



Application of Interferometric Method and Radar Remote Sensing Images for Estimating the Depth of Snow and Water Discharge, Case Study: (Yamchie Basin)

H. Seifi¹ and B. Feizizadeh^{2*}

Abstract

Snow cover in mountainous basins is known as an important and reliable fresh water resource. Due to the physical conditions of the mountainous environments, in situ measurement of snow pack is challenging based on traditional methods and techniques. In order to deal with this issue, remote sensing based on satellite images can be considered as efficient method for identifying snow cover and computing snow depth and volume. Within the current research, the Landsat 8 satellite images were employed to detect snow cover surface for Yamchi Basin using NDSI indices and object based image analysis methods. The ground control points were applied to compute the accuracy of the results and the overall accuracy was computed to be about 90%. In order to measure the snow cover depth and compute water discharge, the Sentinel A1 and D-InSAR satellite imagery were employed. In context of snow cover investigation using Landsat 8 images, the satellite images for September indicated no snow cover for the study area which accordingly employed as basic data for comparing against winter season satellite images and accordingly computing the snow cover and depth using the interferometry approaches. The obtained results were verified by ground data. Accordingly, the correlation coefficients between observational data and estimated snow depth were computed to be about 85%. With confidence in the accuracy of the maps, the snow volume was also obtained through surface and snow depth maps. Accordingly, the correlation between snow depth of ground control points and the obtained snows depth from differential radar interference were employed to compute water discharge in the study area. Results of this study are of great importance for applying remote sensing image processing methods and analyzing their capabilities for future research. Results are also important for regional decision makers and authorities for regional water resource planning and management.

Keywords: Snow Depth, Snow Cover, Sentinel A1, D-InSAR Method, Yamchi Basin.

Received: December 23, 2017

Accepted: January 3, 2019

کاربرد روش تداخل سنجی و تصاویر سنجش از دوری رادار در برآورد عمق برف و آب قابل استحصال از آن در حوضه آبریز یامچی

هوشنگ سیفی^۱ و بختیار فیضی زاده^{۲*}

چکیده

ذخیره برف در حوضه‌های کوهستانی از منابع آب مهم و قابل اطمینان است. به دلیل شرایط سخت فیزیکی محیط‌های کوهستانی، امکان اندازه‌گیری برف به صورت زمینی وجود ندارد؛ به همین دلیل، استفاده از سنجش از دور با توجه به پوشش وسیع می‌تواند در شناسایی مناطق برفی روش مناسبی باشد. در پژوهش حاضر، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 سطح پوشش برف برای حوضه آبریز یامچی از طریق شاخص NDSI و به‌وسیله پردازش شیء‌گرا بدست آمد و با داده‌های زمینی صحت‌سنجی شد که دقت کلی بالای ۹۰ درصد را نمایش داد. برای محاسبه عمق برف منطقه مورد مطالعه نیز از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel A1 و روش D-InSAR استفاده شد. با بررسی تصاویر Landsat 8 مشخص گردید که تصویر شهریور ماه فاقد برف می‌باشد به همین دلیل این تصویر به‌عنوان تصویر پایه برای تداخل‌سنجی انتخاب گردید و تمام تصاویر نسبت به این تصویر تداخل‌سنجی شده و نقشه عمق برف بدست آمد. نتایج حاصل با داده‌های زمینی صحت‌سنجی شده و ضرایب همبستگی بین داده‌های مشاهده‌ای و مقادیر برآورد شده عمق برف، ۸۵ درصد بدست آمد. با اطمینان از دقت بالای نقشه‌های بدست آمده، حجم برف نیز از طریق نقشه‌های سطح و عمق برف، حاصل شد. با استفاده از همبستگی بین داده‌های عمق برف بدست آمده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری و آب معادل برف ایستگاه‌های زمینی، یک رابطه خطی درجه شش با ضریب همبستگی ۰/۸۷ محاسبه شد، و به این طریق، نقشه‌های عمق آب معادل برف نیز برای منطقه مورد مطالعه منتج گردید. نتایج این تحقیق در خصوص استفاده از تکنیک‌های پردازش تصاویر سنجش از دور و بررسی کارآمدی آنها، می‌تواند راه‌گشای تحقیقات آتی باشد. افزون بر آن، نتایج به دست آمده می‌تواند در امور برنامه‌ریزی منابع طبیعی و آبی توسط تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان در سطح منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: عمق برف، سطح پوشش برف، Sentinel A1، روش D-InSAR، حوضه آبریز یامچی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۱۰/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۰/۱۳

1- M.Sc. in Remote Sensing and GIS, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran. Email: Feizizadeh@tabrizu.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- کارشناس ارشد رشته سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، ایران.

۲- عضو هیات علمی گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، پژوهشکده محیط زیست، دانشگاه تبریز، ایران.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

آگاهی از محیط و چگونگی امکانات بالقوه و بالفعل هر پهنه‌ای برای تفسیر و تحلیل وضع موجود، در ترسیم خطوط برنامه‌ریزی برای آینده یاری می‌کند (Hasanpour Darvishi and Ebrahimi, 2014). در حال حاضر رشد جمعیت، توسعه مناطق شهری، اهمیت کشاورزی در توسعه اقتصادی و لزوم تأمین آب مورد نیاز این بخش و بالا رفتن سطح بهداشت عمومی جامعه، مصرف آب را نسبت به شرایط زندگی سنتی چندین برابر نموده است. جهت استفاده صحیح و بهینه از منابع آب نیاز به اطلاع از میزان آب موجود در منطقه مورد نظر، تغییرات زمانی و مکانی آن و برنامه‌ریزی دقیق نگه‌داری و بهره‌برداری از آن است (Fattahi et al., 2009). بارش برف در مناطق کوهستانی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع آبی جهت ذخیره آب برای فصول گرم سال محسوب شده و قسمت عمده نزولات جوی در مناطق کوهستانی و در عرض‌های جغرافیایی بالا را تشکیل می‌دهد و با داشتن عکس‌العمل کند هیدرولوژیکی، نقش خاصی از نظر تغذیه‌ی سفره‌های آب زیرزمینی و تأخیر در جریان آب رودخانه‌ها را ایفا می‌کند (Engman and Gurney, 1991).

ایران به‌عنوان کشوری با اقلیم نیمه‌خشک و خشک شناخته می‌شود که مشکل کم‌آبی همواره یکی از مسائل زیست‌محیطی آن بوده است. لذا بارش برف و پوشش آن در مناطق کوهستانی بهترین عامل در میزان تأمین آب در فصول گرم سال محسوب می‌شود. نظر به اینکه میانگین بارندگی در ایران کمتر از یک سوم بارندگی جهان بوده و توزیع آن با نیازهای کشاورزی و صنعتی که مصرف‌کننده‌ی اصلی آب هستند، مطابقت ندارد، لزوم کنترل و استفاده بهینه از منابع آب بیش‌ازپیش احساس می‌شود (Raygani, 2005). بنابراین آگاهی از خصوصیات فیزیکی برف، به‌عنوان یک منبع حیاتی و پارامتری کلیدی در مطالعات هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آب در مناطقی که بارش برف دارای سهم زیادی در نزولات جوی است، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Adhami, 2005) و بدون در نظر گرفتن این عوامل (سطح و عمق برف) مدیریت منابع و مخازن و برنامه‌ریزی منابع آبی و هیدرولوژی رودخانه‌ها میسر نخواهد بود (Nolin and Liang, 2000). مسأله پیش‌بینی و برآورد رواناب حاصل از بارش برف و درک کمی از فرآیندهای مختلف تولید آن به‌عنوان یکی از مباحث مهم و بنیادی در دانش هیدرولوژیکی به شمار می‌رود. دستیابی به این نوع از اطلاعات، پایه و مبانی مطالعاتی طرح‌های عمرانی در زمینه‌های مختلف توسعه و بهره‌برداری در منابع آب و سازه‌های آبی و سایر عرصه‌های محیطی در حوضه‌های آبریز تشکیل می‌دهد (Fooladvand et al., 2015). یکی از مشکلات پیش رو در زمینه مطالعه برف، دشواری پایش وضعیت

پوشش برف در ایستگاه‌های برف‌سنجی است. از آنجا که سطح تحت پوشش برف و عمق برف یکی از پارامترهای مهم و دخیل در میزان جریان رواناب حاصل از ذوب برف است، با توجه به مشکل بودن پایش و اندازه‌گیری این پارامترها در حوضه‌های آبریز کوهستانی، تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان جایگزین پایش‌ها و عملیات مطرح شده‌اند (Miryagoubzadeh and Ganbarpour, 2010). سنجنده OLI^۱ ماهواره Landsat 8 با داشتن مزیت‌های فراوان و با داشتن تعداد باندهای مناسب، میزان تفکیک مکانی قابل استناد و سری‌های زمانی متوالی ابزار مناسبی برای این منظور محسوب می‌شود. بزرگ‌ترین محدودیت در استفاده از این تصاویر، ابرناکی هوا است. همچنین در طول شب نمی‌توان از این تصاویر استفاده نمود؛ بنابراین از آنجا که گستره پوشش سطحی برف کمی نیست که مستقیماً در محاسبه آب ذخیره‌شده در یک‌لایه برف مورد استفاده قرار گیرد، روش‌های گوناگونی برای تعیین خصوصیات فیزیکی برف و به دست آوردن حجم برف توسعه داده شده‌اند. یکی از این روش‌ها استفاده از سیستم سنجنش‌ازدور راداری است. تصاویر ماکروویو^۲ به دلیل قابلیت آن‌ها در برآورد خصوصیات توده برفی مانند عمق برف مورد توجه می‌باشند. امواج ماکروویو نه‌تنها از ابر بلکه از بارش عبور می‌کنند. با استفاده از تصاویر راداری در قطبیدگی‌های افقی و عمودی و فرکانس‌های مختلف، مشخصه‌های برف از جمله آب معادل قابل‌استخراج است. رادار با روزه مصنوعی با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال و استفاده از اثر تغییر فرکانس داپلر به کمک اطلاعات مداری ماهواره می‌تواند تصاویری با قدرت تفکیک بالاتر ایجاد نماید (Almodarresi et al., 2015)؛ یکی از داده‌های راداری، تصاویر مربوط به ماهواره Sentinel 1 می‌باشد که کاربرد زیادی در زمینه‌های مختلف از جمله برف می‌باشد. بنابراین، از طریق تصاویر راداری ماهواره Sentinel 1A می‌توانیم عمق برف را محاسبه کنیم که در این تحقیق جهت محاسبه عمق برف از تصاویر این ماهواره استفاده شده است. در شمال غرب ایران نزولات جوی در فصول سرد سال بیشتر به‌صورت برف است و به دلیل وسعت مناطق کوهستانی در این نواحی، ذخایر برفی در طول سال ماندگار بوده و بنابراین مدیریت علمی این ذخایر آبی جهت تأمین آب مصرفی ضروری است (Kamali et al., 2011).

