف می‌باشد (سرکوات و همکاران، ۲۰۱۳) که می‌تواند ناشی از افزایش دمای ناشی از تغییر اقلیم باشد (مارتی و میستر، ۲۰۱۲). برای برآورد ویژگی‌های مهم بهمن از جمله آب معادل برف، از مدل‌های ترمودینامیکی مانند مدل بسته برف (snowpack) (بارتلت و لنینگ، ۲۰۰۲؛ لنینگ و همکاران، ۲۰۰۲) و مدل کروکاس (CROCUS) بهره گرفته شده است (بران و همکاران، ۱۹۸۹ و ۱۹۹۲). در این مدل‌ها، شبیه‌سازی ویژگی‌های بسته برف بر اساس شرایط هواشناختی مانند دما، باد، رطوبت و غیره انجام می‌شود. نتایج بررسی ارزیابی این مدل‌ها از شبیه‌سازی‌های قابل اعتماد برای شاخص‌های مهم برف حکایت دارد (اچورز و همکاران، ۲۰۰۴). منظور از بسته برف، انباشت گسترده برف در فصل زمستان روی زمین است که در بهار و تابستان ذوب می‌شود (انجمن هواشناسی آمریکا، ۲۰۱۵). بسته برف از لایه‌های برفی تشکیل شده است که در مناطق جغرافیایی مرتفع انباشته شده‌اند و اقلیم آنها شامل دوره‌های هوای سرد بلند مدت در طول سال است. ارزیابی شکل‌گیری و پایداری بسته برف‌ها در مطالعه و پیش‌بینی بهمن بسیار مهم است (کاکس و فولساس، ۲۰۰۳؛ جانچیک، ۱۹۹۴). برای پیش‌بینی بهمن از مدل‌های آماری استفاده می‌شود اما برای بهبود نتایج و مطالعه روش‌های دیگر به بررسی روش‌های عددی با استفاده از

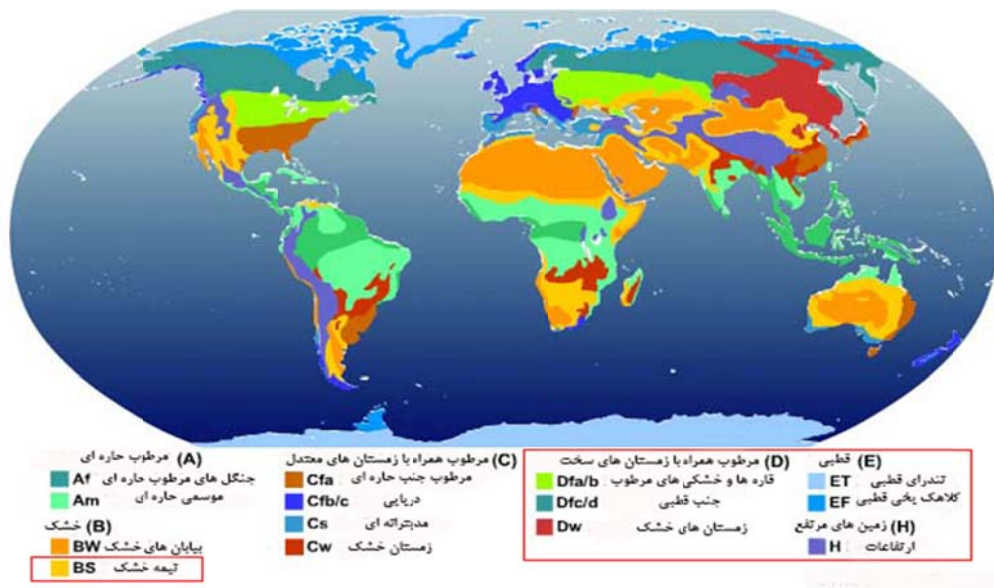
مدل‌های ترمودینامیکی نیز پرداخته شده است (راجر و همکاران، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۳). تاج‌بخش و همکاران نیز در مطالعه‌ای نشان دادند که خروجی پوشش برف مدل WRF با داده‌ای دیدبانی ماهواره‌ای مدیس هم‌خوانی ۶۵ درصدی دارد (تاج‌بخش و همکاران، ۱۳۹۷). به‌کارگیری مدل‌های ترمودینامیکی (مانند مدل بسته برف) با استفاده از برون‌داد مدل‌های پیش‌بینی عددی، یکی از روش‌های متداول در شبیه‌سازی و پیش‌بینی وقوع بهمن می‌باشد (دوچارم و همکاران، ۲۰۱۵) که در بسیاری از مراکز پیش‌بینی بهمن استفاده می‌شود. اسپانگلر و همکاران در ۲۰۱۵ مدلی برای تعیین پتانسیل وقوع بهمن ارائه کردند که در آن از مدل بسته برف برای بررسی پتانسیل رخداد بهمن استفاده و در مرکز آموزشی (COMET, Construction Organizing Membership Education Training) ارائه شده است. پیش‌بینی بهمن در سازمان هواشناسی ایران بیشتر به‌صورت کیفی در مرکز پیش‌بینی تهران یا استان‌های مرتبط انجام می‌شود و استفاده از الگوریتم‌ها یا مدل‌های ترمودینامیکی بر اساس برون‌دادهای مرتبط مدل‌های عددی (مانند آب معادل برف، ضخامت برف یا پوشش برف و غیره) چندان متداول نیست. ضمن اینکه تا کنون به‌صورت مشخص روشی برای پیش‌بینی بهمن در کشور ارائه نشده است. از این‌رو در این مطالعه کوشش می‌شود مهم‌ترین شاخص‌های وقوع بهمن به کمک مدل پیش‌بینی عددی (WRF, Weather Research and Forecasting)، تعیین و بر اساس روش اسپانگلر و همکاران (مدل بسته برف)، پتانسیل وقوع بهمن در یک مطالعه موردی بررسی شود. به همین منظور در بخش بعد در خصوص روش به‌کار گرفته شده و سپس داده و اطلاعات مورد استفاده بحث می‌شود. بخش چهارم به تحلیل همدیدی رخداد بهمن و بحث و بررسی ویژگی برون‌دادهای مرتبط در مدل پیش‌بینی عددی می‌پردازد و در نهایت در بخش پنجم نتایج حاصل از این بررسی بیان می‌شود.

۲. روش پژوهش

در مدل بسته برف، طبقه‌بندی اقلیمی به‌منظور تعیین نوع بسته برف موجود در منطقه و ویژگی‌های آن استفاده می‌شود. شرایط متفاوت اقلیمی موجب می‌شود، در عرض‌های جغرافیایی مشابه، تنها بخشی از کره زمین پوشیده از برف باشد. طرح‌واره‌های متعددی برای طبقه‌بندی اقلیمی جهان استفاده می‌شود که طبقه‌بندی اقلیمی Köppen-Geiger یکی از آنها می‌باشد (شکل ۱). این مدل توسط کوپن، اقلیم‌شناس روسی در سال ۱۸۸۴ معرفی و بعدها توسط گایگر، اقلیم‌شناس آلمانی تصحیح شد (کاتک، ۲۰۱۱).

بر اساس تقسیم‌بندی شکل ۱، دیده می‌شود که رشته‌کوه‌های راکی (محدوده ایالت کلرادو) و رشته‌کوه البرز (منطقه استان البرز) در عرض جغرافیایی و اقلیم تقریباً مشابهی قرار دارند. هر دو معرف زمین‌های مرتفع (رنگ بنفش) با مناطق خشک و نیمه‌خشک (رنگ‌های زرد و نارنجی) در اطراف می‌باشند. استارم و همکاران (۱۹۹۵) از این طبقه‌بندی اقلیمی برای طبقه‌بندی پوشش بسته برف در مقیاس جهانی استفاده نموده‌اند. آنها نشان دادند نوع بسته برف در رشته‌کوه راکی (منطقه کلرادو) از نوع دشت (prairie)، با ژرفای کم و دمای نسبتاً سرد، همراه با وزش باد قابل توجه است که ضخامت بیشینه آن به حدود یک متر می‌رسد. در رشته‌کوه البرز، بسته برف از نوع بی‌دوام (ephemeral) با پوشش نازک و دمای گرمی است که پس از نشست روی زمین آب می‌شود و ضخامت آن بین صفر تا ۵۰ سانتی‌متر است (استارم و همکاران، ۲۰۱۰). با توجه به این طبقه‌بندی، اسپانگلر و همکاران (۲۰۱۵)، پیش‌بینی پتانسیل رخداد برف را بر اساس روشی در سه بخش مرتبط با هم ارائه نمودند. مطالعه شرایط اقلیمی منطقه (از لحاظ شرایط جوی، شیب کوه و غیره)، بررسی وضع هوای حاضر در منطقه (شامل پارامترهای باد، دما و بارش) و پیش‌بینی شاخص‌های مهم هواشناسی در رخداد برف، بخش‌هایی هستند که در روش آنها برای پیش‌بینی

برف در رشته‌کوه‌های راکی در منطقه کلرادو ارائه شده است. بر اساس بررسی اسپانگلر و همکاران، شیب ۳۰ تا ۴۵ درجه کوه، اقلیم سرد و خشک و مناطق مرتفع و کوهستانی، پتانسیل بالایی (از دیدگاه اقلیمی) برای رخداد برف دارند. از آنجا که در مطالعه حاضر تنها به بررسی بخش سوم یعنی مطالعه پتانسیل برف بر اساس اطلاعات پیش‌بینی پرداخته شده است، مطالعه شرایط اقلیمی موضوع بحث این مقاله نیست؛ اما به نظر می‌رسد شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه (جاده چالوس - منطقه شهرستانک) با شرایط لازم اقلیمی برای رخداد برف با پتانسیل بالا مناسب باشد به گونه‌ای که منطقه مورد مطالعه، منطقه‌ای مرتفع با اقلیم کوهستانی است. ارتفاع شهرستانک حدود ۲۲۳۰ متر از تراز دریا می‌باشد و بر اساس تقسیم‌بندی استارم، بسته برف این منطقه، از نوع کم‌عمق و ضعیف (بر اساس شکل ۱) است. همچنین بر اساس اطلاعات دریافتی از سازمان نقشه‌برداری کشور میانگین شیب رشته‌کوه البرز در محدوده منطقه شهرستانک حدود ۴۱٫۵ درجه است. به این ترتیب در یک نگاه کاملاً کیفی، شرایط اقلیمی منطقه مناسب رخداد برف با پتانسیل بالاست. با این وجود باید بررسی و مطالعه کمی و دقیق‌تری برای این قسمت انجام شود. اما در بخش پیش‌بینی شرایط وضع هوا برای بررسی پتانسیل رخداد برف، جدول‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در روش اسپانگلر و همکاران مطرح شده است که در ادامه به اختصار بررسی می‌شوند. جدول ۱ مؤلفه‌های مرتبط با شاخص بارش را معرفی می‌کند. مقدار برف جدید معرف عمق برف جدید طی یک بازه زمانی مشخص (مثلاً ۲۴ ساعت) می‌باشد. آب معادل برف نیز عمق آب ناشی از ذوب کامل برف را معرفی می‌کند و شاخص روند توفان، بر اساس تغییرات دما در آغاز و پایان توفان تعیین می‌شود که شرح آن در جدول ۱ آمده است. دمای بالا در زمان بارش برف، توفان برف را تضعیف می‌کند و هر میزان بارندگی می‌تواند وزن برف را افزایش داده و سقوط برف را محتمل‌تر سازد.



