



Estimation of Changes in Snow Depth in Ardabil and Sarein City Using Sentinel1 Satellite Data with Radar Interferometry Method

S. Asghari Saraskanrood^{1*} and R. Modirzadeh²

Abstract

Snow, as an important part of the hydrological cycle, is considered to be a major source of fresh water in many areas above 45 degrees latitude, so it is important to study and measure changes in snow levels as an important source of water supply. In the present study, first using Sentinel2 optical satellite images in 1397 in Ardabil and Sarein, snow cover level was obtained through NDSI index, then in order to monitor snow depth changes in the study area, SentinelA1 macro images and DINSAR technique were used. Finally, in order to validate the snow depth maps extracted through radar images, the snow depth data in land snowfall stations were compared using linear regression in MATLAB software. The results of linear regression with a generalization coefficient of 85% and the results of error statistical indicators are equal to 0.86-MSE, 0.165-BIAS, 0.924-CORR and RMSE equal to 0.043. The correlations between ground data and snow depth estimation maps show a high degree of correlation. This result is statistically significant at 99%. The results of the present study showed that according to the climatic conditions of the study area, the values of snow depth related to January with a maximum amount of 33 cm and the lowest values of snow depth in March with a minimum of 10 cm. The lowest snow depth was in the eastern slopes and the highest in the western slopes. According to the study, the Sentinel-1's radar images could be a good alternative to ground-based snow stations at high altitudes or in difficult areas due to their high spatial resolution and good correlation with terrestrial data.

Keywords: Snowfall, Radar Images, Interferogram.

Received: February 28, 2020

Accepted: May 24, 2020

برآورد تغییرات عمق برف در سطح شهرستان اردبیل و سرعین با استفاده از داده‌های ماهواره Sentinel1 با روش تداخل‌سنجی راداری

صیاد اصغری سراسکانرود^{۱*} و ریحانه مدیرزاده^۲

چکیده

برف به‌عنوان بخش مهمی از چرخه هیدرولوژیکی، در بسیاری از مناطق بالاتر از عرض جغرافیایی ۴۵ درجه به‌عنوان یک منبع بزرگ آب شیرین محسوب می‌شود، بنابراین مطالعه و اندازه‌گیری تغییرات سطوح برف به‌عنوان یکی از منابع مهم تأمین آب بسیار حائز اهمیت است. در پژوهش حاضر، ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای اپتیکال Sentinel2 در سال ۱۳۹۷ در شهرستان اردبیل و سرعین سطح پوشش برف از طریق شاخص NDSI به دست آمده و سپس به‌منظور پایش تغییرات عمق برف منطقه مورد مطالعه نیز از تصاویر ماکروویو SentinelA1 و تکنیک DINSAR استفاده شد. در نهایت به منظور صحت‌سنجی، نقشه‌های عمق برف استخراج شده از طریق تصاویر راداری با داده‌های عمق برف در ایستگاه‌های برف‌سنجی زمینی با استفاده از رگرسیون خطی در نرم‌افزار MATLAB مقایسه شد. نتایج حاصل از رگرسیون خطی با ضریب تعمیم ۸۵ درصد و نتایج حاصل از شاخص‌های آماری خطا نیز برابر با مقادیر $MSE=0.086$ ، $BIAS=-0.165$ ، $CORR=0.924$ و $RMSE=0.043$ برابر با ۰/۰۴۳ به دست آمد. روابط همبستگی بین داده‌های زمینی و نقشه‌های برآوردی از عمق برف میزان بالایی از همبستگی را نشان داد. این نتیجه از لحاظ آماری در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار بود. نتایج تحقیق حاضر نشان داد با توجه به شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه، حداکثر میزان عمق برف مربوط به دی‌ماه با ۳۳ سانتی‌متر و کمترین آن در ماه اسفند به میزان ۱۰ سانتی‌متر است. کمترین میزان عمق برف در دامنه‌های شرقی و بیشترین مقدار آن در دامنه‌های غربی بوده است. طبق یافته‌های این تحقیق تصاویر راداری SentinelA1 با توجه به قدرت تفکیک مکانی بالا و همبستگی مناسب با داده‌های زمینی، می‌تواند جایگزین خوبی برای ایستگاه‌های زمینی برف‌سنجی در ارتفاعات و یا مناطق صعب‌العبور باشد.

کلمات کلیدی: برف‌سنجی، تصاویر راداری، اینترفروگرام.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۲/۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۳/۴

1- Associate Professor of Geomorphology, Department of Geography, Faculty Literature of Humanities, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil. Email: s.asghari@uma.ac.ir

2- M.Sc. Student in RS and GIS, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil.

*- Corresponding Author

۱- دانشیار دانشکده ادبیات و علوم انسانی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.
۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه محقق اردبیلی.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

جهانی، ملی و ناحیه‌ای، پوشش وسیع، مقرون‌به‌صرفه بودن، تولید اطلاعات چند زمانه، صرفه‌جویی در زمان، کاهش هزینه روش تشخیص تغییرات و سایر موارد می‌باشد در نتیجه می‌توان گفت تکنیک سنجش‌ازدور کارایی مؤثری در برنامه‌ریزی و مطالعات مبتنی بر پایش برف دارد و به کارگیری آن جهت بررسی سطح پوشش برف و عمق برف در این‌گونه مناطق ضروری می‌باشد.

Patil et al. (2018) از روش تداخل‌سنجی راداری برای برآورد آب معادل برف استفاده کرده‌اند که در این روش از طریق ساخت تداخل‌سنجی با استفاده از باند C ماهواره Sentinel1 در نرم‌افزار Snap^۲ در پردازش هند مربوط به سال ۲۰۱۶-۲۰۱۵ اقدام کردند در واقع از یک تصویر مربوط به زمستان و دو تصویر پاییزی برای بررسی امکان‌سنجی این روش استفاده شد. هدف اصلی این تحقیق برآورد آب معادل برف برای برف کم عمق بوده که این روش جایگزین روش‌های سنتی شده چرا که در روش‌های سنتی نیاز به عمق بیشتری از برف بوده تا بتوان آب معادل برف را به دست آورد. نتایج با استفاده از داده‌های میدانی جمع‌آوری شده در سازمان هواشناسی Dhundi واقع در هیمالچال صحت‌سنجی شد که RMSE برای سال ۲۰۱۵ برابر ۳ سانتیمتر و برای سال ۲۰۱۶ برابر ۲/۸ سانتیمتر برآورد شده است که نتایج بسیار خوبی را نشان دادند. (Snapira et al. (2018) در تحقیقی با عنوان برآورد برف مرطوب با استفاده از داده‌های Sentinel1 و محصولات Modis در حوضه‌ی شمال‌غربی هیمالیا نشان دادند که سنجش از راه دور ماهواره‌ای، با دو ابزار نوری و راداری می‌تواند پوشش برف را در مناطق کوهستانی و صعب‌العبور ارائه دهد در این مطالعه آن‌ها جهت تولید نقشه‌های برفی از تکنیک تلفیق داده‌های اپتیکال Modis و راداری Sentinel1 در سامانه‌ی Google Earth Engine اقدام کردند نتایج آن‌ها نشان داد که Sentinel1 به‌طور مؤثری تکمیل‌کننده‌ی داده‌های Modis است این نتایج با استفاده از شاخص خطا RMSE و ضریب کاپا صحت‌سنجی شد که به ترتیب برابر است با ۲/۸۵ و ۰/۹۴ می‌باشد که نتایج قابل قبولی را ارائه دادند. درنهایت مشاهدات این نتایج با وضوح بالا در مناطق برفی به عنوان ورودی به مدل‌های هیدرولوژیکی برای تجزیه و تحلیل بهتر رواناب و مدیریت بهتر منابع آب و ریسک‌پذیری مورد نیاز است. (Tsai et al. (2019) به برآورد عمق برف مرطوب و برف خشک با استفاده از داده‌های راداری Sentinel1، در مناطق کوهستانی (کوه‌های آلپ) پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش مبتنی بر INSAR اقدام به برآورد عمق برف خشک و مرطوب کردند صحت‌سنجی داده‌های آن‌ها با استفاده از نمودار ACU، ۸۰ درصد برآورد شده است. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که این روش از پتانسیل بسیار بالایی در برآورد عمق برف مرطوب

