



محاسبه خصوصیات فیزیکی برف با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری و تصاویر سنجنده ترا سارایکس باند (TerraSAR-X) و مودیس (MODIS)

سید علی الحسینی المدرسی^{۱*}، جواد حاتمی^۲، علی سرکارگر^۳

۱. دانشیار دانشکده فنی مهندسی، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

۳. دانشیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران

مشخصات مقاله

پیشینه مقاله:

دریافت: ۲۱ آبان ۱۳۹۴

پذیرش: ۱۵ اردیبهشت ۱۳۹۵

دسترسی اینترنتی: ۳۰ مرداد ۱۳۹۵

واژه‌های کلیدی:

عمق برف

سنجش از دور فعال

TerraSAR-X

مودیس

تکنیک راداری تداخل سنجی (DInSAR)

چکیده

ذخیره برف در حوزه‌های کوهستانی از منابع آب مهم است. طبق بررسی‌های انجام شده حدود ۶۰ درصد آب‌های سطحی و ۵۷ درصد آب‌های زیرزمینی کشور در مناطق برف‌گیر جریان دارند. در سال‌های اخیر اهمیت و کاربردهای داده‌های روزنه ترکیبی راداری (SAR) با توجه به مزیت‌های عمده‌ای نسبت به سایر سیستم‌های سنجش از دور دارند رو به فزونی بوده است. در این پژوهش ابتدا با استفاده از تولیدات ماهواره مودیس (MODIS) و الگوریتم Snow map نقشه سطح پوشش برف و سپس با استفاده از دوازده تصویر راداری سنجنده TerraSAR-X و تکنیک راداری تداخل سنجی (DInSAR) به گونه‌ای که ابتدا یک تصویر به عنوان تصویر پایه و بقیه تصاویر نسبت به تصویر اول تداخل سنجی انجام شد سپس بین مناطقی که پوشش برف بود مقدار جا به جای بدست آمده آن‌ها نشان‌دهنده تغییرات عمق برف است و در مرحله بعد نقشه عمق برف و نقشه حجم برف مهرماه ۱۳۹۱ تا اردیبهشت ۱۳۹۲ استخراج شد. با استفاده از رگرسیون خطی بین نقشه عمق برف که از تکنیک تداخل-سنجی تولید شده و داده‌های عمق آب معادل برف که از ایستگاه‌های زمینی برداشت شده بودند نقشه عمق آب معادل برف تولید شد که نتایج بیان گر دقت کلی ۹۱/۳ درصد و ضریب کاپای ۸۴/۴۵ نقشه سطح برف و نقشه عمق برف با ضریب تعمیم ۸۵ درصد و RMSe برابر ۲/۷۸ است برای محاسبه عمق آب معادل برف با استفاده از همبستگی بین داده‌های عمق برف مستخرج از DInSAR و داده‌های زمینی عمق آب معادل برف یک رابطه خطی با ضریب تعمیم ۰/۷۷ و RMSe برابر ۲/۹۷ محاسبه شد که این نتیجه که از لحاظ آمار در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار بود.

* almodaresi@iauyazd.ac.ir: پست الکترونیکی مسئول مکاتبات

مقدمه

برف مخلوطی از بلوره‌های یخ، آب به حالت مایع و هواست. بلوره‌های یخ به جای مانده بر سطح زمین حاصل نزولات اتمسفری یا باد هستند (۱۶ و ۱۹). در صورتی که سطح برف در مجاورت اتمسفر آلوده قرار بگیرد، سطح روی آن را لایه‌ای از غبار خواهد پوشاند. برف تا حداکثر ۵۳ درصد سطوح زمین در نیمکره شمالی و تا حداکثر ۴۴ درصد کره زمین در هر فصل را می‌پوشاند. حداقل یک سوم آب مصرفی جهت آبیاری باغات و زمین‌های کشاورزی در جهان از آب حاصل از ذوب برف تأمین می‌شود. همچنین برف در تأمین آب شیرین مصرفی مورد نیاز بشر اهمیت بسیاری دارد. وجود برف در حوزه‌های آبریز تأثیر به‌سزایی در توان ذخیره آب و همچنین برقراری تعادل در چرخه آب و انرژی دارد. برای مثال آلیدو بالای برف موجب انعکاس بالاتر درصدی از اشعه خورشید و ریزموج نسبت به سطوح فاقد برف شده و سطح پوشاننده عایقی بر روی زمین را تشکیل می‌دهد؛ بنابراین با وجود سرد بودن دمای هوا در بالای برف خاک زیرین یخ نمی‌زند و در برابر هوای سرد محافظت می‌شود (۶). نقشه‌های پوشش برف روزانه، بیشینه و میانگین چندروزه و همچنین نقشه‌های آب معادل برف روزانه و میانگین چندروزه از جمله اطلاعات تولید شده به کمک فناوری سنجش از دور و مورد نیاز در مدل‌سازی ذوب برف است (۲ و ۱۳). باید اشاره کرد که این اطلاعات به تنهایی نمی‌تواند به صورت کاربردی مورد استفاده قرار گیرد و از تلفیق آن‌ها با محصولات دیگر سنجش از دور و یا اطلاعات زمینی استخراج شده است که می‌توان نقشه‌های قابل اطمینانی را برای به‌کارگیری در مدل‌های هیدرولوژیکی تولید نمود (۱۴ و ۱۹). از تلفیق تصاویر راداری و تصاویر اپتیکی که از لحاظ قدرت تفکیک مکانی به هم نزدیک هستند و همچنین مدل رقومی منطقه می‌توان نقشه‌ی برف با تفکیک کلاس‌های برف خیس و برف خشک تولید نمود (۱۵ و ۱۸). با استفاده از تصاویر راداری در قطبیت‌های افقی و عمودی و فرکانس‌های مختلف، مشخصه‌های برف از جمله آب معادل استخراج شده است (۲۵). رادار با گشایش