شکل ۱. طبقه بندی اقلیم های مختلف در مقیاس جهانی (گایگر، ۲۰۱۱).

جدول ۱. شاخص های مرتبط با بارش برای پتانسیل رخداد بهمن.

ردیف	شاخص بارش	پتانسیل بالا برای رخداد بهمن	پتانسیل نامشخص برای رخداد بهمن	پتانسیل کم برای رخداد بهمن
۱	مقدار برف تازه	۳۰ سانتی متر یا بیشتر در ۲۴ h	کمتر از ۳۰ سانتی متر در ۲۴ h	برف تازه نیاریده است
۲	آب معادل برف	۲۵ میلی متر میلی متر یا بیشتر در ۲۴ h	کمتر از ۲۵ میلی متر در ۲۴ h	آب معادل برف تازه موجود نیست
۳	روند توفان	شروع سرد و پایان گرم	شروع گرم و پایان سرد	دما در محدوده ۳- تا ۷- °C
۴	باران	رخداد هر نوع باران	بدون بارش باران	بدون بارش باران

بیشتر می شود. با پایش مداوم دما می توان دماهای گرم تر از انجماد را برای دوره های زمانی بیش از ۲۴ ساعت تعیین نمود. در این شرایط احتمال رخداد بهمن افزایش می یابد و برعکس، با کاهش دما، پایداری برف بیشتر و احتمال سقوط بهمن کاهش می یابد. جدول ۲ شرایط پتانسیل سقوط بهمن را بر اساس شاخص دما نشان می دهد.

افزایش دما تا ۱۰ °C یا بیشتر در طول روز، به ویژه هنگامی که دمای هوا در نزدیکی انجماد باشد، می تواند به سرعت موجب نشست برف و رخداد بهمن شود. آهنگ تند افزایش دما بسته برف را به شدت ناپایدار می کند. باید توجه داشت هنگامی که بعد از یک گرمایش، هوا سرد شود یا دمای هوا چندین روز متوالی در محدوده انجماد باشد، پایداری برف

جدول ۲. شاخص های مرتبط با دما برای بررسی پتانسیل رخداد بهمن.

ردیف	شاخص دما	پتانسیل بالا برای رخداد بهمن	پتانسیل نامشخص برای رخداد بهمن	پتانسیل کم برای رخداد بهمن
۱	افزایش دما	افزایش بیش از ۸ °C در ۱۲ h در دماهای نزدیک و کمی بالای ۰ °C	افزایش کمتر از ۸ °C در ۱۲ h در دماهای نزدیک و کمی کمتر از ۰ °C	افزایش تدریجی دما طی چند روز (زیر ۰ °C)
۲	کاهش دما	-	ماندگاری دما بین ۱۰- تا ۴- °C	کاهش دما در پی دمای گرم موجود
۳	دماهای گرم	بالای دمای یخبندان برای بیشتر از ۲۴ h	بالای دمای یخبندان برای ۱۲ تا ۲۴ h	-
۴	دماهای سرد	دماهای بسیار سرد (کمتر از ۱۰- °C)	ماندگاری دما بین ۱۰- تا ۴- °C	-

توجه به اقلیم‌های تقریباً مشابه در دو منطقه کلرادو و البرز بر اساس شکل ۱، به نظر می‌رسد امکان استفاده از این آستانه‌ها برای منطقه البرز نیز وجود داشته باشد که در ادامه بررسی می‌شود. به این ترتیب، در این مطالعه با هدف امکان استفاده از برون‌داد مدل‌های پیش‌بینی عددی برای بررسی پتانسیل بهمن، بخش سوم روش اسپانگلر (پیش‌بینی پتانسیل وقوع بهمن) به منظور دسترسی به حدس اولیه در رخدادهای پتانسیل بهمن در مناطق کوهستانی کشور بررسی شده است که شامل جدول‌های ۱ تا ۴ می‌باشد.

۳. اندازه‌گیری، مشاهده و شبیه‌سازی

این مطالعه در بازه زمانی ۲۶ تا ۲۸ دسامبر ۲۰۱۶ انجام شده است که در بعد از ظهر روز ۲۷ دسامبر، وقوع یک نوبت سقوط بهمن در منطقه شهرستانک جاده چالوس گزارش شده و به دنبال آن بهمن دیگری رخ نداده است. از این رو، شرایط وضع هوا برای ریزش‌های متوالی بهمن چندان مساعد نبوده است. منطقه شهرستانک (N $36^{\circ}10'$ و E $51^{\circ}31'$) در جاده چالوس واقع شده و ارتفاع منطقه ۲۲۳۰ تا ۲۲۴۰ متر می‌باشد و در استان البرز واقع شده است (شکل ۲).

اطلاعات مربوط به سرعت باد در یک دوره ۲۴ ساعته و تعیین سرعت‌های میانگین ۹ تا ۲۷ متر بر ثانیه برای شناسایی پتانسیل بالای وقوع بهمن مناسب است. باید توجه داشت اگر برف تازه یا کم‌تراکم روی زمین وجود داشته باشد، می‌تواند به راحتی توسط باد جابه‌جا شود. بررسی داده‌های جهت باد برای یک دوره ۲۴ ساعته و دقت در مدت‌زمانی جهت‌های وزش باد و تمرکز بر جهت‌هایی که در دوره‌های طولانی‌تر وزیده شده‌اند بسیار مهم است. جدول ۳ شرایط تحلیل این شاخص را نشان می‌دهد.

پوشش ابر هم‌مقدار تابش سرمایشی شبانه و هم‌مقدار تابش خورشیدی روزانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شب‌های سرد و بدون ابر، به‌ویژه هنگامی که دمای بسیار سرد برای چند شب باقی بماند، با سرمایش تابشی سریع همراه می‌شوند و می‌توانند لایه‌های ضعیف را در بسته برف ایجاد کند. حتی لایه‌های نازک ابرهای بالا نیز می‌توانند در شب مانع سرمایش تابشی شوند.

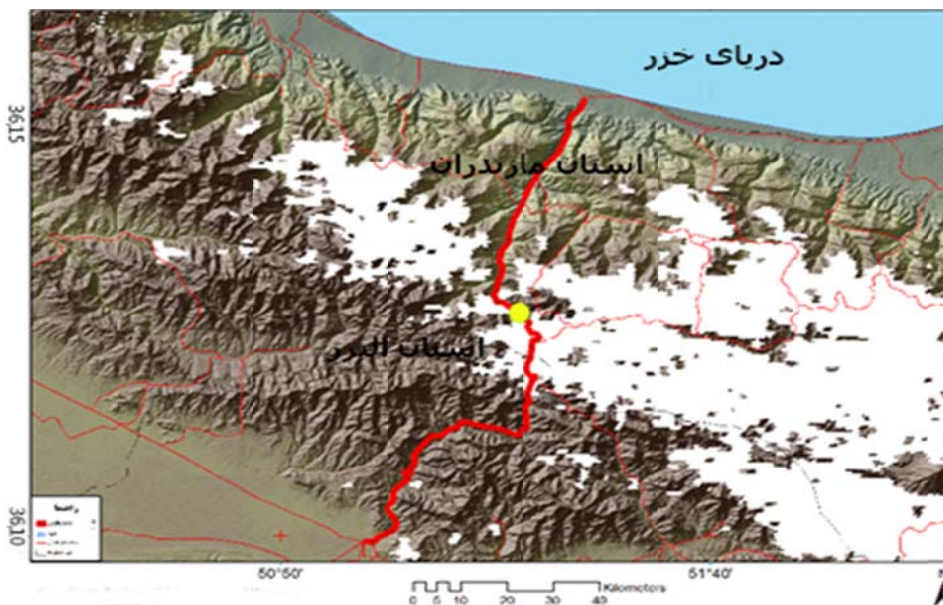
آستانه‌های شاخص‌های هواشناسی مرتبط با پتانسیل وقوع بهمن در جدول‌های بالا برای منطقه کلرادو می‌باشد. با

جدول ۳. شاخص‌های مرتبط با باد برای بررسی پتانسیل رخداد بهمن.

ردیف	شاخص باد	پتانسیل بالا برای رخداد بهمن	پتانسیل نامشخص برای رخداد بهمن	پتانسیل کم برای رخداد بهمن
۱	میانگین سرعت باد	۹ تا ۲۷ متر بر ثانیه	کمتر از ۹ یا بیشتر از ۲۷ متر بر ثانیه	آرام و کمتر از ۷ متر بر ثانیه
۲	میانگین سمت باد	ثابت	متغیر	متغیر

جدول ۴. شاخص‌های مرتبط با پوشش ابر برای بررسی پتانسیل رخداد بهمن.

ردیف	شاخص پوشش ابر / تابش خورشید	پتانسیل بالا	پتانسیل نامشخص	پتانسیل کم
۱	پوشش آسمان در شب	آسمان صاف با دمای بیش از 10°C و بادهای کمتر از 5 m/s	ابری آسمان صاف با دماهای نسبتاً خوب نیمه‌ابری همراه با بادهای کمتر از 5 m/s	-
۲	پوشش آسمان در روز	آسمان‌های صاف یا ابرهای نازک با دماهای گرم به‌ویژه در شیب‌های رو به خورشید	تمام ابری ضخیم	-



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه - خط توپو قرمز جاده چالوس و نقطه زرد محدوده شهرستانک را نشان می‌دهد.