پوشش برفی نمایانگر مؤلفه مهمی از کریوسفر (یخ کره) کره زمین است، تشخیص و نظارت بر پوشش آن، شرایط و فرآیندی که منجر به تحولات فعلی و آینده آن می‌شود بسیار مهم است. در چرخه هیدرولوژی مناطق کوهستانی، برف را می‌توان از انواع مهم بارش نام برد که در تأمین منابع آب آشامیدنی و کشاورزی و تولید انرژی منبع اصلی تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی محسوب می‌شود (Tsai et al., 2019). در طول زمستان، بیش از ۴۰٪ نیم‌کره شمالی توسط برف پوشیده می‌شود که در نتیجه تأثیرات متعدد بر محیط‌زیست، پوشش برف در گزارش ارزیابی پنجم (AR5)^۱ هیئت‌رئیس (پنل) بین‌کشورها در مورد تغییر اقلیم (IPCC)^۲ مورد توجه قرار گرفته و به عنوان یک متغیر مهم آب و هوایی در سیستم جهانی مشاهدات آب و هوا (GCOS)^۳ شناخته می‌شود. ثابت شده است که اهمیت پوشش برف (SCE)^۴ به شدت با فعالیت‌های انسانی پیوند دارد، در نتیجه نظارت بر پوشش برف یکی از مهم‌ترین مباحث در مطالعه و درک کره زمین است. چنانکه پوشش برف می‌تواند در مدت زمان کوتاه به میزان قابل توجهی متفاوت باشد و در مناطق وسیعی گسترش یابد، سنجش از راه دور یک فن مشاهده دقیق برای ردیابی مداوم آن است با این حال، چون که تصاویر نوری محدود به خورشید می‌باشد در برآورد میزان برف مناسب نیست اما رادار ترکیبی با روزنه مصنوعی (SAR)^۵ به دلیل توانایی تصویربرداری آن در روز و شب در هر شرایط آب و هوایی (ابری) توجه بیشتری را در این زمینه به خود جلب کرده است (Tsai et al., 2019). همچنین از آنجا که مناطق کوهستانی نسبت به دیگر مناطق بیشترین پوشش برف را به خود اختصاص می‌دهند پایش برف در آن مناطق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، تاکنون برای پایش برف از روش‌های زیادی استفاده کرده‌اند که در گذشته با استفاده از روش‌های سنتی، آمار و اطلاعات ایستگاه‌های برف‌سنجی، مطالعه و پایش برف بسیار دشوار بوده است چون از طرفی برای دستیابی به وضوح بالا در ارزیابی و بررسی برف به ایستگاه‌های برف‌سنجی با فاصله کم نسبت به هم در نواحی کوهستانی نیاز بوده و از طرف دیگر ساخت و تجهیز تعداد زیادی از ایستگاه‌های برف‌سنجی با هزینه کلانی همراه بوده است، همچنین در صورت ایجاد دسترسی به ایستگاه، ثبت اطلاعات آن در فصول سرد و برفی امکان‌پذیر نبوده و اندازه‌گیری‌هایی که در آن ایستگاه‌ها ثبت می‌شدند به دلیل داشتن ماهیت نقطه‌ای، برای مطالعه پدیده پیوسته‌ای مثل پوشش برف و عمق برف، معیار مناسبی نبودند بنابراین با در نظر گرفتن تمامی این محدودیت‌ها، به‌کارگیری روش‌های جدید سنجش‌ازدور نوری و راداری آغاز شد و کمک شایانی در این زمینه به محققان کرد چراکه این داده‌ها دارای مزایای مختلف از جمله امکان تهیه اطلاعات در مقیاس‌های مختلف

(2019) به برآورد میزان برف مرطوب در مناطق یخچال‌های طبیعی روفنتال^{۱۰} اتریش با استفاده از Sentinel1 اقدام کردند که به مدت چهار سال یخبندان (۲۰۱۴-۲۰۱۵-۲۰۱۷-۲۰۱۸) در این منطقه داده‌ها پردازش شد و برای هر چهار سال برای یک منطقه بر اساس نتایج به دست آمده از Sentinel1، میزان برف مرطوب با دقت سه تا چهار پیکسل یا ۳۰-۴۰ متر به دست آمد سپس نتایج با ضریب کاپا و شاخص خطا صحت‌سنجی شده که به ترتیب برابر با ۰/۹۲ و ۱/۸۲ است در نهایت گردش کار معرفی شده برای Sentinel1 به نظارت بر میزان انباشت یخچال‌های دور دست و خطرناک کمک می‌کند همچنین نتایج نشان داد که داده‌های رادار مطالعه‌ی دقیق یخچال‌ها را برای چنین مکان‌هایی و دیگر مناطق بهبود می‌بخشد. Almodarresi et al. (2016) در پژوهش خود با استفاده از دوازده تصویر راداری سنجنده TerraSAR-X و روش تداخل‌سنجی نقشه عمق و حجم برف مه‌ماه ۱۳۹۱ تا اردیبهشت ۱۳۹۲ را استخراج کردند. با استفاده از رگرسیون خطی بین نقشه عمق برف که از روش تداخل‌سنجی تولید شده و داده‌های عمق آب معادل برف که از ایستگاه‌های زمینی برداشت شده بودند، نقشه عمق آب معادل برف تولید شد که نتایج بیانگر ضریب تعمیم ۸۵ درصد و RMSE برابر ۲/۷۸ بوده است. Seifi and Feizizadeh (2019) در پژوهش خود به برآورد عمق برف و آب قابل استحصال از آن با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat8 و Sentinel1 در حوضه آبریز یامچی پرداختند آن‌ها از طریق اعمال شاخص Ndsi بر روی Landsat8 پوشش برف را متمایز کردند و با استفاده از Sentinel1 و روش تداخل‌سنجی عمق برف را به دست آوردند. نتایج با داده‌های زمینی صحت‌سنجی شده و ضریب همبستگی برابر ۹۱ درصد به دست آمد. حجم برف و آب معادل برف را نیز از طریق نقشه‌های سطح و عمق برف، حاصل شد که در نهایت با استفاده از همبستگی بین داده‌های عمق برف و آب معادل برف، یک رابطه خطی درجه شش با ضریب ۰/۸۷ محاسبه شد که نتایج قابل قبولی ارائه داده‌اند. در راستای هدف این تحقیق با توجه به مطالب بیان شده در زمینه‌ی مطالعه برف می‌توان گفت که تحقیقاتی زیادی در ایران در خصوص برآورد پوشش برف، آب معادل برف و ذخایر برفی صورت گرفته که بیشتر از مدل‌های اقلیمی و سنجش از دور اپتیک با قدرت تفکیک مکانی متوسط و پایین استفاده شده است. در این تحقیق با استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا به برآورد عمق و پوشش برف پرداخته شد که در این خصوص مطالعات بسیار محدودی صورت گرفته است، تمام تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که تکنیک تداخل‌سنجی راداری اهمیت ویژه‌ای در ارزیابی و برآورد تغییرات عمق برف دارد بنابراین سعی شده است که با استفاده از تصاویر نوری و ماکروویو سطح پوشش و عمق برف شهرستان اردبیل و سرعین،

نسبت به برف خشک در مناطق کوهستانی برخوردار است. Jesenko et al. (2019) به برآورد پوشش برف و عمق برف تازه در فصول مختلف سال پرداختند آن‌ها با استفاده از باند X رادار در حوضه آبخیز رودخانه بیاس^۷ در شمال غربی هیمالیا در نزدیکی مانالی هند به برآورد عمق برف تازه و سطح پوشش برف اقدام کردند با این حال، به دلیل محدود بودن ایستگاه‌های زمینی، فقط از اطلاعات سازمان هواشناسی Dhundi استفاده شد که نتایج قابل قبولی ارائه دادند همچنین نتایج آن‌ها نشان داد مجموعه داده‌های نوری در رابطه با تصاویر راداری می‌تواند برای ترسیم انواع برف خشک و مرطوب استفاده شود. Majumdar et al. (2019) در مطالعه‌ای به برآورد آب معادل برف در نونگان، استان جیلین چین، بر اساس داده‌های چند زمانه‌ی Sentinel1 پرداختند. در این مقاله در منطقه برفی کم عمق در زمستان دو تصویر از Sentinel1 با فرمت IW^۸ تداخل‌سنجی شدند نتیجه تحقیق آن‌ها نشان داد که روش مورد استفاده در این تحقیق از دقت بالایی برخوردار بوده و داده‌های Sentinel1 برای برآورد آب معادل آب نه تنها امکان‌پذیر است بلکه بهترین کارایی را دارد که در نهایت MAE برابر ۰/۱۹۸ و RMSE برابر ۰/۲۴ سانتیمتر است. Varade and Dikshit (2019) از دو روش برای برآورد برف مرطوب و برف خشک استفاده کرده‌اند در روش اول با استفاده از داده‌های Sentinel2 و شاخص NDSI^۹ به برآورد پوشش برف اقدام کردند که به دلیل وضوح بالای داده‌های Sentinel2 مقدار پوشش برف به دست آمده با داده‌های مرجع سازمان هواشناسی با استفاده از ضریب کاپا صحت‌سنجی گردید که دقت آن برابر ۰/۷۸ بوده است؛ در روش دوم با استفاده از تکنیک پلاریمتری و داده‌های Sentinel1 به برآورد برف مرطوب و خشک پرداختند که نتایج آن‌ها با ضریب تعیین رگرسیون خطی برابر ۰/۵۸ و با استفاده از ریشه میانگین مجذور خطا برابر با ۱/۰۳ بوده است همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که برف مرطوب بهتر از برف خشک برآورد شده است. Eckerstorfer et al. (2019) به تشخیص و نظارت بر فعالیت‌های بهمن پرداختند آن‌ها با این هدف که آگاهی از وقوع زمانی فعالیت بهمن برای پیش‌بینی بهمن بسیار مهم است در یک منطقه بزرگ با ابعاد ۱۵۰ × ۱۰۰ کیلومتری شمال نروژ با استفاده از پنج تصاویر Sentinel1 به پردازش در نرم‌افزارهای راداری اقدام کردند که با بازبازدیدهای میدانی ۷۷/۳ درصد از بهمن‌ها تشخیص داده شد این بازبازدید میدانی به عنوان معیار و صحت‌سنجی تحقیق آن‌ها استفاده شد، همچنین دقت نتایج تشخیص بهمن‌ها در این منطقه با استفاده از Sentinel1 برابر ۷۹٪ با وضوح خیلی بالا شامل بهمن‌های متوسط و بزرگ به دست آمد که در حال حاضر، سرویس هشدار بهمن نروژ از سیستم پردازش این همکاران برای قبل وقوع بهمن در سه منطقه نروژ استفاده می‌کنند. Heilig et al.