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. پردازش رادار با گشایش مصنوعی به طرز قابل قبولی قدرت تفکیک نقاط هدف را در راستای حرکت ماهواره و نیز عمود بر جهت پرواز، بهبود می‌بخشد. قدرت تفکیک مناسب در جهت عمود بر راستای پرواز از طریق استفاده از سیگنال رادار با پهنای باند بالا به دست می‌آید. به علت که شیفت فرکانس داپلر به موقعیت هدف قبل و یا بعد از مرکز تابش راداری وابسته است، فرکانس سیگنال برگشتی از هدف تا زمانی که نقطه هدف در جای پای رادار قرار دارد یک باند فرکانسی را جاروب می‌نماید. با چنین اطلاعاتی سیگنال با پهنای باند وسیع در جهت آزمون تولید می‌شود و این خود سبب بهبود قدرت تفکیک می‌شود (۸ و ۱۱). روش اینترفرومتری فاز در تصاویر راداری نیز در تعیین آب معادل برف مورد استفاده قرار گرفته است. توانایی InSAR در تهیه نقشه‌های توپوگرافی و کشف جابجایی‌ها در تغییر شکل‌های زمین ناشی از عوامل گوناگون چون زلزله، استخراج معادن، آتش‌فشان و غیره اثبات شده است. اگرچه برای انجام این منظورها امکانات دیگری چون GPS، توتال استیشن، لیزر اسکن‌ها و غیره در اختیار است اما به دلایل زیر که مقایسه‌ای است بین این روش‌ها و روش InSAR، مطالعه و استفاده از این تکنیک لازم می‌نماید (۲۲ و ۲۸). در یک سیستم تصویربرداری رادار، سنجنده رادار فرستنده و گیرنده موج در طیف میکروویو است. در این نوع تصویربرداری امکان تهیه‌ی تصویر در هر شرایط آب و هوایی، روشنایی و با قدرت تفکیک مکانی بالا فراهم است (۲۴ و ۲۷). علاوه بر این، مانند تصاویر سنجنده‌های غیرفعال میکروویو، به علت نفوذ امواج میکروویو در سطوحی مانند برف، یخ و خاک امکان ثبت اطلاعات راجع به خصوصیات زیرین این سطوح نیز در تصویربرداری رادار ممکن شده است (۲۲). تصویربرداری رادار با گشایش مصنوعی سیستمی فعال است که در آن می‌توان تفکیک مکانی تصویربرداری نسبت به تصویربرداری رادار در هر دو راستای پرواز و عمود بر پرواز

قطبیت‌های مشابه و متفاوت می‌تواند پارامترهای مطلوب برف را به خوبی برآورد کند (۲۲). شی و دازیر (۲۵) با استفاده از باندهای L و C اقدام به اندازه‌گیری عمق برف و آب معادل برف کردند که ابتدا باز پراکنش سطح را برای باندها بدست آوردند و سپس بین داده‌های باز پراکنش و داده‌های زمینی با استفاده از الگوریتم خطی ارتباط برقرار کردند که در نهایت RMSE ۳۴ سانتی‌متر و ۰/۲۷ میلی‌متر برای عمق برف و آب معادل عمق برف محاسبه شد. اویس قران و زبکر (۲۱) به بررسی تجمع برف با استفاده از تکنیک InSAR و تصاویر ماهواره ERS در باند C پرداخت. استخراج پارامترهای مختلف مربوط به نرخ انباشت برف در یک منطقه کوچک برای برف خشک است. در حالی که مدل با استفاده از داده‌های باز پراکنش رادار تنها تغییرات را می‌تواند نشان دهد برای محاسبه انباشت مطابقت ندارد. با استفاده از دو مکانیسم پراکنندگی سطح و حجم برای پیش‌بینی نرخ انباشت برف خشک در منطقه گرینلند دارای دقت لازم است. تجزیه و تحلیل دقیق از InSAR از بازپراکنش رادار در گرینلند توصیف کرد و به یک مدل محاسبه حجم برف دست یافت؛ که اوانس (۱۱) عمق برف را با استفاده از تصاویر ماهواره هوآبرد SAR و لیدار در کوه‌های مامونس در کالیفرنیا آمریکا با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی رادار با روزنه مصنوعی و باند KU را برآورد کرد. این تحقیق یک روش جدید برای تعیین عمق برف با استفاده از کاوش‌های موجود در هوا تکنیک تداخل‌سنجی رادار با روزنه مصنوعی (DInSAR) و برای اعتبارسنجی با استفاده از اندازه‌گیری عمق برف که به صورت دستی گرفته شده استفاده شد که در شش ایستگاه نشان‌دهنده میزان تفاوت با نتایج میانگین InSAR نشان دهند دقت بالای ۸۰ درصد است. اوانس و کروس (۱۰) با استفاده از تصاویر باند KU و تکنیک DINSR عمق برف را محاسبه کردند که برای این کار ابتدا یک مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از تکنیک dinsr ایجاد کردند و سپس برای هر تاریخ یک مدل رقومی ارتفاعی ایجاد شد که در نهایت عمق برف را اندازه‌گیری کردند که به نتایج مطلوبی رسیدند. رسولی و ادهمی (۱) در پژوهش خود به محاسبه آب

افزایش یافته است. هرچه طول موج بیشتر شود نفوذ بیشتر خواهد شد (۱۴ و ۲۰). طول موج‌های بلندتر از تابش مایکروویو (به عنوان مثال، نسبت به نور مرئی) به معنای آن است که رادارهای تصویربرداری به مشکلات معمول از اتمسفر میرایی حساس نیستند معمولاً تنها باران بسیار سنگین مانع از انتقال انرژی مایکروویو هستند (۲۱). در اصل، سیگنال‌های رادار قادر به نفوذ در عوارضی که جامد فرض می‌شوند را دارند از جمله پوشش گیاهی و سطح خاک. در عمل، ارزیابی وجود یا مقدار نفوذ رادار در اجسام جهت تفسیر تصاویر خاص بسیار دشوار است. میزان نفوذ با عمق پوسته ارزیابی می‌شود عمقی که قدرت سیگنال را به $1/e$ مقدار سطح، یا در حدود ۳۷٪ کاهش می‌دهد (۵، ۷ و ۲۲). عوارض مختلف نفوذ متفاوتی دارند؛ مشخصات عمق پوست که در واحد استاندارد طول اندازه‌گیری شده، مقادیر میانگین تغییر سیگنال رادار به میزان نفوذ در اجسام مختلف را ارائه می‌دهد. بازه طیفی سنجنده‌های رادار با گشایش مصنوعی قادر به تصویربرداری در باندهای L با فرکانس ۱/۲۵ GH (طول موج ۲۴ سانتی‌متر) با فرکانس ۵/۳ GH (طول موج ۵/۶ سانتی‌متر) و باند X با فرکانس ۹/۶ GH (طول موج ۳/۱ سانتی‌متر) هستند (۲۲). هرچه طول موج بیشتر باشد قدرت نفوذ موج در پدیده‌ای مانند خاک و یا برف نیز افزایش می‌یابد (۹ و ۲۲ و ۲۸). همچنین رطوبت در خاک یا برف باعث کاهش شدید نفوذ موج به عمق خاک یا برف می‌شود. به طوری که نفوذ باند L و باند C در برف خشک به ترتیب حدود ۵۰ و ۲۰ متر است و در صورتی برف مرطوب باشد، این نفوذ به چند سانتی‌متر کاهش می‌یابد. در صورتی که برف خشک باشد، در باند C رادار مقادیر پس پراکنش از سطح زیرین برف غالب است و تصاویر حاصل از باند C که دارای برف خشک و یا بدون برف هستند، شباهت زیادی دارند. در صورتی که برف مرطوب باشد، مقادیر پس پراکنش به دلیل جذب موج توسط آب موجود در برف کاهش می‌یابد و بنابراین برف مرطوب از سایر پدیده‌ها قابل تشخیص خواهد بود. مطالعات تئوری و تجربی نشان می‌دهد راداری با فرکانس دوگانه در باند X و باند Ku با