Evans and Kruse (2013) از دو روش برای برآورد حجم برف استفاده کرده‌اند. در روش اول از طریق ساخت تداخل‌سنجی^۳ متعدد با استفاده از باند KU تصاویر راداری Spaceborne Imaging Radar (SIR)، به برآورد جابه‌جایی عمودی حاصل از بارش برف اقدام کردند که به دلیل مناسب نبودن فاصله Baseline با شکست مواجه شد. در روش دوم با ساخت مدل رقومی ارتفاع^۴ قبل و بعد بارش، اقدام به محاسبه حجم برف بارشی کردند. در ادامه نقاطی به‌صورت نمونه

انتخاب شده و ارتفاع برف بارشی در برداشت میدانی با مقادیر محاسبه شده مقایسه گردید که دارای دقت قابل قبولی بوده است. Leinss et al. (2015) در تحقیقی با عنوان اندازه‌گیری آب معادل برف^۵ از برف خشک با تداخل‌سنجی تفاضلی نشان دادند که نقشه‌های آب معادل برف می‌تواند تغییرات زیاد آب معادل برف را در چند سری زمانی مختلف از طریق باندهای X و K به صورت صحیح نشان دهد. Dai et al. (2015) در مقاله‌ای با عنوان محاسبه‌ی نسبت جابجایی عمودی^۶ زمین در شانگهای چین با استفاده از چند تصاویر SAR^۸ به محاسبه نسبت جابجایی عمودی در منطقه مورد مطالعه بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰ پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نسبت جابجایی عمودی به صورت حرکت هم‌زمان از شرق به غرب دارای تغییراتی از ۲۲/۸- تا ۹/۶ میلی‌متر در سال و نسبت حرکت هم‌زمان از شمال به جنوب با تغییراتی معادل ۷/۲- تا ۶/۲ میلی‌متر است. Liu et al. (2017) به برآورد و ارزیابی عمق برف در حوضه آبریز بایانولاک^۸ کوهستان تیانشان^۹، واقع در شینجیانگ^{۱۰} چین پرداخته‌اند. آن‌ها ابتدا با استفاده از باند C تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 و روش راداری تداخل‌سنجی تفاضلی^{۱۱} عمق برف موجود در منطقه مورد مطالعه را با خطای ۱/۹۶ سانتی‌متر برآورد کردند. سپس برای کاهش خطای به دست آمده از الگوریتم 123DVAR استفاده کردند که میزان خطای عمق برف حاصل شده به ۰/۵۰ سانتی‌متر کاهش یافت. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که این روش از پتانسیل بسیار بالایی در برآورد عمق برف در مناطق کوهستانی برخوردار است. Mokhtari Motlag et al. (2013) در تحقیق خود تغییرات سطح پوشش برف حوضه آبریز زیارت‌گران را با استفاده از محصول پوشش برف ماهواره Terra-MODIS (MOD10) استخراج کردند. این محققان از داده‌های سال آبی ۹۰-۸۹ برای واسنجی مدل استفاده کرده و مدل آبدی روزانه را با ضریب همبستگی ۰/۷۴ شبیه‌سازی کردند. نتایج این تحقیق بیانگر دقت خوب محصول پوشش برف MODIS^{۱۳}، برای تعیین سطح پوشش برف حوضه است. همچنین نتایج نشان داد که مدل SRM^{۱۴} با سنجش‌از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌تواند به عنوان ابزاری برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب مخصوصاً در حوضه‌هایی که ذوب برف فاکتور اصلی ایجاد رواناب است، مورد استفاده قرار گیرد. Ahmadi et al. (2015) اثر تغییر اقلیم بر رواناب ناشی از ذوب برف در بالادست حوضه آبریز زاینده‌رود و در زیرحوضه بالادست ایستگاه هیدرومتری قلعه شاهرخ را مورد بررسی قرار دادند. این محققان از محصولات روزانه و هشت روزه پوشش برف‌سنجنده MODIS برای پایش سطوح برف، به عنوان یکی از متغیرهای مهم در مدل شبیه‌سازی برف-رواناب SRM استفاده کردند. دقت سطوح برف استخراج شده در مقایسه با داده ایستگاه‌های زمینی مشخص کرد که محصول روزانه پوشش برف، دارای دقت کلی ۷۳/۴٪ و در شرایط هوای صاف دارای

دقت ۹۲/۱٪ می‌باشد. دقت محصول هشت روزه پوشش برف در منطقه مورد مطالعه نیز ۸۴/۲٪ برآورد گردید. در نهایت نتایج تحقیق نشان‌دهنده کاهش حجم رواناب سالانه در زیرحوضه، کاهش شدید رواناب تولید شده در فصول بهار و تابستان و افزایش رواناب در فصول زمستان و پاییز می‌باشد. Almodarresi et al. (2016) در پژوهش خود با استفاده از دوازده تصویر راداری سنجنده TerraSAR-X و روش راداری تداخل‌سنجی نقشه عمق و حجم برف مهرماه 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 ۲/۷۸ بود. Tasdigian and Rahimzadegan (2017) با بهره‌گیری از تصحیح توپوگرافی و آستانه‌گذاری دمای سطحی به ارتقاء دقت الگوریتم شناسایی سطوح برف از تصاویر MODIS پرداخته‌اند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که الگوریتم اول با روش محصول برف MODIS به متوسط قدر مطلق خطاهای نسبی ۳/۴۴ درصد رسید. در الگوریتم دوم تصحیح توپوگرافی موجب بهبود این مقدار به ۲/۲۵ درصد گردید. الگوریتم سوم مؤید تأثیر اعمال حد آستانه دمای سطح زمین بود که با برگزیدن آستانه ۲۷۸ کلون، متوسط قدر مطلق خطاهای نسبی ۲/۵۸ درصد به دست آمد. بنابراین نتایج نشان‌دهنده کارایی الگوریتم‌های ارائه شده در این تحقیق نسبت به روش استاندارد در مناطق مورد مطالعه بود.

با توجه به مطالب بیان شده و کاربرد تصاویر راداری در زمینه مطالعه برف، در این پژوهش نیز سعی بر این است که با استفاده از سنجش‌از دور از جمله تصاویر نوری و راداری سطح پوشش و عمق برف حوضه آبریز یامچی، یکی از زیر حوضه آن (کوهستان سیلان) مورد بررسی قرار گرفته و آب حاصل از ذوب برف برای سال ۱۳۹۴ مدل‌سازی شود. نوآوری پژوهش حاضر، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel 1A برای برآورد آب معادل برف می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز یامچی به عنوان منطقه مورد مطالعه این پژوهش با وسعتی حدود ۶۸۸ کیلومترمربع، بین طول‌های جغرافیایی ۴۷ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۶ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۷ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۴ دقیقه شمالی یکی از زیرحوضه‌های کوهستان سیلان در شمال غرب ایران و در شمال غربی شهرستان نیر از توابع استان اردبیل واقع شده است (شکل ۱). حداقل و حداکثر ارتفاع این

۲-۳-۳- داده‌های زمینی برف‌سنجی

داده‌های برف‌سنجی موردنیاز در این پژوهش شامل سطح برف، عمق برف و آب معادل برف برای دوره یک‌ساله (۱۳۹۴) می‌باشد. اطلاعات از ایستگاه‌های برف‌سنجی منطقه سبلان جمع‌آوری شد. این ایستگاه‌ها شامل ایستگاه‌های خانقاه سادات، آریاچای، هواشانق، آلوارس، عباس‌آباد، سردابه، سنین، صائین، کوه‌سنگر، شاییل و وله‌زیر می‌باشد. به دلیل این که فقط ایستگاه صائین داخل محدوده مورد مطالعه بود، عمل پردازش در محدوده بزرگتر از حوضه آبریز یامچی انجام گرفت تا ارزیابی هر کدام از نقشه‌های خروجی‌ها (سطح و عمق برف) با داده‌های بیشتری انجام گیرد.

۲-۳-۲- روش‌شناسی

در این پژوهش به‌منظور پایش مداوم خصوصیات فیزیکی برف از قبیل سطح پوشش برف و عمق برف در هر نوع شرایط آب و هوایی و با

محدوده به ترتیب ۱۵۲۴ و ۴۳۱۸ متر از سطح دریا بوده و خروجی این حوضه آبریز نهایتاً به سد یامچی منتهی می‌شود.