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) توسعه داده شده است. این داده‌ها در بازه زمانی ۱ ژانویه ۱۹۸۹ به بعد تا نزدیک به زمان واقعی در دسترس هستند. محصولات ERA-Interim به صورت شبکه‌ای از داده‌ها، دربرگیرنده گستره وسیعی از پارامترهای هواشناسی در سطح زمین با گام زمانی ۳ ساعته و پارامترهای ترازهای بالایی جو با گام زمانی ۶ ساعته است که شامل شرایط ورد سپهر و پوشش سپهر، امواج اقیانوسی و ویژگی‌های سطحی است (دی و همکاران، ۲۰۱۱). در این بررسی الگوهای فشار تراز دریا و ضخامت ۱۰۰۰/۵۰۰ هکتوپاسکال، ارتفاع ژئوپتانسیل و دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال همراه با تاوایی نسبی این تراز، سرعت قائم باد در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال و همچنین رطوبت نسبی و باد تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال به منظور شناسایی شرایط جوی ریزش بهمن از ابتدا تا انتهای رخداد، مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش، همچنین، با استفاده از نسخه ۳٫۹ مدل عددی میان‌مقیاس WRF، شبیه‌سازی پارامترهای جوی از تاریخ ۲۶ تا ۲۹ دسامبر ۲۰۱۶ به مدت چهار روز انجام گرفت. اجرای مدل، برای روز ۲۵ دسامبر ساعت ۱۲ UTC تا روز ۲۹ دسامبر ساعت

شرایط جوی با بارش برف سنگین، وقوع بارش باران پس از برف یا افزایش دمای قابل توجه پس از بارش برف شدید، امکان رخداد بهمن را برای کاربران غیر تخصصی نیز امکان‌پذیر می‌سازد. با انتخاب مطالعه موردی یاد شده، درواقع، کوشش شده است آستانه‌های معرفی شده در جدول‌های ۱ تا ۴ بند ۲، برای شرایطی آزمون شوند که رخداد بهمن چندان قابل پیش‌بینی نباشد. به همین منظور ابتدا در بند سوم به بررسی شرایط همدیدی منطقه در مطالعه موردی پرداخته می‌شود و سپس شاخص‌های رخداد بهمن بررسی می‌شوند.

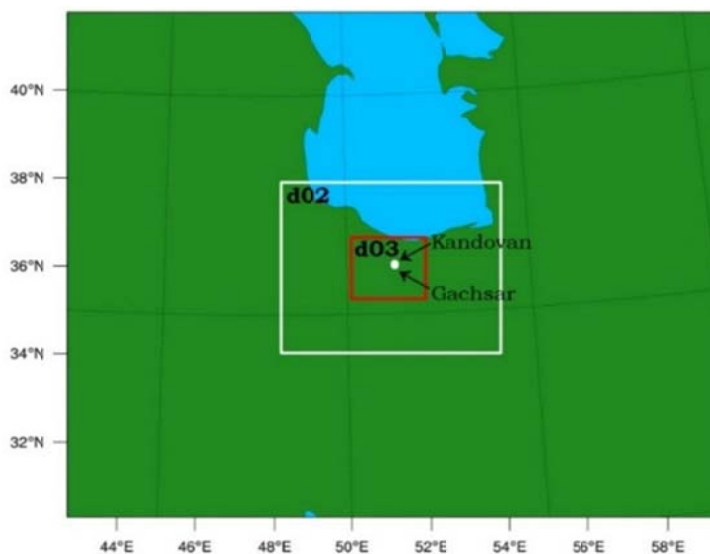
در تحلیل همدیدی، با توجه به ارتفاع کوه‌های منطقه مورد مطالعه، بررسی نقشه‌های جو بالا در ترازهای ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال (تقریباً معادل ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متر) ارزیابی می‌شود. الگوهای فشار تراز دریا و ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز به منظور بررسی شرایط جوی حاکم، در نظر گرفته شده‌اند. بررسی شرایط همدیدی با استفاده از داده‌های ERA-Interim در گام زمانی ۶ ساعته انجام شده است. داده‌های ERA-Interim داده‌های باز تحلیل جوی در مقیاس جهانی است که توسط مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت (ECMWF-

طول موج بلند انجام می‌دهد (ملاور و همکاران، ۱۹۹۷). برای مدل‌سازی طول موج کوتاه، از نسخه تغییر یافته طرح‌واره RRTM به نام RRTMG با قابلیت شبیه‌سازی تغییرات توده‌های ابر با مقیاس کمتر از تفکیک مکانی شبکه‌ای استفاده شد (لاکونو و همکاران، ۲۰۰۸). طرح‌واره Mellor-Yamada-Janjic به‌عنوان یک طرح‌واره پیش‌یابی یک‌بعدی برای انرژی جنبشی تلاطمی با در نظر گرفتن شار قائم محلی مدل‌سازی لایه‌مرزی سیاره‌ای استفاده گردید. برای لایه سطحی از مدل ETA و بر پایه طول زبری مومین-اوبوخوف و توابع استاندارد مربوط به نظریه شباهت استفاده شد (یانج و همکاران، ۲۰۰۲). مدل سطح زمین (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA) با در نظر گرفتن دما و رطوبت خاک در چهار لایه، پوشش برف و فیزیک خاک در دماهای انجماد برای فیزیک سطح زمین استفاده شد (تواری و همکاران، ۲۰۰۴).

حوزه‌های شبیه‌سازی برای اجرای مدل WRF به‌صورت سه حوزه تودرتو آماده شدند (شکل ۳). دقت تفکیک مکانی برای این سه حوزه به ترتیب ۱۸ کیلومتر برای حوزه اصلی، ۶ کیلومتر برای حوزه دوم و ۲ کیلومتر برای حوزه سوم انتخاب شدند.

UTC ۰۰ انجام شده و با لحاظ نمودن ۱۲ ساعت spin up اطلاعات از روز ۲۶ دسامبر ساعت ۰۰ UTC در نظر گرفته شده است. داده‌های مورد نظر از برای شرایط مرزی و اولیه جوی از داده‌های پیش‌بینی GFS با تفکیک افقی 0.5° که از محصولات مراکز ملی پیش‌بینی محیطی (NCEP-National Centers for Environmental Prediction) در ایالات متحده است، استفاده شده است. برخی از مهم‌ترین طرح‌واره‌های انتخاب شده برای بخش فیزیک مدل WRF در شبیه‌سازی‌های عددی بارش برف به‌عنوان یک پارامتر جوی کوچک مقیاس، به شرح زیر می‌باشند:

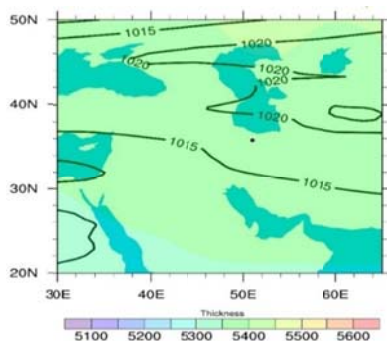
طرح‌واره تامسون برای شبیه‌سازی فرآیندهای میکروفیزیک ابر، یک طرح‌واره جدید است که فرآیندهای مرتبط با یخ، برف و گویچه‌برف را شبیه‌سازی نموده و برای مدل‌سازی جوی با تفکیک مکانی بالا مناسب است (تامسون و همکاران، ۲۰۰۸). طرح‌واره پارامترسازی کومولوسی، طرح‌واره Tiedtke نام دارد که با شبیه‌سازی شار جرمی، انواع فرارفت‌های عمیق و نیمه‌عمیق در جو را وارد فرآیند مدل‌سازی می‌کند (تیک، ۱۹۸۹). طرح‌واره RRTM به‌عنوان طرح‌واره طول موج بلند، یک مدل تابشی دقیق و سریع است که محاسبه شارها و آهنگ کاهش دما را در



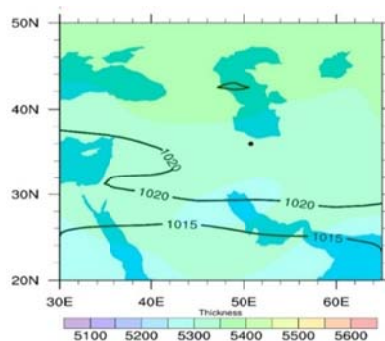
شکل ۳. حوزه شبیه‌سازی اصلی و زیر حوزه‌ها به‌صورت تودرتو به همراه موقعیت شهرهای کندوان و گچسار.

همراه با رطوبت نسبی، باد و دما در تراز ۸۵۰ هکتو پاسکال در این بررسی مطالعه شده‌اند که در ادامه به بررسی آنها پرداخته می‌شود.

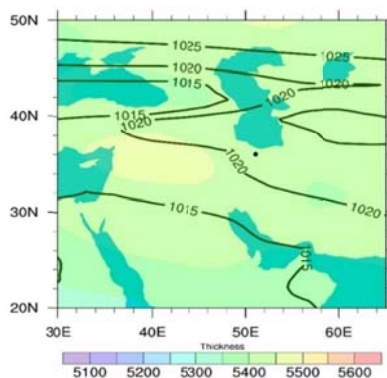
الگوهای فشار تراز میانگین دریا در روز ۲۶ دسامبر گرادیان فشاری بسیار ضعیفی را در نیمه شمالی کشور نشان می‌دهد که به تدریج در حال تقویت شدن است (شکل ۴-الف). این وضعیت برای ۲۴ ساعت بعد، افزایش فشار را در منطقه نشان می‌دهد و زبانه‌ی هم‌فشار ۱۰۱۸ (شکل ۴-ب). این شرایط برای روز ۲۸ دسامبر همچنان ادامه دارد و فشار در منطقه البرز به بیش از ۱۰۲۰ هکتوپاسکال می‌رسد. در روز ۲۹ دسامبر نیز افزایش نسبی گرادیان فشار در نیمه شمالی کشور دیده می‌شود (شکل ۴-د). تغییر در الگوهای ضخامت ۵۰۰/۱۰۰۰ چندان قابل توجه نیست و طی روزهای ۲۶ تا ۲۹ دسامبر، بین ۵۲۰۰ تا ۵۳۰۰ ژئوپتانسیل متر متغیر است.



