



Comparison of Snow Cover Resulting from MODIS Satellite data and a Numerical Prediction Model in Iran

S. Tajbakhsh^{1*}, M. Rahnama² and A.H. Nikfal³

Abstract

The prediction of snow cover is fundamental for runoff prediction in terms of the snow melting role. The purpose of this study was to assess the feasibility of using snow cover output of the WRF numerical prediction model in order to predict snow melting. Since there are a few snow monitoring stations in the mountainous areas of Iran, satellite data were the only widespread observation data. Accordingly, the extraction of snow cover data using MODIS sensor was addressed. Afterwards, the data was compared to the snow cover of the WRF model outputs for a case study. Finally, the results were assessed using the probability table. The studied area is located on Chalous Road, Alborz province, and the study was made for the period of January 28 to January 30, 2017 with heavy snowfall. Synoptic analysis indicated a strong pressure gradient in surface level associated with cold air in the middle layer of the atmosphere. Overlapping of satellite snow cover data with model output showed the linear correlation coefficient of 0.7 at a significant level of 0.01 in a 90 × 78 points network with 5 km resolution. The probability of detecting snow on 3 day average was 87% and the probability of false detection was about 20%. Heidke Skill Score was about 0.7 for days with clear sky (January 29th and January 30th.) which was the best result in January 28th. The Heidke Skill Score was reduced to 57% which may be the result of inaccurate satellite observation due to cloudiness or inaccurate forecasting. Since there is no ground station in the selected area, one cannot properly comment on this.

Keywords: WRF Numerical Weather Prediction, Normalized Snow Cover Index, Probabilistic Table and Remote Sensing Data.

Received: October 29, 2017

Accepted: March 23, 2018

مقایسه پوشش برف برونداد یک مدل پیش‌بینی عددی و داده‌های سنجده MODIS در ایران

سحر تاج‌بخش^{۱*}، مهدی رهنما^۲ و امیرحسین نیکفال^۳

چکیده

هدف این مطالعه، امکان‌سنجی استفاده از برونداد پوشش برف مدل پیش‌بینی و تحقیقاتی وضع هوا برای پیش‌بینی‌های مرتبط با ذوب برف می‌باشد. با توجه به تعداد محدود ایستگاه‌های دیدبانی برف‌سنجی در مناطق کوهستانی کشور، داده‌های ماهواره‌ای به عنوان اطلاعات دیدبانی و سنجش برف با پوشش گسترده مکانی، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه شاخص نرمال شده تمایز برف (NSDI) با استفاده از داده‌های سنجده MODIS استخراج و با برونداد مدل پیش‌بینی عددی WRF در یک مطالعه موردی مقایسه و خروجی مدل با استفاده از جدول توافقی ارزیابی شد. داده‌های مورد استفاده در مدل پیش‌بینی عددی داده‌های روزانه دریافتی از مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مقیاس وضع هوا (ECMWF) می‌باشد. منطقه مورد مطالعه محدوده گچسار تا کندوان استان البرز مورخ ۲۸ تا ۳۰ ژانویه ۲۰۱۷ با بارش برف سنگین می‌باشد. تحلیل هم‌دیدگی معرف فشاری قوی همراه با هوای سرد در لایه میانی جو است. برهم‌نهی داده پوشش برف ماهواره و خروجی مدل در یک شبکه منظم ۹۰×۷۸ نقطه‌ای با تفکیک ۵ کیلومتر، معرف ضریب همبستگی خطی ۰/۷ در سطح معنی‌داری ۹۵٪ برای سه روز می‌باشد. میانگین احتمال آشکارسازی برف ۸۷٪ و میانگین احتمال آشکارسازی نادرست مدل حدود ۲۰٪ برآورد شده است. شاخص آزمون مهارت هیدک (Heidke) کیفیت اجرای مدل را حدود ۷۰٪ در روزهای بدون ابر برآورد می‌کند. به نظر می‌رسد به علت ابرناکی، هم‌خوانی داده‌های ماهواره با برونداد مدل کاهش یافته باشد؛ به گونه‌ای که در روز ۲۸ ژانویه (هوای نیمه ابری)، صحت پیش‌بینی‌ها به ۵۷٪ کاهش می‌یابد که ممکن است ناشی از دیدبانی نادرست ماهواره یا پیش‌بینی نادرست باشد. به علت عدم وجود ایستگاه زمینی نمی‌توان به درستی در این خصوص اظهار نظر نمود.

کلمات کلیدی: مدل پیش‌بینی عددی WRF، شاخص نرمال شده تمایز برف، جدول توافقی و داده سنجش از دور.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۸/۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱/۳

1- Assistant Professor, Atmospheric Survey Research Group, Atmospheric Science and Meteorology Research Center. Email: sahrtajbakhsh@gmail.com
2- Assistant Professor, Atmospheric Survey Research Group, Atmospheric Science and Meteorology Research Center. Email: meh.rahnama@gmail.com
3- Ph.D. Student, Atmospheric Science and Meteorology Research Center. Email: ah.nikfal@gmail.com

*- Corresponding Author

۱- استادیار گروه پژوهشی کاوش‌های جوی، پژوهشکده هواشناسی و علوم جو.

۲- استادیار گروه پژوهشی کاوش‌های جوی، پژوهشکده هواشناسی و علوم جو.

۳- دانشجوی دکتری هواشناسی، پژوهشکده هواشناسی و علوم جو.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۷ امکان‌پذیر است.

روش‌های پایش و پیش‌بینی توده برف، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و خروجی پوشش برف مدل‌های عددی می‌باشد (Hardiman et al., 2008). برخی مطالعات نشان داده‌اند که برای نمایش نقش اثرات برف در مدل‌های جوی بهتر است، کسر منطقه تحت پوشش برف در هر سلول شبکه شناخته شود (Liston, 1999). صحت و دقت این خروجی‌ها در تعیین پیش‌بینی بهمن نیز اهمیت بسزایی دارد. آگاهی از مدت زمان پوشش برف، کاربردهای گوناگونی دارد. تغییرات دوره زمانی پوشش برف می‌تواند به عنوان شاخص تغییرات اقلیمی در نظر گرفته شود (Hantel and Maurer, 2011). پژوهش‌ها نشان داده است که دمای سطح زمین می‌تواند نماینده خوبی برای پوشش برف باشد (Hoelzle et al., 2003; Zhang, 2005; Lundquist and Lott, 2008; Tyler et al., 2008). روشی نیز برای تخمین دوره زمانی پوشش برف بر اساس دما ارائه شد (Teubner et al., 2015). در اکولوژی گیاهی، مدت زمان فصلی پوشش برف، طول دوره رویش گیاه را محدود می‌کند و بنابراین می‌تواند به ایجاد گونه‌های خاص گیاهی مرتبط شود (Cutler, 2011; Gottfried et al., 2011). کاربرد پوشش برف در مطالعات اقلیمی نیز بسیار مهم است. مطالعات زیادی نیز در خصوص پوشش برف و ارتباط آن با دورپیوندها به ویژه نوسان شمالگان پرداخته شده است. این مطالعات نشان می‌دهند که تقویت، تضعیف، تغییرات سالانه و فازی این دورپیوندها با تغییر پوشش برف تغییر می‌کنند (Cohen and Entekhabi, 1999; Saito and Cohen, 2003; Allen and Zender, 2010; Cohen et al., 2014). ارتباط بین پوشش برف در سیبری و تغییرات پوشش سپهری نیز توسط Cohen and Barlo (2005) انجام شده است.

در ایران نیز مطالعات بسیاری در خصوص آشکارسازی پوشش برف با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و با اهداف هیدرولوژیکی انجام شده است. (Najafi et al., 2007) با استفاده از داده‌های NOAA² رواناب ناشی از ذوب برف را در حوضه آبریز شهرچای ارومیه بررسی نمودند. به صورت مشابه نظم‌فر و مرادی در سال ۱۳۹۵ همین کار را در حوضه آبریز دهگلان به کمک داده‌های ۸ روزه پوشش برف سنجنده مودیس شبیه‌سازی کردند. دمای سطح برف با استفاده از داده‌های سنجنش از دور توسط Fattahi et al. (2012) در حوضه آبریز گلستان بررسی شده است. مطالعات زیادی با سناریوی مشابهی برای حوضه‌های آبریز دیگر کشور انجام شده است (Asoudeh et al., 2013; Kamnoush et al., 2015; Erfanian et al., 2013; Moradi and Amiri, 2014). آنچه مسلم است اطلاعاتی که در مطالعات یاد شده به عنوان ورودی مدل هیدرولوژیکی از سنجنده‌های ماهواره‌ای دریافت می‌شود و در بهترین حالت بدون تأخیر زمانی است.

پوشش برف یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سطح زمین است که تابش زمینی، انرژی و بیلان هیدرولوژیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Pulliainen et al., 2006). پوشش برف معرف میزان آب ذخیره شده است و پایش زمانی و مکانی رواناب ناشی از ذوب برف از اهمیت بالایی در پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی برخوردار است. آب در فصل زمستان در توده برف‌ها انباشته شده و پس از ذوب و آزاد شدن گرمای نهان، اثرات مهمی بر متغیرهایی نظیر دمای هوا در نزدیکی سطح زمین، رطوبت خاک و رواناب سطحی دارد. حدود ۹۸٪ از پوشش برف در مقیاس‌های مکانی جهانی و زمانی فصلی، مربوط به نیمکره شمالی است (Hall et al., 2010; Armstrong et al., 2001). از این رو، نمایش دقیق کمی پوشش برف در مدل‌های پیش‌بینی آب و هوا¹ (NWP) برای محاسبه تبادل شارهای سطح زمین و پیش‌بینی‌های متغیرهای جوی ضروری است. منبع سنتی اطلاعات در مورد پوشش برف، شبکه ایستگاه‌های هواشناسی زمینی است که در آن دیدبانی‌های روزانه، عمدتاً به شکل اندازه‌گیری عمق برف توسط دیدبان انجام می‌شود. متأسفانه مناطق کوهستانی مورد مطالعه به ایستگاه‌های برف‌سنجی مجهز نمی‌باشند. با توجه به اینکه اندازه‌گیری‌ها و نمونه‌برداری‌های میدانی برف به دلیل زمان‌بر بودن و هزینه بالا مقرون به صرفه نبوده و به صورت محدود قابل اجرا هستند، استفاده از فناوری سنجنش از دور و اطلاعات ماهواره‌ای، امکان ارزیابی خروجی مدل‌های پیش‌بینی عددی برای محدوده مطالعاتی مورد نظر را فراهم می‌نماید (Nazmfar and Moradi, 2016). سنجنده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی متفاوت از چند سانتی‌متر تا چند کیلومتر امکان جمع‌آوری اطلاعات برای پوشش سطح وسیعی از زمین را در طی دوره‌های زمانی متعدد فراهم می‌نمایند. یکی از کاربردهای اصلی و روزمره اطلاعات پوشش برف در مدل‌های پیش‌بینی عددی است (Hyvarinen et al., 2008). دقت پیش‌بینی، به‌ویژه برای دما و رطوبت سطح زمین تا حد زیادی بستگی به دقت نقشه برفی دارد که برای آغازگری مدل‌های پیش‌بینی عددی استفاده می‌شود. شبکه موجود برای دیدبانی زمینی پارامترهای پوشش برف، کامل نیست و اغلب قادر به ارائه پردازش‌های حوضه‌های آبریز بزرگ و متوسط نمی‌باشد (Shiklomanov et al., 2002). راه حل امیدوارکننده استفاده از داده‌های موجود و ترکیب آنها با روش‌های سنجنش از راه دور است. تحلیل برف بر اساس داده‌های ماهواره‌ای پوشش فضایی بهتری دارند و دیدبانی‌های برف و بدون برف به سادگی تهیه می‌شوند. اما این روش‌ها اغلب مبتنی بر اطلاعات کانال‌های مرئی و نزدیک فرورسرخ می‌باشند و در شرایط ابرناکی زیاد و نور خورشید محدود زمستان‌های قطبی نتایج خوبی ندارند. با این وجود یکی از متداول‌ترین

