

Research Paper

Estimation of Snow Depth Using Active Microwave Images

Majid Rahimzadegan*¹, Mehdi Mohebbi²

1. Associate Professor in Civil Engineering and Water Resources Management, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
2. Msc in Civil Engineering and Water Resources Management, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Received: 2024/05/16
Accepted: 2024/07/31

ABSTRACT

Snow depth plays a critical role as a key input parameter in various agricultural, hydrological, and climatological models. Nevertheless, the process of estimating snow depth through optical remote sensing tools is subject to uncertainties stemming from constraints within the imaging technique. Consequently, the primary objective of this study is to employ active microwave remote sensing technology for the purpose of snow depth estimation in regions characterized by mountainous terrain. The radar interferometric technique employing active microwave imagery was utilized for the specific objective of examining the microwave signal's interaction with snow accumulation. Utilizing Sentinel 1 satellite images of the Zagros mountains in Iran during the months of February 2017, March 2019, and 2020, relevant data was acquired. Furthermore, field measurements of snow depth were conducted to validate the proposed algorithm. In order to enhance the accuracy of snow depth estimations, the data from both VV and VH channels was integrated by applying a weighting factor determined based on the local radiation angle. The comparison between the outcomes of the suggested approach and the field data revealed a correlation coefficient of 0.86. Furthermore, the calculated values for RMSE and P-Value were 14.37 cm and 0.009, correspondingly. Based on the statistical metrics derived from the validation process of the proposed technique, it demonstrated a satisfactory performance in the estimation of snow depth.

Keywords:

Snow Depth; Radar Interferometry; Sentinel 1; Local Incidence Angle.

*Corresponding Author: Associate Professor in Civil Engineering and Water Resources Management, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

ORCID: 0000 0002 2632 4869

rahimzadegan@kntu.ac.ir

S

Extended Abstract**Introduction**

now cover plays a critical role as a water source for domestic, agricultural, and industrial purposes. However, the melting of snow cover significantly impacts global climate change and affects the water supply of many rivers reliant on melting snow. Therefore, the study of snow cover is imperative. In mountainous regions, where snow cover is abundant, conducting field research poses challenges due to limited access, harsh weather conditions, inadequate infrastructure, and a shortage of skilled personnel. As a result, remote sensing-based research plays a pivotal role in examining snow cover. Active microwave remote sensing offers a more precise method for estimating snow depth compared to optical remote sensing, which is restricted in its ability to capture images round the clock, and passive microwave remote sensing, which suffers from low spatial resolution. This research utilized Sentinel-1 satellite images from the VV and VH channels. The radar interferometric method was utilized to estimate snow depth by analyzing the phase difference between two images caused by snow cover, enabling an accurate determination of snow depth.

Methodology

The method employed in this research for estimating snow depth is radar interferometry, which relies on the interaction between the satellite signal and the snow mass. When the radar signal travels to an area covered with snow, its path differs from that of an area without snow cover. This divergence is attributed to the signal's disruption caused by the constant dielectric contrast between the snow and the ground, which delays the signal's return time. Considering the phase delay of the transmitted and received signals, along with the difference in the travel path between areas with snow cover and those without it, it becomes feasible to determine the depth of the snow. However, the complex topography alters the interaction between the signal and the snow mass in mountainous regions. In this research, the accuracy of snow depth estimation was enhanced by incorporating the local radiation angle. Additionally, by combining the snow depth data acquired from the two channels, VV and VH, a more precise estimation of snow depth was achieved using Sentinel 1 images

Results and discussion

To trust the results obtained through the radar interferometric method, it is crucial to ensure proper consistency between two images: one with snow cover and one without. A minimum coherence of 0.3 is required between two corresponding pixels. In this study, the pairs of images used exhibited a coherence of over 70%, meeting the necessary conditions for applying the mentioned method. Furthermore, it is important to note that various corrections were applied to enhance the coherence and accuracy of the images used. The snow depth obtained from the proposed method was compared to field measurements of snow depth in this research. The comparison revealed a correlation of 86%, indicating the satisfactory accuracy of the proposed method. However, it should be noted that significant relative errors were observed in areas where the snow depth exceeded 90 cm or was less than 10 cm. These errors present an opportunity for improvement in future research.

Conclusion

The primary objective of this research was to accurately determine the depth of snow by harnessing the power of active microwave images. To accomplish this, we utilized the radar interferometric method, a technique known for its effectiveness in such estimations. Essentially, this method leverages the phase difference observed between two images: one capturing the ground covered in snow and the other showing the same area without snow. This phase difference arises due to snow accumulation on the ground's surface. In this study, we estimated the snow depth by carefully analyzing the phase difference between

the two images and applying Snell's law, which helped account for the effects of snow accumulation. Additionally, we considered the intricate influence of mountainous topography. By incorporating the local incidence angle, we significantly improved the accuracy of our estimations in areas with varying terrain. By comparing the results obtained from the proposed algorithm with field measurements, a correlation of 86% was obtained with an average absolute error of 14.37 cm, which shows the effectiveness of the proposed method.

برآورد عمق برف با استفاده از تصاویر مایکروویو فعال

مجید رحیم زادگان^{۱*}، مهدی محبی^۲

۱. دانشیار گروه مهندسی عمران و مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران (نویسنده مسئول).

۲. کارشناسی ارشد مهندسی عمران و مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰

عمق برف یکی از پارامترهای ورودی مهم در بسیاری از مدل‌های کشاورزی، هیدرولوژی و اقلیمی است. با این حال عدم قطعیت‌هایی در برآورد عمق برف با استفاده از ابزار سنجش از دور نوری به دلیل محدودیت‌های موجود در شیوه تصویربرداری وجود دارد. از این رو هدف این پژوهش استفاده از ابزار سنجش از دور مایکروویو فعال در برآورد عمق برف در مناطق کوهستانی است. بدین منظور از روش تداخل سنجی راداری تصاویر مایکروویو فعال و اندرکنش سیگنال مایکروویو با توده برف استفاده شد. داده‌های به کار رفته، شامل تصاویر سنتینل ۱ از رشته‌کوه‌های زاگرس در کشور ایران در تاریخ فوریه ۲۰۱۷، مارس ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ بود. همچنین، به منظور اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی از اندازه‌گیری میدانی عمق برف استفاده شد. به منظور برآورد بهتر عمق برف، نتایج در دو کانال VH و VV با استفاده از ضریب وزنی بدست آمده از زاویه تابش محلی ترکیب شدند. مقایسه نتایج روش پیشنهادی با برداشت‌های میدانی نشان‌دهنده همبستگی 0.86 بود. همچنین مقادیر $RMSE$ و $P-Value$ به ترتیب $14/37$ سانتیمتر و 0.09 بدست آمد. با توجه به پارامترهای آماری بدست آمده از اعتبارسنجی روش پیشنهادی، کارایی آن در برآورد عمق برف مناسب بود.

عمق برف، تداخل سنجی راداری، سنتینل ۱، زاویه تابش محلی.