۲-۲-۲- داده‌های زمینی برف‌سنجی

داده‌های برف‌سنجی در این پژوهش شامل عمق برف و برف تازه و روزهای بارش برف، دما، تعداد روزهای یخبندان و آمار بارندگی سالیانه برای دوره یک ساله ۱۳۹۷ است. اطلاعات از ایستگاه‌های برف‌سنجی سازمان هواشناسی استان اردبیل جمع‌آوری شده است. این ایستگاه‌ها شامل ایستگاه‌های اردبیل، سرعین و فرودگاه می‌باشند که موقعیت این ایستگاه‌ها در جدول ۵ بیان شده است.

۲-۳- روش‌شناسی

به منظور بررسی تغییرات عمق و سطح پوشش برف، ابتدا تصاویر SentinelA1 و Sentinel2 مربوط به سال ۱۳۹۷ برای شهرستان اردبیل و سرعین تهیه گردید. به این منظور با توجه به این موضوع که بازه زمانی مورد استفاده باید دارای سطح پوشیده از برف باشد و چون که نمی‌توان به یک روز از ماه برای بررسی پوشش و عمق برف اکتفا کرد تصاویر چهار ماه اول سال مد نظر اخذ شده و پردازش جداگانه‌ای بر روی آن‌ها اعمال شد و برای تمامی ماه‌ها این عمل تکرار شد. در این پژوهش جهت پایش خصوصیات فیزیکی برف از قبیل سطح پوشش برف و عمق برف با دقت مکانی بالا سعی شده است تا از مزایای تصاویر ماهواره‌ای نوری و ماکروبو استفاده گردد عمق و مساحت برف تخمین زده شد و مقدار آن به دست آمده است.

مورد بررسی قرار گرفته و مساحت و مقدار عمق برف برای سال ۱۳۹۷ برآورده شود. نوآوری پژوهش حاضر، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel1 و Sentinel2 برای برآورد عمق و سطح برف می‌باشد.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

شهرستان اردبیل و سرعین به عنوان منطقه مورد مطالعه این تحقیق با وسعتی حدود ۳۸۱۰ کیلومترمربع در ارتفاع ۱۳۵۰ متر از سطح آب‌های آزاد، در شمال غرب ایران واقع شده است که از نظر موقعیت جغرافیایی در ۴۸ درجه و ۱۸ دقیقه طول جغرافیایی و ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه عرض جغرافیایی قرار گرفته است (شکل ۱).

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

داده‌های ماهواره Sentinel1: در پژوهش حاضر برای دستیابی به عمق برف از باند C تصاویر ماهواره SentinelA1 استفاده شده است که مشخصات نوع تصویر تهیه شده در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲-۱- داده ماهواره Sentinel2

برای استخراج سطح پوشش برف منطقه مورد مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MSI^{۱۱} ماهواره Sentinel2 استفاده شد که مشخصات نوع تصویر تهیه شده در جدول ۲ نشان داده شده است.

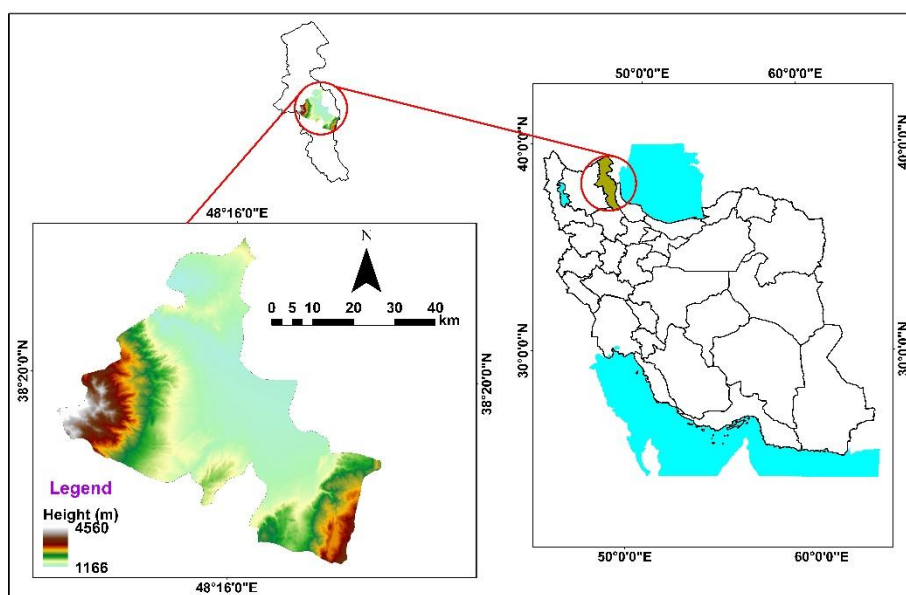


Fig. 1- Location of the study area
شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه

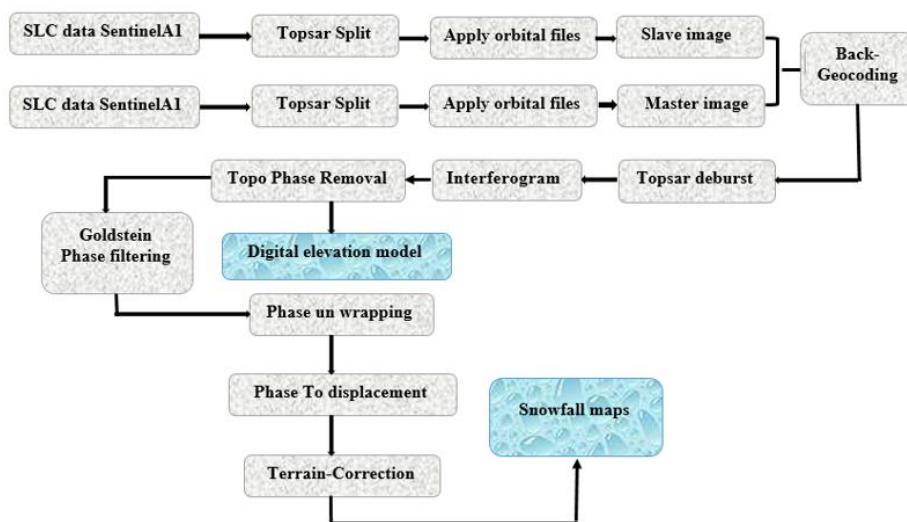


Fig. 2- The processing levels for Sentinel A1 images to achieve snow depth

شکل ۲- مراحل پردازش تصاویر SentinelA1 جهت دستیابی به عمق برف

Table 1- The type of images used by SentinelA1 satellite radar

جدول ۱- نوع تصویر استفاده شده راداری ماهواره SentinelA1

Imaging band	Spatial resolution	Processing level	Format	Shooting history
C-SAR	IW, 5 m x 20 m	SLC	IW	2018/01/18
C-SAR	IW, 5 m x 20 m	SLC	IW	2017/12/20
C-SAR	IW, 5 m x 20 m	SLC	IW	2018/02/14
C-SAR	IW, 5 m x 20 m	SLC	IW	2018/03/08
C-SAR	IW, 5 m x 20 m	SLC	IW	2017/09/19

Table 2- Specifications of the images used to extract the surface area of the snow cover

جدول ۲- مشخصات تصاویر استفاده شده جهت استخراج سطح پوشش برف

Satellite	Sensor	Spatial resolution	Format	Date
Sentinel2	msi	10m	Tif	2018/01/18
Sentinel2	msi	10m	Tif	2017/12/20
Sentinel2	msi	10m	Tif	2018/02/14
Sentinel2	msi	10m	Tif	2018/03/08

مادون قرمز میانی (B₁₁) سنجنده تقسیم بر مجموع بازتابندگی در این دو باند به دست می‌آید، در تهیه نقشه پوشش برفی زمانی که پیکسل دارای NDSI بزرگ‌تر یا مساوی ۰/۴ است به‌عنوان پیکسل برفی در نظر گرفته می‌شود (Nagajothi at al., 2019).

$$NDSI = \frac{B_3 - B_{11}}{B_3 + B_{11}} \frac{Green - Swir}{Green + Swir} \quad (1)$$

لذا در تحقیق حاضر از طریق رابطه (۱) در محیط نرم‌افزار Snap سطوح برف برای ماه‌های موردنظر، مربوط به منطقه مورد مطالعه استخراج شد.

۲-۳-۱- استخراج سطح برف

پس از دانلود تصاویر مربوط به منطقه مورد مطالعه و اطمینان از عدم وجود خطاهای رایج هندسی، جهت پردازش و اعمال الگوریتم‌های مورد نیاز بر روی تصویرهای منتخب از نرم‌افزار Snap استفاده گردید. تصاویر پردازش شده بر اساس محدوده مورد مطالعه برش داده شد که در نهایت جهت استخراج سطح پوشش برف آماده گردید.