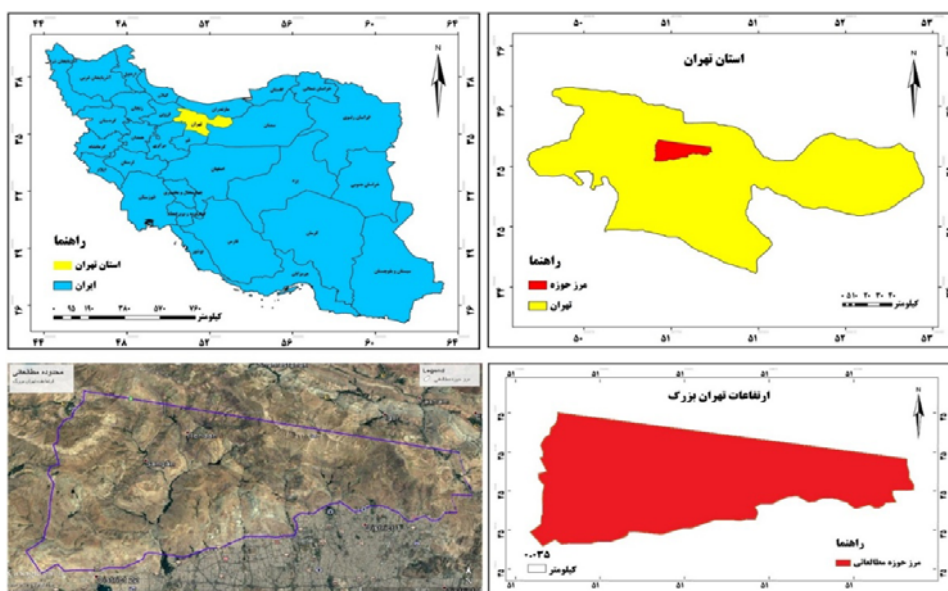
قدرت تفکیک زمانی بالا و داده‌های مایکروویو و بدون ابر به صورت هم زمان بود و در نتیجه نقص‌های تولیدات مودیس خصوصاً در مقیاس‌های روزانه پوشش داده شد و میزان مطابقت تولیدات سطح برف جدید با ایستگاه‌های زمینی ۷۹ درصد بدست آمد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعه در $51^{\circ} 06'$ تا $51^{\circ} 38'$ طول شرقی و $35^{\circ} 34'$ تا $35^{\circ} 51'$ عرض شمالی واقع شده است. ارتفاع منطقه بین ۱۸۰۰ متر در شمال تا ۵۶۱۰ متر در مرکز و ۱۰۵۰ متر در جنوب متغیر است (شکل ۱). تهران در بین دو وادی کوه و کویر و در دامنه‌های جنوبی رشته کوه البرز گسترده شده است.

معادل برف با پردازش سنجنده MODIS پرداختند محدود مطالعاتی آجی چای که از کوه‌های سبلان سرچشمه گرفته به دریاچه ارومیه می‌ریزد روش کار آن‌ها به این ترتیب بود که با استفاده از شاخص NSDI نقشه برف منطقه به صورت باینری استخراج و محدوده اثرگذار هر ایستگاه برف سنجی را با استفاده از روش چند ضلعی تیسن مشخص گردید و در نهایت حجم آب معادل برف را محاسبه کرد. وانگ و همکاران (۲۶) به مقایسه دقت محصولات روزانه و ۸ روزه پوشش برف استاندارد مودیس با محصولات جدیدتر روزانه و چندروزه پوشش برف مودیس با ترکیب مشاهدات دو ماهواره AQUA و TERA با استفاده از روش میدانی پرداختند. نتایج نشان داد که در قسمت‌های بدون ابر مقدار قابل قبول بودن کلاس‌بندی دو ماهواره AQUA و TERA نزدیک به ۱۰۰ درصد است. طالبی (۲) نقشه برف روزانه را با استفاده از ترکیب داده‌های MODIS و AMSER-E در حوزه شیرکوه یزد تهیه کردند. هدف آن‌ها در این تحقیق استفاده از مزایای داده‌های اپتیکال با



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

استفاده شده در این تحقیق، Stripmap، داده‌های سنجنده مودیس با فرمت رستری و برای یک دوره آماری یک ساله در ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۳ به فواصل ۸ روزه و با دقت مکانی ۵۰۰ متر است.

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از تصاویر ماهواره TerraSAR-X در بازه زمانی ماه اکتبر سال ۲۰۱۲ تا ماه می ۲۰۱۳ در منطقه تهران به تعداد دوازده تصویر استفاده گردید. مد تصویربرداری در

محصولات پوشش برف

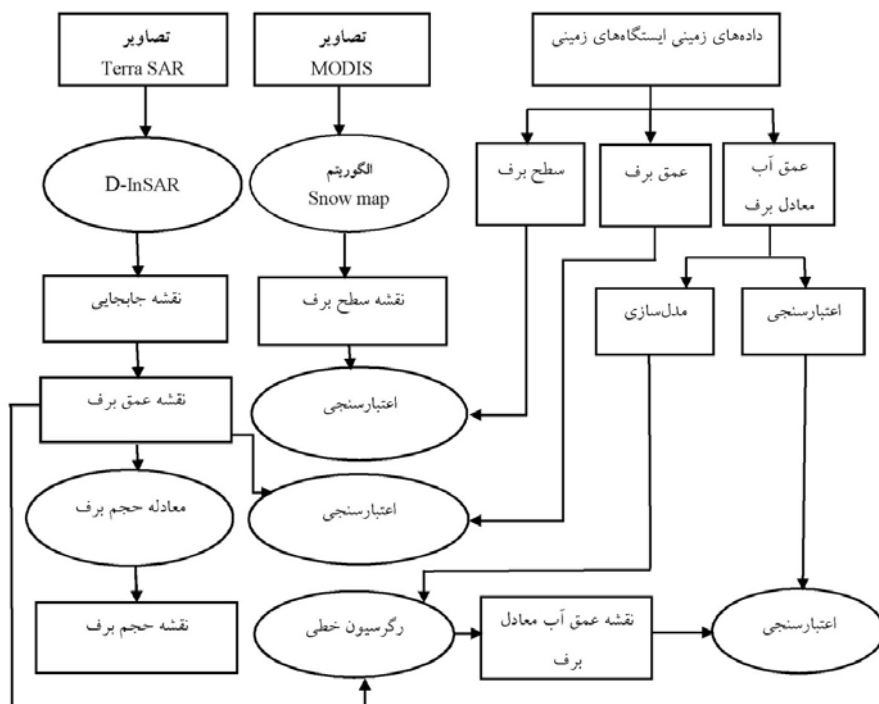
محصولات پوشش برف مودیس توسط الگوریتم‌های مختلف به عنوان مجموعه‌ای از محصولات از نوع اولیه MOD10_L2 تا محصولات ۸ روزه مشبک جهانی، MOD10C2 تهیه می‌شود که در این تحقیق از محصولات ۸ روزه که شامل ۶ سری محصول MOD10A1 شامل محصولات پوشش برف مودیس به صورت روزانه و محصولات MOD10A2 ترکیب ۸ روزه استفاده گردید. دوره ۸ روزه که از اولین روز هر سال آغاز می‌شود و تا سال بعد ادامه دارد. آخرین دوره ۸ روزه از هر سال که تا چند روز از سال ادامه می‌یابد که با ورودی دو یا هشت روز تولید گردید (۱۴ و ۲۳).