واژگان کلیدی:

۱. مقدمه

برف در مناطق کوهستانی منبع حیاتی آب شیرین است. آب بسیاری از رودخانه‌های بالادست در حوضه‌های آبریز توسط رواناب حاصل از ذوب برف تامین می‌شوند (Viste & Sorteberg, 2015). از طرفی به دلیل افزایش تغییرات اقلیمی و زیست محیطی کره زمین، پوشش برف در چند سال اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Diro et al., 2000; Robinson & Frei, 2018). بر این اساس، تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی منجر به افزایش ذوب برف شده و با افزایش ذوب برف، ضریب آلبیدو کره زمین و میزان بازتاب انرژی به جو کاهش خواهد یافت؛ در نتیجه دمای کره زمین افزایش یافته و چرخه ذوب برف و گرمایش جهانی روز به روز قوی‌تر خواهد شد (You et al., 2020). از این رو داشتن اطلاعات از پوشش برفی می‌تواند در تعیین دبی رودخانه‌ها، پیش‌بینی سیلاب، تامین آب شیرین یک منطقه و پیش‌بینی نرخ گرمایش جهانی موثر باشد (Formetta et al., 2014). به منظور ارزیابی ویژگی‌های پوشش برف در مناطق کوهستانی، بازدهی‌های منطقه‌ای از خصوصیات فیزیکی برف مانند جنس، عمق، چگالی و حجم آب معادل برف،

بسیار مهم است (Varade, Manickam, et al., 2020). در کشورهای در حال توسعه، برداشت‌های میدانی خصوصیات برف در ارتفاعات زیاد، به دلایل آب و هوای منطقه، عدم زیرساخت‌های لازم، کمبود نیروی انسانی ماهر، عدم دسترسی به منطقه و ابزار لازم با محدودیت روبه‌رو است (Varade, Manickam, et al., 2020). از این رو استفاده از ابزار سنجش از دور کمک شایانی در مطالعات پوشش برفی خواهد کرد. در زمینه استخراج پارامترهای برف از تصاویر ماهواره‌ای مطالعات زیادی انجام شده است که در ادامه برخی از مهم‌ترین آنها ارائه شده است.

واراد^۱ و دیکشیت^۲ در سال ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ با استفاده از بازتاب طیفی در باندهای مرئی و مادون قرمز داده‌های چند طیفی ماهواره سنتینل ۲، رابطه‌ای تجربی به منظور مدلسازی آب معادل توده برف ارائه کردند (Varade & Dikshit, 2018; Varade & Dikshit, 2017). با این حال، محدودیت اصلی استفاده از داده‌های سنجش از دور نوری، عدم نفوذ سیگنال در توده برف است. از آنجاییکه خصوصیات فیزیکی توده برف مانند چگالی، عمق، اندازه ذرات و جنس به توده حجمی برف مربوط می‌شود، سنجش از دور مایکروویو به دلیل نفوذ مناسب سیگنال، اطلاعات دقیق‌تری را ارائه می‌کند (Varade & Dikshit, 2018). مزیت دیگر سنجش از دور مایکروویو قابلیت عبور امواج از ابر و تاثیر کم شرایط جوی بر این امواج است که امکان مدلسازی خصوصیات فیزیکی برف را در هر شرایط آب و هوایی فراهم می‌سازد (Attema & Ulaby, 1978; Ulaby et al., 2014). در این راستا، تعداد زیادی از مطالعات صورت گرفته، به استفاده از داده‌های سنجنده‌های مایکروویو فعال و داده‌های راداری روزنه مجازی در برآورد مشخصات برف روی آورده‌اند (Awasthi et al., 2020; Guneriusen et al., 2001; Surendar et al., 2015; Varade, 2018; Maurya, et al., 2020).

در برخی از تحقیقات از تداخل‌سنجی راداری به منظور تعیین عمق برف استفاده شده است. تداخل‌سنجی راداری یکی از تکنیک‌های ارزیابی تغییرات ارتفاعی سطح زمین از جمله مطالعه فرونشست و مطالعه پوشش برف انباشته شده می‌باشد که در پژوهش‌های زیادی از آن استفاده شده است (Chen et al., 2018; Sánchez-Gómez & Navarro, 2018; Strozzi et al., 2017). گانریاسن^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۱ نشان دادند سیگنال راداری در برخورد با توده برف دچار شکست می‌شود که تاثیر چشمگیری در فاز تداخل‌سنجی دارد (Guneriusen et al., 2001). دلیل اصلی شکست سیگنال در توده برف، چگالی و ثابت دی الکتریک برف است (Matzler, 1996). از این رو اختلاف قابل توجهی بین مسیر سیگنال در دو حالت زمین پوشیده از برف و عاری از برف وجود خواهد داشت که متناظر با اختلاف فاز تداخل‌سنجی است (Evans et al., 2014). در نتیجه با توجه به خصوصیات فیزیکی و هندسی توده برف رابطه‌ای بین اختلاف فاز تداخل‌سنجی و عمق برف وجود دارد (Guneriusen et al., 2001; Rott et al., 2003). محمودزاده^۴ و همکاران در سال ۲۰۲۰ در پژوهشی عمق برف را با استفاده از داده‌های سنتینل ۱ در کانال‌های VV و VH و با تکنیک تداخل‌سنجی راداری برآورد کردند. آنها به منظور بهبود خطای تکنیک تداخل‌سنجی راداری، ابتدا

¹ Varadr

² Dikshit

³ Guneriusen

⁴ Mahmoodzada

اختلاف فاز دو تصویر عاری از پوشش برف را ارزیابی کردند تا مقادیر خطای اختلاف فاز بدست آید. سپس دو تصویر حاوی پوشش برف و عاری از پوشش برف بکار گرفته شد و از مقادیر اختلاف فاز بهبود یافته در تعیین عمق برف استفاده گردید. همچنین به منظور برآورد عمق برف از چگالی میدانی برف استفاده گردید (Mahmoodzada et al., 2020). لی^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۲ با روش تداخلسنجی راداری به ارزیابی عمق برف در منطقه‌ای جنگلی پرداختند. از این رو ابتدا دو منطقه جنگلی و غیر جنگلی با تکنیک مذکور ارزیابی شد تا اثرات جنگل بر روی فاز تداخلسنجی مدل‌سازی شود؛ سپس با وارد کردن فاز اثرات جنگل، عمق برف در منطقه‌ای جنگلی بدست آمد (Li et al., 2022). کنده^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۹ در پژوهشی با داده‌های سنتینل ۱ و روش تداخلسنجی راداری تغییرات آب معادل برف را بدست آوردند. بدین منظور، ابتدا با توجه به ارتباط تغییرات فاز و تغییرات عمق برف، اختلاف عمق برف در هر دو تصویر حاوی برف ارزیابی شد؛ سپس با بدست آوردن حاصلضرب تغییرات عمق برف در چگالی برف، تغییرات آب معادل برف محاسبه شد. آن‌ها با توجه دسترسی ۶ روزه تصاویر ماهواره سنتینل ۱ سری زمانی تغییرات آب معادل برف در مناطق شمال شرقی کشور فنلاند را برآورد کردند (Conde et al., 2019). پاتیل^۳ و همکاران در سال ۲۰۲۰ در پژوهشی با داده‌های تراسار ایکس^۴ عمق برف را برآورد کردند. در این پژوهش با توجه به اطلاعات پلاریمتری و تداخلسنجی درایه‌های ماتریس نیمه معین مثبت هرمتین^۵، رابطه‌ی تعیین انسجام پیچیده تداخلسنجی پلاریمتری داده‌های روزنه مجازی^۶ در کانال‌های HV، VV و HH توسعه یافت. مقادیر انسجام HV همبستگی مناسبی با عمق برف داشت؛ از این رو ارتباط خطی بین عمق برف و انسجام HV با استفاده از تحلیل خطی استخراج و از آن در برآورد عمق برف استفاده شد. الگوریتم پیشنهادی آنها در منطقه دهوندی هند آزمایش شد و پارامتر آماری همبستگی عمق برف با داده‌های میدانی ۷۸ درصد بدست آمد (Patil et al., 2020).