۲- روش تحقیق

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی در مقاله حاضر، محدوده گچسر (۳۶ و ۱۰ درجه شمالی و ۵۱ و ۳۱ درجه شرقی) تا کندوان (۳۷ و ۷۹ درجه شمالی و ۴۶ و ۲۴ درجه شرقی) در جاده چالوس می‌باشد که طی زمستان ۲۰۱۷ بیش از ۱۰ مورد سقوط بهمن را تجربه نموده و متأسفانه تلفات و خسارات زیادی بر جای گذاشته است (Republic News Agency, 2017). ارتفاع منطقه حدود ۲۲۳۰ تا ۲۲۴۰ متر می‌باشد و در استان البرز واقع شده است (شکل ۱). این مطالعه برای بازه زمانی ۲۳ تا ۳۱ ژانویه ۲۰۱۷ برای شرایط برف سنگین در نظر گرفته شده است.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

برای این پژوهش از سه سری داده به شرح زیر استفاده شده است:

۲-۳- داده‌های سنجنده MODIS روی ماهواره TERRA

سنجنده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی متفاوت از چند سانتی‌متر تا چند کیلومتر امکان جمع‌آوری اطلاعات برای پوشش سطح وسیعی از زمین را در طی دوره‌های زمانی متعدد فراهم می‌نمایند (Shimamora et al., 2006).

چنانچه اطلاعات پوشش برف با صحت قابل قبولی به صورت پیش‌بینی در دسترس باشد، مدل‌های هیدرولوژیکی با دقت بهتری قادر به پیش‌بینی رواناب می‌باشند اثرات تغییر اقلیم توسط (Ahmadi et al. (2015)، در یک مطالعه موردی بر فرایندهای رواناب-برف بررسی شد. (Tasdighian et al. (2017) آشکارسازی پوشش برف توسط سنجنده مدیس را ارزیابی و بهبود بخشیدند. (kashki et al. (2017) نیز به تحلیل همدیدی بارش برف سنگین در یک مطالعه موردی پرداختند. در این بررسی نیز کوشش می‌شود شاخص پوشش برف در یک مطالعه موردی به کمک مدل پیش‌بینی و تحقیقاتی وضع هوا (WRFM³) استخراج و با داده‌های دیدبانی سنجنده مودیس مقایسه شده و نتایج به کمک جدول توافقی ارزیابی شوند. این پژوهش با هدف پیش‌بینی ذوب برف برای کاربری در پیش‌بینی‌های مرتبط با سیلاب و سقوط بهمن انجام می‌شود. به همین منظور، در بند بعد، داده‌های مورد استفاده دیدبانی، پیش‌بینی و ماهواره‌ای و همچنین روش پژوهش در این مطالعه ارائه می‌شود. بخش سوم به ارائه و تحلیل نتایج می‌پردازد و در نهایت نتایج حاصل از این تحقیق در بخش چهارم مطرح می‌شود.

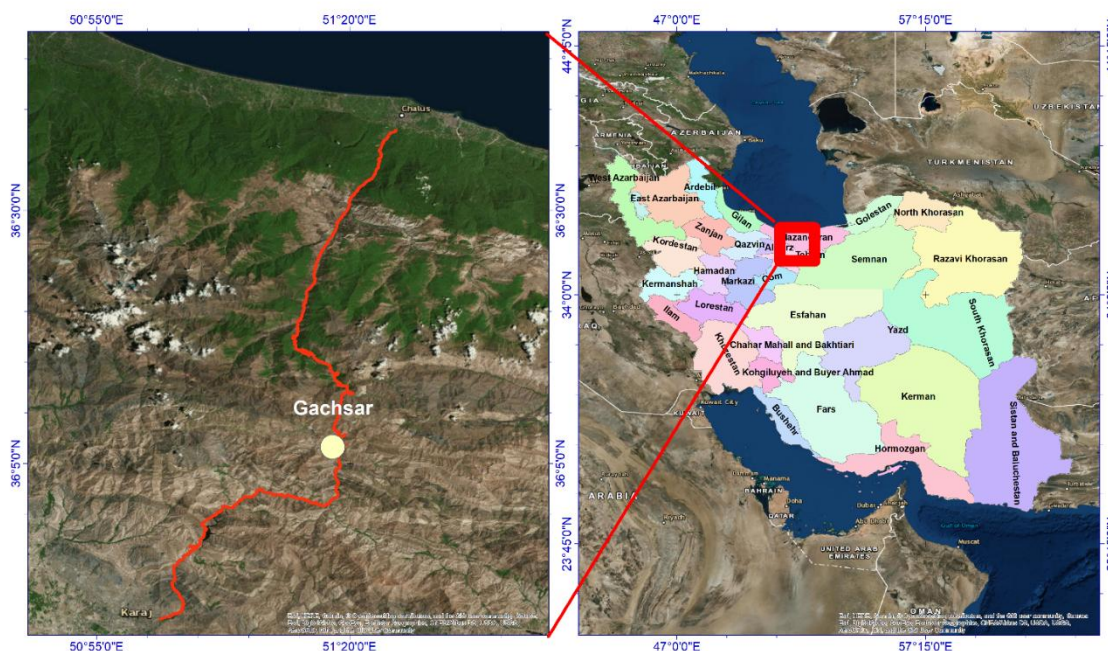


Fig. 1- Geographic location of the study area. Red line and green point show Chalous road and Gachsar position respectively (Google map)

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه. جاده چالوس به رنگ قرمز و نقطه زرد موقعیت گچسر را نشان می‌دهد (برگرفته از نقشه گوگل)

الگوهای همدیدی با استفاده از داده‌های ERA- interim در گام زمانی ۶ ساعته پرداخته شده است. این داده‌ها از مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مقیاس (ECMWF) با پیکربندی NETCDF در آدرس (<http://apps.ecmwf.int/datasets>) قابل دسترسی می‌باشند. در این بررسی الگوهای فشار تراز دریا و ضخامت ۵۰۰/۱۰۰۰ هکتوپاسکال، ارتفاع ژئوپتانسیل و دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال همراه با تاوایی نسبی، ارتفاع ژئوپتانسیل و دمای ۷۰۰ هکتوپاسکال همراه با سرعت قائم و ارتفاع ژئوپتانسیل و دمای ۸۵۰ هکتوپاسکال همراه با رطوبت نسبی و بردار باد به منظور شناسایی شرایط جوی ریزش بهمن از ابتدا تا انتهای رخداد، مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲-۵- برونداد مدل پیش‌بینی عددی WRF

در این پژوهش، همچنین، با استفاده از نسخه ۹-۳ مدل عددی میان‌مقیاس WRF، شبیه‌سازی شاخص پوشش برف از تاریخ ۲۳ ژانویه ۲۰۱۷ تا پایان ۳۱ ژانویه ۲۰۱۷ به مدت ۹ روز انجام گرفت. مدل WRF یک مدل هواشناسی میان‌مقیاس غیرهیدرواستاتیک با انتخاب‌های گوناگون برای هسته‌ی دینامیکی، به همراه پارامتره‌سازی‌های فیزیکی است. مدل WRF به صورت جهانی و توسط قشر وسیعی از پژوهشگران در مطالعات هواشناسی و زیست‌محیطی استفاده شده و همواره در حال توسعه است. کدهای اصلی مدل WRF بر پایه زبان فرترن-۹۰ و با ساختاری پیچیده و حجیم (بیش از یک میلیون خط کد) آماده شده است. مدل WRF شامل هسته‌های دینامیکی، بخش فیزیکی، بخش شیمی و برنامه‌هایی به منظور تعیین مقادیر مرزی در شبیه‌سازی‌ها و گوارد داده‌ها است. در حال حاضر دو هسته دینامیکی متفاوت که عبارتند از هسته دینامیکی پیشرفته ARW که تحت عنوان هسته دینامیکی مختصات جرمی اولیری شناخته می‌شود، و هسته دینامیکی مدل میان‌مقیاس غیرهیدرواستاتیک NMM در مدل WRF پیاده‌سازی شده است. علاوه بر هسته دینامیکی، فرایندهای فیزیکی و شیمیایی فاز گازی و ذرات هواویز نیز به طور جداگانه در ماژول‌های فیزیک و شیمی در مدل WRF تعبیه شده است. در بخش فیزیک مدل، کلیه فرآیندهای فیزیکی شامل فرآیندهای مربوط به لایه مرزی سیاره‌ای، همرفت، ابرزایی، و برهم‌کنش سطح و جو پارامتره‌سازی می‌شوند. بخش فیزیک مدل به واسطه یک فصل مشترک فیزیکی با هسته دینامیکی در ارتباط است. بخش شیمی جو نیز در این مدل به فرآیندهای شیمیایی مربوط به گازهای جوی و ذرات هواویز اختصاص دارد. هسته دینامیکی مدل WRF (ARW) می‌تواند با استفاده از شرایط مرزی و اولیه تعریف شده توسط کاربر برای شبیه‌سازی‌های ایده‌آل و یا با استفاده از داده‌های درون‌یابی شده که از قبل توسط سایر مدل‌ها از طریق تحلیل و