۲-۲-۲- داده مورد استفاده

۲-۲-۱- داده‌های ماهواره Sentinel 1A

در تحقیق حاضر برای دستیابی به عمق برف و آب قابل استحصال از آن از تصاویر SAR ماهواره Sentinel 1A استفاده شده است که مشخصات نوع تصویر تهیه شده در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲-۲- داده ماهواره Landsat 8

برای استخراج سطح پوشش برف منطقه مورد مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده OLI با گذر و ردیف ۱۶۷-۳۴ استفاده شد که مشخصات نوع تصویر تهیه شده در جدول ۲ نشان داده شده است.

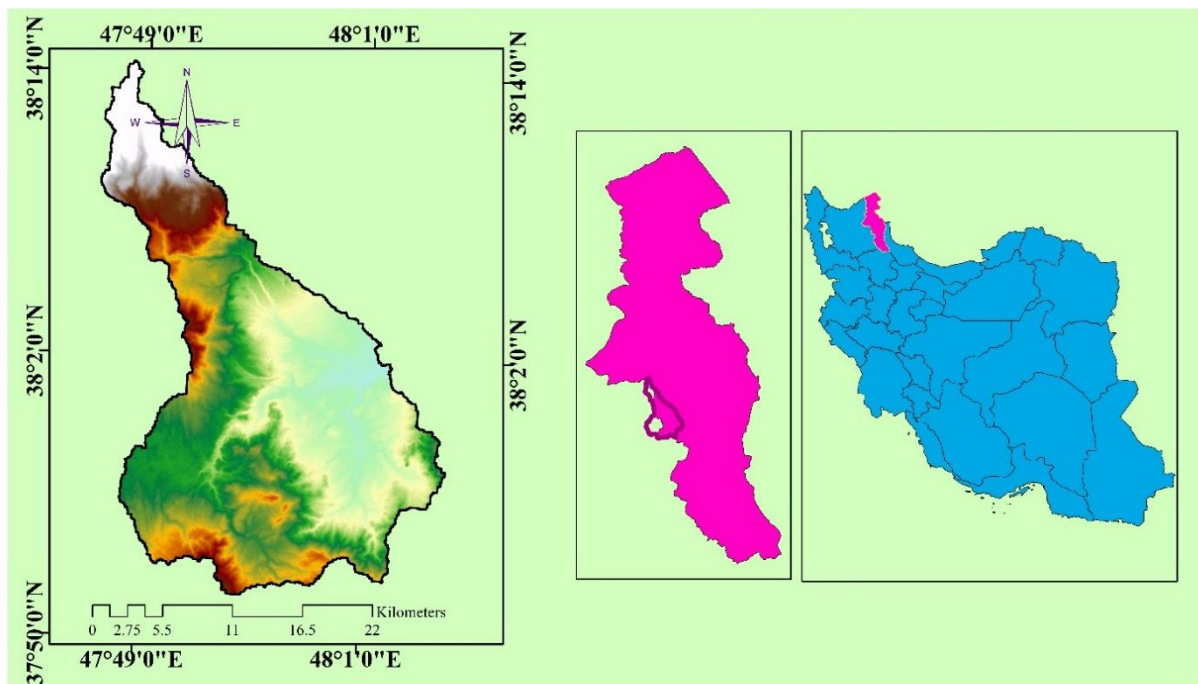


Fig. 1- Location of the Yamchi basin

شکل ۱- نقشه موقعیت حوضه آبریز یامچی

Table 1- The type of images used by Sentinel 1A satellite radar

جدول ۱- نوع تصویر استفاده شده راداری ماهواره Sentinel 1A

Shooting history	Orbit	Track	format	Spatial resolution	Imaging band
2015/09/13	101	7	IW (Interferometric Wide swath)	5 m x 20 m	C-SAR
2015/12/16	101	7	IW (Interferometric Wide swath)	5 m x 20 m	C-SAR
2016/01/17	101	7	IW (Interferometric Wide swath)	5 m x 20 m	C-SAR
2016/02/18	101	7	IW (Interferometric Wide swath)	5 m x 20 m	C-SAR
2016/03/05	101	7	IW (Interferometric Wide swath)	5 m x 20 m	C-SAR

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	Row	Pass	Date	Cloud Cover(Percent)	Basis	Correction level
Landsat 8	OLI	34	167	2015/12/16	0	WGS84	LIT
Landsat 8	OLI	34	167	2016/01/17	0	WGS84	LIT
Landsat 8	OLI	34	167	2016/02/18	0	WGS84	LIT
Landsat 8	OLI	34	167	2016/03/05	7	WGS84	LIT

شبهات (نظیر ارزش عددی و بافت) مهم‌ترین معیار مشترک آن‌هاست (Feizizadeh et al., 2016). در فرآیند قطعه‌بندی مفسر می‌تواند با در نظر گرفتن پارامترهای مقیاس، وزن داده شده به باندها، شکل، بافت، ضریب فشردگی^{۱۸} و معیار نرمی شکل^{۱۹}، فرآیند قطعه‌بندی تصویر را انجام داده و بر اساس نسبت اهمیت هر یک از این عوامل در خصوصیات کلاس‌های موردنظر برای استخراج از تصاویر ماهواره‌ای، نسبت اهمیت آن‌ها را در فرآیند سگمت‌سازی اعمال نماید (Feizizadeh and Helali, 2009).

در تحقیق حاضر جهت قطعه‌بندی از روش قطعه‌بندی چندتفکیکه^{۲۰} استفاده شده است. برای این منظور با تجزیه و تحلیل نتایج قطعه‌بندی تصویر با مقیاس متفاوت، پارامتر مقیاس ۳۰ برای قطعه‌بندی انتخاب شد. به دلیل اهمیت باندهای ۲-۴-۵-۶ وزن‌های نمایش داده شده در جدول ۳ جهت قطعه‌بندی اعمال گردید. همچنین معیار نرمی شکل ۰/۴ و فشردگی ۰/۶ در نظر گرفته شد.

NDSI به‌عنوان یک الگوریتم استخراج اتوماتیک برف به‌همراه مجموعه‌ای از آستانه‌ها به‌کار می‌رود. این شاخص بر مبنای این حقیقت که برف دارای بازتابندگی بالا در ناحیه مرئی و بازتابندگی پایین در مادون قرمز میانی است (Nolin and Liang, 2000) جهت تشخیص برف از ابر و مناطق فاقد برف استفاده می‌شود. NDSI شاخصی به‌همراه OLI) و مادون قرمز میانی (b6 سنجنده OLI) تقسیم‌بر مجموع بازتابندگی در این دو باند به‌دست می‌آید (رابطه ۱):

$$NDSI = \frac{b6 - b2}{b6 + b2} \quad (1)$$

لذا در تحقیق حاضر از طریق رابطه ۱ و بر مبنای طبقه‌بندی شیء‌گرا در محیط نرم‌افزار eCognition سطوح برف برای ماه‌های موردنظر، مربوط به منطقه مورد مطالعه استخراج شد.

۲-۳-۲- استخراج عمق برف

در این پژوهش برای سنجش تغییرات عمق برف از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری استفاده شده است.

دقت مکانی بالا سعی شده تا از مزایای تصاویر ماهواره‌ای اپتیکال و ماکروویو به‌صورت هم‌زمان استفاده گردد. برای استخراج سطح برف از داده‌های سنجنده OLI، ماهواره 8 Landsat استفاده شده است. داده‌های ماهواره‌ای به فرمت Geo TIFF از سایت USGS^{۱۵} تهیه شدند. با استفاده از تصاویر سنجنده OLI و شاخص NDSI^{۱۶} سطح پوشش برف برای چهار ماه آذر، دی، بهمن و اسفند ۱۳۹۴ استخراج شد. بعد از آن بر طبق تاریخ‌های تصاویر Landsat 8 تصاویر راداری Sentinel 1A اخذ شد. سپس از طریق سطح برف استخراج شده توسط تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 به بررسی عمق برف در ماه‌های موردنظر پرداخته شد. به این نحو که برای تخمین عمق برف و آب قابل استحصال از آن از تصاویر راداری Sentinel 1A استفاده شده و در نهایت خصوصیات برف از جمله عمق، حجم و آب معادل برف به‌دست آمد. در مرحله آخر نتایج حاصل شده از طریق تصاویر راداری، با داده‌های ثبت‌شده آماری ایستگاه‌های برف‌سنجی منطقه مورد مطالعه مقایسه شد. روند کلی تحقیق در شکل ۲ نمایش داده شده است.

۲-۳-۱- استخراج سطح برف

۲-۳-۱-۱- آماده‌سازی تصاویر

پس از دانلود تصاویر مربوط به منطقه مورد مطالعه و اطمینان از عدم وجود خطاهای رایج، جهت تعیین طول موج، نوع سنجنده و موزاییک تصویرهای مورد نیاز از نرم‌افزار Envi 5.3 استفاده گردید. پس از این مرحله، تصاویر موزاییک‌شده در محیط نرم‌افزار ArcMap 10.4.1 براساس محدوده مورد مطالعه برش داده شد و در مرحله آخر در فرمت IMAGE Image ذخیره گردید، تا برای ورود به نرم‌افزار eCognition جهت طبقه‌بندی و استخراج سطح پوشش برف آماده گردد.