همانطور که پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد، استفاده از تداخلسنجی راداری و اندرکنش سیگنال راداری با توده برف به منظور برآورد عمق برف بسیار مناسب است. با این حال در مناطق کوهستانی توپوگرافی پیچیده منجر به تغییر در اندرکنش سیگنال با توده برف می‌شود که در پژوهش‌های پیشین، کمتر به بهبود آن پرداخته شده است. از این رو، در این پژوهش تلاش شده است تا خطای ناشی از توپوگرافی در مناطق کوهستانی در اندرکنش بین سیگنال راداری با توده برف، کاهش یابد که منجر به بهبود برآورد عمق برف می‌شود. بدین منظور ابتدا از روش تداخلسنجی راداری اختلاف فاز دو تصویر حاوی پوشش برف و عاری از پوشش برف بدست آمد. در گام دوم اندرکنش سیگنال مایکروویو با توده برف در مناطق کوهستانی در نظر گرفته شد و رابطه‌ای به منظور برآورد عمق برف بدست آمد. سپس با وارد کردن پارامترهای زاویه تابش محلی به جای زاویه تابش، اختلاف فاز دو تصویر و چگالی برف میدانی، عمق برف

¹ Li² Conde³ Patil⁴ TerraSAR-X⁵ Hermitian⁶ Polarimetric Interferometric SAR

برآورد شد. به منظور برآورد بهتر، عمق برف در دو کانال VH و VV محاسبه شد. به منظور مقایسه نتایج روش پیشنهادی از برداشت‌های میدانی استفاده شد.

۲. منطقه مطالعاتی و داده‌ها

۲-۱- منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر، یخچال‌های رشته کوه زاگرس در کشور ایران است که در شکل ۱ نشان داده شده است. رشته کوه زاگرس در ۴ استان اصفهان، لرستان، چهارمحال بختیاری و اراک در کشور ایران واقع شده است. زاگرس رشته‌کوهی است که از شمال غربی تا جنوب شرقی فلات ایران کشیده شده و شامل ۱۱ استان و حدود ۲۰۰ شهر می‌باشد. رشته کوه‌های زاگرس از لحاظ اقلیمی به زاگرس شمالی و جنوبی تقسیم می‌شود. اقلیم زاگرس شمالی خنک‌تر و پر بارش‌تر از زاگرس جنوبی است. منطقه مورد مطالعه در این پژوهش در اقلیم زاگرس شمالی قرار دارد که اغلب بارش آن از جنس برف می‌باشد. شکل ۱ منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های برداشت میدانی را نشان می‌دهد. اطلاعات ایستگاه‌های برداشت میدانی در جدول ۱ ارائه شده است.

شکل ۱- منطقه مطالعاتی این پژوهش به همراه ایستگاه‌های برداشت میدانی بر روی نقشه مدل ارتفاعی منطقه

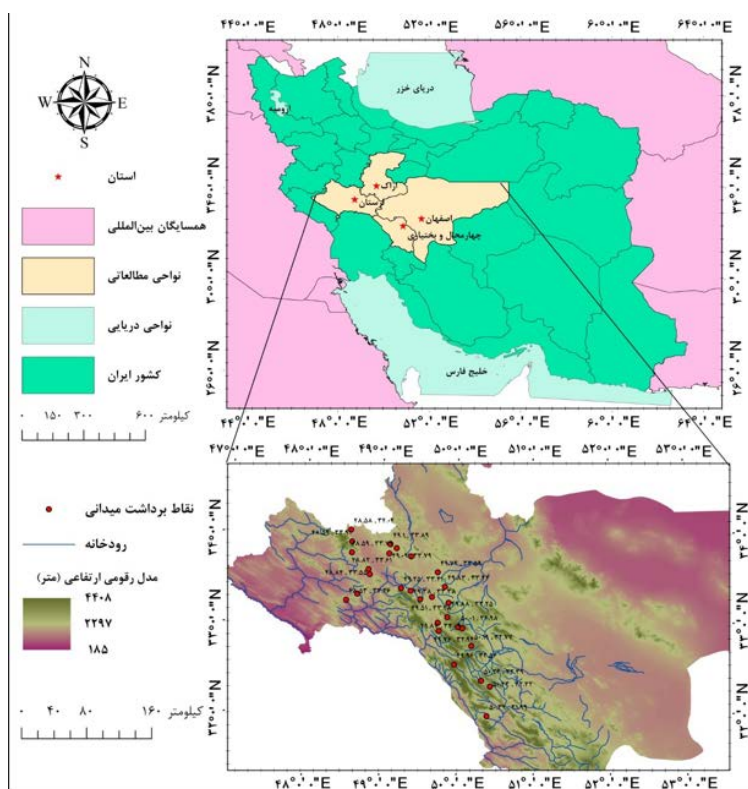


Figure 1- The study area of this research along with the field sampling stations on the elevation model map of the area

۲-۲-۲- داده‌ها

در پیاده‌سازی‌های صورت گرفته در این پژوهش از دو مجموعه داده شامل داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های میدانی استفاده شده است. از داده‌های ماهواره‌ای به منظور مدلسازی عمق برف با استفاده از مفاهیم فیزیکی و از داده‌های زمینی به منظور اعتبارسنجی مدلسازی و نتایج حاصل به کار گرفته شد.

۲-۲-۱- داده‌های میدانی

به منظور برداشت‌های زمینی عمق برف از ابزار خط‌کش و لوله استفاده شده است، بدین صورت که ابتدا گودال‌هایی درون توده برف حفر، سپس با استفاده از خط‌کش عمق گودال اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده عمق برف است (Mahmoodzada et al., 2020). نحوه انتخاب محل نمونه برداری از توده برف به صورت تصادفی بود. بدین منظور در هر ایستگاه ۱۰ نقطه با فاصله‌های برابر از هم انتخاب شدند و عمق برف آن نقاط اندازه‌گیری شد. سپس میانگین عمق برف از ۱۰ نقطه اندازه‌گیری شده به عنوان داده نهایی، در صحت‌سنجی به کار رفت. برداشت‌های زمینی در این پژوهش توسط سازمان آب منطقه‌ای خوزستان انجام شد که شامل اطلاعات عمق و چگالی برف در ۳ سال ۲۰۱۷، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ بود. تعداد نقاط برداشت‌های میدانی در مجموع ۳ سال، ۳۹ نقطه بود.

۲-۲-۲- داده‌های ماهواره‌ای

در این پژوهش، از داده‌های سنجنده سنتینل ۱ استفاده گردید. این ماهواره توسط آژانس فضایی اروپا طراحی و توسعه داده شده است. سنجنده سنتینل ۱ در ارتفاع ۶۹۳ کیلومتری از سطح زمین قرار دارد. فرکانس سیگنال‌های ارسالی این ماهواره ۵/۴۰۵ گیگاهرتز با طول موج ۵/۵ سانتیمتری (باند C) است. تصاویر برداشت شده توسط سنتینل ۱ دارای مدهای IW^1 ، EW^2 ، SM^3 و WV^4 در دو فرمت SLC^5 و GRD^6 با دو کانال VH و VV است که هر یک کاربردهای مختلفی دارند. در مطالعات پوشش برف به دلیل اندازه‌گیری مقادیر مختلف سیگنال دریافتی در هر پیکسل از داده‌های IW با فرمت SLC استفاده می‌شود (Nagler et al., 2016; Varade, Maurya, et al., 2020). قدرت تفکیک مکانی مد IW ، ۲۰ متر در جهت رنج و ۵ متر در جهت آزیموت است. زاویه تابش در این سنجنده بین ۲۹ تا ۴۳ درجه متغیر است. به منظور ارزیابی عمق برف یک تصویر در تابستان و یک تصویر زمستان بکار رفت که تصویر زمستان به عنوان تصویر پایه و تصویر تابستان، پیرو بود. تصاویر از مجموعه داده‌های *Distributed* (*Active Archive Centers (DAAC)*) ناسا به آدرس <https://search.asf.alaska.edu.com> تهیه شد. اطلاعات تصاویر بکار رفته در جدول ۱ نشان داده شده است.