داده‌های زمینی برف‌سنجی

داده‌های برف‌سنجی مورد نیاز در این پژوهش نیاز شامل عمق برف و آب معادل برف برای دوره یک ساله از ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۳ است که اطلاعات از ایستگاه‌های برف‌سنجی شمال تهران جمع‌آوری شد.

روش تحقیق

در این پژوهش به منظور پایش مداوم خصوصیات فیزیکی برف از قبیل سطح پوشش برف و عمق آب معادل برف در هر نوع شرایط آب و هوایی و با دقت مکانی بالا سعی شده تا از مزایای تصاویر ماهواره‌ای اپتیکال و ماکروویو به صورت هم‌زمان استفاده گردید. با استفاده از داده‌های ماهواره بدست آمده از سنجنده MODIS و الگوریتم Snow map سطح پوشش برف تخمین زده شده بعد از آن در قسمت‌هایی که دارای برف بود و پوشش آن تشخیص داده شد به بررسی عمق برف پرداخته شد و برای تخمین ارتفاع برف و عمق آب معادل برف از تصاویر راداری TERRA SAR استفاده گردید و در نهایت خصوصیات برف بدست آمده از تصاویر اپتیکال و تصاویر راداری با داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های زمینی مقایسه شد. در شکل ۲ مراحل محاسبه سطح پوشش و عمق برف و عمق آب معادل برف و حجم برف با استفاده از تصاویر اپتیکال MODIS و TERRA SAR ارائه شده است.



شکل ۲. فلوچارت انجام پژوهش

سطح برف الگوریتم‌های مختلفی در تولید نقشه‌های سطح پوشش برف استفاده می‌گردد وجود دارد و هرکدام از آن‌ها دارای دقت متفاوتی در پیش‌بینی رواناب می‌باشند به طور مثال الگوریتمی در تولید داده‌های سطح پوشش برف از داده‌های خام بدست آمده از سنجنده MODIS مورد استفاده قرار می‌گیرد (الگوریتم Snow map)، یک مجموعه‌ای از تولیدات پوشش برف را در سطوح مختلف ارائه می‌کند (۱۵). این تولیدات توسط NSIDC در DACC توزیع می‌شوند. الگوریتم نقشه برف MODIS معروف به الگوریتم Snow map برای تولیدات سطح برف سنجنده MODIS استفاده می‌شود یک الگوریتم از نوع تصمیم مبنای استفاده از آزمون‌های گروهی حد آستانه است الگوریتم Snow map در سال ۱۹۸۸ ارائه شد. این الگوریتم از لحاظ محاسباتی دارای حجم بسیار کم است و از لحاظ مفهومی کاملاً ساده است و از این رو درک این مطلب چگونه تولید شده است برای کاربر آسان است (۲۲). الگوریتم Snow map بر پایه شاخص NDSI و بازتابش باندهای ۲ و ۴ است. در این الگوریتم برای تشخیص سطوح پوشیده شده از برف از شاخص سطح برف و یا NDSI کمک گرفته می‌شود. به علت انعکاس پایین برف در باندهای مادون قرمز و انعکاس بالا در باندهای مرئی، این شاخص می‌تواند در تشخیص پوشش برف از سایر پدیده‌ها بسیار مفید باشد. شاخص NDSI با داده‌های MODIS با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

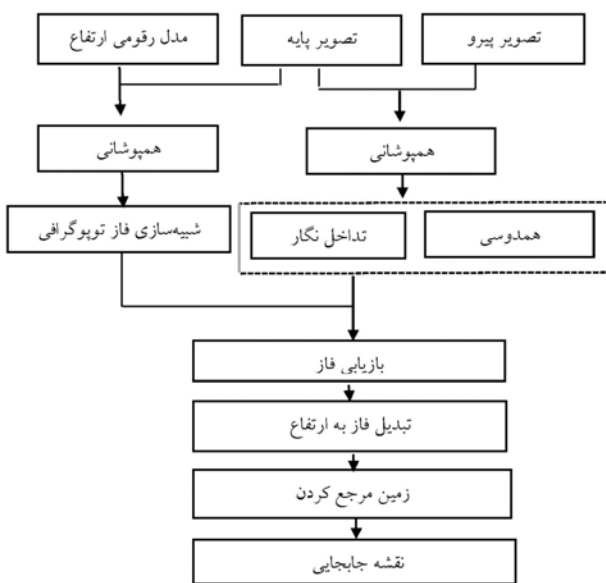
$$NDSI = \frac{Band(4) - Band(6)}{Band(4) + Band(6)} \quad [1]$$

در تهیه نقشه پوشش برفی زمانی که پیکسل دارای NDSI بزرگ‌تر یا مساوی ۰/۴ است به عنوان پیکسل برفی در نظر گرفته می‌شود و در صورتی که کمتر از ۰/۴ باشد، به عنوان پیکسل عاری از برف فرض می‌گردد. در این شاخص پیکسل‌هایی که تقریباً ۵۰ درصد یا بیش‌تر توسط برف پوشیده شده‌اند، دارای NDSI حداقل ۰/۴ هستند. از آنجایی که آب نیز ممکن است دارای یک NDSI حدود ۰/۴ باشد، یک آزمایش دیگر نیز برای جداسازی آب و برف صورت می‌پذیرد. آب و

برف به دلیل اینکه بازتابش آب در باند ۲ کمتر از ۱۱ درصد است، قابل تفکیک هستند؛ بنابراین اگر بازتابش باند ۲ بزرگ‌تر از ۱۱ درصد باشد و NDSI هم بیش‌تر از ۰/۴ باشد، آن پیکسل به عنوان برف در نظر گرفته نمی‌شود (۱۸). برف خالص دارای یک NDSI بالاست. برف در پیکسل‌های مختلط دارای مقدار کمتری در مقایسه با پیکسل‌های خالص است و پیکسل‌های خالص برف با توجه مقدار بالای NDSI آن‌ها قابل تشخیص است. محصولات ۸ روزه مودیس دارای دو لایه است؛ Maximum - Snow - Extent در این تصویر بیش‌ترین سطح برف مشاهده شده نمایش داده شده است. به صورتی که اگر در حداقل یک یا دو روز از دوره هشت روزه نیز برف مشاهده شده باشد در این تصویر آن ناحیه با پوشش برف مشخص شده است.