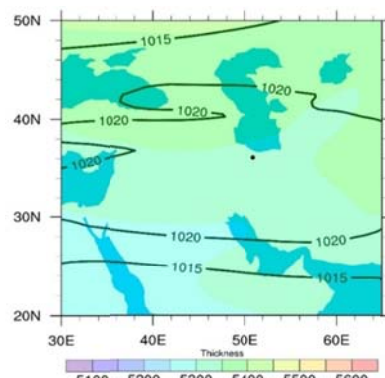
ب) ۲۷ دسامبر ۲۰۱۶



الف) ۲۶ دسامبر ۲۰۱۶



ت) ۲۹ دسامبر ۲۰۱۶



پ) ۲۸ دسامبر ۲۰۱۶

شکل ۴. الگوی فشار میانگین تراز دریا بر حسب hPa (خطوط توپر) و ضخامت ۵۰۰/۱۰۰۰ بر حسب متر (نواحی سایه زده شده) روزهای ۲۶ تا ۲۹ دسامبر ۲۰۱۶. نقطه تو پر سیاه موقعیت شهرستانک می‌باشد.

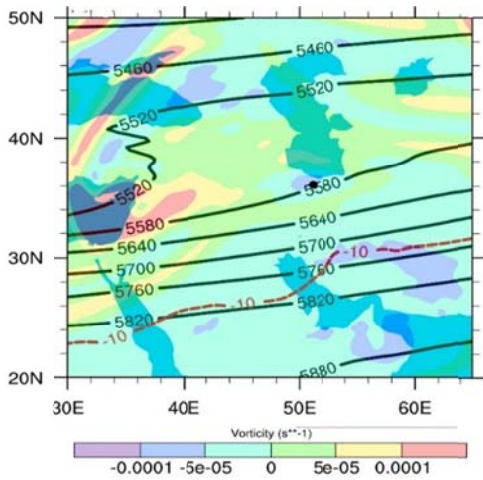
شاخص‌های آب معادل برف و ضخامت برف مهم‌ترین برون‌دادهای مدل پیش‌بینی عددی برای شبیه‌سازی بر اساس روش ارائه شده در بند بالا می‌باشند که در این مطالعه برای بازه زمانی منتخب و در منطقه مورد مطالعه یاد شده، تهیه شده‌اند.

۴. بحث و نتایج

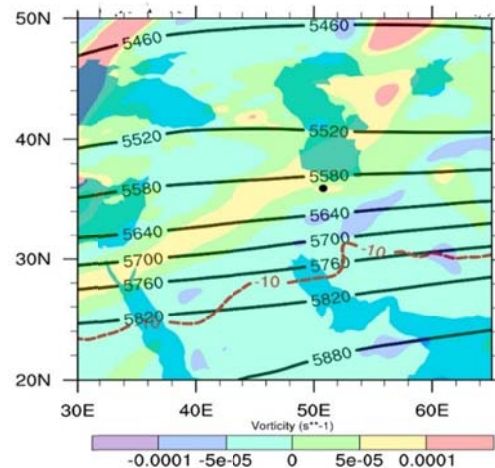
رخدادهای مهم در مطالعه موردی منتخب، روز ۲۷ دسامبر ۲۰۱۶ گزارش شده است. برای بررسی همدیدی این مطالعه موردی، مدل WRF برای بازه ۲۶ تا ۲۹ دسامبر اجرا شده است. در این بررسی از داده‌های ERA-Interim با گام زمانی ۳ ساعته استفاده و به صورت روزانه، میانگین‌گیری شده است. پارامتر میانگین فشار در تراز دریا و ضخامت ۵۰۰/۱۰۰۰، ارتفاع ژئوپتانسیل همراه با تاوایی نسبی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، ارتفاع ژئوپتانسیل و سرعت قائم باد در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال و ارتفاع ژئوپتانسیل

شده است تا ارتفاع این تراز در منطقه افزایش نیافته و همچنان ۵۵۸۰ ژئوپتانسیل متر باشد. در این روز تاوایی نسبی حدود صفر است (شکل ۵-ب). طی روزهای ۲۸ و ۲۹ دسامبر نیز روند افزایش ارتفاع روی کشور دیده می‌شود. از این رو به نظر می‌رسد در لایه‌های بالایی جو شرایط برای ایجاد ناپایداری مناسب نیست (شکل‌های ۵-چ و ۵-ت).

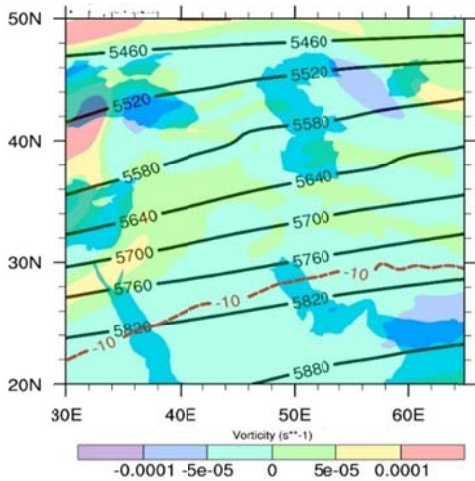
در نقشه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال روز ۲۶ دسامبر ۲۰۱۶ جریان‌های مداری از شمال کشور در حال عبور می‌باشد. زیانه ارتفاع زیاد ضعیفی روی دریای سیاه شکل گرفته است (شکل ۵-الف). تاوایی نسبی در این روز حدود $5 \times 10^{-5} s^{-1}$ است. در روز ۲۷ دسامبر موج ضعیفی در غرب دریای مدیترانه شکل گرفته است و در حال نزدیک شدن به شمال غرب ایران می‌باشد. این شرایط موجب



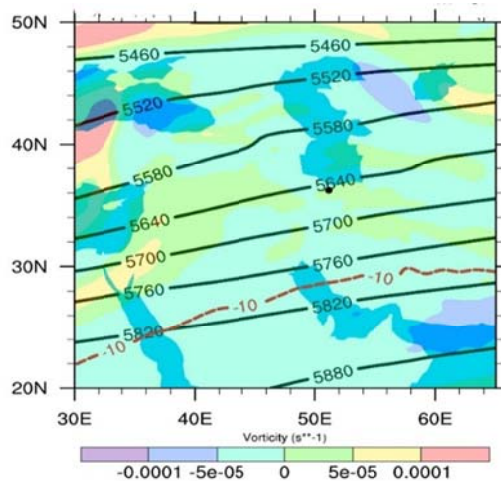
ب- ۲۷ دسامبر ۲۰۱۶



الف) ۲۶ دسامبر ۲۰۱۶



ت) ۲۹ دسامبر ۲۰۱۶

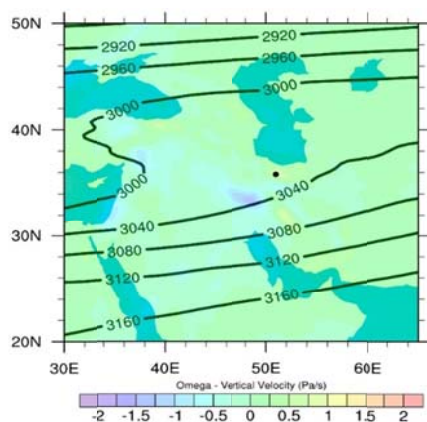


پ) ۲۸ دسامبر ۲۰۱۶

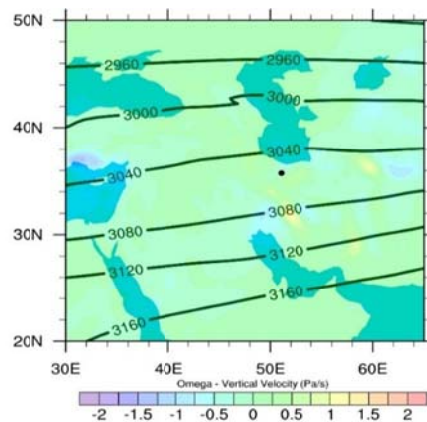
شکل ۵. الگوی ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰ mb بر حسب متر (خطوط توپر سیاه)، دما بر حسب درجه سلسیوس (خط چین قرمز) و تاوایی نسبی بر حسب بر ثانیه (مناطق سایه زده شده) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال روزهای ۲۶ تا ۲۹ دسامبر ۲۰۱۶. نقطه تو پر سیاه موقعیت شهرستانک می‌باشد.

طول موج کوتاه به سمت ایران امکان پذیر می باشد. این شرایط، با افت ارتفاع در تراز ۷۰۰ میلی بار همراه است به گونه ای که ارتفاع در منطقه شهرستانک حدود ۲۰ ژئوپتانسیل متر کاهش یافته است. در این روز سرعت قائم حدود ۱ پاسکال بر ثانیه است (شکل ۶-ب). با عبور موج یاد شده، دوباره ارتفاع زیاد بر منطقه حاکم می شود و ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در شهرستانک به بیشتر از ۳۰۴۰ ژئوپتانسیل متر می رسد. سرعت قائم در این روز تغییری نسبت به ۲۴ ساعت گذشته ندارد (شکل ۶-پ). در روز ۲۹ دسامبر نیز روند افزایش ارتفاع همچنان ادامه دارد و به مقدار ۳۰۸۰ ژئوپتانسیل متر می رسد (شکل ۶-ت).