در تحقیق حاضر بنا به دقت بالای طبقه‌بندی شیء‌گرا، برای استخراج سطح پوشش برفی از روش‌های شیء‌گرا استفاده شده است. در روش شیء‌گرا قطعه‌بندی^{۱۷} یکی از اصلی‌ترین مراحل می‌باشد. قطعه به معنی گروهی از پیکسل‌های همسایه در داخل یک ناحیه است که

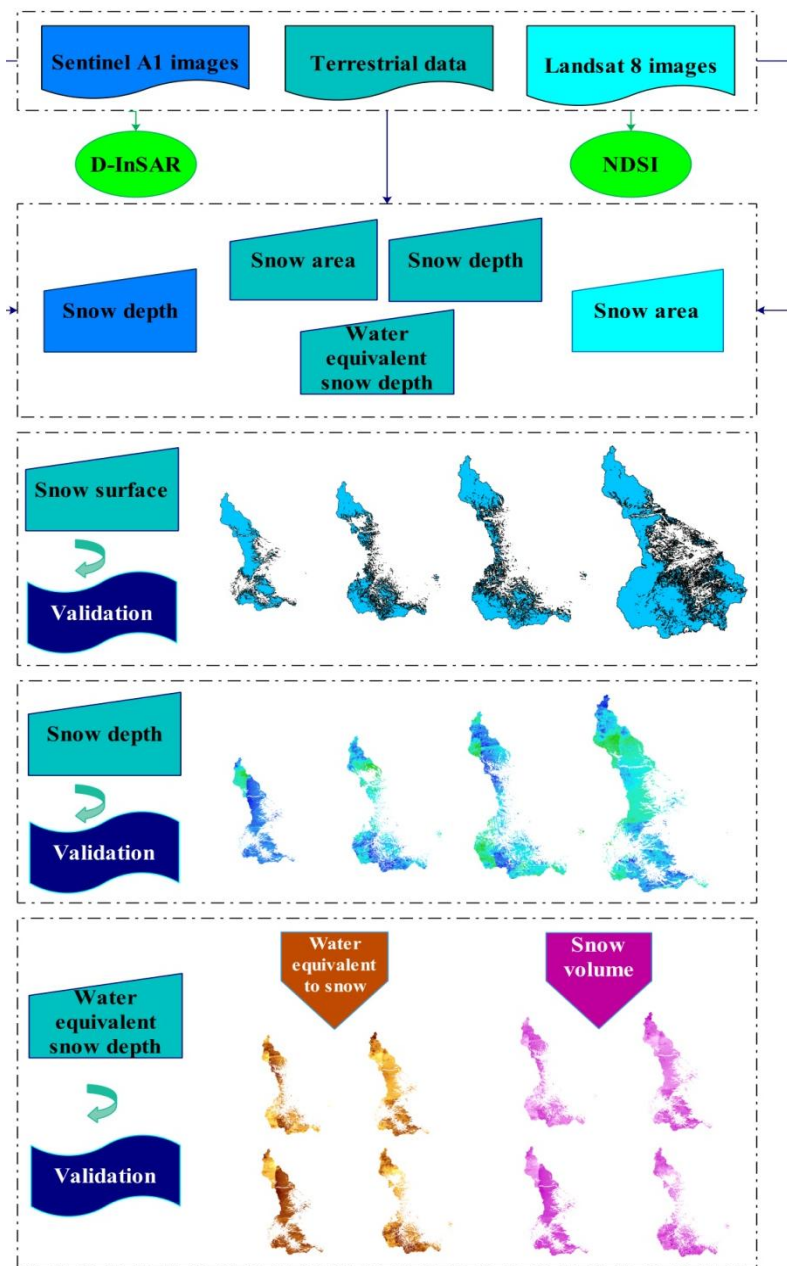


Fig. 2- The overall trend of the research

شکل ۲- روند کلی تحقیق

روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (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 روزنه 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 تغییرات سطحی رخ داده در زمین را در بازه‌های متفاوت با دقت‌های میلیمتری آشکارسازی کند (Shi and Dozier, 2000). مراحل اصلی پردازش داده‌های به دست

Table 3- Selected weights for selective band combinations in image segmentation process
جدول ۳- وزن‌های انتخابی برای ترکیب باندهای منتخب در فرایند قطعه‌بندی تصویر

Band combination	Applied weight
Band 2	30
Band 4	20
Band 5	20
Band 6	30
Total	100

که در آن M: تصویر مختلط اصلی (master)، S: تصویر مختلط دوم (slave)، I: تداخل سنجی (Interferogram)، *: مزدوج مختلط، Φ_M : فاز تصویر (master)، Φ_S : فاز تصویر (Slave) و Φ_I : فاز تداخل سنجی می‌باشند.

یک تداخل سنجی از سیکل‌های رنگی تشکیل شده است (شکل ۴). دو نقطه‌ای که در یک نوار رنگی قرار دارند (با این شرط که مسیر بین دو نقطه از هیچ رنگ دیگری عبور نکند) به یک اندازه جابه‌جا شده‌اند. هر سیکل ۳۶۰ درجه، معادل نصف طول موج است و برای مثال اگر از تصاویر حاصل از باند x (طول موج ۵/۶ سانتی‌متر) به سمت رادار یا در خلاف جهت آن دارد، که سیکل زرد-آبی-قرمز معادل جابه‌جایی دور از رادار و سیکل رنگی زرد-قرمز-آبی معادل جابه‌جایی به سمت راداری است (Rahnounfar et al., 2005).

اگر منطقه‌ی مورد مطالعه دارای تغییرات ارتفاعی صفر باشد. اختلاف فاز در جهت موازی با حرکت سنجنده رادار^{۲۵} ثابت است و در جهت ارسال سیگنال راداری به سمت زمین^{۲۶} به طور خطی افزایش می‌یابد و هنگامی که این اختلاف به مقدار 2π رسید دوباره به صفر برمی‌گردد و این روند تکرار می‌شود بنابراین الگوی تداخلی چنین منطقه‌ای شامل سیکل‌های افقی در جهت آزیموت است.

آمده از سنجنده Sentinel 1A با هدف دستیابی به عمق برف در شکل ۳ آورده شده است.

فرایند یکی کردن سیستم مختصات دو تصویر SLC، ثبت کردن^{۲۱} تصویر نامیده می‌شود. مختصات مداری سکو یا سکوها باید به طور دقیقی معلوم باشد تا برای رجیستر کردن تصویر ۱ و تصویر ۲ استفاده شوند. هم خط کردن غیردقیق در تصویر SAR باعث کاهش همبستگی بین دو سیگنال تداخل سنجی می‌شود، زیرا عملکرد همبستگی بر روی پیکسل متناظر در تصویر انجام نمی‌گیرد بنابراین برای به دست آوردن سیکل‌های رنگی^{۲۲} با کیفیت بالا باید دو تصویر با دقت زیر پیکسل به یکدیگر ثبت شوند. یکبار که دو تصویر SLC، نسبت به هم رجیستر می‌شوند، پروسه‌ی ضرب مختلط بر سر تولید تداخل سنجی و تصویر همدوسی انجام می‌شود.

تداخل نگار دربرگیرنده میزان اختلاف فاز بین دو تصویر است. میزان ارتفاع در هر نقطه از منطقه در فاصله زمانی تهیه دو تصویر به وسیله بررسی میزان اختلاف فاز تعیین می‌شود. تداخل نگار در اثر ضرب مختلط تصویر اصلی^{۲۳} (تصویر اول) در مزدوج تصویر وابسته^{۲۴} (تصویر دوم) ساخته می‌شود (رابطه ۲).

$$I = MS^* \quad (2)$$

$$\Phi_I = \Phi_M - \Phi_S$$

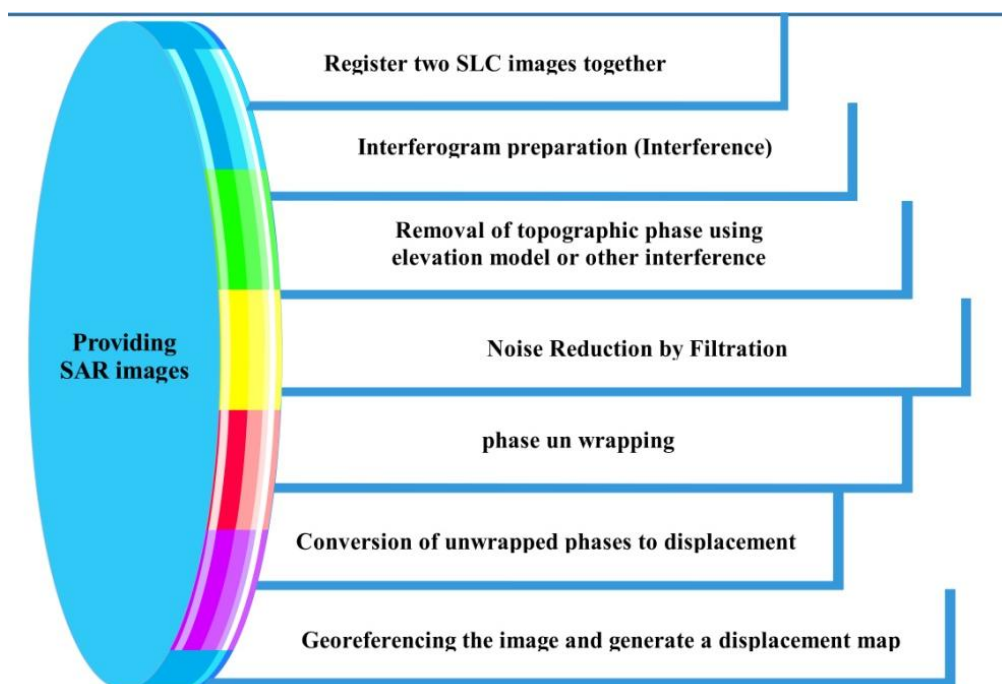


Fig. 3- The processing levels for Sentinel A1 images to achieve snow depth
شکل ۳- مراحل پردازش تصاویر Sentinel A1 جهت دستیابی به عمق برف