در لایه Eight - Day - Snow - Cover به ازای هر روز از دوره هشت روزه یک بیت از بایت مربوطه مشخص شده که بیت صفر مربوط به روز اول و بیت ۱ مربوط به روز ۲ و غیره بیت ۷ مربوط به روز هشتم است. تنظیم کردن این بیت‌ها به این معنی است که این بیت‌ها در کنار هم قرار داده شود مشخص شود که در هر روز در این دوره ۸ روزه در آن بیت دارای برف هستند یا ابر و این بیت‌ها در صورت مشاهده برف در آن روز و منطقه مربوطه یک خواهد شد و بدین طریق روزی که بیش‌ترین برف را در این دوره ۸ روزه دارد انتخاب می‌شود (۱۷). داده‌های روزانه پوشش برف MOD10A1 نتیجه انتخاب یک مشاهده از چند مشاهده در طول روز است و با استفاده از الگوریتم اسکورینگ (Scoring) بدست می‌آید منطق این الگوریتم بر این استوار است تا نزدیکترین مشاهدات به نادیر با بالاترین پوشش در بالاترین زاویه ارتفاعی خورشیدی انتخاب شود. بنابراین تعداد پیکسل‌های با زاویه دید غیر نادیر به حداقل می‌رسد هر مجموعه از داده‌های روزانه سطح پوشش برف یک مجموعه داده شبکه‌ای شده در سیستم مختصات Sinusoidal می‌باشد و داده‌های پوشش برف به صورت عدد‌های صحیح کد دار ذخیره می‌شوند که عدد مربوط به برف با DN ۲۰۰ نشان داده شده اند (۲۳). بعد از

جابجایی سطح زمین بر اساس شکل ۳ عبارتند از: رجیستر کردن دو تصویر SLC نسبت به هم رجیستر کردن یک تصویر SLC و یک تصویری که با استفاده از DEM دارای فاز مجازی شده نسبت به هم ضرب مختلط تصاویر رجیستر شده در هر دو حالت برای تولید اینترفروگرام، محاسبه نقشه همدوسی، حذف الگوهای فرینچ که ناشی از کرویت زمین است، Phase unwrapping، تبدیل فازهای Unwrap شده به جابجایی ژئورفرنس کردن نقشه نهایی است (۲۲ و ۲۸).



شکل ۳. مراحل انجام تداخل سنجی تفاضلی راداری

در این راستا اینترفروگرام، جابجایی‌های سطح زمین را در فاصله بین دو زمان تصویربرداری به شکل یک تصویر جابجایی ارائه می‌دهد که نسبت به یک سطح مبنای خاص یا سیستم تصویر مشخصی کالیبره نشده است. چون اینترفروگرام در راستای رنج مایل بیان می‌شود، این موضوع از این حقیقت ناشی می‌شود که اغلب سیستم‌های SAR پهلونگر هستند؛ بنابراین ابتدا اینترفروگرام باید در راستای افق (به معنای دید قائم از بالا) تبدیل شود. پس از این مرحله بعدی شامل ژئوکد کردن (Wrap کردن نقشه جابجایی حاصل از اینترفرومتری) می‌باشد (۴ و ۱۲). با توجه به مطالب ذکر شده در مورد مراحل تداخل سنجی تفاضلی برای مناطق مورد مطالعه، تداخل سنجی

تهیه تصاویر ۸ روزه مودیس عملیات پردازش بر روی آن انجام می‌شود برای این کار ابتدا در محیط نرم افزار ENVI سیستم مختصات این تصاویر که سینوسی است به سیستم مختصات طول و عرض جغرافیایی تبدیل شد و مرز مورد نظر برش زده شد سپس تصاویر وارد نرم افزار ArcGIS[®] 10.1 شده و از بین دو لایه، لایه Maximum-Snow_Extent انتخاب شد و عمل کلاس بندی انجام شد و ارزش پیکسلی ۲۰۰ را به عنوان برف و بقیه ارزش‌های پیکسلی را به عنوان غیر برف بدین طریق کلاس برف مشخص شد.

عمق برف

از آنجا که گستره پوشش سطحی برف کمی نیست که مستقیماً در محاسبه آب ذخیره شده در یک لایه برف مورد استفاده قرار گیرد روش‌های گوناگونی برای تعیین خصوصیات فیزیکی برف توسعه داده شده‌اند در این پژوهش سعی شده است برای سنجش تغییرات عمق برف از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری استفاده شود. از آنجا که INSAR یک تکنیک راداری است. اساس آن مشابه نقشه‌برداری زمینی برای جمع‌آوری داده در تهیه نقشه منحنی میزان رستری و یک نقشه منحنی میزان رستری است. اگر دو نقشه دقیقاً مشابه باشند، از تفاضل پیکسل به پیکسل دو تصویر آرایه‌ای از صفر حاصل خواهد شد (۲۲ و ۲۸). اگر بعضی مقادیر در تصویر حاصل (تفاضل دو تصویر) غیر صفر باشند بیانگر آن است که در آنجا تغییری رخ داده است، مقدار تغییر متناسب با مقدار روشنایی پیکسل در تصویر حاصل (تفاضل) است. برای تهیه اینترفروگرام با داشتن زوج مناسبی از تصاویر SLC، با همدوسی نسبتاً بالا، پارامترهای مداری دقیق معلوم و طول خط باز مناسب، می‌تواند پردازش انجام شود. در عملیات‌هایی مانند این پژوهش که هدف تولید نقشه جابجایی می‌باشد می‌بایست در فاصله زمانی مدنظر (که می‌تواند سال باشد) داده‌هایی را انتخاب نمود که دارای طول باز کم باشند تا امکان دسترسی به همدوستی بالاتر بین فازها در زمان‌های t_1 و t_2 افزایش یابد. مراحل اصلی پردازش داده‌های ذکر شده با هدف دستیابی به

استفاده از آن بتوانیم عمق آب معادل برف را تهیه کنیم.

نتایج و بحث

در ابتدا برای دست یافتن به سطح پوشش برف و مناطقی که داری برف هستند با استفاده از الگوریتم Snow map در قالب نقشه‌های برف سطح برف نمایش داده شد و سپس برای یافتن عمق برف در مناطقی که از برف پوشیده شده‌اند با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری عمق برف محاسبه شد نقشه‌های عمق برف تولید شد و در ادامه با استفاده از نقشه سطح برف و عمق مناطق که از برف که مراحل قبل تولید شده بود حجم برف موجود بر روی ارتفاعات محاسبه شد نقشه‌هایی آن تولید شد و در مرحله آخر با استفاده از همبستگی بین عمق برف تولیدی و داده‌های زمینی آب معادل برف معادله خزی آن محاسبه نقش عمق آب تولیدی محاسبه شد و در هر مرحله نقشه‌های تولید صحت‌سنجی و اعتبارسنجی شدند.

سطح برف

پس از دریافت تصاویر MOD10A2 به فرمت HDF این محصول به صورت آماده است. تصاویر با فرمت TIF وارد نرم‌افزار ENVI شدند و اطلاعات سیستم مختصات تصاویر از سیستم مختصات سینوسی به سیستم مختصات طول و عرض جغرافیایی را تغییر داده‌ایم و سپس با استفاده کلاس‌بندی به روش حد آستانه که پیکسل‌های که در تصاویر عدد درجه خاکستری آن‌ها برابر با ۲۰۰ بود را به کلاس برف و پیکسل‌های که در تصاویر عدد درجه خاکستری آن‌ها برابر با ۲۰۰ نبود را به کلاس سایر تقسیم‌بندی کرده‌ایم که به تعداد ۲۷ تصویر از ۱۵ اکتبر ۲۰۱۲ تا ۹ می ۲۰۱۳ پوشش برف نشان داده شده است.