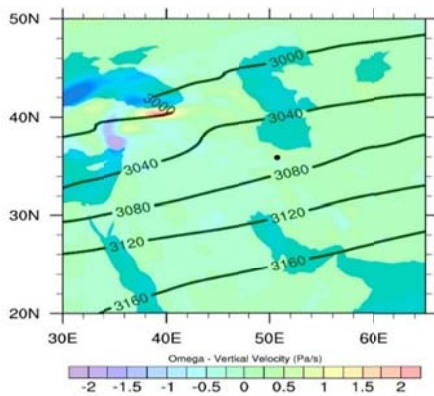
در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، شرایط جوی تقریباً مشابه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال است. در روز ۲۶ دسامبر زبانه های ارتفاع زیاد روی کشور دیده می شود. ارتفاع این تراز در منطقه مورد مطالعه بیشتر از ۳۰۴۰ ژئوپتانسیل متر می باشد. ضمن اینکه سرعت قائم قابل توجه نیست (شکل ۶-الف). با شکل گیری تدریجی موجی در شرق دریای مدیترانه، امواج کوتاه به نوار شمالی ایران ارسال می شوند. در این روز پربند ۳۰۷۵ ژئوپتانسیل متر از روی منطقه البرز عبور نموده است. الگوی دما نیز نفوذ ناوه هوای سردی را از غرب ایران نشان می دهد و هم دمای ۲۷۰/۵ درجه (شکل ۶-الف). در روز بیست و هفتم دسامبر، کم ارتفاع عمیقی در شرق مدیترانه کاملاً شکل گرفته است و ارسال امواج با



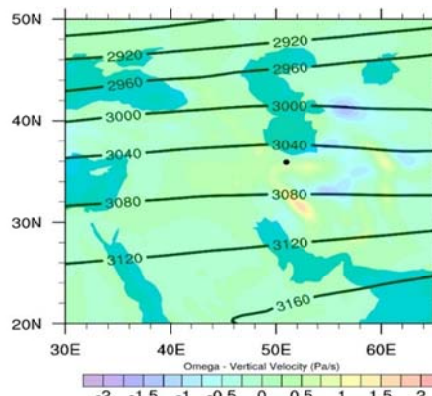
ب- ۲۷ دسامبر ۲۰۱۶



الف) ۲۶ دسامبر ۲۰۱۶



ت) ۲۹ دسامبر ۲۰۱۶



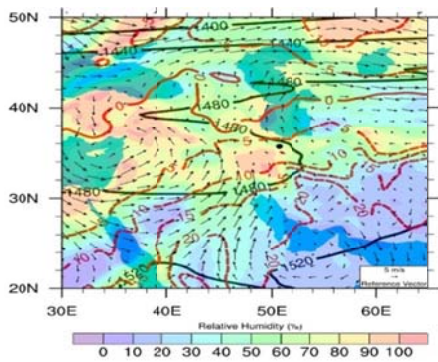
پ) ۲۸ دسامبر ۲۰۱۶

شکل ۶. الگوی ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۷۰۰ mb بر حسب متر (خطوط توپر سیاه) و سرعت قائم بر حسب پاسکال بر ثانیه (مناطق سایه زده شده) تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال روزهای ۲۶ تا ۲۹ دسامبر ۲۰۱۶. نقطه توپر سیاه موقعیت شهرستانک می باشد.

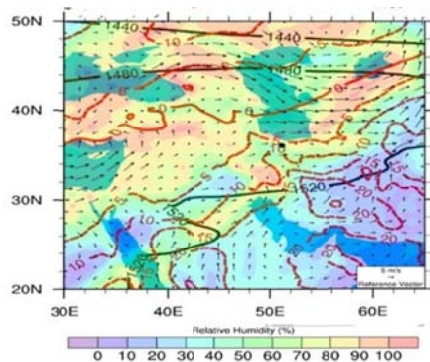
نهم دسامبر سرعت و جهت بادهای تغییر یافته و بادهای جنوبی ضعیف در منطقه حاکم می‌شود (شکل ۷-ت).

الگوی آب معادل برف در شکل ۸ آمده است. مقادیر آب معادل برف بر حسب kg/m^2 می‌باشد که با فرض $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ می‌توان مقادیر عددی این شاخص را معادل مقدار آن بر حسب میلی‌متر در نظر گرفت. همان‌گونه که در شکل ۸ دیده می‌شود، مقدار آب معادل برف روز ۲۶ دسامبر به‌طور میانگین ۳۰ تا ۴۵ میلی‌متر برآورد شده است که این مقدار به علت بارش برف جدید و تخمین آن به‌صورت تجمعی، به تدریج افزایش یافته است به‌گونه‌ای که برای روز ۲۷ دسامبر مقدار آن به ۴۵ تا ۶۰ میلی‌متر در منطقه مورد مطالعه (محدوده‌ی شهرستانک در جاده چالوس) رسیده است و تا روز بیست و هشتم تغییر خاصی در آن دیده نمی‌شود (شکل ۸).

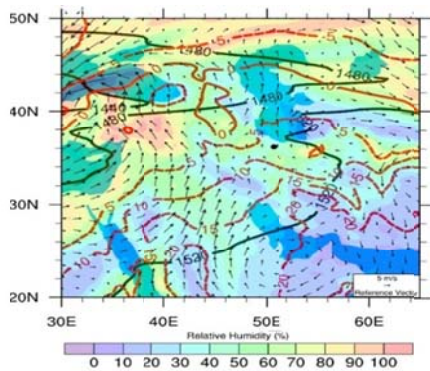
تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در روز ۲۶ دسامبر استقرار زبانه ارتفاع زیاد را در نیمه جنوبی کشور نشان می‌دهد که منطقه شهرستانک رشته‌کوه البرز را هم پوشش داده است. پربند ۱۵۰۰ ژئوپتانسیل متر در این روز از منطقه عبور کرده است. الگوهای دمایی عبور ناوه دما را در نوار شمالی نمایش می‌دهد که با گذر هم‌دمای 5°C در منطقه مورد مطالعه همراهی شده است. جهت بادهای غربی است (شکل ۷-الف). الگوی بادهای شکل‌گیری مرکز کم‌ارتفاع فعالی در شرق مدیترانه در روز ۲۷ دسامبر نشان می‌دهد در این روز منطقه مورد مطالعه شهرستانک، در دامنه ناوه این تراز قرار دارد. رطوبت نسبی در این روز به ۸۰ درصد می‌رسد. (شکل ۷-ب). با عبور ناوه یاد شده در روز ۲۸ دسامبر از منطقه، بادهای غربی با سرعت بیشتری حاکم شده و رطوبت به بیش از ۹۰ درصد افزایش می‌یابد (شکل ۷-پ). برای روز بیست و



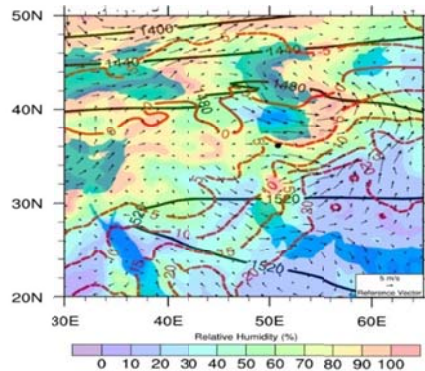
ب- ۲۷ دسامبر ۲۰۱۶



الف) ۲۶ دسامبر ۲۰۱۶

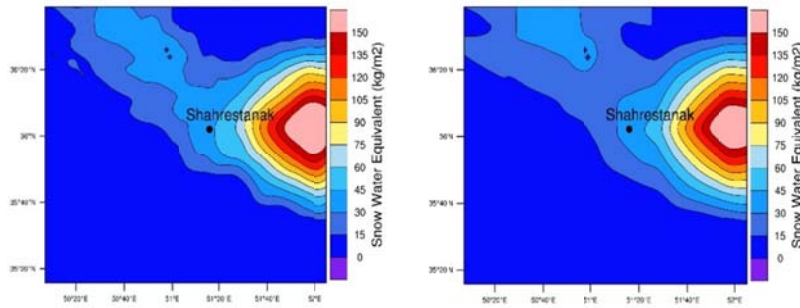


ت) ۲۹ دسامبر ۲۰۱۶



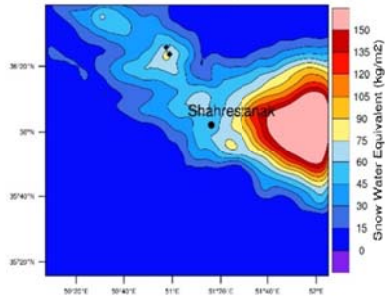
پ) ۲۸ دسامبر ۲۰۱۶

شکل ۷. الگوی ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۸۵۰ mb بر حسب متر (خطوط توپر سیاه)، دما بر حسب درجه سلسیوس (خط‌چین قرمز) و رطوبت نسبی بر حسب درصد (مناطق سایه زده شده) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال روزهای ۲۶ تا ۲۹ دسامبر ۲۰۱۶. نقطه توپر سیاه موقعیت شهرستانک می‌باشد.



ب) ۲۷ دسامبر

الف) ۲۶ دسامبر

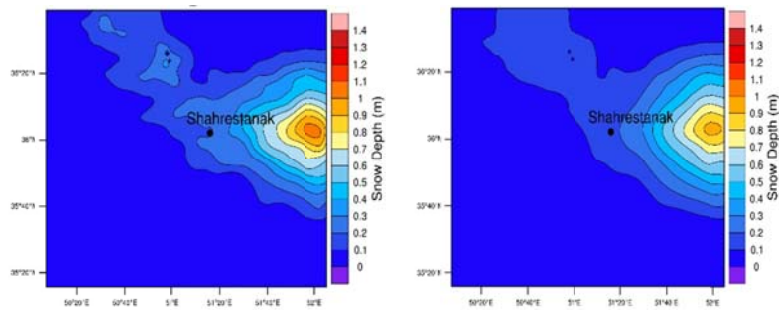


پ) ۲۸ دسامبر

شکل ۸. الگوی میانگین روزانه آب معادل برف بر حسب kg/m^2

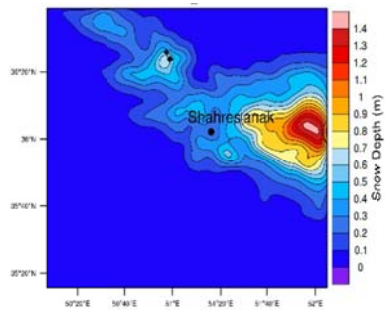
بعدی، مقدار آن به ۳۰ سانتی‌متر افزایش یافته است (شکل ۹-ب). روز بیست و هشتم دسامبر میانگین این شاخص در منطقه شهرستانک تغییری نداشته است (شکل ۹-پ).