¹ Interferometric Wide Swath

² Extra Wide Swath

³ Stripmap

⁴ Wave

⁵ Single Look Complex

⁶ Ground Range Detection

جدول ۱- اطلاعات تصاویر پایه و پیرو استفاده شده در این پژوهش به منظور برآورد عمق برف

تاریخ برداشت	نام تصویر	نوع تصویر	فاصله زمانی تصویر پایه با برداشت میدانی (روز)	فاصله زمانی تصویر پیرو (روز)
۲۰۱۷/۲/۲۲	S1A_IW_SLC__1SDV_20170222T144317_20170222T144344_015398_01944A_B53E	پایه	۲	۱۳۲
	S1A_IW_SLC__1SDV_20170704T0704T144325_20170704T144352_017323_01CEC3_0B0C	پیرو	-	۱۳۲
۲۰۱۷/۲/۲۲	S1A_IW_SLC__1SDV_20170222T144252_20170222T144319_015398_01944A_56B1	پایه	۲	۱۳۲
	S1A_IW_SLC__1SDV_20170704T0704T144300_20170704T144327_017323_01CEC3_B791	پیرو	-	۱۳۲
۲۰۱۹/۳/۸	S1A_IW_SLC__1SDV_20190308T144308_20190308T144335_026248_02EEA6_FABB	پایه	۴	۱۲۰
	S1A_IW_SLC__1SDV_20190706T0706T144313_20190706T144340_027998_032966_41D8	پیرو	-	۱۲۰
۲۰۱۹/۳/۸	S1A_IW_SLC__1SDV_20190308T144333_20190308T144400_026248_02EEA6_2EFD	پایه	۴	۱۲۰
	S1A_IW_SLC__1SDV_20190706T0706T144338_20190706T144405_027998_032966_29AB	پیرو	-	۱۲۰
۲۰۲۰/۳/۲	S1A_IW_SLC__1SDV_20200302T0302T144314_20200302T144341_031498_03A0AF_FACC	پایه	۲	۱۳۲
	S1A_IW_SLC__1SDV_20200712T0712T144326_20200712T144354_033423_03DF74_B07E	پیرو	-	۱۳۲

Table 1- The information of Master and Slave images used in this research in order to estimate snow depth

۳. روش پژوهش

در این پژوهش عمق برف با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و اندرکنش سیگنال با توده برف، برآورد شد. نحوه پیاده‌سازی روش پیشنهادی در روندنمای شکل ۲ ارائه شده است. در ادامه روش پیشنهادی به منظور برآورد عمق برف تشریح شده است.

فصلنامه برنامه‌ریزی و آمایش فضا

شکل ۲- روندنمای روش پیشنهادی این تحقیق به منظور برآورد عمق برف

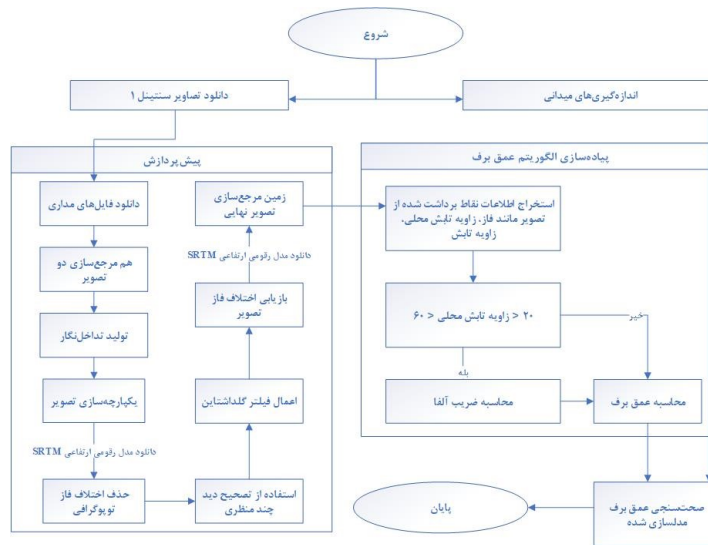


Figure 2- The process chart of the proposed method of this research in order to estimate the snow depth

۳-۱- مباحث مفهومی برآورد عمق برف

سیگنال به دلیل حضور برف و تفاوت در ثابت دی الکتریک در فصل مشترک هوا و برف دچار شکست می‌شود (Li et al., 2017). از این رو با شکست سیگنال در فصل مشترک هوا و برف، تاخیر فازی بین دو تصویر حاوی پوشش برف و عاری از پوشش برف بوجود خواهد آمد. در نتیجه بر پایه هندسه دو مسیر پیموده شده سیگنال، می‌توان روابط بین فاز سیگنال و اختلاف مسیر پیموده شده سیگنال در زمین حاوی برف و عاری از پوشش برف را نوشت (Guneriusen et al., 2001; Rott et al., 2003). شکل ۳ به خوبی مسیر پیموده شده سیگنال در حالت زمین پوشیده از برف و عاری از پوشش برف را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، در حالتی که زمین پوشیده از برف است شکستی در مسیر سیگنال به وجود می‌آید که منجر به تاخیر فاز سیگنال در برخورد با زمین و برگشت آن به ماهواره می‌شود که با نوشتن روابط قانون اسنل و رابطه تاخیر فاز امواج الکترومغناطیس با مسیر پیموده شده سیگنال، می‌توان عمق برف را بر پایه تاخیر فاز سیگنال تعیین کرد. در ادامه، روابط نوشته شده از هندسه مسیر سیگنال با توجه به شکل ۳ استخراج شده است.

شکل ۳- مکانیزم پراکنش سیگنال در توده برف

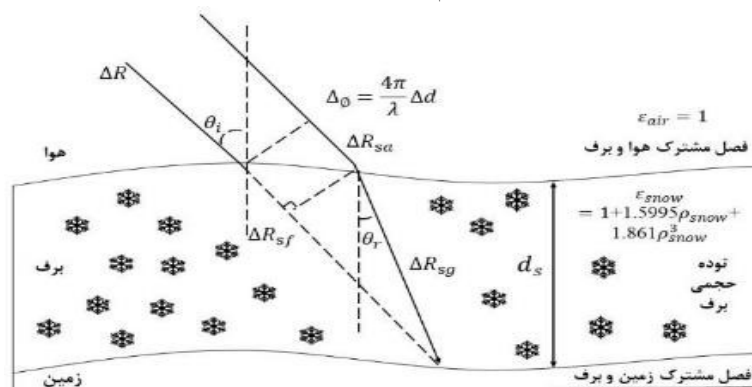


Figure 3- Mechanism of signal propagation in snow mass

فصلنامه برنامه‌ریزی و آمایش فضا

با توجه به شکل ۳، سیگنال در حالتی که زمین عاری از پوشش برف است به صورت مستقیم به سطح زمین برخورد می‌کند و شکستی در مسیر سیگنال وجود ندارد. در حالیکه در حالت دوم که زمین پوشیده از برف است، سیگنال در فصل مشترک برف و هوا دچار شکست شده و با زاویه متفاوتی از زاویه ارسالی به سطح زمین برخورد می‌کند. این شکست ناشی از اختلاف ثابت دی الکتریک برف و هوا است. از این رو اختلاف دو مسیر پیموده شده سیگنال در حالت اول و دوم به صورت رابطه (۱) است.