با توجه به ایستگاه‌های زمینی موجود در منطقه برآورد سطح برف سنجنده MODIS برای افزایش قدرت صحت‌سنجی با نقاط تمام ایستگاه‌های برف‌سنجی موجود در استان تهران مورد

با استفاده از تصاویر سنجنده TSX با استفاده از نرم‌افزار SARscape تولید گردید.

حجم برف

با توجه به این که حجم برف از دو پارمتر عمق برف و سطح برف بدست می‌آید برای محاسبه حجم برف از فرمول زیر آن را محاسبه می‌کنیم که مساحت هر پیکسل در عدد درجه خاکستری آن که نشان دهنده عمق برف در پیکسل مورد نظر است ضرب کنیم حجم برف برای هر پیکسل بدست می‌آید (۳).

[۲]

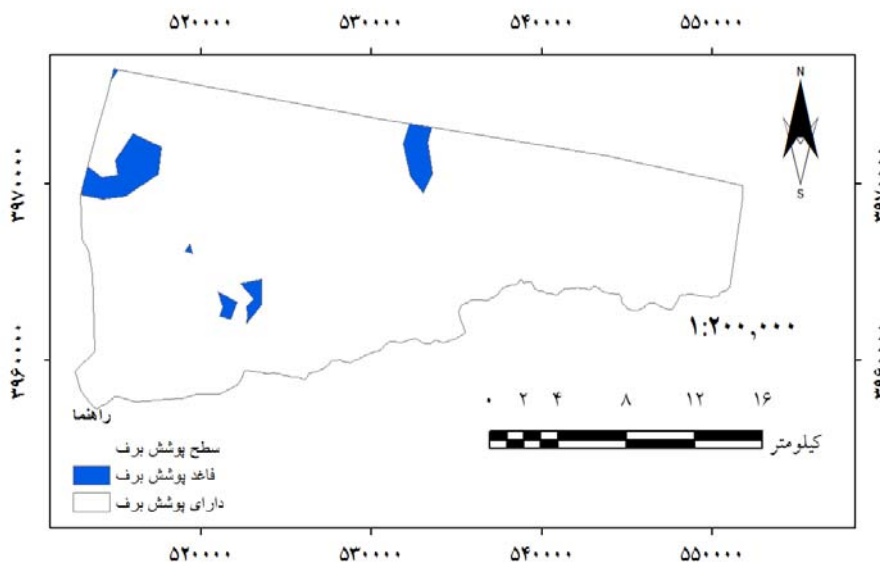
$$V=H \times S$$

در این رابطه؛ V حجم برف در هر پیکسل، H ارتفاع برف در هر پیکسل، S مساحت برف در هر پیکسل.

برف‌سنجی شامل اندازه‌گیری ضخامت و چگالی برف می‌باشد که با معلوم بودن این پارامترها، آب معادل برف قابل برآورد است که در بین نقاط اندازه‌گیری شده ضخامت برف و چگالی آن است اولاً توزیع آب معادل را با توزیع ضخامت برف یکسان فرض نموده و ثانیاً برای برآورد چگالی نقاط مختلف، از مقدار میانگین وزنی آن استفاده شود بدین ترتیب پس از تعیین زمان مناسب برای برف با ضرب نمودن میانگین چگالی در مقادیر برآورد شده ضخامت برف، آب معادل برف در نقاط مختلف و یا به عبارت دیگر توزیع مکانی آن به دست آمد. مدلسازی تغییرات آب معادل با استفاده از مدل رگرسیون خطی در مورد نظر است (۶). رگرسیون خطی ممکن است ساده یا چندگانه باشد. رگرسیون خطی ساده شامل یک متغیر وابسته و یک متغیر مستقل است. با داشتن معادله خط رگرسیون و مقدار متغیر مستقل می‌توانیم مقدار متغیر وابسته را پیش‌بینی کنیم. البته ممکن است این مقدار با مقدار واقعی کمی تفاوت داشته باشد. به این تفاوت‌ها، مقادیر باقیمانده (Residual) می‌گویند (۸). با استفاده از مدل رگرسیونی بین داده‌های زمینی آب معادل برف و عمق برف که از تصاویر TerraSAR-X بدست آورده‌ایم معادله خطی بین این دو بدست می‌آوریم که با

استان تهران در تاریخ‌های مختلف در جدول ۱ آورده شده است.

ارزیابی قرارگرفته و همه محققین به اتفاق صحت بالای تصاویر MODIS جهت برآورد سطح برف را تأیید کرده‌اند. نتایج این برآورد برای صحت تصاویر MOD10A2 در سطح



شکل ۴. نقشه پوشش سطح برف

جدول ۱. برآورد دقت سطح برف در ۴ توزیع برف در استان تهران

تاریخ مشترک تصویر و اندازه‌گیری زمینی	ایستگاه برف سنجی در تصویر ایستگاه برف سنجی	ایستگاه‌های دارای برف (تعداد)	ایستگاه‌های بدون برف (تعداد)	کل ایستگاه‌ها (تعداد)	دقت کلی (%)	ضریب کاپا (%)
۱۳۹۱/۹/۲۷	ایستگاه‌های دارای برف (تعداد)	۱۹	۲	۲۱	۸۶/۹	۸۰/۵۲
	ایستگاه‌های بدون برف (تعداد)	۱	۱	۲		
	کل ایستگاه‌ها (تعداد)	۲۰	۳	۲۳		
۱۳۹۱/۱۰/۲۴	ایستگاه‌های دارای برف (تعداد)	۲۰	۱	۲۱	۹۱/۳	۸۴/۱۲
	ایستگاه‌های بدون برف (تعداد)	۱	۱	۲		
	کل ایستگاه‌ها (تعداد)	۲۱	۲	۲۳		
۱۳۹۱/۱۱/۱۶	ایستگاه‌های دارای برف (تعداد)	۲۰	۱	۲۱	۹۵/۶	۸۵/۰۲
	ایستگاه‌های بدون برف (تعداد)	۱	۲	۳		
	کل ایستگاه‌ها (تعداد)	۲۱	۳	۲۳		
۱۳۹۱/۱۲/۱۴	ایستگاه‌های دارای برف (تعداد)	۲۰	۱	۲۱	۹۱/۳	۸۴/۱۲
	ایستگاه‌های بدون برف (تعداد)	۱	۱	۲		
	کل ایستگاه‌ها (تعداد)	۲۱	۲	۲۳		
میانگین					۹۱/۳	۸۳/۴۵