از میان تصاویر ماهواره‌ای در دسترس و نیز با توجه به اهداف این تحقیق، تصاویر سنجنده (MODIS⁴) ماهواره TERRA برای مطالعه سطح پوشش برف در محدوده مطالعاتی این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند. دلیل انتخاب سنجنده مودیس جهت برآورد سطح برف، پوشش زمانی مناسب (حداقل روزی یک برداشت از منطقه مطالعاتی) و قدرت تفکیک طیفی بالا و مکانی متوسط آن است. محدوده‌ی زمانی تصاویر انتخابی، بین روزهای ۲۷ تا ۳۰ ژانویه سال ۲۰۱۷ می‌باشد. دلیل انتخاب این تاریخ‌ها، ریزش قابل توجه برف در این فاصله زمانی در محدوده منطقه مطالعاتی بوده است. پس از انتخاب تصاویر نسبت به تصحیح رادیومتریکی و تصحیح هندسی آنها در نرم‌افزار (ENVI) اقدام شد. بدلیل خصوصیات بازتابی سطح برف که با توجه به تغییر عواملی چون دانه‌بندی و شکل کریستال‌های برف، زبری سطح، ضخامت و ناخالصی برف و همچنین زاویه تابش خورشیدی و زاویه انعکاس، بشدت تغییر می‌کند، با افزایش میزان برف از میزان بازتابش آن در محدوده طیف مرئی و فرسرخ نزدیک کاسته می‌گردد. دلیل اصلی این کاهش ذوب و انجماد دوباره برف و افزایش دانه‌بندی آن است (Bartelt et al., 2001). میزان امواج کوتاه و بلندی که در سطح برف دریافت می‌گردد، قادر است منبع مهمی برای فرایند ذوب برف باشد. با توجه به خصوصیات ذکر شده و نیز اختلاف در محدوده طیف مرئی و مادون قرمز کوتاه بازتابش شده از سطح برف، در این مطالعه از شاخص نرمال شده تمایز برف (NDSI⁵) استفاده شد. این شاخص از بازتاب طیفی برف که در باند مرئی دارای بازتاب بالا و محدوده طیفی مادون قرمز کوتاه دارای بازتاب پایین است، برای تفکیک برف از ابر و نواحی بدون پوشش برفی استفاده می‌کند (معادله ۱):

$$NDSI = \frac{MODIS_{Band4} - MODIS_{Band6}}{MODIS_{Band4} + MODIS_{Band6}} \quad (1)$$

مطالعه رفتار زمانی پوشش برف، مدل‌سازی آب و هوایی، طبقه‌بندی پوشش سطح برف در سطح جهانی، پایش محیط‌زیست و مطالعات زیست‌محیطی و بررسی تعادل میزان انرژی و آب در سطح جهانی از جمله کاربردهای شاخص نرمال شده تمایز برف به‌شمار می‌رود. دامنه تغییرات این شاخص بین +۱ و -۱ است. در شاخص نرمال شده پوشش برف مقادیری که از -۱ تا صفر می‌باشند نشان‌دهنده مناطقی است که برف در آن‌ها وجود ندارد و از صفر تا +۱ مناطقی را شامل می‌شود که برف با توجه به ضخامت آن ضرایب مثبت را به خود اختصاص می‌دهد. هر قدر ضخامت لایه پوشش برف بیشتر باشد، عدد مورد نظر به ۱ نزدیکتر و هر چه ضخامت کمتر باشد به صفر متمایل می‌شود.

۲-۴- داده‌های ERA- Interim برای مطالعه شرایط همدیدی

به منظور تحلیل شرایط وضع هوا در مطالعات انجام شده، به بررسی

پیش‌بینی در دسترس قرار دارد، برای شبیه‌سازی‌های جو واقعی عمل نماید. برنامه‌هایی که آغازگری شبیه‌سازی را برعهده دارند، از عملکرد نسبتاً مشابه برخوردارند. خروجی این برنامه‌ها به عنوان ورودی در اختیار هسته دینامیکی مدل WRF قرار داده می‌شود. لزوم تعیین شرایط اولیه در شبیه‌سازی‌ها به دلایل زیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است:

- آماده‌سازی داده ورودی به منظور شبیه‌سازی در راستای افقی و قائم و دقت در شرایط مرزی، که عامل مهمی در کاهش خطا در گام‌های زمانی بعدی می‌باشد،
- تعیین میدان‌های هیدرواستاتیک و انحراف از وضعیت هیدرواستاتیک،
- فراداده‌ها (Metadata) مانند تاریخ شبیه‌سازی، خصوصیات فیزیکی شبکه نقاط، و سامانه نقشه به کارگرفته‌شده در شبیه‌سازی

از داده‌های جهانی جغرافیایی به عنوان ورودی بخش پیش‌پردازش مدل WRF استفاده می‌شود. این داده‌ها دربرگیرنده بسیاری از ویژگی‌های سطحی، مانند توپوگرافی، بافت خاک و کاربری اراضی هستند که برخی با دقت ۳۰ ثانیه در مقیاس جغرافیایی (حدود یک کیلومتر) در دسترس قرار دارند. برای شبیه‌سازی پدیده‌های جوی با مقیاس‌های کوچک مانند بارش که به دقتی بیش از تفکیک مکانی مدل نیاز دارند، از پارامتره‌سازی فیزیکی استفاده می‌شود. برای شرایط مرزی و اولیه جوی از داده‌های بازتحلیل سامانه پیش‌بینی جهانی^۶ GFS با دقت $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ در مقیاس طول و عرض جغرافیایی، که از محصولات مراکز ملی پیش‌بینی محیطی^۷ (NCEP) در ایالات متحده است، استفاده شده است. برخی از مهم‌ترین طرحواره‌های انتخاب‌شده برای بخش فیزیک مدل WRF در شبیه‌سازی‌های عددی بارش برف به عنوان یک فراسنج جوی کوچک مقیاس، به شرح زیر می‌باشند:

طرحواره تامسون برای شبیه‌سازی فرآیندهای میکروفیزیکی 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 (Thompson et al., 2008). طرحواره فراسنج‌سازی کومولوسی، طرحواره Tiedtke نام دارد که با شبیه‌سازی شار جرمی، انواع فرارفت‌های عمیق و نیمه‌عمیق در جو را وارد فرآیند مدل‌سازی می‌نماید (Tiedtke et al., 1987). طرحواره^۸ RRTM، یک مدل تابشی دقیق و سریع است که مقدار شار تابشی را در طول موج‌های بلند و کوتاه پارامتره‌سازی می‌کند (Mlawer et al., 1997). برای پارامتره‌سازی تابش در مدل‌های جهانی هواشناسی مانند GFS و ECMWF، از نسخه تغییر یافته طرحواره RRTM به نام RRTMG

استفاده می‌شود که محاسبات پارامتره‌سازی تابش را با روشی سریع‌تر، به‌گونه‌ای که کمترین مقدار افزایش خطا را در پی داشته باشد انجام می‌دهد. طرحواره Mellor-Yamada-Janjic به عنوان یک طرحواره پیش‌بینی یک‌بعدی برای انرژی جنبشی تلاطمی با در نظر گرفتن شار قائم محلی مدل‌سازی لایه مرزی 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 (Junjing et al., 2002). مدل سطح زمین 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 (Tewari et al., 2004).

به منظور تحلیل هم‌مدیدی، 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 هکتو پاسکال نیز به منظور بررسی شرایط جوی حاکم، در نظر گرفته شده‌اند. بررسی شرایط هم‌مدیدی با استفاده از داده‌های ERA-Interim در گام زمانی ۶ ساعته انجام شده است. داده‌های ERA-Interim داده‌های بازتحلیل جوی در مقیاس جهانی است که توسط مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت جوی^۹ (ECMWF) توسعه داده شده است. این داده‌ها در بازه زمانی ۱ ژانویه ۱۹۸۹ به بعد تا نزدیک به زمان واقعی در دسترس می‌باشند. محصولات ERA-Interim به صورت شبکه‌ای از داده‌ها، دربرگیرنده گستره وسیعی از فراسنج‌های هواشناسی در سطح زمین با گام زمانی ۳ ساعته و فراسنج‌های ترازهای بالایی جو با گام زمانی ۶ ساعته است که شامل شرایط ورد سپهر و پوشش سپهر، امواج اقیانوسی و ویژگی‌های سطحی است (Dee et al., 2011). در این بررسی، الگوهای فشار تراز دریا و ضخامت ۱۰۰۰/۵۰۰ هکتو پاسکال، ارتفاع ژئوپتانسیل و دمای تراز ۵۰۰ هکتو پاسکال همراه با تاوایی نسبی این تراز، سرعت قائم باد در تراز ۷۰۰ هکتو پاسکال و همچنین رطوبت نسبی و باد تراز ۸۵۰ هکتو پاسکال به منظور شناسایی شرایط جوی ریزش بهمن از ابتدا تا انتهای رخداد، مورد مطالعه قرار گرفته است. حوضه‌های شبیه‌سازی برای اجرای مدل WRF به صورت سه حوضه تودرتو آماده شدند (شکل ۲). دقت تفکیک مکانی برای این سه حوضه به ترتیب ۱۸ کیلومتر برای حوضه اصلی، ۶ کیلومتر برای حوضه دوم و ۲ کیلومتر برای حوضه سوم انتخاب شدند.

روش ارزیابی در این بررسی استفاده از جدول توافقی می‌باشد. در این جدول معمولاً رخداد‌های پیش‌بینی و دیدبانی با هم مقایسه می‌شوند و میزان صحت پیش‌بینی‌ها تعیین می‌شود.

می‌دهد و با مقدار $\frac{b}{a+b}$ تعریف می‌شود. در بسیاری از منابع این شاخص با علامت اختصاری FAR¹⁴ نیز معرفی شده است. تمامی این مقادیر بین صفر تا ۱ متغیر می‌باشند. شاخص‌های POFA و POFD (یا FAR)، هرچه به صفر نزدیک‌تر باشند و شاخص‌های POD و PODn هرچه به یک نزدیک‌تر باشند، پیش‌بینی‌ها قابل اعتمادترند. همچنین بایاس مدل بر اساس رابطه (۲) محاسبه شده است:

$$\text{Bias} = \frac{a+b}{a+c} \quad (2)$$

برای ارزیابی خروجی مدل از شاخص‌های PC¹⁵ و HSS¹⁶ استفاده شده است. شاخص PC به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$\text{PC} = \frac{a+d}{a+b+c+d} \quad (3)$$

در این رابطه PC معرف کسری از موارد طبقه‌بندی شده است که یکی از آنها معرف اطلاعات واقعی باشد. بهترین مقدار برای PC عدد یک می‌باشد و بدترین آن صفر است. این اندازه‌گیری، به ویژه زمانی که یکی از طبقه‌بندی‌ها حاکمیت بیشتری داشته باشد، به تنهایی کافی نمی‌باشد. از این رو از شاخص معروف دیگری با عنوان شاخص آزمون مهارت هیدک (HSS) برای تحلیل نهایی مدل پیش‌بینی عددی WRF در خصوص برون‌داد پوشش برف و بر اساس رابطه (۴) برآورد می‌شود. این شاخص برای وقتی که پارامتری مانند مقدار برف به میزان قابل توجهی تغییر کند بسیار مهم می‌باشد زیرا PC در این شرایط می‌تواند نتایج کاملاً نادرستی ارائه کند (Hardiman et al., 2008):

$$\text{HSS} = \frac{2(ad-bc)}{(a+c)(c+d)+(a+b)(b+d)} \quad (4)$$

آزمون مهارت هیدک همان PC می‌باشد که برای توافق بین دو تحلیل بر اساس شانس تعیین می‌شود. در بهترین حالت HSS معادل یک است. در این مقاله برای ارزیابی پیش‌بینی پوشش برف مدل WRF از هر سه روش ارزیابی می‌شود.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

در این بخش ابتدا به تحلیل هم‌دیدگی مطالعه موردی رخداد بهمن از تاریخ ۲۷ تا ۳۰ ژانویه ۲۰۱۷ در محدوده مورد مطالعه پرداخته شد. سپس شرایط هم‌دیدگی در یک بازه زمانی تابستانی، که در محدوده مورد مطالعه که برفی باریده نشده، تحلیل شد. مقادیر محاسبه شده NDSI به کمک تصاویر ماهواره‌ای برای هر دو مطالعه موردی، معرفی و پردازش شد. از مدل پیش‌بینی عددی WRF برای تحلیل شاخص پوشش برف استفاده شد و نتایج حاصل از برون‌داد مدل شاخص پوشش برف محاسبه شده به کمک تصاویر ماهواره‌ای مقایسه و به روش جدول توافقی ارزیابی گردید.