- شاخص NDSI: این شاخص را می‌توان از رابطه‌ی (۱) محاسبه کرد که از نسبت اختلاف بازتابندگی باند مرئی (B₃) سنجنده و

۲-۳-۲- استخراج عمق برف

در این تحقیق برای سنجش تغییرات عمق برف از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری استفاده شده است. روش تداخل سنجی D-InSAR روشی برای تهیه نقشه‌های ارتفاعی، جابجایی و تغییرات سطح زمین و نیز تعیین سرعت حرکت هدف از طریق تداخل فاز دو یا چند تصویر راداری با روزه مجازی SAR اخذ شده از منطقه‌ی مشابه اطلاق شده است. این روش قادر است با استفاده از حداقل سه (دو تصویر+DEM) یا تعداد بیشتری از تصاویر راداری (سری زمانی^{۱۲}) تغییرات سطحی رخ داده در زمین را در بازه‌های متفاوت با دقت‌های میلیمتری آشکارسازی کند (Seifi and Feizizadeh, 2019).

۲-۳-۳- پردازش تکنیک تداخل سنجی^{۱۳}

تکنیک تداخل سنجی معروف به (InSAR) برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین ابداع شده است، این تکنیک هنگامی که با نظارت ژئودزیکی زمینی مانند سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی همراه باشد، می‌تواند حرکات سطح را در مقیاس میلی‌متر تا سانتی‌متر با وضوح مکانی بالا شناسایی کند بدین طریق که الگوی تداخل ناشی از اختلاف فاز بین دو تصویر بدست آمده توسط یک رادار فضایی در دو زمان مشخص را محاسبه می‌کند (Nagler et al., 2016)؛ در حقیقت تداخل نگار^{۱۴} حاصل ضرب مختلط دو تصویر مورد نظر در زمان‌های گوناگون است. تداخل نگار به وجود آمده به روش InSAR قابلیت نمایش تغییرات ارتفاعی و ناهمواری را دارد، لازمه ایجاد آن داشتن دو تصویر با فرمت SLC^{۱۵} با طول خط مبنای مناسب و همدوسی^{۱۶} بالا و وجود پارامترهای مداری دقیقی است تا پردازش‌های لازم و ضروری انجام شود. با در نظر داشتن هدف تحقیق می‌توان طول بازه‌های مکانی و زمانی را انتخاب نمود و با مدنظر داشتن فاصله زمانی می‌توان داده‌هایی را گزینش کرد تا امکان دسترسی به همدوسی‌های بالاتر بین فازها را داشته باشد که در این صورت باید داده‌ها دارای طول باز کم باشند زیرا تصاویری که در فاصله زمانی مختلف انتخاب می‌شود معمولاً در این فواصل سطح زمین دچار جابه‌جایی شده از طرفی چون داده‌ها دارای طول باز زیاد می‌باشند در نتیجه با همدوسی پایین بین دو تصویر امکان آشکارسازی آن برای ما امکان‌پذیر نمی‌باشد (Almodarresi et al., 2016).

– **فرآیند SPLIT**: تصاویر SLC ماهواره‌ی Sentinel1 دارای تکه‌های مختلفی هستند که هر یک از این تکه‌ها یک برست^{۱۷} شناخته می‌شوند. زمانی که این فرآیند بر روی داده‌ها صورت گیرد هر یک از این برست‌ها به عنوان یک محصول جداگانه در فرآیند پردازشی در نظر گرفته می‌شود (Meyer et al., 2018).

– **فرآیند Apply orbit file**: با استفاده از این فرآیند در واقع اطلاعات مربوط به سرعت، دقت ماهواره در زمان تصویربرداری برای هر یک از داده‌های ورودی تعریف می‌شوند (Meyer et al., 2018).

– **تولید اینترفروگرام^{۱۸}**: حاصل ضرب یک تصویر راداری در مختلط مزدوج تصویر دوم موجب به وجود آمدن تداخل نگاشت می‌شود. در این صورت فاز تداخل نگاشت، اختلاف فاز زوج تصویر و دامنه آن، حاصل ضرب دامنه‌های زوج تصویر است که از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Maghsoudi and Mahdavi, 2013):

$$\begin{aligned} S_1 &= A_1 \sigma^{i\phi_2} & S_2 &= A_2 \sigma^{i\phi_2} \\ S_1 \cdot S_2 &= A_1 \times A_2 e^{i(\phi_1 - \phi_2)} = e^{i\phi} \end{aligned} \quad (2)$$

در روابط فوق S_1 و S_2 سیگنال‌های ثبت شده در A تصاویر اول و دوم برای یک پیکسل متناظر، A_1 و ϕ دامنه سیگنال‌های ثبت شده، ϕ_1 و ϕ_2 فاز آن‌ها، A حاصل ضرب دامنه سیگنال‌های ذکر شده و ϕ فاز تداخل نگاشت است (Maghsoudi and Mahdavi, 2013).

– **فیلتر گلدشتاین^{۱۹}**: این فیلتر اندازه‌گیری فاز و تصحیح فاز را بهبود می‌بخشد و اعمال این فیلتر در مواقعی که ایجاد تغییر فازها اهمیت کمی داشته باشد با دستکاری تمامی فازها باعث تولید طرح تداخلی بهتری می‌شود (Panahi, 2012).

– **واپسچی فازها^{۲۰}**: مرحله تصحیح فاز در 2π شناخته شده است بنابراین برای مرتبط کردن فاز تداخل سنجی با ارتفاع توپوگرافی باید در ابتدا فاز بدون پرده باز شود. مهم‌ترین مراحل در فرآیند پردازش اینترفرومتری مرحله تصحیح فاز است که باید قبل از اندازه‌گیری جابجایی انجام داد اصلاح فاز موجب می‌شود تا مقادیر حقیقی پالس به صورت مجدد محاسبه شده و ابهام 2π اصلاح شود (Akerson et al., 2000).

– **رفع فاز حاصل از توپوگرافی^{۲۱}**: در این فرآیند تغییرات ارتفاع و فاز نسبت به هم مورد سنجش واقع می‌شوند اگر خط مبنای مکانی برابر صفر باشد در آن زمان توپوگرافی منطقه هیچ تأثیری در فاز تداخل نگاشت نخواهد داشت در صورت دخالت داشتن توپوگرافی می‌توان با استفاده از داده ارتفاعی منطقه (حاصل از مدل رقومی زمین، نقشه توپوگرافی و یا تولید شده از روش تداخل سنجی) از رابطه‌ی زیر استفاده نمود (Maghsoudi and Mahdavi, 2013).

$$|df| \approx \frac{2\pi\alpha B \sin(\psi + \beta)}{\lambda R \cos\psi} |dh| \quad (3)$$

- **تبدیل فاز به جابجایی**^{۲۲}: برای اینکه فاز به جابجایی تبدیل شود، واحد مقادیر پیکسل‌های تصویر تولید شده از واحد فاز، تبدیل به واحد جابجایی می‌شود (Panahi, 2012).

- **صحت‌سنجی داده‌ها**: جهت یافتن جواب‌های واقعی و برآورد پارامترهای مربوط به برف از رگرسیون خطی باهدف دقیق بودن رابطه بین نمونه‌های مشاهداتی و برآوردی با بهترین برازش خطی استفاده شد که حاصل آن به‌صورت نموداری بوده است (شکل ۵)، این نمودار پراکنش نقاط مشاهداتی و ضرایب همبستگی در نقاط موجود در سطح منطقه را نشان می‌دهد؛ همچنین برای انجام ارزیابی مدل رگرسیون خطی و اطمینان از دقت بالای نقشه‌های به‌دست‌آمده از چندین شاخص آماری چون: ریشه میانگین مجذور خطا (RMSE)، میانگین مجذور خطا (MSE)، بایاس (BIAS) و ضریب همبستگی خطی (CORR) استفاده شد. اعمال این شاخص‌ها در نرم‌افزار EXCEL انجام گرفت که نتیجه در شکل ۶ و ۷ آورده شده است.

- **رگرسیون خطی ساده**: رگرسیون خطی دارای یک متغیر وابسته و مستقل است که در آن نمودار پراکنش به‌خوبی الگوی همبستگی دو متغیر را به لحاظ بصری نمایان می‌کند (Raygani et al., 2008).

- **شاخص‌های خطا**: بررسی و ارزیابی توان مدل رگرسیون خطی با محاسبه چندین شاخص آماری صورت می‌پذیرد که در ادامه شرح داده خواهد شد.

- **ریشه میانگین مجذور خطا**: این شاخص از رابطه (۴) محاسبه می‌شود که در آن F_1 مقدار پیش‌بینی‌شده (مقدار خروجی واقعی محاسبه‌شده) و O_1 مقدار مشاهده شده و N_1 تعداد داده‌ها می‌باشد. هرچه مقدار RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده نزدیک‌تر بودن مقادیر مشاهده شده و برآورد شده به یکدیگر و دقیق‌تر بودن مدل است (Kaviani and Alijani, 2011).

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2 \right]^{1.2} \quad (4)$$

- **میانگین مجذور خطا**: این شاخص بر پایه رابطه زیر مقدار میانگین مربع تفاضل بین پیش‌بینی و دیدبانی‌های متناظر را محاسبه می‌کند؛ هراندازه مقدار آن به صفر میل کند، کمترین میزان خطا را نشان می‌دهد. این شاخص از رابطه (۵) محاسبه می‌شود (Kaviani and Alijani, 2011).