جدول ۲. جزئیات تداخل نگارهای تولید شده

تاریخ	فاصله زمانی (روز)	فاصله مکانی (متر)	حداکثر فاصله مکانی مناسب (متر)	ابهام ارتفاعی (متر)	جایبجای در جهت ازیموت (متر)	جایبجای در جهت رنج (متر)	تفاوت اثر دایر بین دو تصویر (متر)	حداکثر اثر دایر بین دو تصویر برای تداخل سنجی (متر)
۲۰۱۲/۱۰/۲۸	۱۲	۷۲۴/۲۹	۳۸۳۹/۵۲۷	۶۴/۷۰	۶۵/۷۲۴	-۲۵/۱۷۷	۱۵/۸۱۷	۳۶۰۷/۰۸۱
۲۰۱۲/۱۱/۰۸								
۲۰۱۲/۱۰/۲۸	۳۳	۵۵/۲۲۲	۳۸۳۹/۵۲۷	۶۶/۶۹	-۷۰/۶	۳/۸۷۸	-۱۹/۳۰	۳۶۰۷/۰۸۱
۲۰۱۲/۱۱/۳۰								
۲۰۱۲/۱۰/۲۸	۴۴	۴۱/۲۱۹	۳۸۳۹/۵۲۷	۵۰/۵۴	۴/۹۶۳	۱۳/۴۱۶	۲۱/۶۸۸	۳۶۰۷/۰۸۱
۲۰۱۲/۱۲/۱۱								
۲۰۱۲/۱۰/۲۸	۵۵	۸۶/۵۳۴	۳۸۳۹/۵۲۷	۶۳/۴۳	-۱۹۷/۹۱۲	-۲۴/۴۹	۷/۷۵۳	۳۶۰۷/۰۸۱
۲۰۱۲/۱۲/۲۲								
۲۰۱۲/۱۰/۲۸	۸۶	۶۳/۳۳۲	۳۸۳۹/۵۲۷	۳۱/۴۵	-۵۵/۰۲۹	-۶/۲۵۳	۱۱/۵۹۲	۳۶۰۷/۰۸۱
۲۰۱۳/۰۱/۱۳								
۲۰۱۲/۱۰/۲۸	۹۷	۸۸/۶۵۱	۳۸۳۹/۵۲۷	۲۲/۸۸	۱۵۸/۶۶۳	۴۲/۲۲۳	-۵۹/۷۴	۳۶۰۷/۰۸۱
۲۰۱۳/۰۱/۲۴								
۲۰۱۲/۱۰/۲۸	۱۳۰	۹۸/۴۱۷	۳۸۳۹/۵۲۷	۱۹/۹۸	۳۵/۱۷۵	۰/۶۸۲	۲۴/۴۳۱	۳۶۰۷/۰۸۱
۲۰۱۳/۰۲/۲۶								
۲۰۱۲/۱۰/۲۸	۱۴۱	۷۳/۱۰۷	۳۸۳۹/۵۲۷	۲۳/۶۲	-۴/۱۷۸	-۲۹/۷۰۶	۳۴/۱۶۰	۳۶۰۷/۰۸۱
۲۰۱۳/۰۳/۰۹								
۲۰۱۲/۱۰/۲۸	۱۶۱	۹۶/۲۸۹	۳۸۳۹/۵۲۷	۲۴/۱۰	-۹/۵۵۶	۱۲/۷۰۳	۲۴/۹۹۳	۳۶۰۷/۰۸۱
۲۰۱۳/۰۳/۳۱								
۲۰۱۲/۱۰/۲۸	۱۸۴	۱۰۵/۲۰	۳۸۳۹/۵۲۷	۲۱/۸۶	-۱۹/۹۵	۲۵/۶۶۳	-۵۷/۶۵	۳۶۰۷/۰۸۱
۲۰۱۳/۰۴/۲۲								
۲۰۱۲/۱۰/۲۸	۱۹۵	۹۹/۴۳	۳۸۳۹/۵۲۷	۲۳/۷۲	۳۴/۰۱۲	۳/۶۱۰	-۲/۵۷۲	۳۶۰۷/۰۸۱
۲۰۱۳/۰۵/۰۳								

هیدرولوژی کاربردی (NOHRSC) در ۱۵ محل دقت محصول MOD10A1 را برآورد کردند. میزان دقت محصول MOD10A1 با استفاده از داده‌های SNOTEL ۹۴/۲٪ و با استفاده از داده‌های NOHRSC ۷۵/۹٪ محاسبه شد. همچنین اووشارانگ و زیکر در سال ۲۰۰۷ محصول MOD10A1 سنجده MODIOS را با ۲۰۰۰ داده زمینی به دست آمده از

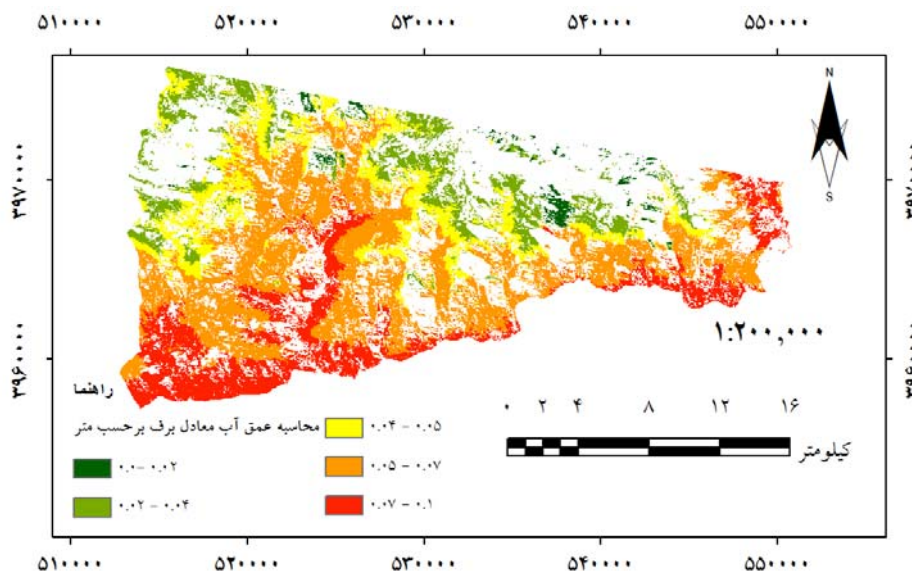
از آنجا که این تولیدات در مناطق دیگر جهان برآورد دقت شده‌اند می‌توان از نتایج آن‌ها نیز برای حصول اطمینان نسبت به این تولیدات استفاده کرد. نمونه‌هایی از پژوهش‌های انجام شده به قرار زیر است: کلین و بارنت در سال ۲۰۰۳ با استفاده از داده‌های سیستم اتوماتیک سنجش برف ایالات متحده آمریکا (SNOTEL) و مرکز بین‌المللی سنجش از دور

بررسی تصاویر MODIS به این نتیجه رسیدیم که تصویر ۲۸/۱۰/۲۰۱۲ فاقد برف بوده و هیچ گونه پوشش برفی ندارد به همین دلیل این تصویر را به عنوان تصویر پایه برای تداخل‌سنجی قرار داده‌ایم و تمام تصاویر را نسبت به این تصویر تداخل‌سنجی کرده‌ایم که یازده تداخل‌نگار ایجاد شد که عدد درجات خاکستری هر پیکسل نشان‌دهنده عمق برف موجود در آن پیکسل است که در جدول ۴ جزئیات تداخل‌سنجی برای هر زوج تداخل‌نگار آورده‌ایم که در آن فاصله مکانی و فاصله زمانی مناسب و پایین بوده است که هر چه فاصله مکانی کمتر باشد دقت خروجی تداخل‌سنجی بالاتر است و همچنین محتویات جدول دارای جزئیات دقیق تداخل‌نگارهای بدست آمده است. پس از تولید تداخل‌نگارهایی و کلاس‌بندی آن‌ها چون تصاویر در نرم‌افزار SARSCAPE به صورت یک تصویر کامل تصویر پردازش می‌شوند و قابلیت برش را ندارند بعد از پردازش تصاویر به روش D-INSAR منطقه مورد مطالعه برش داده شد.