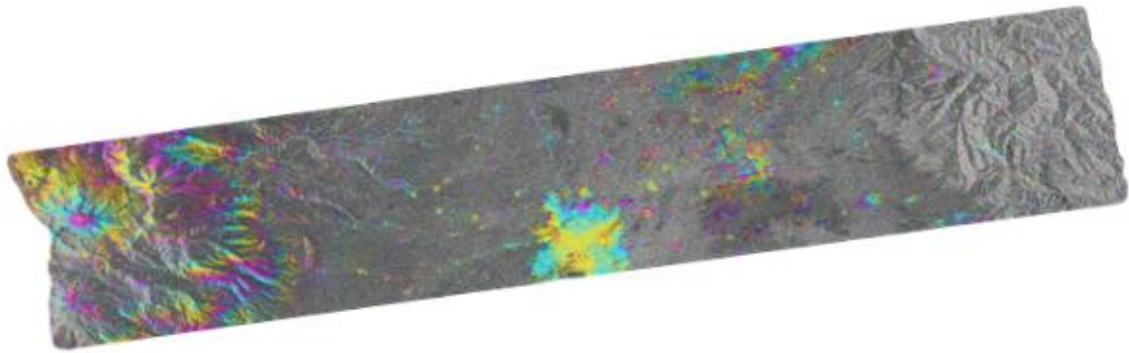


Fig. 4- Fringe composed by displacement occurring in the case study area
 شکل ۴- سیکل‌های رنگی تشکیل شده بر اثر جابجایی اتفاق افتاده در منطقه مورد مطالعه

برآورده شود. تصویر فاز رفع ابهام شده ممکن است شامل حفره‌ها یا سوراخ‌هایی باشد که آن‌ها نمایانگر پیکسل‌هایی هستند که آن جاها همدوسی فاز کمتر از آن است که اختلاف فاز بتواند محاسبه شود یا ممکن است نشان‌دهنده‌ی نواحی سایه رادار باشد. تصویر فاز wrap شده ممکن است نسبتاً نویزی باشد بنابراین نرم کردن یا حذف نویز می‌تواند با استفاده از فیلتر میان‌ه تطبیقی (Premelatha, 2001) یا با استفاده از تبدیل ویولت (Braunich et al., 2000) قبل از عمل phase unwrapping اجرا شود. قبل از انجام مرحله نهایی که تبدیل مقادیر فاز به ارتفاع است برای بهبود نتایج پردازش مرحله refinemend and refatennen را انجام می‌دهیم. در این مرحله، تمام کارهای انجام شده دوباره مرور و بررسی می‌شود تا بتوان تصویری ایده‌آل با کمترین اثر توپوگرافی و فازها و مدارات ماهواره‌ای اصلاح شده را به دست آورد. مرحله نهایی که تبدیل فاز مطلق به جابجایی است در واقع مهم‌ترین بخش نامیده می‌شود؛ زیرا خروجی این مرحله میزان جابه‌جایی زمین را نشان می‌دهد، لذا بیشینه‌ی دقت به کار گرفته می‌شود. مقادیر تغییرات فاز بیان کننده، تغییرات ارتفاعی به اندازه نصف طول موج است، با توجه به اینکه طول موج تصویربرداری سنجنده ASAR، ۵/۶ سانتی‌متر است. در انجام تبدیل فاز به ارتفاع برای هر پیکسل مقداری برابر با میزان تغییر ارتفاعی آن نقطه برحسب متریک محاسبه می‌شود. با توجه به مطالب ذکر شده در مورد مراحل تداخل‌سنجی تفاضلی راداری و روابط بحث شده نقشه جابه‌جایی با استفاده از تصاویر سنجنده Sentinel 1A و از طریق نرم‌افزار SARSCAPE در محیط Envi 5.3 تولید گردید.

۳- ارزیابی نتایج

ابتدا با استفاده از الگوریتم NDSI و بر مبنای طبقه‌بندی شیء‌گرا، نقشه‌های سطح برف برای ماه‌های برفی (آذر، دی، بهمن و اسفند) استخراج شد. سپس در مناطقی که از برف پوشیده شده‌اند، با استفاده

این پدیده به علت وجود خط مبنا در جهت برد، به وجود آمده است و باید اثر آن حذف شود که به تصحیح زمین مسطح^{۳۷} معروف است. (برای حذف اثر توپوگرافی از DEM SRTM با دقت ۳۰ متر استفاده شده است). تداخل نگار تفاضلی حاصل در برگیرنده مقداری نویز است. عامل به وجود آورنده این نویزها می‌تواند مختلف باشد؛ دو عامل اصلی در به وجود آمدن آن‌ها تأثیرگذار است. عامل اول مربوط به تفاوت زمانی بین دو تصویر اصلی و وابسته است. گاهی اوقات برخی از تغییرات در منطقه که در بین فاصله زمانی دو تصویر اتفاق می‌افتد جزو عوامل به وجود آورنده نویز می‌باشند و عامل دوم خط مبنای مکانی می‌باشد که میزان نویزها در تصاویر ارتباط مستقیمی با خط مبنای مکانی دارد؛ هرچه این میزان بیشتر باشد، شاهد وجود نویزهای بیشتری در تداخل نگار هستیم. برای حذف این نویزها از فیلتر استفاده می‌شود. اگر پنجره‌ی فیلتر، خیلی کوچک باشد مقدار همبستگی از پیکسلی به پیکسل دیگر به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر خواهد کرد، حال اگر پنجره خیلی بزرگ‌تر باشد نتیجه‌ی کلی‌تری تولید خواهد کرد. تصویر همدوسی دلالت بر درجه‌ی تطابق بین سیگنال‌های برگشتی از پیکسل‌های معادل در تصویر SLC دارد، و از مقادیر بین صفر و یک تشکیل شده است که مقادیر بزرگ‌تر (نزدیک به ۱) دلالت بر تطابق نزدیک و نیز قابلیت اطمینان بیشتر است. پیچیدگی ایجاد شده در تداخل‌سنجی خام به خاطر این است که اختلاف فازهای نشان داده شده برحسب تعداد کل سیکل‌های طول موج کامل نیستند بلکه فقط برحسب محدوده‌ای از رنج ۰-۳۶۰ درجه هستند که اندازه‌گیری می‌شوند. هر سیکل کامل از ۰-۳۶۰ درجه یا 2π رادیان یک سیکل اینترفرومتری را نشان می‌دهد. اختلاف فازهای مطلق باید با افزودن مضارب مناسبی از 2π قبل از این که ارتفاع استخراج شود رفع ابهام^{۳۸} می‌شود این مرحله phase unwrapping نامیده می‌شود. مسئله اینجاست که اختلاف کار بین سیگنال‌های دریافتی توسط دو آنتن در رنج 2π رادیان اندازه‌گیری می‌شود. مضرب صحیح مناسبی از 2π باید به اختلاف فاز محاسبه شده اضافه شود تا اختلاف فاز واقعی

مشاهدات حاکی از آن است که در ارتفاعات کوهستانی سبلان، بیشترین بارش در ماههای سرد سال از نوع برف بوده و بخش زیادی از منطقه دارای ارتفاعات ۲۰۰۰ تا ۴۸۰۰ متر را تحت پوشش خود قرار می‌دهد. با توجه به سطح برف به دست آمده از طریق تصاویر ماهواره Landsat 8 در حوضه آبریز یامچی، خروجی هر چهار ماه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این برآورد نشان داد که بیشترین مقدار پوشش برف برای سال ۱۳۹۴ مربوط به ماه آذر و کمترین مقدار پوشش برف مربوط به ماه بهمن است. جدول ۴ میزان سطح پوشش برف برای چهار ماه مورد مطالعه آورده شده است.

نهایتاً هر یک از خروجی‌ها با داده‌های زمینی سطح برف صحت‌سنجی شدند که نتایج ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که طبقه‌بندی با دقت زیادی انجام گرفته است (جدول ۵).

۳-۲- عمق برف

ابتدا برای این که اثبات شود جابه‌جایی وجود داشته است، از روش تداخل‌سنجی راداری برای برآورد عمق برف استفاده شد. با بررسی تصاویر Landsat 8 که برای استخراج پوشش برف از تصاویر این ماهواره استفاده شده است، مشخص گردید که تصویر شهرپور

از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری عمق برف بدست آمد. در ادامه با استفاده از نقشه سطح و عمق برف، حجم برف موجود بر روی ارتفاعات منطقه مورد مطالعه محاسبه شده و نقشه‌های آن تهیه شد. در مرحله آخر با استفاده از همبستگی بین عمق برف تولیدی و آب معادل برف داده‌های زمینی، معادله خطی بدست آورده و نقشه عمق آب تولیدی از برف استخراج گردید.

۳-۱- سطح برف

پس از دانلود تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 مربوط به منطقه مورد مطالعه و اطمینان از عدم وجود خطاهای رایج، جهت تعیین طول موج، نوع سنجنده و ادغام تصویرهای مورد نیاز از نرم‌افزار Envi 5.3 استفاده گردید. پس از این مرحله، تصویر ادغام شده در محیط نرم‌افزار ArcMap10.4.1 براساس محدوده مورد مطالعه برش داده شد و در مرحله آخر در فرمت IMAGE Image ذخیره گردید، تا برای ورود به نرم‌افزار eCognition جهت طبقه‌بندی و استخراج سطح پوشش برف آماده گردد. در نهایت از طریق الگوریتم NDSI نقشه سطح پوشش برف برای ماه‌های آذر، دی، بهمن و اسفند استخراج شد (شکل ۵).