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2 \quad (5)$$

بایاس: این که مدل بر اساس اینکه چقدر بیش از حد نرمال یا کمتر از حد نرمال عمل ارزیابی را انجام می‌دهد استوار است و بر طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود که بهترین مقدار آن صفر است در واقع نسبت برآوردهای صحیح به مشاهدات صحیح می‌باشد و اگر مقدار آن برابر

۱ باشد نشانگر عدم وجود خطا می‌باشد این شاخص از رابطه (۶) محاسبه می‌شود (Kaviani and Alijani, 2011):

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i) \quad (6)$$

- **ضریب همبستگی خطی**: ضریب همبستگی شاخص آماری است که توسط آن درجات مختلف ارتباط بین دو متغیر وابسته را در یک مقیاس ثابت و محدود را می‌توان تعیین کرد. این ضریب بین مقدار مشاهده شده و بازیابی شده بر طبق رابطه (۷) محاسبه می‌شود (Kaviani and Alijani, 2011):

$$CORR = \frac{COY(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (7)$$

که در آن σ_x و σ_y انحراف استاندارد در x و y هستند و $COY(X, Y)$ کوواریانس بین نمونه‌ها است. مقادیر ضریب همبستگی را برحسب ضریب مزبور به شرح ذیل ارزیابی کرده‌اند:

$0.2 \leq r < 0.4$ همبستگی ضعیف، $0.4 \leq r < 0.69$ همبستگی متوسط، $0.69 \leq r < 0.9$ همبستگی قوی، $0.9 \leq r < 1.0$ همبستگی بسیار قوی (Kaviani and Alijani, 2011).

۳- ارزیابی نتایج

۳-۱- سطح برف

پس از دانلود تصاویر ماهواره‌ای Sentinel2 مربوط به منطقه مورد مطالعه و بررسی خطاهای رایج، جهت پردازش‌های مورد نیاز از نرم‌افزار Snap استفاده گردید. درنهایت از طریق الگوریتم NDSI نقشه سطح پوشش برف برای ماه‌های آذر، دی، بهمن و اسفند استخراج شد.

در ارتفاعات این شهرستان‌ها، بیشترین بارش در اواخر فصل پاییز و ماه‌های سرد زمستان، از نوع برف بوده است که در شهرستان اردبیل و سرعین به علت شرایط کوهستانی و قرارگیری در میان کوه سیلان و کوه‌های تالش و بزغوش بارش برف زودتر اتفاق می‌افتد در حقیقت قسمت بسیاری از این شهرستان‌ها دارای ارتفاعات ۲۵۰۰ تا ۴۲۰۰ متر را تحت پوشش خود قرار می‌دهد. با توجه به سطح برف به دست آمده از طریق تصاویر ماهواره Sentinel2 در شهرستان اردبیل و سرعین، خروجی هر چهار ماه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج این برآورد نشان داد که بیشترین مقدار پوشش برف برای سال ۱۳۹۷ مربوط به ماه دی و کمترین مقدار پوشش برف مربوط به ماه اسفند است همچنین در جدول ۳ مساحت سطوح برف‌گیر منطقه را برای چهار ماه مورد نظر نشان داده است.

۳-۲- عمق برف

بررسی نقشه‌های عمق برف نشان می‌دهند که بیشترین عمق برف به دست آمده معادل ۳۰ سانتیمتر مربوط به آذرماه در غرب منطقه (کوه سیلان)، ارتفاعات جنوبی، بخش هیر (دهستان فولادلوی جنوبی، دهستان ارشق شمالی، دهستان هیر و شهر هیر) و بخش مرکزی (دهستان ارشق شرقی، دهستان بالفلو، دهستان سردابه، دهستان شرقی، دهستان کلخوران و شهر اردبیل) برآورد شده است که در ارتفاع بالای ۲۰۰۰ متری قرار دارند.

عمق برف برآورد شده معادل ۳۰-۲۶ سانتیمتر برف مربوط به کوهستان سیلان و ارتفاعات جنوبی می‌باشد مقدار ۲۶-۲۰ سانتیمتر برف مربوط به بخش مرکزی منطقه و بخش هیر و سرعین می‌باشد کمترین عمق برف ۲۰-۵ سانتیمتر مقدار مربوط به بخش شمالی (کوه‌های تالش)، شمال غربی و بخش ثمرین (دهستان غربی و دهستان دوجاق) است.

با بررسی تصاویر SentinelA1 استفاده شده، تصویر ۹/۰۹/۲۰۱۷ به عنوان تصویر پایه برای تداخل‌سنجی انتخاب شد چون هیچ‌گونه پوشش برفی در این تاریخ وجود نداشته است و تمامی تصاویر نسبت به این تصویر تداخل‌سنجی شدند در همین صورت چهار تداخل‌نگار ایجاد شد که عدد درجات خاکستری هر پیکسل نشان‌دهنده عمق برف موجود در آن پیکسل است، جدول ۴ جزئیات تداخل‌سنجی برای هر زوج تداخل‌نگار را نمایش می‌دهد که در آن فاصله مکانی و فاصله زمانی مناسب است هر چه فاصله مکانی کمتر باشد دقت خروجی تداخل‌سنجی بالاتر است.

برای هر یک از ماه‌های مورد مطالعه پس از تولید تداخل‌نگارهای مورد نظر و کلاس‌بندی آن‌ها، تصاویر راداری مورد نظر در نرم‌افزار Snap به صورت یک تصویر کامل پردازش شد.

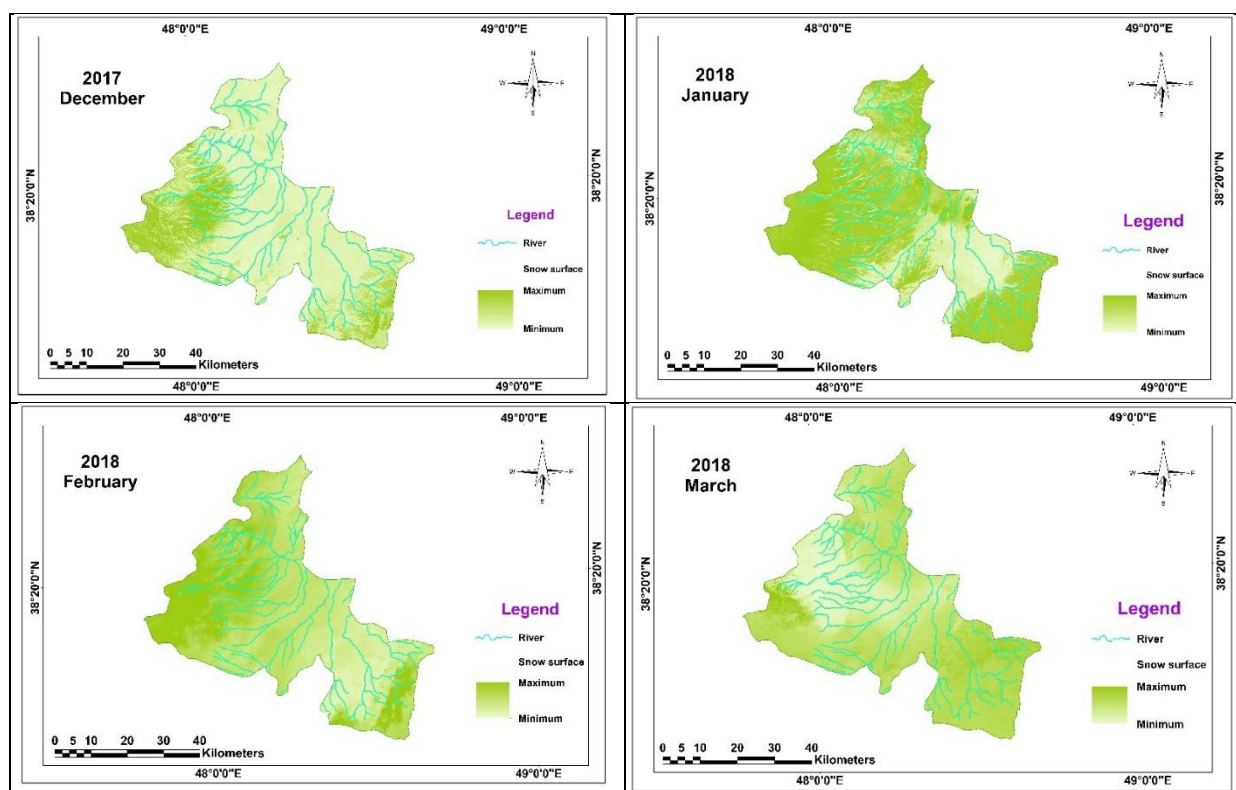


Fig. 3- Snow surface area extracted for snowy months in the study area

شکل ۳- سطح برف استخراج شده برای ماه‌های برفی منطقه مورد مطالعه

Table 3- Area of snow area boundaries in area of study for 1397

جدول ۳- مساحت سطوح برف‌گیر منطقه مورد مطالعه برای سال ۱۳۹۷

Picture date	29/09/1397	28/10/1397	25/11/1397	17/12/1397
Area (Km2)	233/20	356/52	180/23	96/10