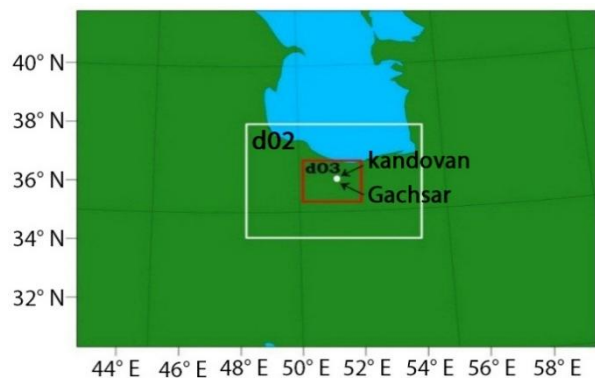


Fig. 2- Main- and sub-basins simulation area nesting and the location of the Kandovan and Gachsar cities

شکل ۲- منطقه شبیه‌سازی اصلی و زیرحوضه‌ها به صورت تودرتو به همراه موقعیت شهرهای کندوان و گچسار

به این ترتیب رخدادهای دیدبانی پوشش برف به کمک سنجنده MODIS در بازه زمانی مورد نظر با نتایج محاسباتی به کمک خروجی‌های مدل پیش‌بینی عددی WRF مقایسه می‌شوند. جدول احتمالی روش بایاس به صورت جدول ۱ تعریف می‌شود:

Table 1- Contingency Table 2 × 2

جدول ۱- جدول توافقی ۲×۲

Forecast	Observation	
	Yes	No
Yes	a	b
No	c	d

مقادیر a معرف تعداد رویدادهایی است که رخداد یک پدیده هم دیدبانی و هم پیش‌بینی شده‌اند. شاخص b، تعداد رویدادهایی است که پدیده دیدبانی نشده اما پیش‌بینی شده است. بخش c تعداد رویدادهای پدیده دیدبانی شده اما پیش‌بینی نشده است و بخش d نشان دهنده رویدادهایی است که رخداد پدیده نه دیدبانی و نه پیش‌بینی شده است. به این ترتیب شاخص احتمال آشکارسازی (POD¹⁰) معادل $\frac{a}{a+c}$ می‌باشد و معرف نسبت پیش‌بینی‌های درست به مجموع پیش‌بینی‌های پوشش برف است. همچنین شاخص احتمال آشکارسازی برای پیش‌بینی درست رویدادهایی که پوشش برف پیش‌بینی نشده است، با PODn¹¹ نمایش داده می‌شود و مقدار آن معادل $\frac{d}{b+d}$ می‌باشد. این شاخص پیش‌بینی‌های درست برای رویدادهای بدون پوشش برف است. احتمال آشکارسازی اشتباه (POFD¹²) معرف نسبت پیش‌بینی‌های اشتباه به کل دیدبانی‌های بدون پوشش برف می‌باشد و مقدار آن معادل $\frac{b}{b+d}$ است. همچنین شاخص احتمال هشدار اشتباه (POFA¹³) نسبت پیش‌بینی‌های اشتباه به کل پیش‌بینی‌ها را نشان

۳-۱- تحلیل همدیدی مطالعه موردی ۲۴ تا ۳۱ ژانویه ۲۰۱۷

الگوهای فشار تراز میانگین دریا در روز ۲۷ ژانویه، تقویت سامانه کم فشار را روی نوار مرکزی رشته کوه البرز نشان می‌دهد که طی ساعت‌های ۰۰ تا ۱۲ UTC روز بیست و هفتم ژانویه در نوار مرکزی کشور و روی رشته کوه البرز حدود ۵ میلی‌بار کاهش یافته است و مقدار آن از ۱۰۱۵ به ۱۰۱۰ میلی‌بار رسیده است (شکل‌های ۳-الف و ۳-ب). این سامانه با حرکت شرق سو و نفوذ زبانه‌ای پرفشار به جای آن در منطقه مورد بررسی، از روز ۲۸ ژانویه ساعت ۰۰ UTC تا روز ۰۰ تا ۱۲ UTC روز بیست و هفتم ژانویه در نوار رشته کوه البرز دیده می‌شود به گونه‌ای که مقادیر فشار از ۱۰۱۵ میلی‌بار به ۱۰۲۵ میلی‌بار طی ۴۸

ساعت افزایش یافته است (شکل‌های ۳-پ تا ۳-ح). در الگوهای فشار تغییرات ضخامت ۵۰۰/۱۰۰۰ چندان قابل توجه نمی‌باشد و طی روزهای ۲۷ تا ۳۰ ژانویه بین ۵۲۰۰ تا ۵۳۰۰ متر متغیر است.

گرچه ارتفاع ژئوپتانسیلی ۵۰۰ هکتوپاسکال معرف گذر جریان‌های مداری بسیار قوی از روی نوار شمالی ایران می‌باشد که در دامنه شرقی یک ناوه افقی مستقر شده‌اند (شکل‌های ۳-الف تا ۳-ح). افت ارتفاع ژئوپتانسیل در منطقه مورد مطالعه (کندوان-گچسر) طی ساعت‌های ۰۰ تا ۱۲ UTC روز بیست و هفتم به میزان حدوداً ۸۰ متر دیده می‌شود.

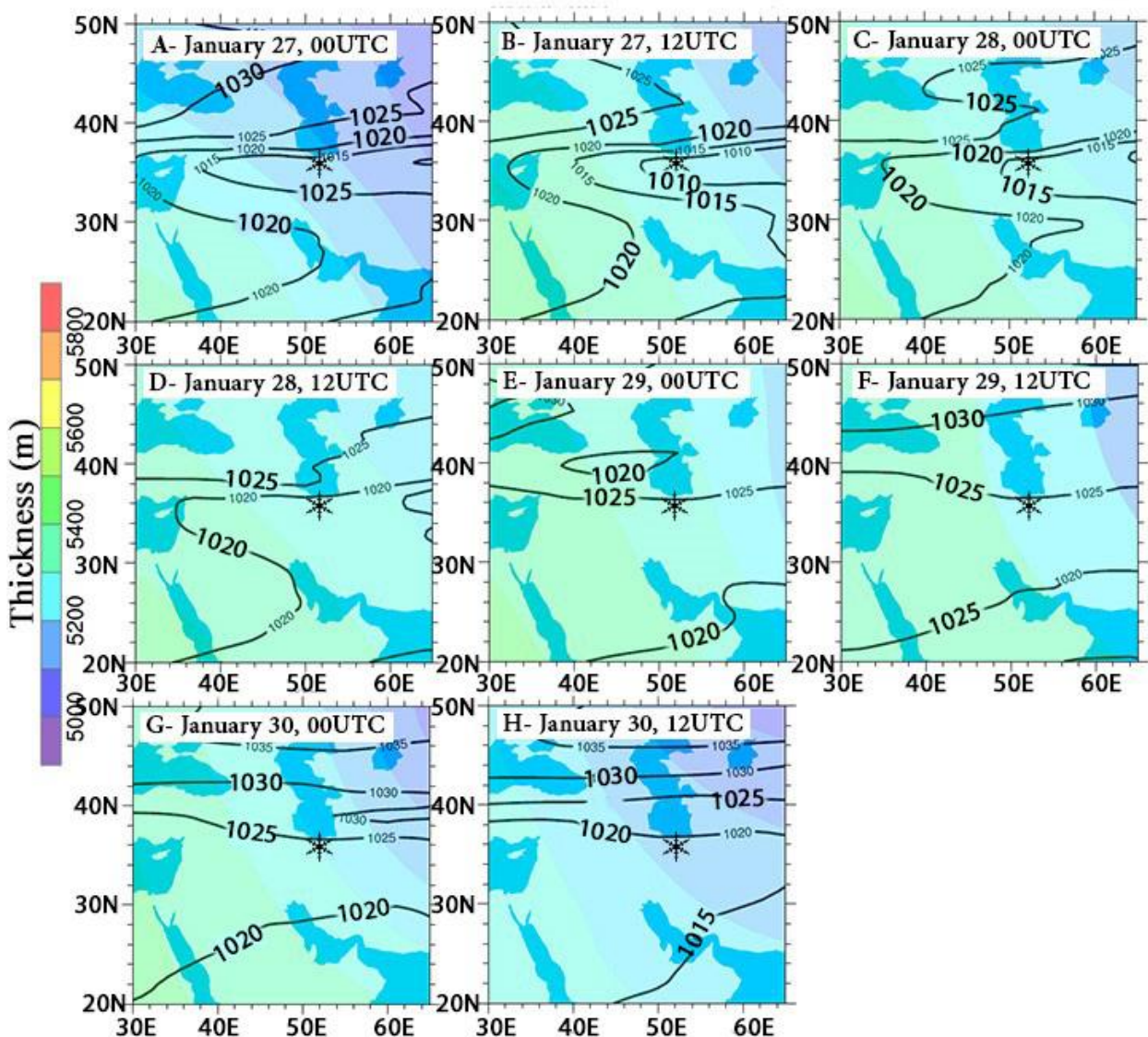


Fig. 3- MSL pressure in hPa (solid line) and thickness of 1000/500 in meters, January, 27-30 2017, Black dot is the position of the Kanduan-Gachsar zone.

شکل ۳- الگوی فشار تراز دریا (خطوط توپر-hPa) و ضخامت ۵۰۰/۱۰۰۰ (هاشور رنگی -m) ساعت ۰۰ UTC روز ۲۷ ژانویه تا ساعت ۱۲ UTC روز ۳۰ ژانویه ۲۰۱۷، علامت ستاره، موقعیت محدوده کندوان-گچسر می‌باشد.

می‌باشد (شکل ۴-ج). در روز سی‌ام ضمن استقرار پشته ژئوپتانسیلی در منطقه، روند افزایش دما و کاهش تاوایی نسبی در تراز ۵۰۰ میلی بار مشاهده می‌شود (شکل ۴-چ و ۴-ح).