$$DR = DR_{sf} - DR_s = DR_{sf} - (DR_{sa} + DR_{sg}) \quad (1)$$

ΔR اختلاف مسیر سیگنال در حالت زمین پوشیده از برف و عاری از برف، ΔR_{sf} مسیر سیگنال در حالت زمین عاری از پوشش برف، ΔR_s مسیر سیگنال در حالت زمین پوشیده از برف است که به دو بخش مسیر سیگنال از آنتن تا سطح برف ΔR_{sa} و از سطح برف تا سطح زمین ΔR_{sg} تقسیم می‌شود. با در نظر گرفتن قانون اسنل $\sin \theta_i \sqrt{\epsilon_{air}} = \sin \theta_r \sqrt{\epsilon_{snow}}$ ، اختلاف فاز دو تصویر را می‌توان به عمق برف ارتباط داد (Li et al., 2017). در رابطه اسنل θ_i زاویه تابش در سطح برف، θ_r زاویه شکست در فصل مشترک برف و هوا، ϵ_{air} ضریب دی الکتریک هوا و ϵ_{snow} ثابت دی الکتریک برف است. ضریب دی الکتریک هوا برابر یک است. d_s عمق برف در راستای دید سنجنده متناظر با اختلاف فاز ϕ_s است. λ طول موج سیگنال راداری، ϵ_s گذردهی برف می‌باشد.

$$Df = - \frac{4p}{l} d_s (\cos q_i - \sqrt{\epsilon_s - \sin^2 q_i}) \quad (2)$$

در رابطه ۲ مقادیر گذردهی برف از رابطه ماترلز ($\epsilon_s = 1 + 1.6\rho_s + 1.861\rho_s^3$) قابل برآورد است. از طرفی اختلاف فاز نیز با تکنیک 'DInSAR' بدست می‌آید. در نتیجه عمق برف مشخص خواهد شد. در مناطق کوهستانی به دلیل شیب مثبت و منفی زمین، زاویه تابش محلی با زاویه تابش متفاوت خواهد بود که منجر به بروز خطا در برآورد عمق برف با استفاده از رابطه ۲ می‌شود. بنابراین می‌توان به منظور ارزیابی بهتر عمق برف از زاویه تابش محلی به جای زاویه تابش در رابطه ۲ استفاده کرد تا اثرات شیب زمین و تفاوت زاویه تابش محلی با زاویه تابش در نظر گرفته شود.

همچنین به منظور ترکیب عمق برف در دو کانال VV و VH از ضریب وزنی S در تعیین عمق برف نهایی استفاده شد که در رابطه ۳ چگونگی ترکیب عمق برف در دو کانال مذکور به عمق برف نهایی آورده شده است. براساس رابطه ۳، عمق برف بدست آمده از اختلاف فاز در کانال VV در ضریب S و عمق برف حاصل از اختلاف فاز در کانال VH در ضریب (1-S) ضرب می‌شود. به منظور تعیین ضریب S باید دقت داشت که در زوایای تابش محلی زیاد، نسبت سیگنال به نویز افزایش و در زوایای تابش محلی کم قدرت تفکیک مکانی کاهش می‌یابد (Nagler et al., 2016)، از این رو باید بهترین بازه برای زاویه تابش محلی در نظر گرفته شود و ضریب وزنی S با استفاده از

¹ Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar

بازه مناسب زاویه تابش محلی و اختلاف زاویه تابش سنجنده تعیین گردید. در این پژوهش زاویه تابش محلی مناسب بین ۲۰ تا ۶۰ درجه در نظر گرفته شده و با توجه به آن بر پایه رابطه ۴ ضریب وزنی S محاسبه گردید. از آنجاییکه اختلاف فاز کانال هم قطبی عملکرد بهتری در برآورد عمق برف دارد، ضریب S در کانال هم قطبی VV به کار رفت (Leinss et al., 2014). ضریب S با استفاده رابطه ۴ بدست می آید.

$$d_s = S * d_{vv} + (1 - S) * d_{vh} \quad (3)$$

$$S = \begin{cases} 1 & "(q_i < q_i^1)" \\ 0.5 * (1 + \frac{q_i^2 - q_i^1}{q_i^2 + q_i^1}) & "(q_i^1 < q_i < q_i^2)" \\ 0.5 & "(q_i > q_i^2)" \end{cases} \quad (4)$$

۴. نتایج

۴-۱- ارزیابی همدوسی بین جفت تصویر

شکل ۴ همدوسی بین پیکسل‌های جفت تصویر را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در تمامی جفت تصاویر دست کم ۵۰ درصد پیکسل‌ها دارای همدوسی بالای ۳۰ درصد هستند. از این رو استفاده از تداخل‌سنجی راداری قابل اعتماد است. از دلایل تاثیر گذار بر همدوسی می‌توان به ناهمبستگی مبنای مکانی، ناهمبستگی زمانی، ناهمبستگی ناشی از نویز گرمایی سنجنده و ناهمبستگی ناشی از اثرات اتمسفر اشاره کرد. اگر فاصله زمانی دو تصویر پایه و پیرو زیاد باشد، همدوسی دو تصویر کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر ناهمبستگی مکانی به دلیل تغییرات موقعیت سنجنده در هنگام اخذ دو تصویر است که با افزایش آن، همدوسی دو تصویر کاهش می‌یابد. همچنین ناهمبستگی ناشی از اتمسفر به دلیل بخار آب موجود در زمان اخذ تصویر رخ می‌دهد. در این پژوهش تلاش شده است تا تصویر پایه و پیرو کمترین فاصله زمانی را داشته باشند تا اثرات ناهمبستگی زمانی کاهش یابد. با این حال به دلیل نیاز به استفاده از تصویر عاری از پوشش برف از منطقه مورد مطالعه دست کم ۱۰۰ روز فاصله زمانی بین دو تصویر پایه و پیرو وجود داشت.

شکل ۴- همدوسی بین پیکسل‌های جفت تصاویر مورد استفاده در این پژوهش در کانال الف (VH) و ب (VV)

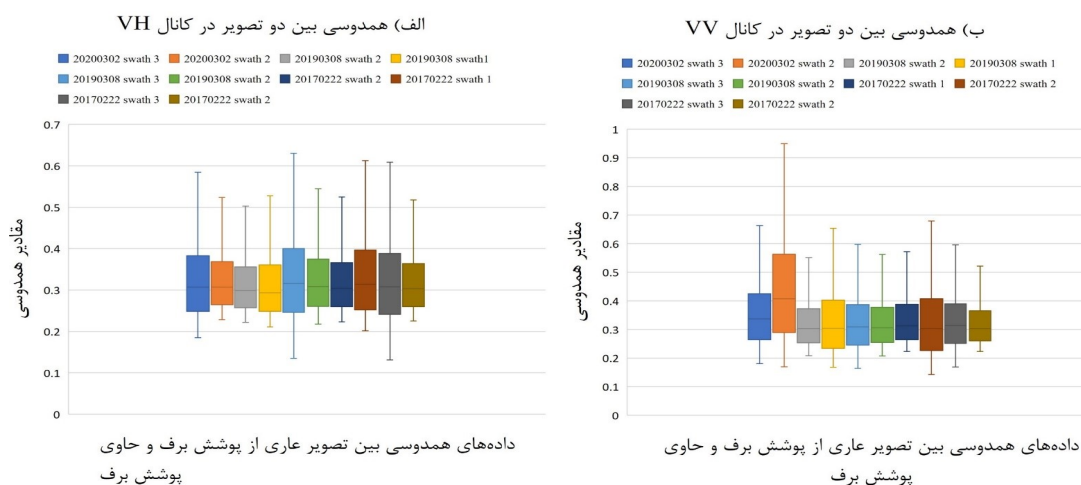


Figure 4- Coherence between the pixels of the pair of images used in this research in the channel a) VH and b) VV