Table 4- Details of produced interference
جدول ۴- جزئیات تداخل نگارهای تولید شده

Fashion image	Date	Maximum Doppler effect between two images	Doppler effect difference between two images	Moving in the direction of Range	Ambiguity	Move to Azimuth	Maximum space available	Temporal baseline	Spatial baseline
iwsvv	2017/12/20	485/40	0/03	-2/266	324/770	27/726	5407/66	96	36/074
iwsvv	2018/01/18	485/40	1/108	12/447	556/340	0/240	5407/66	120	27/057
iwsvv	2018/02/14	485/40	-8/08	15/440	355/415	1/840	5407/66	144	11/360
iwsvv	2018/03/08	485/40	-8/08	35/720	160/530	4/960	5407/66	168	95/454

عمق مربوط به اسفندماه با عمق معادل ۱۰ سانتیمتر در ارتفاعات جنوبی است. در واقع بیشترین ماندگاری برف در مناطق با شیب‌های بالا در ارتفاعات بالاتر می‌باشد کمترین میزان عمق برف در دامنه‌های شرقی و بیشترین مقدار آن در دامنه‌های غربی بوده که وجود شیب زیاد و جهت بادهای غالب منطقه که شرقی غربی است یکی از دلایل آن محسوب می‌گردد. به منظور بررسی و ارزیابی نتایج عمق برف حاصل شده از تصاویر SentinelA1، از داده‌های ایستگاه‌های برف‌سنجی (جدول ۵) استفاده گردید. با توجه به زمان داده‌های اندازه‌گیری شده در سطح زمین، نتایج به دست آمده از چهار ماه برفی سال ۱۳۹۷ با داده‌های زمینی مقایسه شدند. برای انجام ارزیابی از معادله خط درجه اول و رگرسیون خطی استفاده شد در این معادله $y=a+bx$ بهترین خط برازنده، برای نمودار پراکنش نمونه‌های مشاهداتی و نمونه‌های برآوردی برازش شد در واقع ضرایب a و b طوری تعیین شدند که مجموع توان دوم خطاها در آن کاهش یافته و بهترین خط برازش شده است انجام این موارد در نرم‌افزار MATLAB^{۲۳} انجام گرفت نمودار حاصل از پراکنش نقاط مشاهداتی و خط رگرسیون و ضرایب همبستگی را در نقاط موجود در سطح شهرستان اردبیل و سرعتین نمایش می‌دهد.

بر اساس نتایج به دست آمده، با اطمینان می‌توان گفت که تغییرات عمق برف استخراج شده از تصاویر راداری ۸۵ درصد با تغییرات عمق برف اندازه‌گیری شده در ایستگاه برف‌سنجی منطبق است که این نتیجه با توجه به داده‌های کم و صعب‌العبور بودن منطقه می‌تواند راه‌گشای مطالعات برف برای کارشناسان در منطقه باشد. البته این امر جای بحث و بررسی بیشتر و گسترده‌تری را دارد.

در دی‌ماه بیشترین عمق برف به دست آمده معادل ۳۳ سانتیمتر مربوط به مناطق غرب (کوه سبلان)، جنوب و جنوب غربی، بخش هیر و مناطق مرکزی برآورد شده است. معادل ۲۶-۳۳ سانتیمتر برف مربوط به غرب (کوهستان سبلان) و ارتفاعات جنوبی می‌باشد مقدار ۲۶-۲۲ سانتیمتر برف مربوط به مناطق مرکزی می‌باشد کمترین عمق برف مقدار ۲۲-۵ سانتیمتر برف مربوط به بخش شمال (کوه تالش) و شمال غربی (بخش ثمرین) است. در بهمن‌ماه بیشترین عمق برف به دست آمده معادل ۲۱ سانتیمتر مربوط به مناطق جنوبی، جنوب غرب برآورد شده است معادل ۲۱-۱۸ سانتیمتر برف مربوط به ارتفاعات جنوب غربی و قسمت کمی از نواحی اطراف سبلان در غرب منطقه است مقدار ۱۸-۱۳ سانتیمتر برف مربوط به جنوب شرقی حوضه مورد مطالعه می‌باشد کمترین عمق برف مقدار ۱۳-۵ سانتیمتر برف مربوط به بخش شمال (کوه‌های تالش) و شمال شرق (بخش هیر) و شمال غرب (بخش ثمرین) و غرب (سرعین) و بخش مرکزی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. در اسفندماه نیز بیشترین عمق برف به دست آمده معادل ۱۰ سانتیمتر برف برآورد شده است و مربوط به مناطق جنوب، جنوب غرب و جنوب شرق و غرب در منطقه مورد مطالعه می‌باشد معادل ۱۰-۸ سانتیمتر برف مربوط به جنوب این مناطق می‌باشد مقدار ۸-۶ سانتیمتر برف مربوط به غرب (قسمتی از کوهستان سبلان)، جنوب و جنوب شرقی می‌باشد و کمترین عمق برف مقدار ۶-۲ سانتیمتر برف مربوط به مناطق مرکزی، بخش هیر، بخش ثمرین و سرعین می‌باشد. آنچه که از نقشه‌های عمق برف می‌توان دریافت کرد این است که بیشترین دامنه تغییرات مقادیر عمق برف مربوط به دی‌ماه با عمق معادل ۳۳ سانتیمتر در غرب (ارتفاعات سبلان) و ارتفاعات واقع در جنوب منطقه مورد مطالعه می‌باشد و کمترین مقادیر

راداری با ضریب تعیین ۸۵ درصد نشان می‌دهد که با تغییرات عمق برف اندازه‌گیری شده در ایستگاه منطبق است؛ می‌توان گفت یکی از عوامل مهم برآورد دقیق عمق برف استفاده از باند C رادار می‌باشد، با توجه به نتایج تحقیق Nagler et al. (2016) از آنجاکه برف به دلیل برخورداری از دی‌الکتریک زیاد دارای ویژگی انعکاسی آشکار در باند C است باند C نسبت به آن حساسیت بالایی دارد.

در واقع باند C قادر به شناسایی برف برای تمام مناطقی است که دارای برف است. همچنین مجموعه داده‌های گروه باند C با استفاده از تصویربرداری چند زمانه و بازتولید مکرر در بازنگری مجدد، به صورت آشکار در دسترس قرار می‌گیرند و فرصتی را برای تهیه نقشه برف مرطوب در یک زمینه عملیاتی فراهم می‌آورند.

همچنین داده‌های تصاویر SentinelA1 به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالا و نفوذ در برف می‌توانند به صورت کاربردی در مناطق کوچک و متوسط یا بزرگ مورد استفاده قرار بگیرند، چون قادر به اندازه‌گیری تغییرات سطح هستند (قادر به نمایش این است که سطح در زمان‌های مختلف به چه میزان تغییرات ارتفاعی داشته‌اند) و چون طول موج C

Table 5- Location of stations in the study area

جدول ۵- موقعیت ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه

Satation	Longitude	latitude
Ardabil	48/20	38/13
Sarein	48/05	39/03
forodgah	48/25	38/20

نتایج حاصل از شاخص‌های آماری CORR, BIAS, MSE, RMSE به صورت نمودار نشان داد که مقادیر به دست آمده به ترتیب ۰/۰۴۳، ۰/۰۸۶، ۰/۱۶۵ و ۰/۹۲۴ می‌باشد. بر اساس نتایج شاخص‌های آماری BIAS, MSE, RMSE هرچقدر مقادیر به دست آمده از آن‌ها به صفر نزدیک‌تر باشد از صحت بالاتری و خطای کمتری برخوردار است و بر اساس شاخص CORR، مقادیر به دست آمده $0.9 \leq r < 0.1$ قرار دارد که بیانگر همبستگی بسیار قوی بین داده‌ها می‌باشد.

قابل ذکر است که برای ارزیابی کارایی دقیق‌تر تصاویر ماکروویو داده‌ها و اطلاعات نقاط متعدد در تاریخ‌های مختلف مورد نیاز است هر چه داده‌های ایستگاهی بیشتر باشند نتایج را بهتر برآورد خواهد کرد. بر پایه نتایج به دست آمده، تغییرات عمق برف به دست آمده از تصاویر