در تراز ۸۵۰ میلی باری، الگوی ژئوپتانسیل تقریباً مشابه سطح زمین است و زبانه کم‌ارتفاع تنها روز ۲۷ ژانویه با گرادیان خوبی در منطقه مستقر است. از روز بیست و هشتم ارتفاع ژئوپتانسیل زیاد شده و به آرامی مرکز کم ارتفاع به سمت شرق حرکت می‌کند و گرادیان ارتفاعی نیز کاهش می‌یابد.

این شرایط با افزایش تاوایی نسبی $5 \times 10^{-5} s^{-1}$ تا $10^{-4} s^{-1}$ طی ساعت‌های ۰۰ تا ۱۲ UTC روز ۲۷ ژانویه مشهود است (شکل‌های ۴-الف و ۴-ب). با وجود افزایش ارتفاع از روز بعد (۲۸ ژانویه ساعت ۰۰ UTC، به علت افت محسوس دما تا روز بیست و نهم، روند افزایش تاوایی نسبی همچنان حفظ می‌شود به گونه‌ای که در روز ۲۹ ساعت ۱۲ UTC همچنان مقادیر تاوایی نسبی $10^{-4} s^{-1}$ حفظ می‌شود (شکل‌های ۴-پ تا ۴-ج). ریزش هوای سرد از عرض‌های شمالی به داخل دهانه ناوه تراز ۵۰۰ میلی بار در روز بیست و نهم موجب افت دما در این ارتفاع تا حدود -30 درجه سلسیوس در منطقه مورد مطالعه

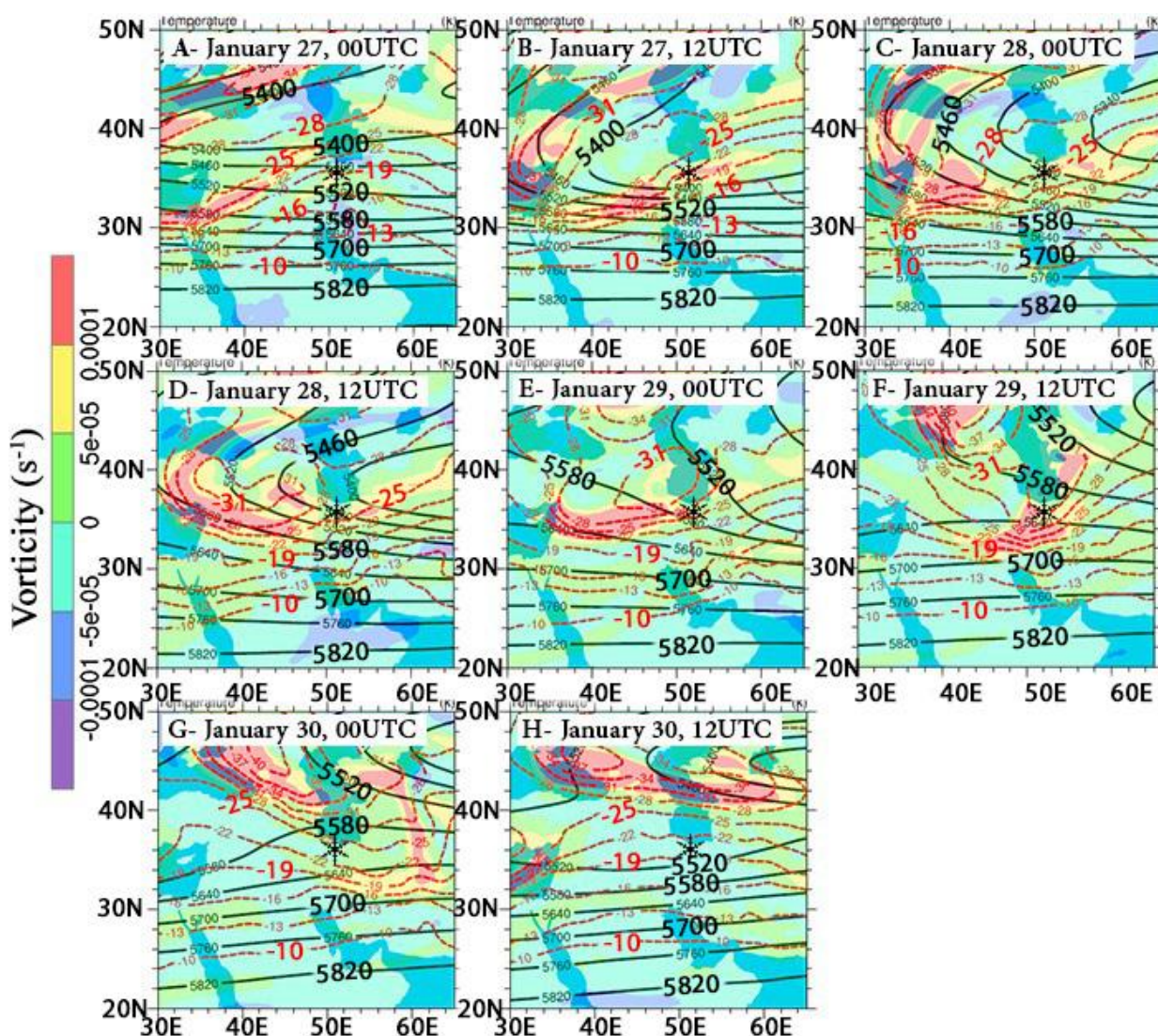


Fig. 4- GPH in meter (solid line), temperature (dash line and relative vorticity (shaded area) of 500 hPa, 27 to 30, January, 2017, Black dot is the position of the Kanduan-Gachsar zone.

شکل ۴- الگوی ارتفاع ژئوپتانسیل (خطوط توپر سیاه-m)، دما (خط چین قرمز - $^{\circ}C$) و تاوایی نسبی (مناطق هاشور رنگی سایه زده شده - s^{-1}) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ساعت ۰۰ UTC روز ۲۷ ژانویه تا ساعت ۱۲ UTC روز ۳۰ ژانویه ۲۰۱۷، علامت ستاره، موقعیت محدوده کندوان-گچسر می‌باشد.

الگوی پوشش برف که در سری شکل‌های ۶ آمده است، معرف میزان پوشش برف در منطقه مورد مطالعه طی روزهای ۲۷ تا ۳۰ ژانویه ۲۰۱۷ می‌باشد. همانگونه که در سری شکل‌های این شاخص (شکل‌های ۶-الف تا ۶-ح) دیده می‌شود، از روز بیست و هفتم ژانویه تا روز سی‌ام که برای این بررسی در نظر گرفته شده میزان پوشش برف بیش از ۹۰٪ (بیشتر از ۹۰ درصد) در منطقه کندوان-گچسر می‌باشد. با توجه به این که خروجی مدل WRF برای تمام روزها و ساعت‌ها در منطقه مورد مطالعه همین مقادیر را نشان می‌دهد، نقشه‌های پوشش برف به صورت ۲۴ ساعته آورده شده‌اند.

سرعت باد در منطقه مورد مطالعه طی روزهای ۲۷ و ۲۸ ژانویه ساعت ۰۰ UTC کمتر از ۱۰ نات می‌باشد. از روز ۲۸ ژانویه ساعت ۱۲ UTC سرعت باد به ۱۰ نات می‌رسد و جهت جنوب شرقی دارد. با استقرار زبانه‌های ارتفاع زیاد، سرعت باد نیز کاهش می‌یابد. الگوی دما نیز طی روزهای ۲۷ و ۲۸ افت دما در این تراز را نشان می‌دهد. در روز ۲۸ ژانویه با جریان‌های جنوبی دما افزایش می‌یابد و به ۴ درجه سلسیوس در منطقه مورد مطالعه می‌رسد. سپس تا روز ۳۰ دوباره منطقه سرد شده و دما تا ۴- درجه سلسیوس کم می‌شود. (سری شکل‌های ۵-الف تا ۵-ح).

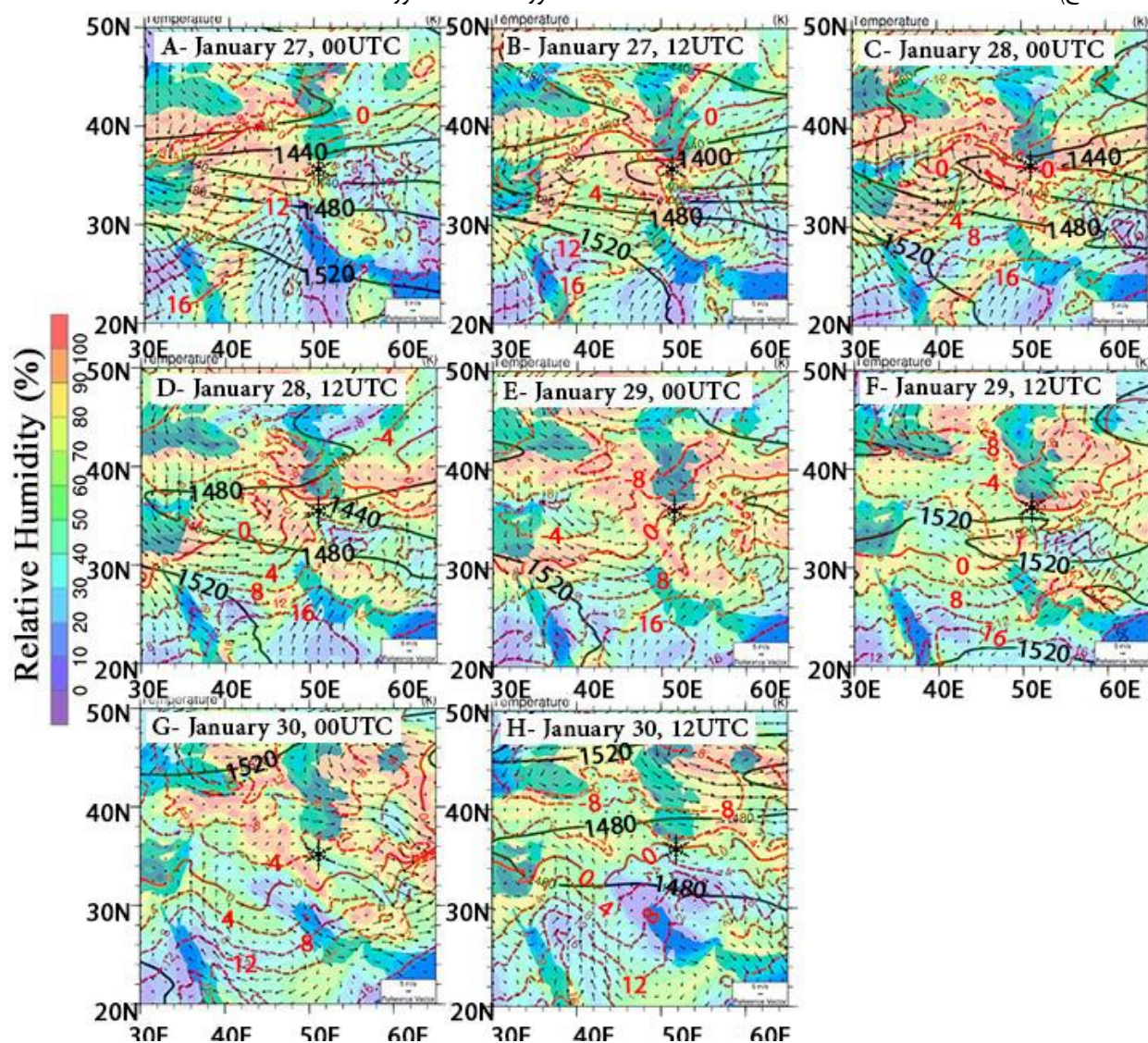


Fig. 5- GPH in meter (solid line), temperature (dash line, relative humidity (shaded area) and wind vector (arrow) of 850 hPa, 27 to 30, January, 2017, Black dot is the position of the Kanduan-Gachsar zone.