مقادیر شاخص ضخامت برف نیز مشابه الگوی شکل ۹ رفتار نموده است به‌گونه‌ای که مقادیر عددی این شاخص در روز ۲۶ دسامبر بین ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر پیش‌بینی شده (شکل ۹-الف) و طی ۲۴ ساعت



ب) ۲۷ دسامبر

الف) ۲۶ دسامبر



پ) ۲۸ دسامبر

شکل ۹. الگوی میانگین روزانه ضخامت برف بر حسب متر.

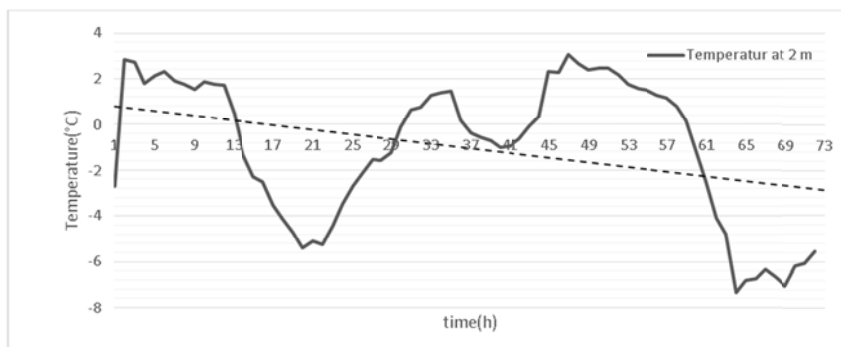
(روز رخداد بهمن) به‌جز ۵ ساعت (ساعت‌های ۱۲ تا ۱۵ روز بیست و هفتم) بالاتر از دمای یخندان بود. این شرایط از ساعت ۰۶ روز بیست و هفتم تا ۱۲ روز بیست و هشتم دسامبر دیده شده است که با لحاظ نمودن ۵ ساعت ریز صفر، ۲۴ ساعت می‌باشد. از این‌رو به نظر می‌رسد این شرایط به سقوط بهمن کمک نموده است. بنابراین بر اساس جدول ۲، ردیف‌های اول و سوم در این مطالعه برای پتانسیل نامشخص رخداد بهمن مناسب است. همچنین در ردیف دوم شرایط ماندگاری دما در دماهای کمتر از 4°C نیز وجود ندارد. از این‌رو، در این ردیف نیز شاخص پتانسیل نامشخص رخداد بهمن وجود دارد. در این مطالعه موردی، بر اساس خروجی‌های مدل پیش‌بینی عددی WRF، ماندگاری در دماهای خیلی سرد تجربه نشده است.

مقادیر پیش‌بینی باد ۱۰ متری به‌عنوان شاخص جدول ۳ نیز برای روزهای ۲۶ تا ۲۹ دسامبر ۲۰۱۶ در شکل ۱۱ آمده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، این شاخص طی روزهای مورد مطالعه، کمتر از ۷ متر بر ثانیه می‌باشد. لذا به نظر می‌رسد عامل باد تأثیری در رخداد بهمن در این مطالعه نداشته است.

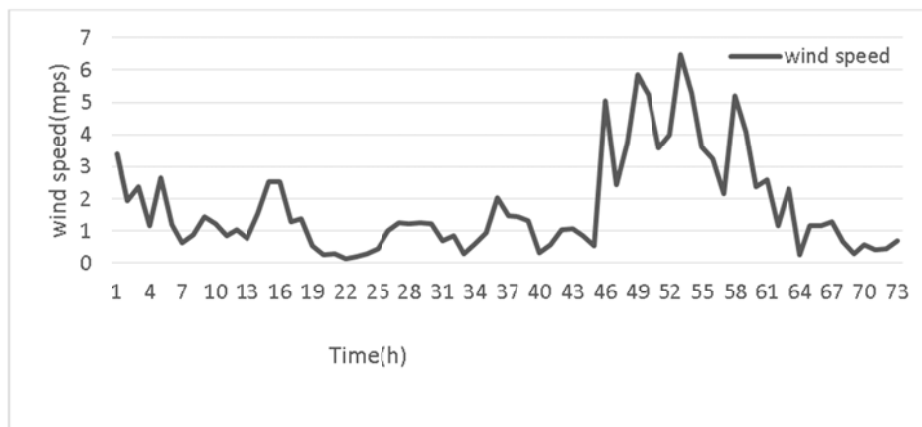
پوشش ابر شاخص مهم دیگری است که تابش شبانه و روزانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شب‌های سرد و بدون ابر با دمای بسیار پایین برای مدت چند شب، لایه‌های برف روی زمین را تضعیف می‌کند. پوشش ابر پایین (تراز ۷۰۰ هکتو پاسکال) به‌صورت میانگین روزانه برای روزهای مورد مطالعه به شرح شکل ۱۲ می‌باشد.

به‌این ترتیب شاخص‌های آب معادل برف و ضخامت برف در بازه ۲۴ ساعته ۲۶ تا ۲۷ دسامبر، به ترتیب ۱۰ سانتی‌متر و بیش از ۲۵ میلی‌متر افزایش یافته است از این‌رو ردیف‌های ۱ و ۲ جدول ۱ (مربوط به شاخص‌های بارش) بر اساس پیش‌بینی مدل WRF، به ترتیب معرف پتانسیل نامشخص و پتانسیل بالا برای رخداد بهمن هستند. روند توفان (تغییرات دمایی توفان از شروع تا خاتمه آن) که در ردیف ۳ جدول ۱ آمده است، معرف تغییرات دمایی در روز ۲۷ دسامبر می‌باشد. با توجه به اینکه ریزش بهمن در بعد از ظهر روز بیست و هفتم گزارش شده است، تغییرات دما بر اساس نمودار شکل ۱۱، نشان‌دهنده‌ی شروع سرما (ابتدای روز ۲۷ دسامبر) با دمای 2°C است که زمان ۲۴ روی محور زمان می‌باشد و خاتمه گرم با دمای 3°C که زمان ۴۸ روی محور زمان می‌باشد. از این‌رو ردیف ۳ جدول ۱ نیز پتانسیل بالای رخداد بهمن را نشان می‌دهد. نوع بارش بر اساس مدل پیش‌بینی عددی WRF برای روز ۲۷ دسامبر از نوع برف خفیف می‌باشد از این‌رو ردیف ۴ جدول ۱ در این مطالعه، پتانسیل نامشخص را برای رخداد بهمن نشان می‌دهد.

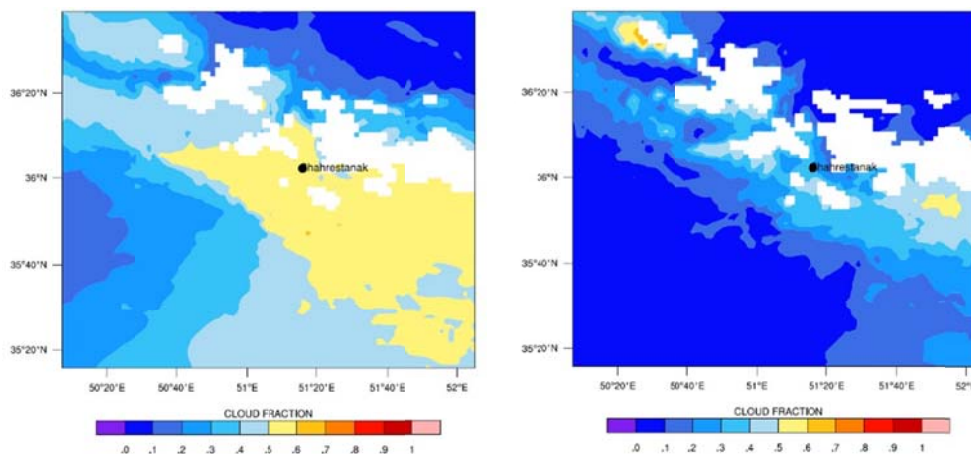
تغییرات دمای پیش‌بینی شده در ایستگاه شهرستانک طی روزهای ۲۶ تا ۲۸ دسامبر ۲۰۱۶، در نمودار شکل ۱۱ آمده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، تغییرات دما طی روزهای ۲۶ و ۲۷ دسامبر در بازه 3°C تا 4°C متغیر است (ساعت‌های ۱ تا ۴۸ نمودار) که تقریباً نزدیک به صفر درجه سلسیوس می‌باشد؛ اما روز بیست و هشتم تا 8°C نیز کاهش داشته است. دمای هوای روز ۲۷ دسامبر



شکل ۱۰. تغییرات دمای پیش‌بینی شده نقطه شهرستانک از ساعت یکم روز ۲۶ تا ساعت ۲۴ روز ۲۸ دسامبر (۷۲ ساعت یا سه شبانه‌روز).

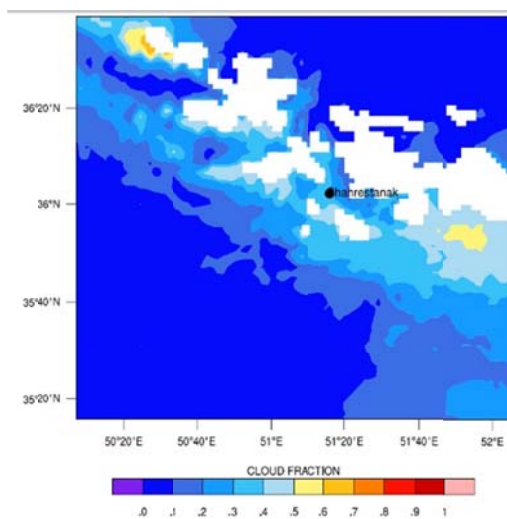


شکل ۱۱. سرعت باد برای ساعت‌های ۰۰ و ۱۲ UTC در نقاط گچسر و کندوان از روز ۲۶ تا ۳۰ ام ژانویه ۲۰۱۶.



ب) ۲۷ دسامبر - میانگین روز

الف) ۲۶ دسامبر - میانگین روز



پ) ۲۸ دسامبر - میانگین روز

شکل ۱۲. میانگین روزانه و شبانه پیش‌بینی میزان پوشش ابر پایین (تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال) برای منطقه شهرستانک.