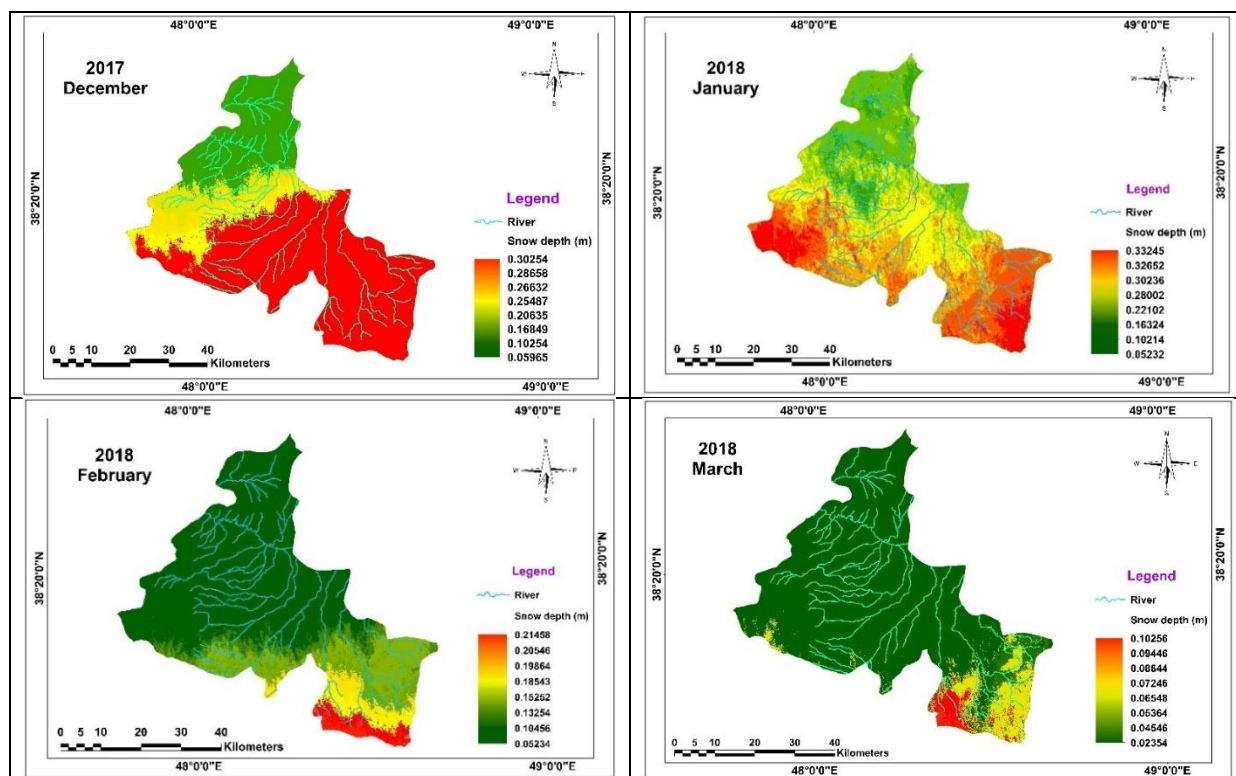


Fig. 4- Depth of snow extracted for the snowy months in the study area

شکل ۴- عمق برف استخراج شده برای ماه‌های برفی منطقه مورد مطالعه

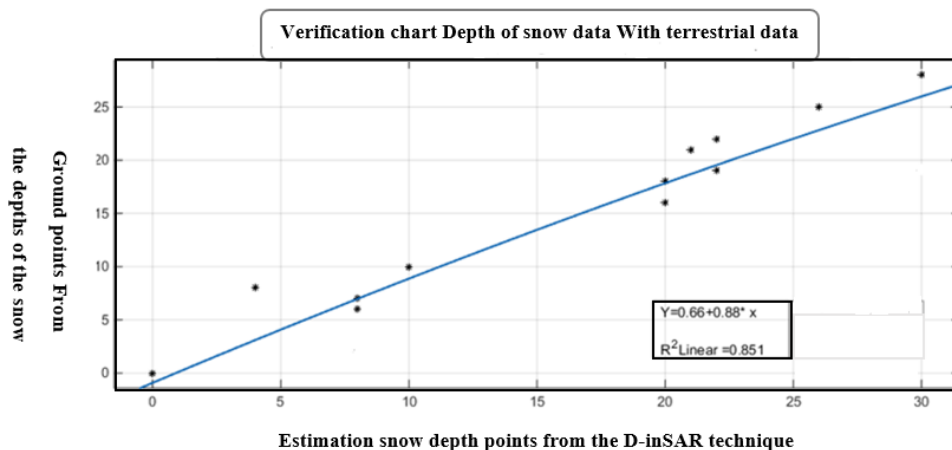


Fig. 5- Distribution of observation points and estimation of snow depth and correlation coefficient in the study area

شکل ۵- پراکنش نقاط مشاهداتی و برآوردی عمق برف و ضریب همبستگی در منطقه مورد مطالعه

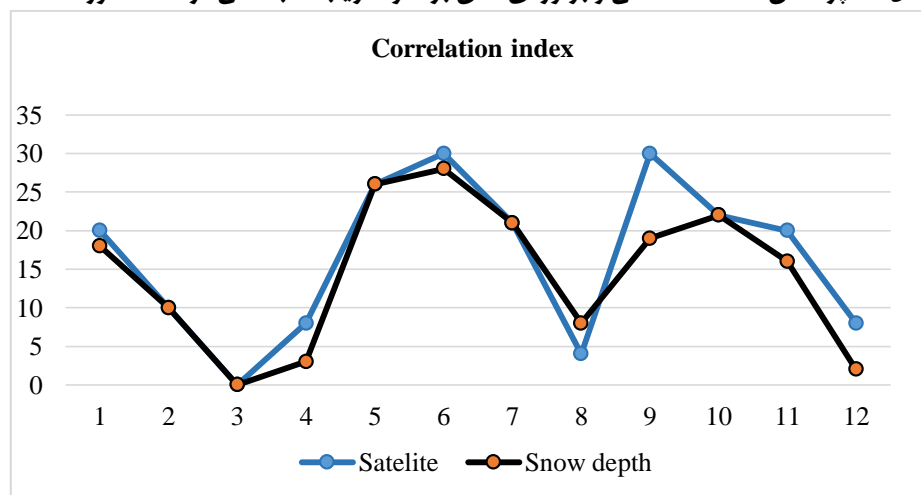


Fig. 6- Correlation between terrestrial data with snow generated from Sentinel images

شکل ۶- همبستگی بین داده‌های زمینی با برف تولیدشده از تصاویر Sentinel

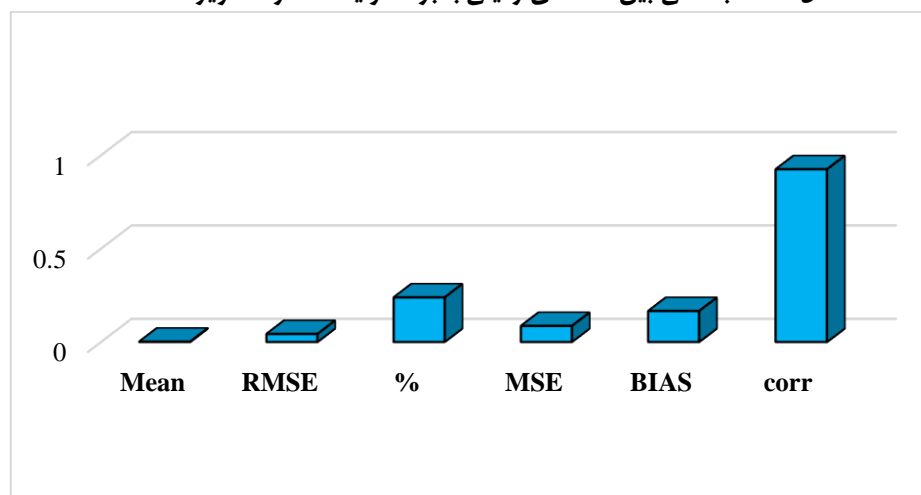


Fig. 7- Values of statistical indices for evaluating results

شکل ۷- مقادیر شاخص‌های آماری برای ارزیابی نتایج

قابلیت نفوذ بیشتر از سطح برف را ندارد برای محاسبه تغییرات ارتفاعی برف مناسب است، بنابراین بهترین محدوده ماکروویو برای اندازه‌گیری عمق برف، طول موج کم است چون شدت نفوذ کمتری دارند و از سطح برف نمی‌توانند عبور کنند از طرفی با افزایش طول موج، قدرت نفوذ نیز افزایش می‌یابد و طول موج‌های بلندتر از سطح عبور و به سمت بستر میل می‌کند بنابراین با طول موج کوتاه‌تر که توانایی نفوذ کمتری دارند موجب نظارت بیشتری بر سطح می‌شود و تغییرات را بهتر نمایان می‌کند. نتایج به دست آمده در این پژوهش با نتایج مطالعات: Patil et al. (2018)، Snapiro et al. (2018)، Tsai et al. (2019)، Dozier et al. (2019)، majumdar et al. (2019)، Jesenko et al. (2019)، Eckerstorfer et al. (2019)، Varade et al. (2019)، Seifi and Feizizadeh (2019)، Heilig et al. (2019)، همخوانی دارد؛ بدین‌صورت که آن‌ها نیز معتقدند برای اندازه‌گیری و محاسبه عمق برف تصاویر رادار مناسب‌ترین تصاویر هستند چراکه باند C رادار نسبت به برف از حساسیت بسیار بالایی برخوردار است و معتقدند که هرچه طول موج در محدوده ماکروویو کمتر باشد بهترین نتایج را از تغییرات ارتفاعی سطح برف دارد همچنین می‌توان گفت که نتیجه به دست آمده مانند نتیجه‌ی مطالعات Almodarresi et al. (2016)، بر تفکیک بسیار بالای داده‌های راداری در برآورد عمق برف تأکید کردند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای اپتیکال Sentinel2 سطح پوشش برف برای شهرستان اردبیل و سرعین با دقت بسیار بالایی از طریق الگوریتم NDSI به دست آمد نتایج حاصل از پوشش برف نشان می‌دهد طی سال آبی ۱۳۹۶-۱۳۹۷ بیشترین مقدار پوشش برف مربوط به ماه‌های آذر و دی است که به ترتیب مقدار مساحت آن‌ها برابر با ۳۵۶/۵۲ و ۲۳۳/۲۰ کیلومتر مربع است. همچنین کمترین مقدار پوشش برف در ماه‌های بهمن و اسفند به وقوع پیوسته است که به ترتیب مساحت آن‌ها برابر با ۱۸۰/۲۳ و ۹۶/۱۰ کیلومتر مربع است؛ بنابراین استفاده از تصاویر Sentinel2 امکان پایش پوشش برف و برآورد میزان ذخایر برفی را با دقت بسیار بالا در ماه‌های سرد زمستان را امکان‌پذیر ساخته است.