۴-۲- ارزیابی صحت روش پیشنهادی

در این پژوهش عمق برف در ۳ تاریخ فوریه ۲۰۱۷، مارچ ۲۰۱۹ و مارچ ۲۰۲۰ برآورد شد. میانگین عمق برف با استفاده از روش به کار گرفته شده، ۲۲/۹۵ سانتیمتر برآورد شد. بیشترین خطای نسبی بدست آمده، ۱۲۵ درصد مشاهده گردید. با دقت در عمق برف این نقطه مشاهده می شود که عمق برف ۵ سانتیمتر در برداشت‌های میدانی اندازه‌گیری شده است. پایین بودن عمق برف در روش تداخل‌سنجی راداری می‌تواند منجر به خطا در محاسبه اختلاف فاز شود؛ چراکه تفاوت چندانی بین دو تصویر عاری از پوشش برف و حاوی پوشش برف مشاهده نشده و خطا ایجاد می‌شود. با دقت در مقادیر بدست آمده از عمق برف برآورد شده، مشاهده می‌شود که روش استفاده شده در ایستگاه‌هایی که عمق برف در آنها بالای ۹۰ سانتی‌متر است؛ به درستی عمل نمی‌کند که یکی از دلایل آن همدوسی بین دو تصویر است. با افزایش عمق برف همدوسی بین دو تصویر کاهش و در نتیجه روش مذکور خطا خواهد داشت. بنابراین روش DInSAR در نقاطی که عمق برف کمتر از ۱۰ سانتی‌متر و بیشتر از ۹۰ سانتی‌متر دارند با خطا مواجه می‌شود. از این رو لازم است تا تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام شود.

شکل ۵ همبستگی بین عمق برف برآورده شده و بدست آمده از داده‌های میدانی را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است همبستگی ۸۶ درصدی بین عمق برف روش پیشنهادی و داده‌های میدانی مشاهده می‌شود.

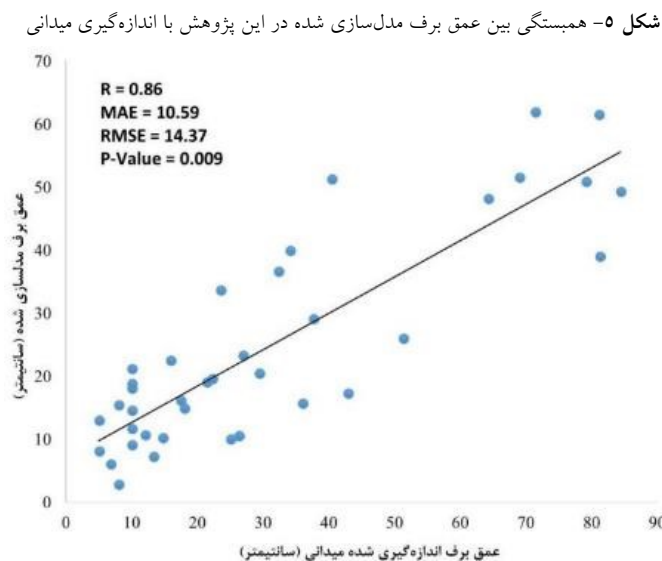


Figure 5- Correlation between modelled snow depth and observed snow depth in this research

در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ نقشه‌های عمق برف در ۳ سال ۱۳۹۸، ۱۳۹۷ و ۱۳۹۵ نشان داده شده است. در مناطقی که اعداد مثبت هستند، تغییرات سطح ناشی از وجود برف است. درحالی‌که اعداد منفی، نشان‌دهنده تغییرات سطح ناشی از رشد پوشش گیاهی در تابستان یا عوامل دیگر که منجر به بالا آمدگی سطح زمین می‌شود، است.

فصلنامه برنامه‌ریزی و آمایش فضا

شکل ۷- نقشه عمق برف در منطقه مورد

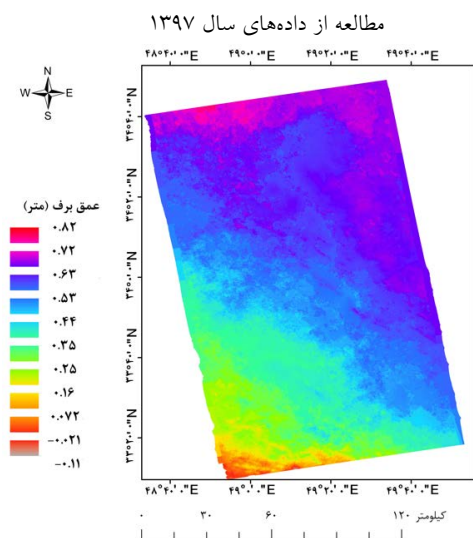


Figure 7- Snow depth map in the study area from the data of 2019

شکل ۶- نقشه عمق برف در منطقه مورد

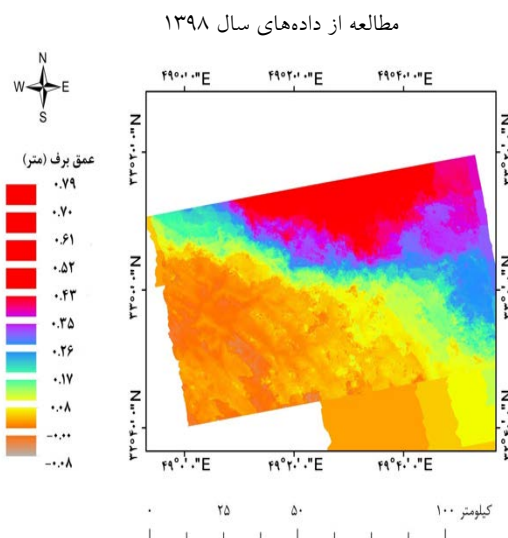


Figure 6- Snow depth map in the study area from the data of 2020

شکل ۸- نقشه عمق برف در منطقه مورد مطالعه از داده‌های سال ۱۳۹۵

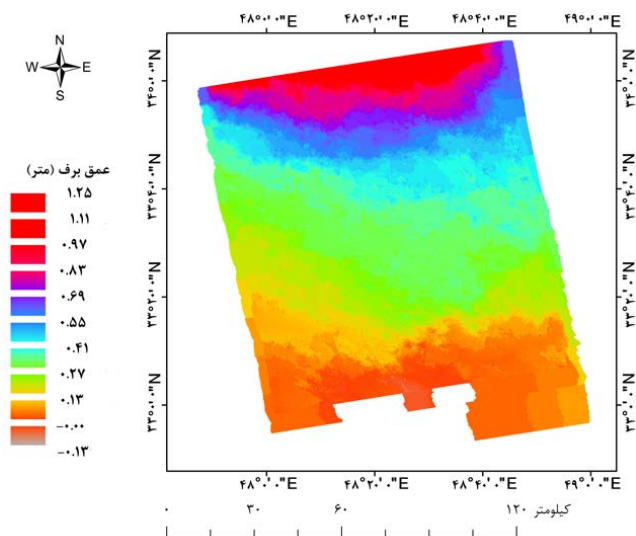


Figure 8- Snow depth map in the study area from the data of 2017

۵. بحث

در این پژوهش، پارامترهای تاثیرگذار در برآورد عمق برف به ترتیب چگالی برف، اطلاعات اختلاف فاز بین دو تصویر، زاویه تابش سیگنال، طول موج، نوع کانال قطبیدگی سیگنال، زاویه تابش محلی سیگنال است (Li et al., 2017).