این‌رو بند سوم نیز چندان منطبق با شرایط پتانسیل بالای رخداد بهمن نیست. با توجه به اینکه ریزش بهمن در این منطقه تنها یک‌بار رخ داده است (خبرگزاری ایرنا، دی‌ماه ۱۳۹۵)، به نظر می‌رسد در مقایسه با شرایط رخدادهایی که طی ۲۴ ساعت ۳۰ ریزش بهمن گزارش می‌شود، چندان قوی نباشد. از سوی دیگر الگوهای هم‌مدیدی حاکم بر منطقه نیز شرایط جوی مخاطره‌آمیزی را در منطقه مورد مطالعه نشان نمی‌دهد. از این‌رو پتانسیل نامشخص برای رخداد بهمن در این مطالعه، انتخاب خوبی است و وقوع بهمن را می‌توان محتمل دانست نه قطعی. لذا پیش‌بینی پتانسیل ریزش بهمن بر اساس آستانه‌های تعریف‌شده در جدول اسپانگلر در این مطالعه هم‌خوانی دارد.

همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود در روز بیست و هفتم آسمان تقریباً نیمه‌ابری است (۰/۵ تا ۰/۶ آسمان ابری است) (شکل ۱۲-ب)؛ از این‌رو امکان جذب تابش امواج کوتاه در طول روز و سرد شدن زیاد در شب را ندارد (شکل ۱۲-الف و ۱۲-پ). نتایج این بررسی بر اساس جدول‌های اسپانگلر به صورت جدول ۵ خلاصه می‌شود. موارد مستخرج مربوط به این مقاله رنگی شده‌اند. در این جدول، دیده می‌شود که شاخص باد نقشی در این رخداد ندارد. سایر موارد مرتبط، به‌جز بندهای ۲ و ۳ (ردیف‌های ۱، ۴ تا ۷، ۱۱ و ۱۲) بر پتانسیل نامشخص رخداد بهمن دلالت می‌کنند. در بند سوم نیز حدود ۵ ساعت روند توفان نامنظم شده است که دقیقاً نمی‌توان بر پتانسیل بالای رخداد بهمن در این بند صحنه گذاشت. از

جدول ۵. بررسی تمامی شاخص‌های جدول‌های ۱ تا ۴ در یک نگاه برای مطالعه موردی ریزش بهمن ۲۶ تا ۲۹ دسامبر ۲۰۱۶.

ردیف	شاخص بارش	پتانسیل بالا برای رخداد بهمن	پتانسیل نامشخص برای رخداد بهمن	پتانسیل کم برای رخداد بهمن
۱	مقدار برف تازه	۳۰ سانتی‌متر یا بیشتر در ۲۴ h	کمتر از ۳۰ سانتی‌متر در ۲۴ h	برف تازه نیاریده است
۲	آب معادل برف	۲۵ میلی‌متر یا بیشتر در ۲۴ h	کمتر از ۲۵ میلی‌متر در ۲۴ h	آب معادل برف تازه موجود نیست
۳	روند توفان	شروع سرد و پایان گرم	شروع گرم و پایان سرد	دما در محدوده ۳- تا ۷°C-
۴	باران	رخداد هر نوع باران	بدون باران	بدون باران
۵	افزایش دما	افزایش بیش از ۸°C در ۱۲ h در دماهای نزدیک و کمی بالای ۰°C	افزایش کمتر از ۸°C در ۱۲ h در دماهای نزدیک و کمی کمتر از ۰°C	افزایش تدریجی دما طی چند روز (زیر ۰°C صفر)
۶	کاهش دما	-	ماندگاری دما بین ۱۰- تا ۴°C- ندارد	کاهش دما در پی دمای گرم موجود
۷	دماهای گرم	بالای دمای یخبندان برای بیشتر از ۲۴ h	بالای دمای یخبندان برای ۱۲ تا ۲۴ h	-
۸	دماهای سرد	دماهای بسیار سرد (کمتر از ۱۰°C-)	ماندگاری دما بین ۱۰- تا ۴°C-	-
۹	میانگین سرعت باد	۹ تا ۲۷ متر بر ثانیه	کمتر از ۹ یا بیشتر از ۲۷ متر بر ثانیه	آرام و کمتر از ۷ متر بر ثانیه
۱۰	میانگین سمت باد	ثابت	متغیر	متغیر
۱۱	پوشش آسمان در شب	آسمان‌های صاف با دمای کمتر از ۱۰°C- و بادهای ۵ m/s یا کمتر	-ابری - آسمان صاف با دماهای نسبتاً خوب -نیمه‌ابری همراه با باد بیشتر از ۵ m/s	-
۱۲	پوشش آسمان در روز	آسمان‌های صاف یا ابرهای نازک با دماهای گرم، به‌ویژه در شیب‌های رو به خورشید	تمام ابری ضخیم	-

۵. نتیجه گیری

این مطالعه با هدف تهیه پیش‌بینی بهمن به کمک مدل‌های پیش‌بینی عددی انجام شده است. از آنجا که داده‌های دیدبانی سازمان هواشناسی در مناطق کوهستانی ناچیز است، دسترسی به اطلاعات برف در اندازه‌گیری‌های زمینی چندان میسر نیست و به نظر می‌رسد برون‌دادهای مرتبط مدل‌های پیش‌بینی عددی، راه‌حل مناسبی برای حدس اولیه رخداد بهمن باشند. به همین منظور در این مطالعه سه مورد رخداد بهمن برای بازه زمانی ۲۶ تا ۲۹ دسامبر ۲۰۱۶ که در محدوده شهرستانک جاده چالوس رخ داده‌اند به صورت موردی، ابتدا بررسی همدیدی شده و سپس برون‌دادهای آب معادل برف، ضخامت برف، دما و باد مدل پیش‌بینی عددی بر اساس جدول‌های طبقه‌بندی شده اسپانگلر به منظور تعیین پتانسیل رخداد بهمن مطالعه شده‌اند.

بررسی شرایط همدیدی با استفاده از داده‌های ERA Intrim در گام زمانی ۶ ساعته انجام شده است. سپس به صورت روزانه میانگین‌گیری شده‌اند. همچنین، با استفاده از نسخه ۳،۹ مدل عددی میان‌مقیاس WRF، شبیه‌سازی پارامترهای جوی به مدت چهار روز انجام گرفت. حوزه‌های شبیه‌سازی برای اجرای مدل WRF به صورت سه حوزه تودرتو آماده شدند و دقت تفکیک مکانی برای این سه حوزه به ترتیب ۱۸، ۶ و ۲ کیلومتر انتخاب شدند.

برای بررسی پیش‌بینی پتانسیل وقوع بهمن، از روش اسپانگلر و همکاران استفاده شده است. در این روش سه دیدگاه، شرایط اقلیمی منطقه، وضع هوای حاضر و پیش‌بینی وضع هوا در کنار هم بررسی می‌شوند و امکان وقوع بهمن را پیش‌بینی می‌کند. در این مطالعه به منظور بررسی برون‌دادهای مرتبط مدل پیش‌بینی عددی، تنها بخش سوم لحاظ می‌شود. در این بخش برون‌دادهای دما، بارش، ابرناکی و باد همچنین آب معادل برف، ضخامت برف، روند توفان (بر اساس تغییرات دما) و نوع بارش پس از برف، مشخصه‌هایی هستند که آستانه‌های آنها برای سه

حالت پتانسیل بالا، پتانسیل پایین و پتانسیل نامشخص برای رخداد بهمن توسط اسپانگلر تعیین و شناسایی شده‌اند. برای پیش‌بینی شرایط هواشناسی ریزش بهمن در نظر گرفته شده است.

مطالعه همدیدی الگوهای فشار تراز دریا، ضخامت ۱۰۰۰/۵۰۰، ارتفاع ژئوپتانسیل ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ میلی‌بار همراه با مشخصه‌های سرعت قائم (در تراز ۷۰۰)، تاوایی نسبی (در تراز ۵۰۰) و رطوبت نسبی، باد و دما (در تراز ۸۵۰) برای بررسی همدیدی در نظر گرفته شدند. این بررسی نشان داد زبانه‌های سامانه پرفشار سیبری روی منطقه حاکم شده اما فشار هوا از ۱۰۲۲ بیشتر نیست. در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال جریان‌های مداری در حال گذار از روی منطقه است و موج ضعیفی از شرق مدیترانه آغاز شده و از نوار شمالی ایران عبور می‌کند. تغییرات تاوایی نسبی در این تراز چندان قابل توجه نیست. در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز رطوبت از دریای مدیترانه و سرخ به داخل کشور تزریق می‌شود اما دوره عمر آن کوتاه است. بررسی مقادیر آستانه‌ای جدول اسپانگلر نیز معرف پتانسیل نامشخص رخداد بهمن است؛ زیرا مطالعه موردی انتخاب شده شرایط جوی قابل توجهی برای رخداد بهمن ندارد و در دوره ۲۴ ساعت تنها یک مرتبه در منطقه مورد مطالعه بهمن سقوط کرده است. از این رو جدول ۵ نیز شرایط پتانسیل نامشخص را شناسایی کرده است که به نظر می‌رسد با واقعیت تطابق دارد. آستانه‌های به دست آمده در این مطالعه شامل سرعت باد کمتر از ۹ m/s، بارش برف کمتر از ۳۰ سانتی‌متر در ۲۴ ساعت، افزایش دمای کمتر از ۸ در ۱۲ ساعت، عدم ماندگاری دما در محدوده ۴- تا ۱۰°C- و آسمان نیمه‌ابری در طول روز بدون بارش باران می‌باشد که بر احتمال رخداد بهمن و نه قطعیت آن تأکید دارد و برای پیش‌بینی پتانسیل بالای وقوع بهمن، آستانه‌های جوی باید بالاتر از مقادیر یاد شده باشند. لازم به ذکر است به منظور اجرای عملیاتی پیش‌بینی بهمن به کمک جدول اسپانگلر، باید ابتدا شرایط اقلیمی منطقه از لحاظ

شده است و به نظر می‌رسد نتیجه به‌دست‌آمده قابل قبول باشد.

مراجع

تاج‌بخش، س.، رهنما، م. و نیک‌فال، الف. ح.، ۱۳۹۷، مقایسه پوشش برف بین برون‌داد یک مدل پیش‌بینی عددی و داده‌های سنجنده MODIS در ایران، نشریه تحقیقات منابع آب (زیر چاپ).