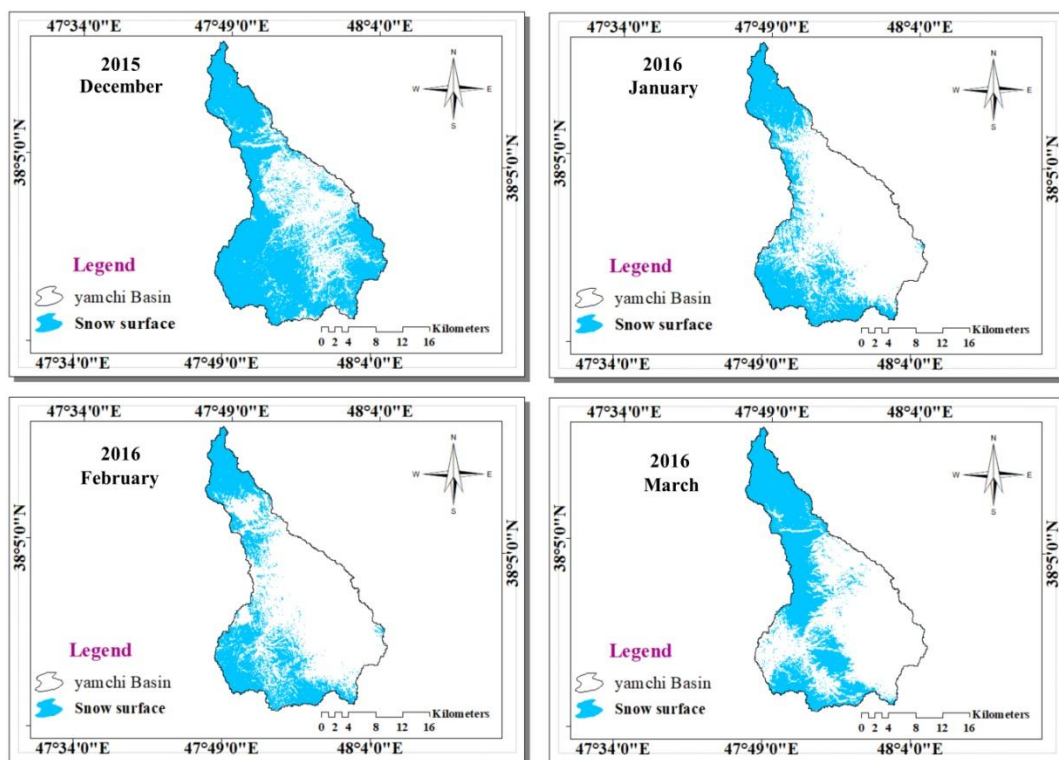


Fig. 5- Snow surface area extracted for snowy months in the study area

شکل ۵- سطح برف استخراج شده برای ماه‌های برفی منطقه مورد مطالعه

پس از تولید تداخل نگاره‌های موردنظر برای هر یک از ماه‌های مورد مطالعه و کلاس‌بندی آن‌ها، به دلیل این‌که تصاویر در نرم‌افزار Sarscape به صورت یک تصویر کامل پردازش می‌شوند و قابلیت برش را ندارند، بعد از پردازش تصاویر به روش D-InSAR منطقه مورد مطالعه برش داده شد که در شکل ۶ نقشه‌های عمق برف نمایش داده شده است.

بررسی نقشه‌های عمق برف نشان می‌دهند که بیشترین مقدار عمق برف مربوط به بهمن ماه با $32/92$ سانتی‌متر و کمترین مقدار عمق برف مربوط به آذر ماه با $13/31$ سانتی‌متر می‌باشد. به منظور بررسی و ارزیابی نتایج عمق برف حاصل شده از تصاویر Sentinel 1 A1، از داده‌های ایستگاه‌های برف‌سنجی استفاده گردید. با توجه به زمان داده‌های اندازه‌گیری شده در سطح زمین، نتایج بدست آمده از چهار ماه برفی سال ۱۳۹۴ با داده‌های زمینی مقایسه شدند. برای انجام ارزیابی از معادله خط درجه اول و رگرسیون خطی استفاده شد. در معادله خط $y=a+bx$ ، بهترین خط برازنده ممکن، برای نمودار پراکنش نمونه‌های مشاهداتی و نمونه‌های برآوردی، برازش شدند. در واقع ضرایب a و b طوری تعیین شدند که مجموع توان دوم خطاها کمینه شده و بهترین خط برازش شود. ضریب همبستگی نیز برای بیان شدت رابطه (از لحاظ کامل، ناقص یا عدم وجود رابطه) و نیز رابطه مستقیم یا معکوس محاسبه گردید (شکل ۷). این نمودار پراکنش نقاط مشاهداتی، خط رگرسیون و ضرایب همبستگی را در نقاط موجود در سطح منطقه نشان می‌دهد. همچنین آب معادل برف برآورد شده و با داده‌های زمینی مقایسه شد.

Table 4- Area of snow area boundaries in Yamchi watershed for 1394

جدول ۴- مساحت سطوح برف‌گیر در حوضه آبریز یامچی برای سال ۱۳۹۴

Row	Picture date	Area (Km2)
1	2015/12/18	358.65
2	2016/01/11	186.69
3	2016/02/04	182.21
4	2016/02/28	224.54

Table 5- Total error rate of classification

جدول ۵- ضریب خطای کلی طبقه‌بندی

Month	November	December	January	February
Overall accuracy	93.2	93	95.65	94.9

(۱۳۹۴/۰۶/۲۲) فاقد برف بوده و هیچ‌گونه پوشش برفی در این تاریخ وجود ندارد به همین دلیل این تصویر به عنوان تصویر پایه برای تداخل‌سنجی انتخاب گردید و تمام تصاویر نسبت به این تصویر تداخل‌سنجی شد. بدین ترتیب چهار تداخل نگار ایجاد شد که عدد درجات خاکستری هر پیکسل نشان‌دهنده عمق برف موجود در آن پیکسل است. جدول ۶ جزئیات تداخل‌سنجی برای هر زوج تداخل نگار را نشان می‌دهد که در آن فاصله مکانی^{۲۹} و فاصله زمانی^{۳۰} مناسب می‌باشد. هر چه فاصله مکانی کمتر باشد دقت خروجی تداخل‌سنجی بالاتر است.

Table 6- Details of produced interference

جدول ۶- جزئیات تداخل نگاره‌های تولید شده

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
SLC 2015/12/18	486.48	0.04	-3.662	424.778	27.726	5407.660	96	36.074
SLC 2016/01/11	486.48	1.108	12.447	556.348	0.245	5407.660	120	27.057
SLC 2016/02/04	486.48	-6.98	15.441	355.418	1.845	5407.660	144	11.306
SLC 2016/02/28	486.48	-1.89	35.727	160.537	4.963	5407.660	168	95.454

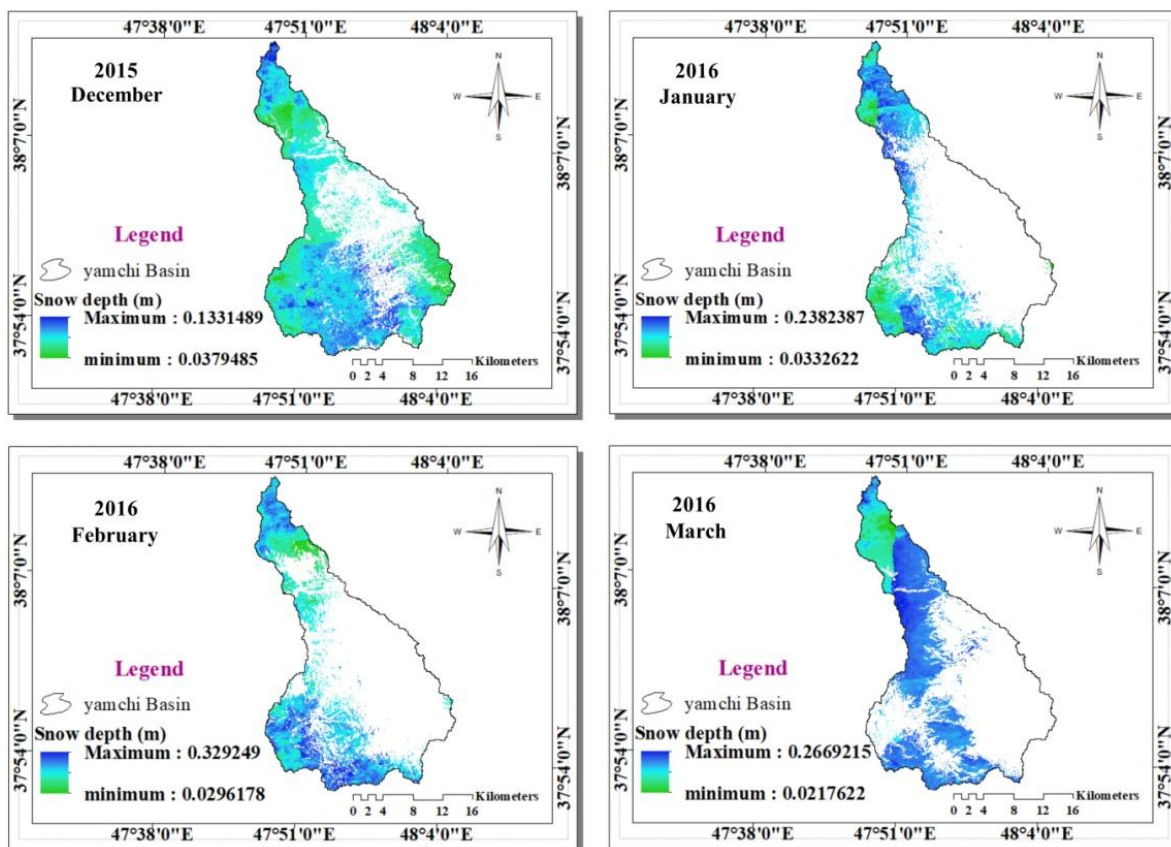


Fig. 6- Depth of snow extracted for the snowy months in the study area

شکل ۶- عمق برف استخراج شده برای ماه‌های برفی منطقه مورد مطالعه

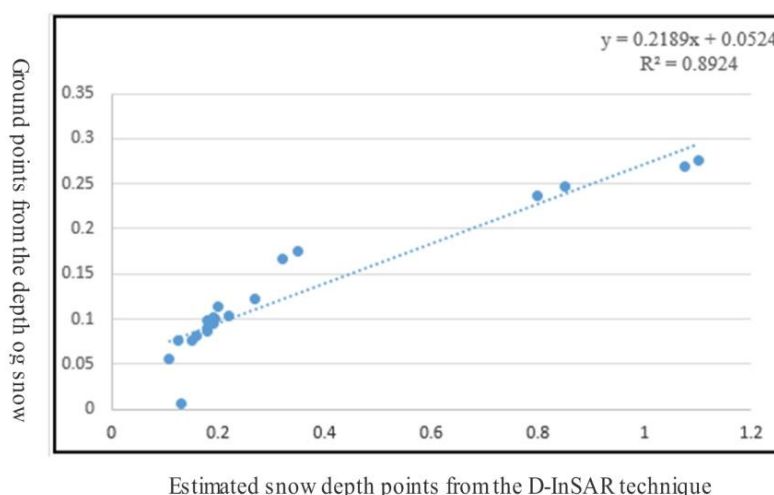


Fig. 7- Distribution of observation points and estimation of snow depth and correlation coefficient in the study area