استفاده شد که نتایج حاصل نشان می‌دهد که بیشترین دامنه تغییرات مقادیر عمق برف مربوط به دی‌ماه با ۳۳/۲۴ سانتیمتر و کمترین مقادیر عمق در اسفندماه با ۱۰/۲۵ سانتیمتر مشاهده شده است برای ارزیابی نتایج اعمال الگوریتم بر روی داده‌های SentinelA1 و محاسبه مقادیر برآوردی از داده‌های زمینی جهت صحت‌سنجی استفاده شد. با اطمینان ۹۰٪ می‌توان گفت که نتایج به دست آمده از تغییرات عمق برف استخراج شده از تصاویر راداری حدود ۸۵٪ با تغییرات عمق برف اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها منطبق است و RMSE آن نیز برابر ۰/۴۳ است. ضرایب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و مقادیر برآورد شده بین داده‌های زمینی و داده‌های برآوردی از عمق برف نشان‌دهنده همبستگی بسیار بالایی بین داده‌ها است مؤثرترین عوامل تأثیرگذار را می‌توان افزایش قدرت تفکیک مکانی داده‌های استفاده شده دانست زیرا این داده‌ها دارای قدرت تفکیک مکانی بین ۵ الی ۲۰ متر در فرکانس ۸-۴ گیگاهرتز هستند و مورد توجه است که این امر جای بررسی بیشتر و گسترده‌تری دارد و همچنین عوامل دیگری که می‌توان از آن‌ها به عنوان عوامل تأثیرگذار نام برد، نوع پوشش زمین و کوهستانی بودن منطقه و توپوگرافی آن و حتی اندازه‌ی دانه‌های برف هم می‌تواند بر روی پالس برگشتی تأثیر بگذارد و نتایج را تحت تأثیر قرار بدهد چراکه به‌کارگیری روش‌های جدیدتر به نتایج بهتری منجر می‌شود. با توجه به اهمیت بالای نقشه عمق برف با دقت بالا می‌توان گفت روش استفاده شده در این پژوهش یکی از روش‌های مناسب برای عمق‌سنجی برف با دقت بسیار بالا است در یک جمع‌بندی می‌توان به این نتیجه رسید که تصاویر رادار برای اندازه‌گیری عمق برف مناسب‌ترین تصاویر هستند به این دلیل که با طول موج کمتر، نفوذ کمتری خواهد داشت و بهترین نتایج را از تغییرات ارتفاعی سطح برف را به دست خواهد آورد. با توجه به بحران‌های روزافزون آب در کشور و همچنین اهمیت داشتن آن برای شهرهای اردبیل، سرعین، یکی از مهم‌ترین پارامتر برای برنامه‌ریزی در امور آب، دانستن مقدار خصوصیات فیزیکی برف با بالاترین دقت است که نتایج این پژوهش نشان‌دهنده این امر با دقت بالای ۹۰ درصد می‌باشد و با دانستن این اطلاعات می‌توان به یکی از مهم‌ترین پارامترهای حوزه برف‌سنجی دست پیدا کرد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Fifth Assessment Report
- 2- Intergovernmental Panel on Climate Change
- 3- Global Climate Observing System
- 4- Snow Cover
- 5- Synthetic Aperture Radar
- 6- Sentinel Application Platform
- 7- Beas River

تصاویر راداری قادر به نمایش تغییرات ارتفاعی سطوح برف در زمان‌های مختلف می‌باشد و به دلیل اینکه امواج ماکروویو قابلیت نفوذ بیشتری از سطح برف ندارند، برای محاسبه تغییرات ارتفاعی برف مناسب است (Seifi and Feizizadeh, 2019)، به همین دلیل برای محاسبه عمق برف از داده‌های SentinelA1 و اعمال روش Dinsar

- borne optical sensors. *Remote Sensing of Environment* 191:402-418
- Jesenko D, Mongus D, Liu S, Čekada M (2019) Detection of snow levels in the Slovenian Alps at different seasons using Sentinel-1. *International Conference on Engineering, Science, and Industrial Applications (ICESI)*, Tokyo, Japan:1-4
- Kaviani M, Alijani B (2011) *Fundamentals of climatology*. Samat Publications, 16th Edition, (In Persian)
- Liu Y, Li L, Yang J, Chen X, Hao J (2017) Estimating snow depth using multi-source data fusion based on the D-InSAR method and 3DVAR Fusion Algorithm. *Remote Sensing* 9, 1195:1-17
- Maghsoudi Y, Mahdavi S (2013) *Fundamentals of radar remote sensing*. First Edition, Tehran, Sharif University of Technology, Tehran (In Persian)
- Majumdar S, Thakur P, Chang L, Kumar SH (2018) X-Band polarimetric SAR copolar phase difference for fresh snow depth estimation in the northwestern Himalayan watershed. *IGARSS IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Yokohama, Japan, 4102-4105
- Meyer F (2018) Sentinel-1 InSAR processing using the Sentinel-1 toolbox, Alaska satellite facility. adapted from coursework developed 4(1):1-18
- Nagajothi V, Priya C, Sharma P (2019) Snow cover estimation of Western Himalayas using Sentinel-2 high spatial resolution data. *Indian Journal of Ecology*, 88-93
- Nagler T, Rott H, Ripper E, Bippus G (2016) Advancements for snowmelt monitoring by means of Sentinel-1 SAR. *Remote Sensing* 8:348:1-17
- Panahi H (2012) *ENVI4.8 application guide with ArcGis 10.1*. Yazd Azad University Press, Yazd (In Persian)
- Patil A, Singh G, Rüdiger CH (2019) A novel approach for the retrieval of snow water equivalent using SAR data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Yokohama, Japan, 3233-3236
- Raygani B, Khajehuddin S, Kopai S, Barati S (2008) Calculation of changes in snow cover maps prepared from MODIS satellite images in periods without images. *Agricultural and Natural Resources Science and Technology*, 12th year, number 44 (In Persian)
- Seifi H, Feizizadeh B (2019) Application of interferometric method and radar remote sensing images for estimating the depth of snow and water discharge, Case study: (Yamchie Basin). *Iran-Water Resources Research* 15(1):311-34 (In Persian)
- 8- Interferometric Wide Swath
9- Normalized Difference Snow Index
10- Rofental
11- MultiSpectral Instrument
12- Time Series Analysis
13- D-INSAR
14- Interferometer
15- Single-Look Complex
16- Coherence
17- Burs
18- Interferogram
19- Goldstein
20- Phase Unwrapping
21- Phase Topography Removal
22- Phase to Displacement
23- Matrix Laboratory
- ۵- مراجع
- Akerson J, Yang Y, Hara Y, Wu B, Kong J (2000) Automatic phase unwrapping algorithms in Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry. *IEICE Transactions on Electronics*, E83C (12):1896-1904. E97., A(1):405-408
- Almodarresi A, Hatami J, Sarkaregar A (2016) Computational physical properties of snow using differential radar interferometry and TerraSAR-X and MODIS. *Remote Sensing and Geographic Information Systems in Natural Resources* 7(2):59-76 (In Persian)
- Chen H (2018) *Wet snow mapping in Southern Ontario with Sentinel-1A Observations*. Waterloo, Ontario, Canada, 2018. University of Waterloo Library 200 University Avenue West Waterloo, Ontario, Canada N2L 3G1 519 888 4883:1-87
- Eckerstorfer M, Vickers H, Malnes E, Grahn J (2019) Real-time automatic snow avalanche activity monitoring system using Sentinel-1 SAR data in Norway. *Remote Sensing* 11, 2863:1-23
- Elizabeth A, Burakowski E (2008) Trends in wintertime climate in the northeastern United States 1965-2005. *Journal of Geophysical Research*; 113. D20114:1-12
- Hantel M, ehrendorfer M, Haslinger A (2002) Climate sensitivity of snow covers duration in Austria. *International Journal of Climatology* 20(6):615-640
- Heilig A, Wendleder A, Schmitt A, Mayer CH (2019) Discrimination of snow and firn for alpine glaciers using Sentinel-1 data: A case study in Rofental Austria. *Geosciences* 69:1-22
- Hori M, Sugiura A, Kobayashi K, Aoki T, Tanikawa T (2017) A 38-year (1978-2015) Northern Hemisphere daily snow cover extent product derived using consistent objective criteria from satellite-

Tsai Y, Dietz A, Oppelt N, Kuenzer C (2019) Remote sensing of snow cover using spaceborne SAR: A review. *Remote Sensing* 11, 1456:1-44

Varade D, Dikshit O (2018) Estimation of surface snow wetness using Sentinel-2 multispectral data. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-5:223-228

Snapir B, Momblanch A, Jain S K, Waine T W, Holman I P (2019) A method for monthly wet and dry snow mapping using Sentinel-1 and MODIS Application in the Himalayan River Basin. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 74:222-230

Tsai Y, Dietz A, Oppelt N, Kuenzer C (2019) Wet and dry snow detection using Sentinel-1 SAR data for mountainous areas with a machine learning technique. *Remote Sensing* 11, 895:1-29