Armstrong, R. L. and Brun, E. (Eds.), 2010, Snow and Climate. Cambridge University Press, 222 pp.

Bartelt, P. B. and Lehning, M., 2002, A physical SNOWPACK model for avalanche warning. Part I: Numerical model. Cold Reg. Sci. Technol., 35, 123–145

Brun, E., David, P., Sudul, M. and Brunot, G., 1992, A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. J. Glaciol., 38, 13–22.

Brun, E., Martin, E., Gendre, V. S. C. and Coleou, C., 1989, An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting. J. Glaciol., 35, 333–342.

Comiso, J., Cavalieri, D. and Markus, T., 2003, Sea ice concentration, ice temperature, and snow depth using AMSR-E data. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 41, 243–252.

Cox, S. and Fulvaas, K., 2003, The freedom of the hills Mountaineers Books Mountaineers (Society) Edition 7, illustrated The Mountaineers Books, ISBN 978-0-89886-827-2, pages 346, 347.

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

Ducharm, P., Houdayer, A. Y., Choquette, Y., and Kapfer, B., 2015, Numerical Simulation of Terrestrial Radiation over a Snow Cover, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 32, 1478, 1485.

Etchevers, P. and Martine, E., Brown, R., Fierz, Ch., Lejeune, Y. and Bazili, E., 2004, Validation of the energy budget of an alpine snowpack simulated by several snow models (SnowMIP project). Ann. Glaciol., 38, 150–158.

Frei, A., Brown, R., Miller, J. A. and Robinson, D. A., 2005, Snow mass over North America: Observations and results from the second

دما و رطوبت، جنس زمین، نوع بسته برف، اقلیم بهمن و غیره شناخته شود؛ سپس شرایط فعلی حاکم بر منطقه مانند دما، باد، فشار، بهمن‌های اخیر انواع بارش‌های برف یا باران و غیره شناسایی شود و در نهایت به کمک مدل پیش‌بینی عددی پتانسیل رخداد بهمن شناسایی شود که در این مقاله تنها بخش سوم آن در یک مطالعه موردی، به‌منظور شناسایی دقت مدل پیش‌بینی عددی و امکان استفاده از جدول اسپانگلر برای بررسی رخداد بهمن انجام

phase of the atmospheric model intercomparison project. J. Hydrometeor., 6, 681–695.

Gustafsson, D., Stahli, M. and Jansson, P. E., 2001, The surface energy balance of a snow cover: Comparing measurements to two different simulation models. Theor. Appl. Climatol., 70, 81–96.

Iacono, M., Mlawer, E., Collins, W., 2008, RTMIP Forcing for the AER Models and Status of the RRTMG Applications, Oral presentation at the ARM Radiative Process Working Group Meeting, Princeton, New Jersey.

Janjic Zavisa, I., 1994, The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. Mon. Wea. Rev., 122, 927–945.

Janjic, Z. I., 2002, Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model. NCEP Office Note No. 437, 61 pp.

Kottek, M., 2011, Comments on: 'The thermal zones of the Earth' by Wladimir Köppen (1884). Meteorologische Zeitschrift. 20(3): 361–365.

Lehning, M., Bartelt, P. Brown, B. and Fierz, C., 2002, A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part III: Meteorological forcing, thin layer formulation and evaluation. Cold Reg. Sci. Technol., 35, 169–184.

Male, D. H., and Granger, R. J. 1981, Snow surface energy exchange. Water Resour. Res., 17, 609–627.

Marty, C. and Meister, R., 2012, Long-term snow and weather observations at Weissfluhjoch and its relation to other high-altitude observatories in the Alps. Theoretical and Applied Climatology: 1-11. doi:10.1007/s00704-012-0584-3.

Mlawer, E. J., Taubman, S., J. Brown, P. D. Iacono, M. J. and Clough, S. A., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous

- atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102, 16663–16682.
- Pulliamen, J., 2006, Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and subarctic zones by assimilating spaceborne microwave radiometer data and ground-based observations. *Remote Sens. Environ.* 101, 257–269.
- Rinen, O., Eerola, K., Siljamo, N. and Koskinen, 2008, Comparison of Snow Cover from Satellite and Numerical Weather Prediction Models in the Northern Hemisphere and Northern Europe, *Journal of applied meteorology and climatology*, 49, 1199-1216.
- Roeger, C., McClung, D. Stull, R. Hacker, J. and Modzolewski, H., 2001, A verification of numerical weather forecasts for avalanche prediction. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 33, 189–205.
- Roeger, C., McClung, D. Stull, R. Hacker, J. and Modzolewski, H., 2003, *Weather and Forecasting*, 18(6), 1140-1160.
- Schirmer, M., Wirz, V., Clifton, A. and Lehning, M., 2011, Persistence in intra-annual snow depth distribution: Measurements and topographic control., *Water Resources Research*, Vol. 47, W09516, doi:10.1029/2010WR009426.
- Serquet, G., Marty, C. and Rebetz, M., 2013, Monthly trends and the corresponding altitudinal shift in the snowfall/precipitation day ratio, *Theoretical and Applied Climatology*, doi: 10.1007/s00704- 013-0847-7.
- Spangler, T., 2015, Snowpack assessment, <http://www.meted.ucar.edu/afwa/snowpack/contrib.htm>.
- Sturm, M., Holmgren, J. and Liston, G., 1995, A Seasonal Snow Cover Classification System for Local to Global Applications, *Journal of Climate*, 8, 1261-1283.
- Sturm, M., Taras, B., Liston, G., Derksen, C., Jonats, T. and Lea, J., 2010, Estimating Snow Water Equivalent Using Snow Depth Data and Climate Classes, *Journal of Hydrometeorology*, 11, 1380-1394.
- Tewari, M., Chen, F., Wang, W., Dudhia, J., LeMone, M. A., Mitchell, K., Ek, M., Gayno, G., Wegiel, J. and Cuenca, R. H., 2004, Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. 20th Conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, pp. 11–15.
- Thompson, G., Field, P., Rasmussen, R. and Hall, W., 2008, Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 5095–5115.
- Tiedtke, M., 1989, A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1779–1800.

Avalanche potential forecast using a numerical weather prediction model, (Case study: Shahrestanak zone, 26-28 December 2016)

Tajbakhsh, S.^{1*} and Nikfal, A. H.²

1. Assistant Professor, Atmospheric Survey Research Group, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran

2. Meteorology expert, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran

(Received: 22 Nov 2017, Accepted: 15 May 2018)

Summary

Avalanches are likely to happen in winter time mountainous regions of Iran, and its timely prediction can help to improve the road traffic safety. The aim of this study is to provide the avalanche first guess using Numerical Weather Prediction (NWP) model outputs. Since the meteorological observations in mountainous areas are very scarce, access to snow data in ground measurements is not feasible; it seems that making use of numerical models to simulate the associated data and predicting the avalanche first guess may be a reliable method. For this purpose, three avalanche events which occurred in Chalous Road (Kanduan-Gachsar) were investigated synoptically as the case studies. Then the precipitation (water equivalent to snow, snow thickness), temperature and wind outputs of Weather Research and Forecasting (WRF) model were analysed based on the Spangler classification tables in order to determine the potential of avalanche events.

Snow density, snow water equivalent and snow depth are the most important factors of snow cover that have fundamental applications in predicting avalanche and flood events. The predictions in this study are based on the WRF model numerical simulations. Spangler et al. (2009) presented a model for estimating the avalanche potential based on the three components of the region's climatic conditions, present weather survey and forecasting avalanche indices. For verification of the model, the threshold values for precipitation, temperature and wind were calculated in Colorado. In the present study, only the third part of the Spangler method (prediction of avalanche occurrence potential) was applied to make the first guess of avalanche potential occurrence in the mountainous regions of the country. The period 26 -29 December 2016 for heavy snow conditions with multiple avalanche was considered as a case study. The area under study is the Shahrestanak (36, 10 °N and 51.31° E) on the Chalous road, which experienced more than 10 avalanche events during winter 2016. Its elevation is about 2230 to 2240 meters and is located in Alborz Province. There are similar climatic conditions in the two regions of Colorado and Alborz based on the Gutten climate classification but their temperature and type of snowpack are different according to the Sturm snowpack classification. The type of snowpack in the Colorado area is prairie (thin and moderate cold snow covering with substantial wind drifting, with the maximum depth of about 1 meter), while the type of snowpack in Alborz area is ephemeral (thin and warm snow that melts down soon and its depth is between zero to 50 cm). Hence, it seems that the thresholds of the meteorological indicators related to avalanche potential in Alborz region could be slightly lower than its thresholds in Colorado area. The synoptic study was done using the mean daily ERA-Interim data. In the present study, the patterns of sea level pressure, thickness of 500/1000 hPa, geopotential heights and temperature with relative vorticity of 500 hPa, vertical velocity at 700 hPa, as well as relative humidity and winds of 850 hPa were studied in order to identify the weather conditions during the avalanche period. Also, using the WRF meso-scale model (ver. 3.9), the simulation of atmospheric condition is conducted for 4 days (26-29 December 2016). Temperature, wind, cloudiness, snow thickness, snow water equivalent and snow cover (the most important indicators of avalanche) were determined using the WRF numerical prediction model. Then the potential of avalanches' occurrence was investigated according to the Spangler model.

Here, we attempt to investigate the potential of avalanche event in a case study using a NWP model and determine the probability of occurrence of avalanche based on one of the existing methods. The case study was selected in such a way that no significant atmospheric conditions were observed in the area. There was only one case of avalanche over 24 hours in the Chalous Road, Shahrestanak position. The results showed that the patterns of weather forecasting in this study are in agreement with actual weather conditions and there is no specific feature for avalanche occurrence in these patterns. The presented thresholds for the avalanche potential have good match in this case study. Winds of less than 9 m/s, snow depth of less than 30 cm in 24 hours, temperature of less than 8 °C in 12 hours, unstable temperature in the range of -4 to -10°C, and cloudy sky during the day without rain emphasize the probability of avalanche and not its certainty. To predict the high potential for avalanche, the atmospheric thresholds should be higher than these values.

Keywords: Snowpack, Snow depth, Snow water equivalent, Avalanche, WRF numerical weather prediction.

* Corresponding author:

sahartajbakhsh@gmail.com