در مناطق کوهستانی با شیب زیاد، بدلیل توپوگرافی پیچیده، پراکنش سیگنال درون توده برف، بسیار تحت تاثیر زاویه تابش محلی است (Goyal et al., 1999). تیلت و همکاران در سال ۱۹۸۵ در پژوهشی دریافتند که عدم قطعیت پراکنش سیگنال به دلیل توپوگرافی زمین، بین ۸ تا ۳۸ درصد است. از این رو لازم است تا اثرات زاویه تابش محلی در نظر گرفته شود (Teillet et al., 1985).

یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار در برآورد عمق برف با استفاده از داده‌های مایکروویو فعال و روش تداخل سنجی راداری، طول موج سیگنال ارسالی و دریافتی است. تصاویر راداری با طول موج‌های ۷/۵ میلیمتری تا ۳۰ سانتیمتر برداشت می‌شوند. از طرفی با افزایش طول موج سیگنال ارسالی میزان نفوذ در عمق برف بیشتر شده که منجر به بازپراکنش حجمی از توده برف و سطحی از فصل مشترک زمین و برف می‌شود. با این حال بر پایه مطالعات انجام شده در محدوده باند C (طول موج ۵/۵ سانتیمتری)، برف خشک تغییری در پراکنش حجمی سیگنال ندارد و تغییرات سیگنال ناشی از فصل مشترک زمین و برف است (Sun et al., 2015). با این حال این مطالعات توسط شرایط عمق برف کمتر از ۱ متر و هم قطبی بودن کانال سیگنال، محدود می‌شود (Fuller et al., 2009).

از طرفی نوع کانال قطبیدگی راداری در تعیین عمق برف بسیار حائز اهمیت است. در کانال‌های هم قطبی (VV و HH) قطبیدگی سیگنال ارسالی و دریافتی یکسان است. معمولاً بازپراکنش کانال‌های هم قطبی، بیان‌کننده بازپراکنش از سطح است که در حضور توده برف، بازپراکنش کانال‌های هم قطبی نشان‌دهنده بازپراکنش از فصل مشترک برف زمین است؛ چراکه در محدوده باند C به دلیل طول موج مناسب، سیگنال به توده برف نفوذ می‌کند. همچنین بازپراکنش کانال‌های متقاطع (HV و VH) به دلیل نفوذ سیگنال راداری از سطح برف و تغییر قطبیدگی در توده حجمی برف نمایانگر بازپراکنش حجمی از توده برف است (Henderson, 1998). با این حال به دلیل وجود عدم قطعیت در تعیین شدت بازپراکنش و فاز ناشی از توده حجمی برف و سطحی از فصل مشترک برف و زمین به صورت مجزا، لازم است تا عمق برف در هر کانال به صورت جداگانه بررسی شود.

از طرفی روش پیشنهادی براساس مکانیزم پراکنش سیگنال راداری از فصل مشترک زمین و برف توسعه یافته است؛ بنابراین باید سطح زمین عاری از پوشش گیاهی باشد، چراکه وجود پوشش گیاهی منجر به تغییر پراکنش سیگنال می‌شود و در فاز تداخل سنجی نیز تاثیرگذار است. از این رو به لازم است تا در تحقیقات آینده اثرات پوشش گیاهی در نظر گرفته شود. یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار در فاز تداخل سنجی راداری میزان رطوبت توده برف است. برف خشک دارای کمترین رطوبت است و نتایج روش تداخل سنجی راداری بر آن قابل اعتماد می‌باشد. در این پژوهش از آنجاییکه فاصله بین تصاویر ماهواره‌ای و برداشت داده‌های میدانی کم بود، از اثرات رطوبت توده برف بر فاز تداخل سنجی می‌توان صرف نظر شد.

۵. نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش، برآورد عمق برف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مایکروویو فعال بود. بدین منظور از تصاویر ماهواره سنتینل ۱ استفاده شد. روش به کار رفته در برآورد عمق برف، مفاهیم تداخل سنجی راداری و قانون اسنل بود.

با توجه به مقادیر شدت بازپراکتش و فاز در دو کانال VV و VH در حالت زمین پوشیده از برف و عاری از پوشش برف کارایی مناسب تصاویر با محدوده طول موج باند C در برآورد عمق برف مشخص شد. از آنجاییکه در عمق برف بیشتر از ۹۰ سانتی متر نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی همبستگی مناسبی با داده‌های میدانی نداشت، محدودیت باند C در برآورد عمق برف در این نقاط کاملاً مشهود است. از طرفی تفاوت بین مقادیر فاز در دو کانال VV و VH منجر به برآورد عمق برف با دو نتیجه متفاوت می‌شود که در VH نتایج دست بالا بدست آمد. علت دست بالا بودن عمق برف در کانال VH، بازپراکتش حجمی در این کانال است. در این پژوهش به منظور صحت‌سنجی عمق برف برآورده شده از روش پیشنهادی، نتایج روش پیشنهادی با مقادیر بدست آمده از اندازه‌گیری‌های میدانی مقایسه شد که همبستگی ۸۶ درصدی با خطای مطلق ۱۰/۵۹ سانتی‌متر بدست آمد. همچنین میانگین خطای مطلق نیز ۱۴/۳۷ سانتی‌متر محاسبه شد که نسبت به پژوهش‌های مشابه بهبود یافته است. از این رو استفاده از روش پیشنهادی در برآورد عمق برف با تصاویر ماهواره‌ای میکروویو فعال می‌تواند اطلاعات خوبی از توده برف در اختیار ما قرار دهد.

قابل ذکر است که در صورت دسترسی به مدل رقومی ارتفاعی با دقت بالاتر، می‌توان دقت برآورد عمق برف را افزایش داد که می‌تواند در پژوهش‌های دیگر به آن پرداخته شود. علاوه بر این به عنوان پیشنهاد می‌توان از چگالی برف اندازه‌گیری شده توسط روش‌های سنسجش از دور در الگوریتم نیز استفاده کرد.

قدردانی

در این پژوهش از مجموعه داده‌های برداشت شده توسط آب منطقه‌ای خوزستان استفاده شده است. از تمامی کارکنان این سازمان کمال قدرانی و تشکر را داریم. همچنین از جناب آقای دکتر حسین‌زاده برای تسهیل در دسترسی به داده‌های این سازمان صمیمانه تشکر می‌کنیم.