شکل ۵- الگوی ارتفاع ژئوپتانسیل (خطوط توپر سیاه-m)، دما (خط چین قرمز- $^{\circ}\text{C}$) و رطوبت نسبی (مناطق سایه زده شده- $\%$) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال ساعت ۰۰ UTC روز ۲۷ ژانویه تا ساعت ۱۲ UTC روز ۳۰ ژانویه ۲۰۱۷، علامت ستاره، موقعیت محدوده کندوان-گچسر می‌باشد.

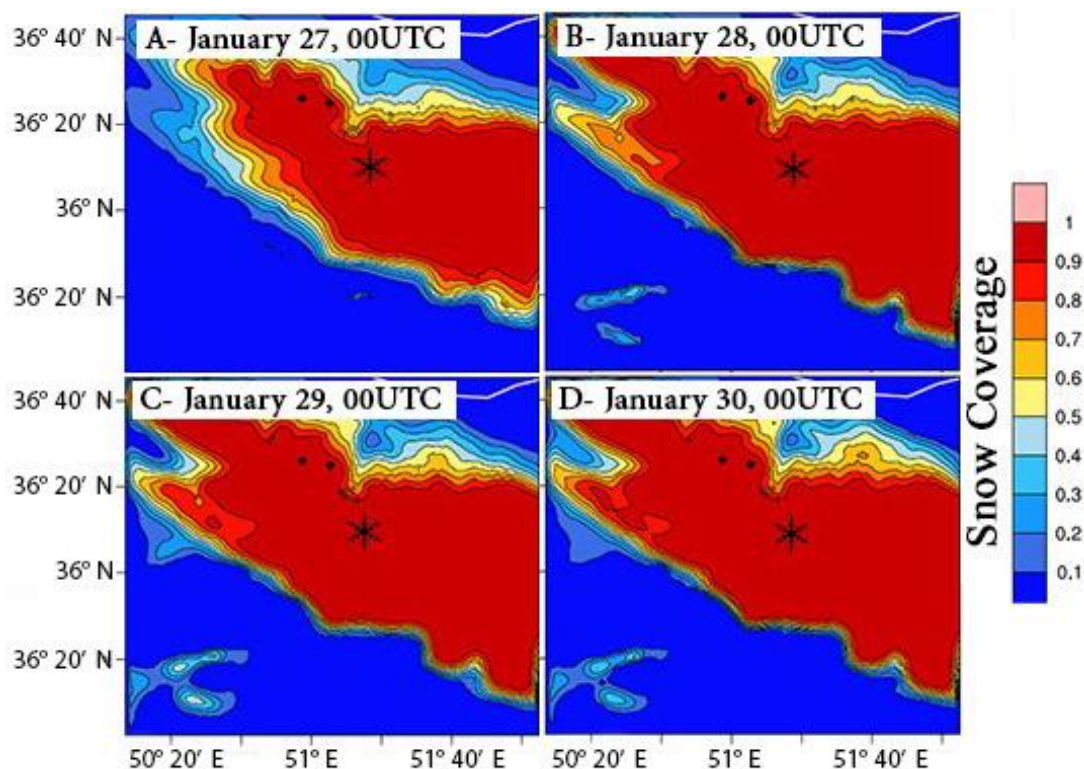


Fig. 6- SWE in Kg/m² (shaded areas) at January 27 to 30, 2017, Kandovan and Gachsar position are shown by black dotted.

شکل ۶- الگوی پوشش برف بر حسب Kg/m² (مناطق رنگی) ساعت ۰۰ UTC روز ۲۷ ژانویه تا ساعت ۱۲ UTC روز ۳۰ ژانویه ۲۰۱۷، نقاط کندوان و گچسار روی شکل مشخص شده‌اند. دو منطقه سیاه دیگر روی شکل پهناهای آبی و بدون برف می‌باشند.

عنوان پیکسل‌های دارای پوشش برف و کمتر از ۰/۴ به عنوان پیکسل‌های فاقد پوشش برف تفکیک گردیدند (Shimamura, 2006). براین اساس محدوده‌های دارای پوشش برف از سایر محدوده‌ها تفکیک شد. نقشه‌های ۸-الف تا ۸-ت، حاصل اجرای این عملکرد می‌باشد. در این شکل‌ها پهناهای سفید رنگ معرف سطوح دارای پوشش برف می‌باشند. براساس نتایج حاصل به غیر از روز ۲۷ ژانویه ۲۰۱۷ که به دلیل پوشش ابر متراکم موجود در منطقه امکان استخراج سطوح برفی امکان‌پذیر نمی‌باشد، از روز ۲۸ تا ۳۰ ژانویه بر میزان سطوح دارای پوشش برف به طرز محسوسی افزوده شده است.

۳-۳- ارزیابی پوشش برف

برای ارزیابی نتایج دیدبانی ماهواره‌ای و پیش‌بینی شده به کمک مدل عددی WRF برای شاخص پوشش ابر، ابتدا ضریب همبستگی خروجی مدل و پوشش برف مشاهده شده تعیین شده است. برای این منظور پوشش برف مدل هنجار شده و سپس با مقادیر هنجار شده پوشش برف (NSDI) مقایسه شده است (شکل ۹).

۳-۲- تحلیل نقشه‌های شاخص نرمال شده تمایز برف، مطالعه موردی ۲۷ تا ۳۰ ژانویه ۲۰۱۷

با توجه به گزارش وقوع بهمن در طی روزهای ۲۷، ۲۸ و ۳۰ ژانویه ۲۰۱۷، به منظور پایش سطح پوشش برف در منطقه مورد مطالعه، نقشه‌های شاخص نرمال شده تمایز برف NDSI برای روزهای مورد نظر، استخراج گردید (شکل ۷). همانطور که در شکل ۷ مشخص است، با توجه به ابری بودن سراسر منطقه مطالعاتی در روز ۲۷ ژانویه ۲۰۱۷ و مشابهت مقادیر شاخص نرمال شده تمایز برف برای پیکسل‌های دارای قطرات آب با برف، امکان استخراج شاخص نرمال شده تمایز برف برای روز ۲۷ ژانویه ۲۰۱۷ با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS وجود ندارد. در روزهای ۲۸ تا ۳۰ ژانویه ۲۰۱۷ و براساس شکل‌های ۷ ب و پ مقادیر شاخص نرمال شده تمایز برف مثبت به طور محسوسی افزایش پیدا می‌کند که این نشانگر بارش برف در منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی مذکور می‌باشد.

با توجه به منابع موجود و مطالعات منتشر شده پیشین، پیکسل‌های دارای مقدار شاخص نرمال شده تمایز برف NDSI بیشتر از ۰/۴ به

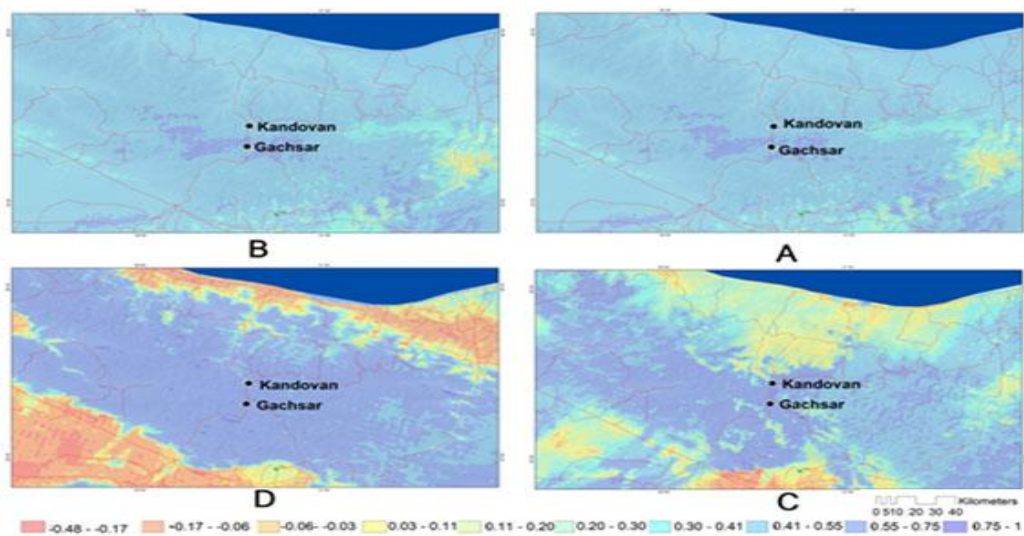


Fig. 7- NSDI pattern associated with clouds January a) 27, b) 28, c) 29 and d) 30, 2017 (extracted from MODIS)

شکل ۷- نقشه‌های شاخص نرمال شده تمایز برف برای الف (۲۷، ب) ۲۸، پ) ۲۹ و ت) ۳۰ ژانویه سال ۲۰۱۷ همراه با پوشش ابر استخراج شده از تصاویر سنجنده MODIS. نقاط توپر سیاه موقعیت کندوان و گچسر را نشان می‌دهند.

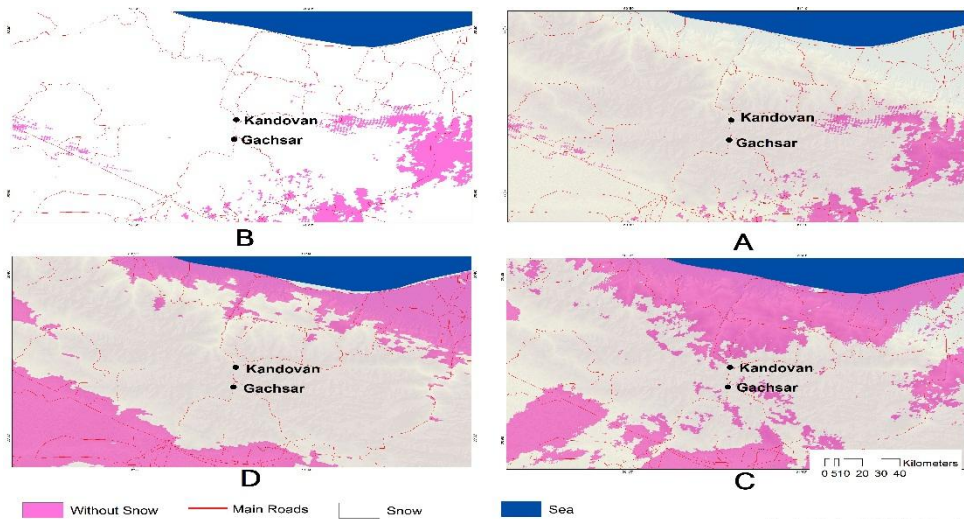


Fig. 8- Maps of snow cover areas extracted from MODIS images for January, a) 27, b) 28, c) 29, d) 30, 2017 after removal of cloud cover

شکل ۸ - نقشه‌های مناطق دارای پوشش برف استخراج شده از تصاویر سنجنده MODIS برای الف (۲۷، ب) ۲۸، پ) ۲۹ و ت) ۳۰ ژانویه ۲۰۱۷ پس از حذف پوشش ابر. نقاط توپر سیاه موقعیت کندوان و گچسر را نشان می‌دهند.