شکل ۷- پراکنش نقاط مشاهداتی و برآوردی عمق برف و ضریب همبستگی در منطقه مورد مطالعه

توجه به داده‌های کم و صعب‌العبور بودن منطقه می‌تواند راه گشای مطالعات برف برای کارشناسان در منطقه باشد. البته این امر جای بحث و بررسی بیشتر و گسترده‌تری را دارد. ارائه یک دستورالعمل جامع و

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، با اطمینان می‌توان گفت که تغییرات عمق برف استخراج‌شده از تصاویر راداری ۸۵ درصد با تغییرات عمق برف اندازه‌گیری شده در ایستگاه برف‌سنجی منطبق است که این نتیجه با

ارتفاعات مختلف محاسبه شد. شکل ۸ نقشه‌های حجم برف برای چهار ما آذر، دی، بهمن و اسفند را نمایش می‌دهد.

۳-۴- عمق آب معادل برف

مدل‌های مختلف رگرسیون خطی که از ترکیب‌های متفاوت عوامل ورودی حاصل شده‌اند، در رابطه ۵ ارائه شده است. با بررسی میزان همبستگی مدل‌های رگرسیون، ضریب همبستگی ۸۸ درصد می‌باشد که قابل قبول است. در این رگرسیون یک معادله خطی درجه شش، بهترین معادله برای مدل کردن عمق آب معادل برف با استفاده از عمق برف است که با بررسی همبستگی بین عمق برف به دست آمده از تصاویر Sentinel A1 و آب معادل برف اندازه‌گیری شده زمینی بهترین معادله مدل شد (رابطه ۳).

در رابطه ذیل، X نشان‌دهنده عمق برف و Y نشان‌دهنده آب معادل برف است. پس از اجرای رابطه ۳ با استفاده از نقشه‌های عمق برف، نقشه‌های عمق آب معادل برف نیز برای منطقه مورد مطالعه تهیه شد که در شکل ۹ آمده است.

$$y = (6E-08x^6) - (1E-05x^5) + (0.0001x^4 - 0.0385x^3) + (0.3793x^2) - (8.689x) + 37.831 \quad (3)$$

استاندارد برای برداشت داده‌های زمینی در سراسر کشور و نظارت دقیق بر نحوه برداشت ضروری به نظر می‌رسد. عوامل دیگری که می‌توان از آن‌ها به عنوان عوامل تأثیرگذار نام برد، نوع پوشش و توپوگرافی زمین، آب موجود در برف و اندازه‌ی دانه‌های برف می‌باشد که می‌تواند بر روی پالس برگشتی تأثیرگذار بوده و نتایج را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین نوع روش مورد استفاده نیز می‌تواند نتایج را تحت تأثیر قرار داده و ممکن است استفاده از روش‌های جدیدتر به نتایج بهتری منجر شود.

۳-۳- حجم برف

برای محاسبه حجم برف ابتدا پیکسل‌های به دست آمده از سطح برف با پیکسل‌هایی که از طریق عمق برف حاصل گردیدند، مقایسه شدند. سپس مساحت پیکسل‌های سطح پوشش برف حاصل از تصاویر Landsat 8، محاسبه شده و در عدد خاکستری آن پیکسل (پیکسل‌های حاصل از تصاویر Sentinel 1A) که نشان‌دهنده عمق برف است، عمل ضرب صورت گرفت و به این طریق حجم برف در

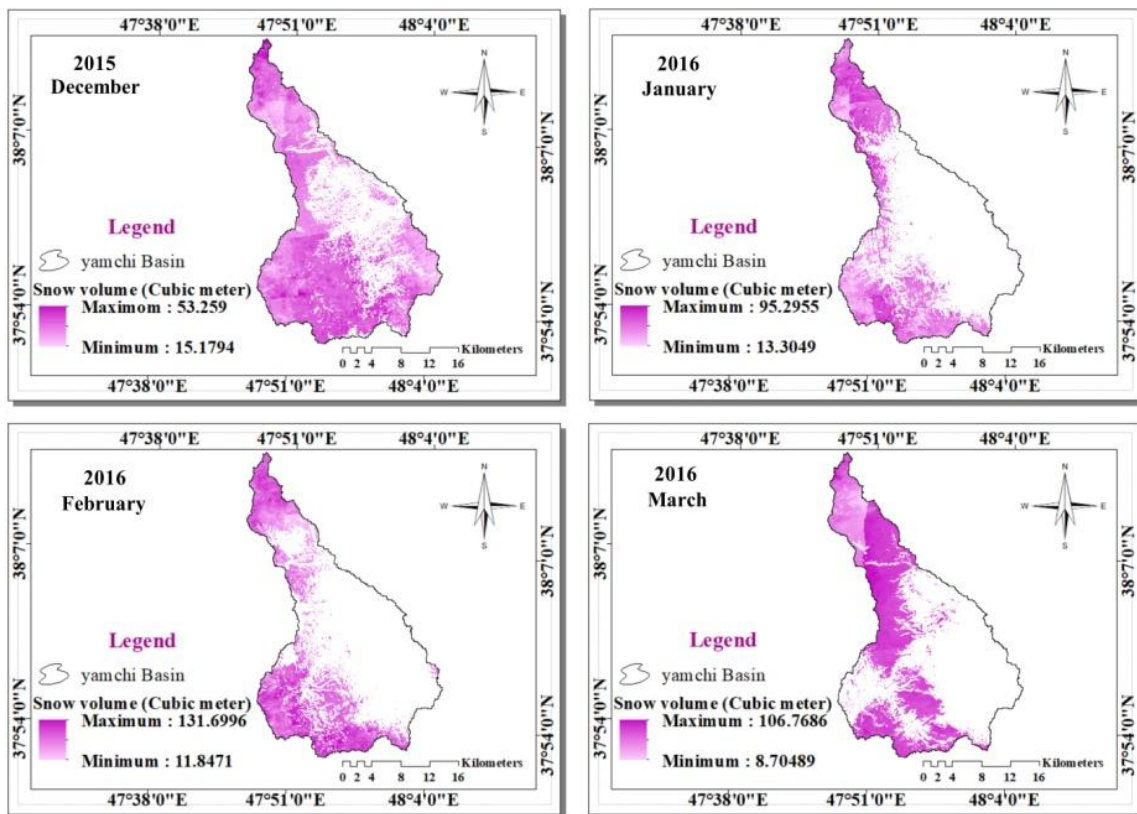


Fig. 8- Snow volume extracted for the snowy months in the study area
شکل ۸- حجم برف استخراج شده برای ماه‌های برفی منطقه مورد مطالعه