منابع

- Attema, E., & Ulaby, F. T. (1978). Vegetation modeled as a water cloud. *Radio science*, 13(2), 357-364. <https://doi.org/10.1029/RS013i002p00357>
- Awasthi, S., Thakur, P. K., Kumar, S., Kumar, A., Jain, K., & Mani, S. (2020). Snow Density retrieval using Hybrid polarimetric RISAT-1 datasets. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 3058-3065. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2991156>
- Chen, J., Günther, F., Grosse, G., Liu, L., & Lin, H. (2018). Sentinel-1 InSAR Measurements of Elevation Changes over Yedoma Uplands on Sobo-Sise Island, Lena Delta. *Remote Sensing*, 10(7), 1152. <https://doi.org/10.3390/rs10071152>
- Conde, V., Nico, G., Mateus, P., Catalão, J., Kontu, A., & Gritsevich, M. (2019). On the estimation of temporal changes of snow water equivalent by spaceborne SAR interferometry: A new application for the Sentinel-1 mission. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 93 - 100. <https://doi.org/10.2478/johh-2018-0003>
- Diro, G. T., Sushama, L., & Huziy, O. (20). Snow-atmosphere coupling and its impact on temperature variability and extremes over North America. *Climate Dynamics*, 50(7), 2993-3007. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3788-5>
- *Distributed Active Archive Centers (DAAC)*. <https://search.asf.alaska.edu.com>

- Evans, J., Kruse, F., Bickel, D., & Dunkel, R. (2014). *Determining snow depth using Ku-Band Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)* (Vol. 9077). <https://doi.org/10.1117/12.2049711>
- Formetta, G., Kampf, S. K., David, O., & Rigon, R. (2014). Snow water equivalent modeling components in NewAge-JGrass. *Geosci. Model Dev.*, 7(3), 725-736. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-725-2014>
- Fuller, M. C., Geldsetzer, T., & Yackel, J. J. (2009). Surface-Based Polarimetric C-Band Microwave Scatterometer Measurements of Snow During a Chinook Event. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(6), 1766-1776. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2006684>
- Goyal, S. K., Seyfried, M. S., & O'Neill, P. E. (1999). Correction of Surface Roughness and Topographic Effects on Airborne SAR in Mountainous Rangeland Areas. *Remote Sensing of Environment*, 67(2), 124-136. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00077-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00077-7)
- Guneriussen, T., Hogda, K. A., Johnsen, H., & Lauknes, I. (2001). InSAR for estimation of changes in snow water equivalent of dry snow. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(10), 2101-2108. <https://doi.org/10.1109/36.957273>
- Henderson, F. M. (1998). *Principles and applications of imaging radar* (Vol. 2) .
- Leinss, S., Parrella, G., & Hajnsek, J. (2014). Snow Height Determination by Polarimetric Phase Differences in X-Band SAR Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(9), 3794-3810. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2323199>
- Li, H., Wang, Z., He, G., & Man, W. (2017). Estimating Snow Depth and Snow Water Equivalence Using Repeat-Pass Interferometric SAR in the Northern Piedmont Region of the Tianshan Mountains. *Journal of Sensors*, 2017, 8739598. <https://doi.org/10.1155/2017/8739598>
- Li, Y., Zhao, X., & Zhao, Q. (2022). Snow Depth Inversion in Forest Areas from Sentinel-1 Data Based on Phase Deviation Correction. *Remote Sensing*, 14(23), 5930. <https://doi.org/10.3390/rs14235930>
- Mahmoodzada, A. B., Varade, D., & Shimada, S. (2020). Estimation of Snow Depth in the Hindu Kush Himalayas of Afghanistan during Peak Winter and Early Melt Season. *Remote Sensing*, 12(17), 2788. <https://doi.org/10.3390/rs12172788>
- Matzler, C. (1996). Microwave permittivity of dry snow. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(2), 573-581. <https://doi.org/10.1109/36.485133>
- Nagler, T., Rott, H., Ripper, E., Bippus, G., & Hetzenecker, M. (2016). Advancements for Snowmelt Monitoring by Means of Sentinel-1 SAR. *Remote Sensing*, 8(4), 348. <https://doi.org/10.3390/rs8040348>
- Patil, A., Mohanty, S., & Singh, G. (2020). Snow depth and snow water equivalent retrieval using X-band PolInSAR data. *Remote Sensing Letters*, 11(9), 817-826. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2020.1779373>
- Robinson, D. A., & Frei, A. (2000). Seasonal Variability of Northern Hemisphere Snow Extent Using Visible Satellite Data. *The Professional Geographer*, 52(2), 307-315. <https://doi.org/10.1111/0033-0124.00226>
- Rott, H., Nagler, T., & Scheiber, R. (2003). Snow mass retrieval by means of SAR interferometry. 3rd FRINGE Workshop, European Space Agency, Earth Observation ,
- Sánchez-Gómez, P., & Navarro, F. J. (2017). Glacier Surface Velocity Retrieval Using D-InSAR and Offset Tracking Techniques Applied to Ascending and Descending Passes of

- Sentinel-1 Data for Southern Ellesmere Ice Caps, Canadian Arctic. *Remote Sensing*, 9(5), 442. <https://doi.org/10.3390/rs9050442>
- Strozzi, T., Antonova, S., Günther, F., Mätzler, E., Vieira, G., Wegmüller, U., Westermann, S., & Bartsch, A. (2018). Sentinel-1 SAR Interferometry for Surface Deformation Monitoring in Low-Land Permafrost Areas. *Remote Sensing*, 10(9), 1360. <https://doi.org/10.3390/rs10091360>
 - Sun, S., Che, T., Wang, J., Li, H., Hao, X., Wang, Z., & Wang, J. (2015). Estimation and analysis of snow water equivalents based on C-band SAR data and field measurements. *Arctic, antarctic, and alpine research*, 47(2), 313-326. <https://doi.org/10.1657/AAAR00C-13-135>
 - Surendar, M., Bhattacharya, A., Singh, G., & Venkataraman, G. (2015). Estimation of snow density using full-polarimetric Synthetic Aperture Radar (SAR) data. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 83-84, 156-165. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.07.001>
 - Teillet, P. M., Guindon, B., Meunier, J. F., & Goodenough, D. G. (۱۹۸۵). Slope-Aspect Effects in Synthetic Aperture Radar Imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 11(1), 39-49. <https://doi.org/10.1080/07038992.1985.10855076>
 - Ulaby, F., Long, D., Blackwell, W., Elachi, C., Fung, A., Ruf, C., Sarabandi, K., Zebker, H., & Van Zyl, J. (2014). *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*, University of Michigan Press .
 - Varade, D., & Dikshit, O. (2018). ESTIMATION OF SURFACE SNOW WETNESS USING SENTINEL-2 MULTISPECTRAL DATA. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, IV-5, 223-228. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-5-223-2018>
 - Varade, D., Manickam, S., Dikshit, O., & Singh, G. (2020). Modelling of early winter snow density using fully polarimetric C-band SAR data in the Indian Himalayas. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111699. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111699>
 - Varade, D., Maurya, A. K., Dikshit, O., Singh, G., & Manickam, S. (2020). Snow depth in Dhundi: an estimate based on weighted bias corrected differential phase observations of dual polarimetric bi-temporal Sentinel-1 data. *International Journal of Remote Sensing*, 41(8), 3031-3053. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1698076>
 - Varade, D. M., & Dikshit, O. (2017). *A novel linear physical model for remote sensing of snow wetness and snow density using the visible and infrared bands* AGU Fall Meeting Abstracts, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017AGUFM.C13C0975V/abstract>
 - Viste, E., & Sorteberg, A. (2015). Snowfall in the Himalayas: an uncertain future from a little-known past. *The Cryosphere*, 1167-1147, 9(3), <https://doi.org/10.5194/tc-9-1147-2015>
 - You, Q., Wu, F., Wang, H., Jiang, Z., Pepin, N., & Kang, S. (2020). Projected Changes in Snow Water Equivalent over the Tibetan Plateau under Global Warming of 1.5° and 2°C. *Journal of Climate*, 5154-5141, 33(12), <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0719.1>