آن به تفکیک روزهای منتخب در جدول ۲ آمده است. بر اساس مستندات بند بالا، نقاطی از شبکه به عنوان نقطه همراه با پوشش برف لحاظ شد که شاخص $NDSI \geq 0.4$ و خروجی مدل مساوی یا بزرگتر از ۵/۵۰٪ باشد. با توجه به اینکه در روز ۲۷ ژانویه آسمان تمام ابری بود، به منظور دقت بهتر داده‌های مستخرج از ماهواره، از اطلاعات روزهای بعد استفاده شد.

همچنین از جدول توافقی برای ارزیابی نتایج مدل استفاده شده و بر اساس آن رخدادهای پیش‌بینی و دیدبانی با هم مقایسه شده‌اند. به همین منظور در منطقه مورد مطالعه، شبکه منظم ۷۸×۹۰ نقطه‌ای با تفکیک افقی ۵ کیلومتر در نظر گرفته شد که در اطراف منطقه بهمن خیز می‌باشد. مقادیر میانگین روزانه برون‌داد پوشش برف مدل با مقادیر مستخرج از داده‌های ماهواره در تمامی نقاط شبکه برای روزهای منتخب روزهای ۲۸، ۲۹ و ۳۰ ژانویه مقایسه شدند که نتایج

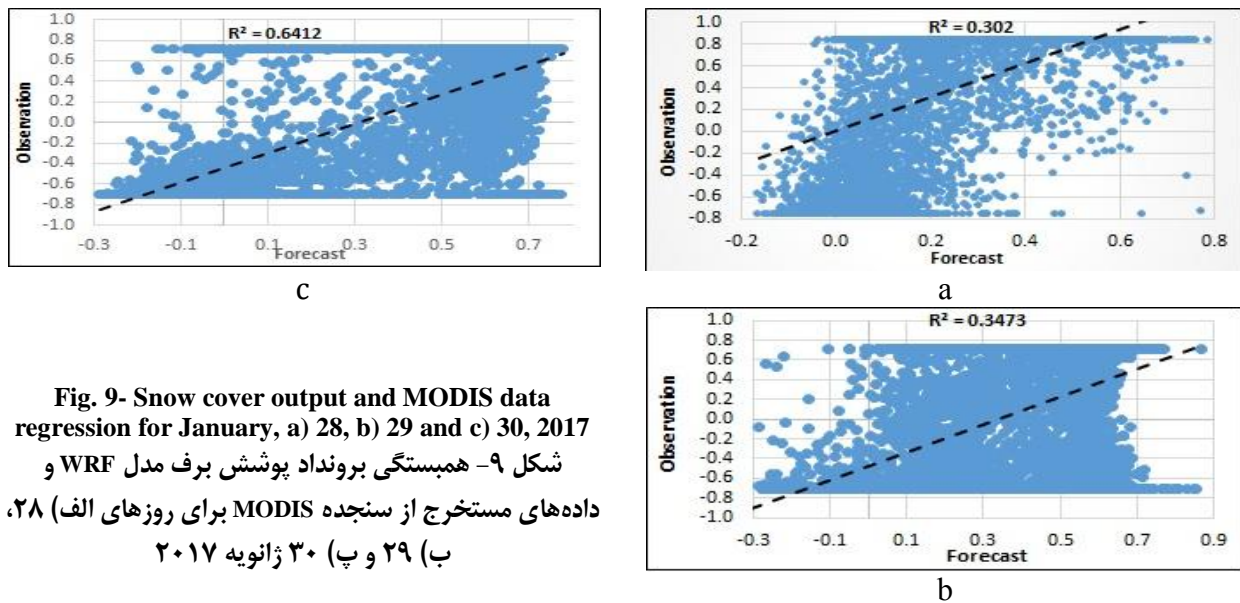


Fig. 9- Snow cover output and MODIS data regression for January, a) 28, b) 29 and c) 30, 2017
 شکل ۹- همبستگی برون داد پوشش برف مدل WRF و داده‌های مستخرج از سنجده MODIS برای روزهای الف) ۲۸، ب) ۲۹ و پ) ۳۰ ژانویه ۲۰۱۷

Table 2- Snow cover contingency table for January, 28, 29 and 30 2017

جدول ۲- جدول توافقی فراسنج پوشش برف برای روزهای ۲۸، ۲۹ و ۳۰ ژانویه ۲۰۱۷

28 Jan.		Forecast		
Forecast	yes(≥ 0.40)	no(< 0.40)		total
yes(≥ 0.50)	A 1204	B 2199		3403
no(< 0.50)	C 27	D 3591		3618
total	1231	5790		7021
29 Jan.		Observation		
Forecast	yes(≥ 0.40)	no(< 0.40)		total
yes(≥ 0.50)	A 2735	B 730		3465
no(< 0.50)	C 985	D 2571		3556
total	3720	3301		7021
30 Jan.		Observation		
Forecast	yes(≥ 0.40)	no(< 0.40)		total
yes(≥ 0.50)	A 3291	B 220		3511
no(< 0.50)	C 595	D 2915		3510
total	3885	3135		7021

روزها مقدار بسیار کوچک نزدیک به صفر دارد. شاخص احتمال آشکارسازی اشتباه (POFD) در تمامی روزها مقدار کم و نزدیک به صفر می‌باشد و حکایت از آن دارد که خطای مدل در پیش‌بینی‌های اشتباه برای پوشش برف پایین است. بایاس مدل به جز برای روز اول (روز ۲۸ ژانویه) برای روزهای بیست و نهم و سی‌ام بسیار مناسب است. این شاخص برای روز بیست و هشتم ژانویه over forecasting را نشان می‌دهد. شاخص PC یا نسبت صحیح نیز برای روزهای ۲۹ و ۳۰ ژانویه مقادیر مناسبی است (نزدیک به یک) و تنها برای روز بیست و

شاخص‌های POD، PODn، POFA، POFD، HSS، FBI و PC به صورت جداگانه برای هر روز بر اساس روابط بند بالا محاسبه شده‌اند که نتایج آن در جدول ۳ آمده است. بر اساس نتایج این جدول پیش‌بینی پوشش برف (POD) از صحت مناسبی برخوردار می‌باشد و نتایج مدل حداقل در ۷۳٪ موارد با واقعیت تطابق دارد. این شرایط برای پیش‌بینی بدون پوشش برف (PODn) نیز مناسب است و از کمینه ۶۲٪ برخوردار می‌باشد. احتمال هشدار اشتباه (FAR) یا (POFA) در روز بیست و هشتم ژانویه مناسب نیست ولی در سایر

هشتم مقدار آن کمی از یک دور است. امتیاز مهارت هیدک برای روزهای ۲۹ و ۳۰ ژانویه نسبتاً مناسب است اما برای روز بیست و هشتم کمتر از ۵۰ درصد می‌باشد.

۴- جمع بندی

پوشش برف یکی از عوامل کلیدی در گردش جوی، مدل سازی رواناب، پیش بینی های عددی وضع هوا و مطالعات مرتبط با تغییر اقلیم می‌باشد. به همین علت در این تحقیق، امکان سنجی پیش بینی شاخص پوشش برف به کمک مدل های پیش بینی عددی مطالعه شده و برون داد شاخص پوشش برف در مدل پیش بینی عددی WRF با داده های دیدبانی های ماهواره ای MODIS مقایسه و صحت سنجی می‌شوند. با توجه به اینکه نصب و راه اندازی ایستگاه سنجش برف در مناطق کوهستانی صعب العبور و سردی که محل ریزش بهمن می‌باشند، به سختی امکان پذیر است، داده های ماهواره ای یکی از منابع جایگزین برای دسترسی به اطلاعات دیدبانی مرتبط با برف با پوشش وسیع می‌باشند. با این وجود در شرایط ابرناکی زیاد و نور ضعیف خورشید در زمستان، نتایج خیلی دقیقی ندارند.

بازه زمانی مورد مطالعه، ۲۷ تا ۳۰ ژانویه ۲۰۱۷ می‌باشد. منطقه مورد بررسی، محدوده گچسر (۳۶،۱۰°N و ۵۱،۳۱°E) تا کندوان (۳۶،۱۰°N و ۵۱،۳۰°E) در جاده چالوس می‌باشد که طی زمستان ۲۰۱۷ بیش از ۱۰ مورد ریزش سقوط بهمن را تجربه نموده است؛ ارتفاع منطقه حدود ۲۲۳۰ تا ۲۲۴۰ متر و در استان البرز واقع شده است. در پژوهش حاضر از داده های ماهواره MODIS به عنوان داده های دیدبانی و داده های ERA-entrim برای مطالعه شرایط همیدی، استفاده و به کمک نسخه 3.9 مدل عددی میان مقیاس WRF، شبیه سازی شاخص پوشش برف با گام زمانی ۶ ساعته در بازه منتخب استخراج شده است. داده های بازتحلیل GFS6 با دقت 0.5°×0.5° در مقیاس طول و عرض جغرافیایی برای شرایط مرزی و اولیه جوی در نظر گرفته شده اند. در بررسی شرایط همیدی، 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 بارش برف مورد مطالعه قرار گرفته است. برون داد پوشش برف مدل نیز برای همین بازه شبیه سازی شده است. روش ارزیابی در این بررسی استفاده از جدول توافقی می‌باشد که در آن معمولاً رخدادهای پیش بینی و دیدبانی با هم مقایسه می‌شوند و میزان صحت پیش بینی ها تعیین می‌شود. مهم ترین شاخص های استفاده شده در این پژوهش برای ارزیابی مدل شامل شاخص های POD، PODn، POFA، POFD، POFA، FBI، HSS، PC و می‌باشند. شاخص NDSI یا شاخص نرمال شده تمایز برف با مقادیر بیشتر از ۰/۴ معرف حضور برف در نقطه مورد نظر می‌باشد. مقادیر همخوان با این شاخص، پوشش برف بیشتر از ۵۰ درصد برای برون داد مدل پیش بینی در نظر گرفته شده است. تحلیل همیدی معرف استقرار شیو فشاری قوی در منطقه مورد مطالعه همراه با عبور هوای سرد در لایه میانی جو می‌باشد که در روز رخداد بهمن با تاوایی پتانسیلی از مرتبه $10^{-4} S^{-1}$ همراه شده است. مهمترین نتایج این بررسی نشان می‌دهد بین مقادیر NDSI و برون داد مدل رابطه خطی خوبی بر قرار است و ضریب همبستگی در سطح معنی داری ۰/۰۱ بالای ۰/۷ است. احتمال آشکارسازی پوشش برف و شرایط بدون برف به طور میانگین در این سه روز بالاتر از ۷۰٪ می‌باشد. احتمال آشکارسازی اشتباه و هشدار اشتباه توسط مدل به طور میانگین به ترتیب ۰/۲ و ۰/۳ می‌باشد. مقادیر بایاس مدل برای روزهای ۲۹ و ۳۰ ژانویه بسیار نزدیک به یک (حدود ۰/۹ می‌باشد و روز ۲۸م بیشتر از ۲ است. شاخص PC به طور متوسط برای سه روز ۰/۷۸ است که نشان می‌دهد بر اساس این شاخص نسبت صحیحی تقریباً بر قرار است. آزمون هیدک تنها برای روز ۲۸ ژانویه کمتر از ۵۰٪ صحت را نمایش می‌دهد و در روزهای بیست و نهم و سی ام به ترتیب حدود ۵۱ و ۸۷ درصد صحت خروجی ها را تأیید می‌کند و به طور میانگین حدود ۶۰٪ پیش بینی پوشش برف طی این سه روز صحیح برآورد شده است.