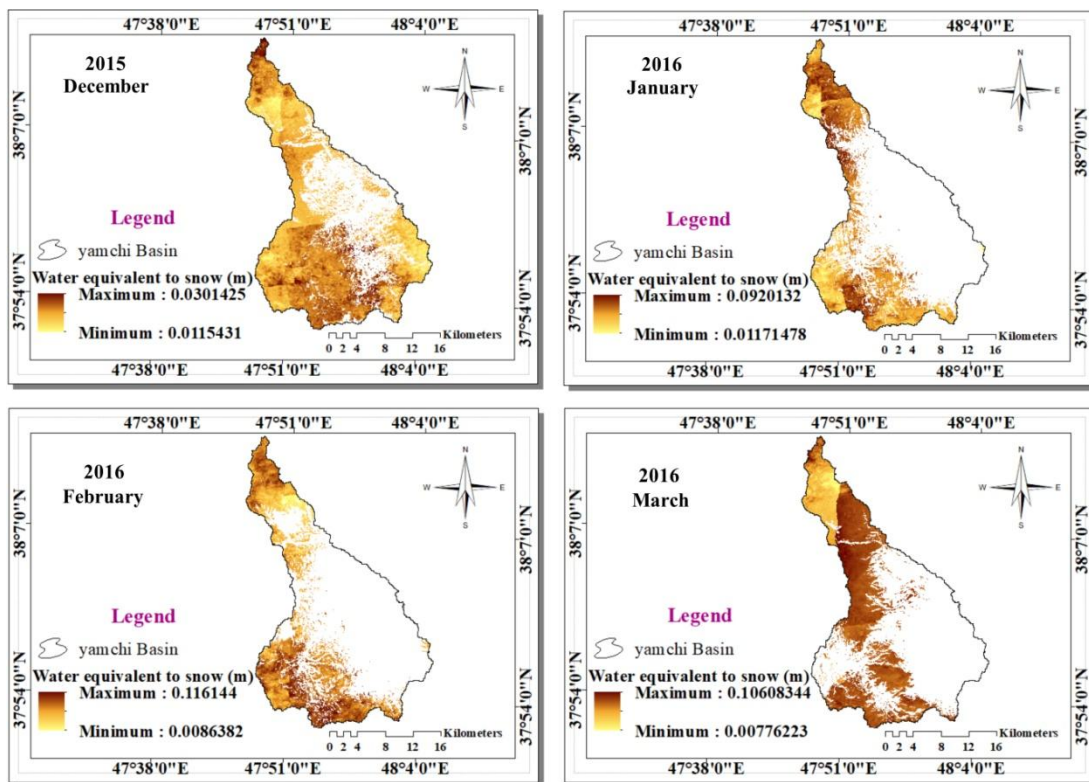


Fig. 9- Snow equivalent water extracted for the snowy months in the study area

شکل ۹- آب معادل برف استخراج شده برای ماه‌های برفی منطقه مورد مطالعه

۴- نتیجه گیری

تغییرات ارتفاعی برف مناسب است. به همین دلیل برای محاسبه عمق برف منطقه مورد مطالعه نیز از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel A1 و روش D-InSAR استفاده شد. بررسی نقشه‌های عمق برف نشان داد که بیشترین مقدار عمق برف مربوط به بهمن ماه با $32/92$ سانتی‌متر و کمترین مقدار عمق برف مربوط به آذر ماه با $13/31$ سانتی‌متر می‌باشد. نتایج حاصل با داده‌های زمینی صحت‌سنجی شده و ضرایب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و مقادیر برآورد شده عمق برف، ۸۵ درصد برآورد گردید.

در یک جمع‌بندی می‌توان به این نتیجه رسید که برای سنجش عمق برف مناسب‌ترین تصاویر، تصاویر رادار هستند که هرچه طول موج در محدوده مایکروویو کمتر باشد بهترین نتایج را از تغییرات ارتفاعی سطح برف دارد چراکه نفوذ کمتری داشته و بر اساس نتایج نقشه‌های تولیدی عمق برف از تصاویر ماکروویو با طول موج کم بهترین نظارت را بر تغییرات عمق منطقه دارند؛ چون روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری یکی از روش‌های پردازش راداری بوده و دارای دقت بالایی نصف طول موج داده‌ها مورد استفاده می‌باشد. با توجه به بحران‌های روزافزون آب در کشور و همچنین اهمیت داشتن حوضه آبریز یامچی برای شهرهای اردبیل، سرعین و نیر، یکی از مهم‌ترین پارامتر برای برنامه‌ریزی در امور آب، دانستن مقدار حجم برف با خطای پایین است

تعیین سطح پوشش و عمق برف در حوضه‌های آبریز مرتفع و برف‌گیر مهم‌ترین پارامترهای سنجش برف محسوب می‌شود. این دو عامل نقش مهمی در تحلیل و پیش‌بینی مراحل ذوب برف در مدل‌های هیدرولوژی و اقلیمی دارند. به دلیل گستردگی بالای پوشش برف و صعب‌العبور بودن مناطق کوهستانی، علاوه بر اینکه اندازه‌گیری این عوامل با روش‌های زمینی پرهزینه و در مناطق مرتفع ناممکن است، از قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالایی نیز برخوردار نیست. فن‌آوری سنجش‌ازدور امکان تهیه اطلاعات دقیقی از وسعت پوشش برف را دارد. انعکاس بالای برف در ناحیه‌ی مرئی و انعکاس پایین برف در مادون قرمز نزدیک، تفکیک برف از سایر پدیده‌ها را ممکن می‌سازد. در این تحقیق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 سطح پوشش برف برای حوضه آبریز یامچی با دقت بسیار بالایی از طریق الگوریتم NDSI و به‌وسیله پردازش شیء‌گرا بدست آمد. نتایج حاصل از پوشش برف نشان می‌دهد طی سال آبی ۱۳۹۴-۱۳۹۵ بیش‌ترین پوشش برف در ماه‌های آذر ($358/65$ کیلومتر مربع) و اسفند ($224/54$ کیلومتر مربع) به وقوع پیوسته است. 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

Braunich H, Wu B, Kong JA (2000) Phase unwrapping of SAR interferograms after wavelet denoising. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGRASS), Honolulu, Hawaii, New York: IEEE, pp 752-754

Dai K, Liu G, Li Z, Li T, Yu B, Wang X, Singleton A (2015) Extracting vertical displacement rates in shanghai (China) with multi-platform SAR images. Remote Sensing Journal 7(8):9542-9562

Engman E T, Gurney R J (1991) Remote sensing in hydrology. Chapman and Hall, pp 223

Evanse J, Kruse F (2013) Determination of snow depth retrieval using Ku-band interferometric synthetic aperture radar (insar). Remote Sensing 68(32):681-684

Feizizadeh B, Helali H (2009) Comparison of pixel-based, object-oriented and effective parameters in coverage / land use classification in west Azarbayejan province. Geographical Research 42(71):84-73 (In Persian)

Feizizadeh B, Shahabi H, Seifi H (2016) Identification of susceptible zones of Urmia lake saline storms using fuzzy-object satellite processing. Managing Environmental Hazards (Extreme Risk Knowledge) 3(3):269-284 (In Persian)

Fattahi E, Noohi K, Delavar M (2009) Investigation of snow cover surface of southwestern basins of Iran in relation to climate signals. Quarterly Journal of Geographic Research 24(95):109-130 (In Persian)

Fooladvand E, Miryagoubzadeh M H, Esmaeili A (2015) Simulation of snow melt runoff using the SRM hydrological model using MODIS satellite image. First International Conference on Geosciences, Shiraz, Kharazmi High School of Science and Technology (In Persian)

Hasanpour Darvishi H, Ebrahimi H (2014) Effect of snow effect on runoff simulation in catchment area (Case study: Neyshabour catchment basin). Irrigation and Drainage Journal of Iran 8(4):864-857 (In Persian)

Kamali M, Hojam S, Vazifehdoust M (2011) Surface of snow cover and its effect on dryland wheat yield in Khorasan province. Water and Soil Journal (Agricultural Sciences and Technology) 125(6):1502-1494 (In Persian)

Leinss S, Wiesmann A, Lemmetyinen J, Hajnsek I (2015) Snow water equivalent of dry snow measured by differential interferometry. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 8(8):3773-3790

Liu Y, Li L, Yang J, Xi Ch, Hao J (2017) Estimating snow depth using multi-source data fusion based on

که نتایج این پژوهش نشان‌دهنده این امر با دقت بالای ۸۵ درصد می‌باشد و با دانستن این اطلاعات می‌توان به یکی از مهم‌ترین پارامترهای حوزه برف‌سنجی دست پیدا کرد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Operational Land Imager
- 2- Microwave
- 3- Interferogram
- 4- Digital Elevation Model (DEM)
- 5- Snow Water Equivalent (SWE)
- 6- Vertical Displacement Rates (VDR)
- 7- Synthetic-Aperture Radar
- 8- Bayanbulak
- 9- Tianshan
- 10- Xinjiang
- 11- D-InSAR
- 12- Three-Dimensional Variational
- 13- Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
- 14- Snowmelt Runoff Model
- 15- United States Geological Survey
- 16- Normalized-Difference Snow Index
- 17- Segmentation
- 18- Compactness
- 19- Shape
- 20- Multi Resolution Segmentation
- 21- Register
- 22- Fringe
- 23- Slave
- 24- Master
- 25- Azimuth
- 26- Range
- 27- Flat Earth
- 28- Unwrap
- 29- Spatial Baseline
- 30- Temporal Baseline

۵- مراجع

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)

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)

Adhami S (2005) Application of GIS and geographic information system in snow covering, case study: Ajizhai basin. Master's Thesis, Tabriz University, Remote Sensing and GIS Group (In Persian)

- Raygani B (2005) Survey of snow cover surface changes and estimation of snowmelt runoff using MODIS satellite imagery in Zayandeh Rood Dam Watershed. Dissertation for Master Degree, Isfahan University of Technology (In Persian)
- Rahnmounfar M, Serajeen M, Rahmati M (2005) Use of radar interferometry in Bam earthquake and IZMIT earthquake study in Turkey. Geomatics conference 84, Mapping Organization
- Shi J, Dozier J (2000) Estimation of snow water equivalence using SIR-C/x-SAR inferring snow depth and particle size. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 38(6):2475-2488
- Tasdigian M, Rahimzadegan M (2017) Evaluation and improvement of snow cover detection from MODIS images. Iran-Water Resources Research 13(1):163-177 (In Persian)
- the D-InSAR method and 3DVAR fusion algorithm. Remote Sensing 9(11):1-17
- Miryagoubzadeh M, Ganbarpour M (2010) Investigation of snow cover maps from MODIS satellite images in modeling of snow melt runoff, Case study: Karaj Dam basin. Journal of Earth Sciences 19(76):141-148 (In Persian)
- Mokhtari Motlag P, Javani B, Sharifan H (2013) Estimation of seasonal snow melt runoff using SRM model (case study: Ziarat basin in golestan province). First National Conference on Water and Agriculture Water Challenges, Isfahan, Iran National Irrigation and Drainage Association, Islamic Azad University, Khorasgan Branch (In Persian)
- Nolin A, Liang S (2000) Progress in bidirectional reflectance modeling and applications for surface particulate media: snow and soils. Remote Sensing Reviews 18(6):307-342
- Premelatha M (2001) Quality assessment of interferometrically derived digital elevation models. Ph.D. Thesis, University of Nottingham, Nottingham