روزهای ۲۹ و ۳۰ ژانویه آسمان تقریباً صاف و بدون ابر است و روزهای ۲۷ و ۲۸ ژانویه پوشش ابر در منطقه وجود دارد. با وجود حذف لایه ابر از تصاویر ماهواره ای در این دو روز، اما احتمال عدم دقت کافی در مقدار عددی شاخص بدست آمده همچنان وجود دارد.

Table 3- Indices of snow cover contingency table for January, 28, 29 and 30 2017

جدول ۳- محاسبه شاخص های جدول توافقی برای فراسنج پوشش برف برای روزهای ۲۸، ۲۹ و ۳۰ ژانویه

	POD	PODn	POFD	POFA	FBI	PC	HSS
Jan. 28 2017	0.98	0.62	0.37	0.64	2.7	0.68	0.35
Jan. 29 2017	0.73	0.77	0.22	0.21	0.93	0.75	0.51
Jan. 30 2017	0.84	0.92	0.07	0.06	0.90	0.88	0.76

Bartelt P, Lehning BM (2002) A physical SNOWPACK model for avalanche warning. Part I: Numerical model. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 35:123–145

Cohen J, Entekhabi D (1999) Eurasian snow cover variability and Northern Hemisphere climate predictability. *Geophys. Res. Lett.*, 26:345–348

Cohen J, Barlow M (2005) The NAO, the AO, and global warming: How closely related? *J. Climate*, 18:4498–4513

Cohen J, Furtado J, Jones J (2014) Linking Siberian snow cover to precursors of stratospheric variability. *J. of climate*, 54:5422–5432

Cutler N (2011) Vegetation–environment interactions in a sub-Arctic primary succession. *Polar Biol.*, 34, 693–706, doi:10.1007/s00300-010-0925-6

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

Erfanian M, Darvishpour E, Abghari M (2013) Estimation of snow cover surface by combining snow cover data of Terra and Aqua satellites in West Azerbaijan province. In: First National Conference on Climatology of Iran, 21-22 may, Kerman, Iran

Fattahi E, Vazifehdoost M (2012) Estimation of surface snow temperature and snow cover using MODIS sensor. *Geographical Researches Quarterly Journal* 23:129-141

Gottfried M, Hantel M, Maurer C, Toechterle H, Pauli H, Grabherr G (2011) Coincidence of the alpine–nival ecotone with the summer snowline. *Environ. Res. Lett.*, 6, 014013, doi:10.1088/1748-9326/6/1/014013

Hantel M, Zaurer C (2011) The median winter snowline in the Alps. *Meteor. Z.*, 20:267–276, doi:10.1127/0941-2948/2011/0495

Hardiman SC, Kushner PJ, Cohen J (2008) Investigating the ability of general circulation models to capture the effects of Eurasian snow cover on winter climate. *J. Geophys. Res.*, 113, D21123, doi:10.1029/2008JD010623

Hoelzle M, Haeberli M, Stocker-Mittaz C (2003) Miniature ground temperature data logger measurements 2000–2002 in the Murtèl-Corvatsch area, Eastern Swiss Alps. *Proc. Eighth Int. Conf. on Permafrost, Zürich, Switzerland, International Permafrost Association*, 419–424

به نظر می‌رسد روزهای ۲۹ و ۳۰ که خروجی مدل همخوانی بیشتری با دیدبانی ماهواره‌ای دارد، به علت عدم پوشش برف و صاف بودن آسمان باشد و اختلاف شرایط دیدبانی و پیش‌بینی در روز ۲۸ ژانویه می‌تواند به موجب پوشش ابر موجود در آسمان باشد که روش‌های دقیق‌تری برای حذف برف را می‌طلبد. از آنجا که دیدبانی در محل نیز وجود ندارد، امکان مقایسه مقادیر مستخرج از ماهواره با داده‌های زمینی مقدور نمی‌باشد. با این اوصاف نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از خروجی مدل WRF در منطقه کوهستانی استان البرز (جاده چالوس) می‌تواند حداقل تا ۶۰ درصد قابل اعتماد باشد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Numerical Weather Prediction
- 2- National Oceanic and Atmospheric Administration
- 3- Weather Research and Forecasting Model
- 4- Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
- 5- Normalized Difference Snow Index
- 6- Global Forecast System
- 7- National Centers for Environmental Prediction
- 8- Rapid Radiative Transfer Model
- 9- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
- 10- Probability of Detection
- 11- Probability of Detection (no)
- 12- Probability of False Detection
- 13- Probability of False Alarm
- 14- False Alarm Ratio
- 15- Proportion Correct
- 16- Heidek Skill Score

۵- مراجع

Ahmadi A, Khoramian A, Safavi HR (2015) Assessment of climate change impacts on snow-runoff processes a case study: Zayandehroud river basin. *Iran-Water Resources Research* 11(2):70-82 (In Persian)

Allen RJ, Zender CS (2010) Effects of continental-scale snow albedo anomalies on the wintertime Arctic Oscillatio. *Journal of Geophysica Research*, D23105

Armstrong RL, Brodzik MJ (2001) Recent Northern Hemisphere snow extent: A comparison of data derived from visible and microwave satellite sensors. *Geophys. Res. Lett.*, 28:3673–3676

Asoudeh, M, Jafari S, Mousavi A (2013) Estimation of snow cover surface by combining snow cover data of Terra and Aqua satellites in West Azerbaijan province. In: First National Conference on Climatology of Iran, 21-22 may, Kerman, Iran

- and ground-based observations. *Remote Sens. Environ.* 101:257–269
- Saito K, Cohen J (2003) The potential role of snow cover in forcing interannual variability of the major Northern Hemisphere mode. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1302, doi: 10.1029/2002GL016341
- Shiklomanov AI, Lammers RB, Vorosmarty CJ (2002) Widespread decline in hydrological monitoring threatens Pan-Arctic research. *Eos, Trans. Amer. Geophys. Union*, 83:13-28
- Shimamura Y, Izumi T, Matsuyama H (2006) Evaluation of a useful method to identify snow-covered areas under vegetation— comparisons among a newly proposed snow index, normalized difference snow index, and visible reflectance. *International journal of remote sensing* 27 (21), p. 4867
- Tasdighian M, Rahimzadegan M (2017) Evaluation and improvement of snow cover detection from MODIS images. *Iran-Water Resources Research* 13(1):163-177 (In Persian)
- Thompson G, Field P, Rasmussen R, 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
- Tyler SW, Burak SA, McNamara JP, Lamontagne A, Selker JS, Dozier J (2008) Spatially distributed temperatures at the base of two mountain snowpacks measured with fiberoptic sensors. *J. Glaciol.*, 54:673–679
- Teubner I, Haimberger L, Hantel M (2015) Estimating snow cover duration from ground temperature. *J. Appl. Meteor.*, 54:959-965
- Tewari MF, Chen F, Wang W, Dudhia J, LeMone MA, Mitchell K, Gayno ME, Wegiel J, Cuenca RH (2004) Implementation and verification of the unified NOAH land surface model in the WRF model. 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, pp. 11–15
- Vercauteren NS, Lyon SW, Destouni G (2014) Seasonal influence of insolation on fine-resolved air temperature variation and snowmelt. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 53:323–332
- Zhang T (2005) Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview. *Rev. Geophys.*, 43:288-303
- Islamic Republic News Agency (2016) Avalanches in Karaj-Chalous road. <http://www.irna.ir/fa/News/82405789>
- Janjic ZI (2002) Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model. NCEP Office Note No. 437, 61 pp
- Kamnoush J, Saraf AP, Sadeghi H (2015) Estimation of snowmelt runoff from Semirrom watershed using SRM model and MODIS satellite imagery. In: 2nd International Conference on Sustainable Development, Strategies & Challenges. First National Conference on Climatology of Iran, 23-25 February, Tabriz, Iran
- Kashki A, Haji Mohammadi H (2017) Synoptic systems analysis took occurrence of heavy snow in the northern provinces of Iran A case study is January 31 to February 3, 2014. *Water Recourse resreach*, 13(2):170-181 (In Persian)
- Liston GE (1999) Interrelationships between snow distribution, snowmelt, and snow cover depletion: Implications for atmospheric, hydrologic, and ecologic modeling. *J. Appl. Meteor* 38:1474–1487
- Lundquist J D and Lott F (2008) Using inexpensive temperature sensors to monitor the duration and heterogeneity of snowcovered areas. *Water Resour. Res.*, 44, W00D16, doi: 10.1029/2008WR007035
- Mehr News Agency (2017) <https://en.mehrnews.com>
- Mlawer Eli 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
- Moradi M and Amiri S (2014) Estimate of snowfall in regions without snowflake stations by combining satellite imagery and ground station data: Case study of snowfall in March 2010 in Markazi province. In: National Conference on Water, Human, Earth, 28 August, Isfahan, Iran
- Nazmfar H, Moradi M (2016) Simulation of the runoff resulted from snowmelt using of the remote sensing data (Case Study: Dehgolan Basin). *Journal of Geography and planning* 55:273-289
- Najafi A, Ghoddoosi J, Saghafian B, Porhemmat J (2005) Estimation of snow melt runoff using remote sensing and geographic information system in Urmia Shahr-e Chahi Basin. *Research and construction Journal* 20:177-185
- Pulliainen J (2006) Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and subarctic zones by assimilating spaceborne microwave radiometer data