ایستگاه‌های هواشناسی مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که کمترین میزان دقت سطح برف در جنگل‌های سبز مشاهده می‌شود در طی ۱۶۰ روز MOD10A1 متوسط درصد مطابقت ۹۳٪ با داده‌های زمینی نشان داد و در مورد جنگل‌های سبز این عدد به ۸۳٪ کاهش یافت. سیمیک همچنین نشان داد میزان دقت در زمان ذوب برف کمتر می‌شود. وانگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ با استفاده از مشاهدات زمینی ۲۰ ایستگاه کلیماتولوژی در چین دقت محصول MOD10A2 را برای ۵ سال متوالی برآورد کرد. نتایج پژوهش‌های آن‌ها نشان می‌دهد که زمانی که عمق برف بیشتر از ۴ سانتی‌متر است در شرایط آسمان صاف و بدون ابر MOD10A2 در تشخیص برف ۹۴٪ و در تشخیص زمین دقت ۹۹٪ دارد.

عمق برف

ابتدا برای این که اثبات کنیم جابجای وجود داشته از روش تداخل‌سنجی راداری محاسبه کردیم برای محیط برفی بوده از تصاویر MODIS سطح برف را محاسبه کردیم سپس در با



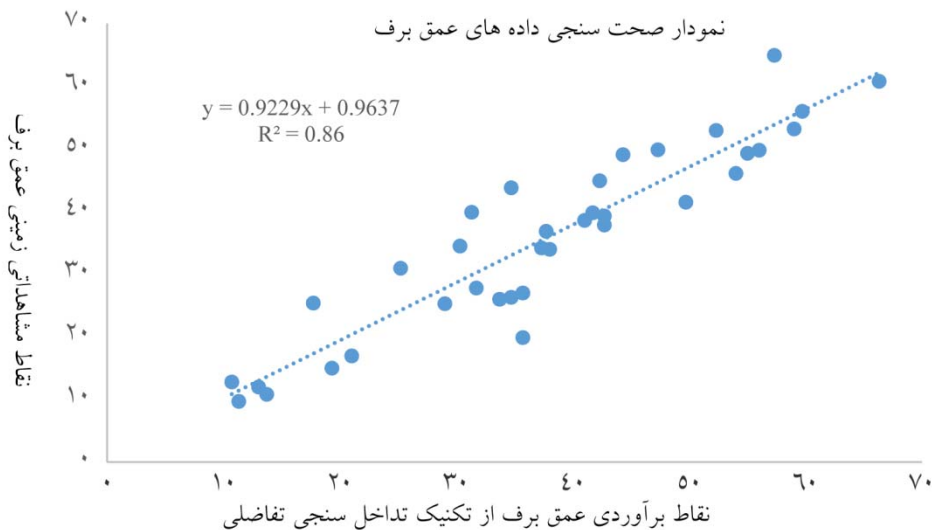
شکل ۵. نقشه عمق برف

ایستگاه‌های برف‌سنجی استفاده گردید. با توجه به زمان داده‌های اندازه‌گیری شده در سطح زمین تصاویر مربوط به آن

به منظور بررسی و ارزیابی نتایج اعمال الگوریتم بر روی داده‌های TerraSAR-X و محاسبه عمق برف از داده‌های

مختلف در تاریخ‌های مختلف نیاز است ولی به علت محدودیت داده از تعداد داده‌های موجود در منطقه بیشتر نتوانستیم استفاده کنیم بر اساس نتایج به دست آمده، با اطمینان ۹۹٪ می‌توان گفت که تغییرات عمق برف استخراج شده از تصاویر راداری حدوداً ۸۵٪ با تغییرات عمق برف اندازه‌گیری شده در ایستگاه نیز منطبق است و RMSE برابر ۲/۷۸ بوده که این نتیجه با توجه به داده‌های کم و صعب‌العبور بودن منطقه می‌تواند راه‌گشای مطالعات برف جهت کارشناسان در منطقه باشد.

تاریخ‌ها انتخاب و ارزیابی صورت می‌گیرد. در چهار تاریخ مختلف در سال ۲۰۱۲ در منطقه مورد مطالعه بررسی نتایج صورت گرفت و تصاویر بدست آمده از عمق برف با داده‌های زمینی مقایسه شدند. اعمال موارد فوق در نرم‌افزار برنامه‌نویسی (MATLAB) انجام گرفت که نتایج در شکل ۶ آورده شده است. این اشکال نمودار پراکنش نقاط مشاهداتی و برآوردی و خط رگرسیون و ضرایب همبستگی را در بیش از ۳۵ نقطه در سطح منطقه نشان می‌دهد. نیز عمق برف و آب معادل برف برآورد شده و با داده‌های زمینی مقایسه شد. شایان ذکر است جهت بررسی کارایی دقیق‌تر تصاویر راداری اطلاعات نقاط



شکل ۶. پراکنش نقاط مشاهداتی و برآوردی عمق برف و ضریب همبستگی

عمق آب معادل برف

مدل‌های مختلف رگرسیون خطی که از ترکیب‌های متفاوت عوامل ورودی حاصل شده‌اند، در شکل همراه با نتایج یک معیار معمول بر ای R آماری آن‌ها ارائه شده است. با بررسی میزان هم‌بستگی مدل‌های رگرسیون است که ضریب همبستگی ۷۷ درصد قابل قبول است که در آن 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 بدست آمده از تصاویر TerraSAR-X و آب معادل برف

حجم برف

برای محاسبه حجم برف ابتدا پیکسل‌هایی از سطح دارای برف را از طریق نقشه‌های پوشش برف که بدست آوردیم را با پیکسل‌هایی که از طریق عمق برف به دست آوردیم مقایسه می‌کنیم آن پیکسل‌های که دارای پوشش برف بوده را مساحتشان را در نرم‌افزار ENVI محاسبه کردیم و سپس در عدد خاکستری آن پیکسل که نشان دهنده عمق برف است ضرب کردیم حجم برف موجود در ارتفاعات را محاسبه کردیم.

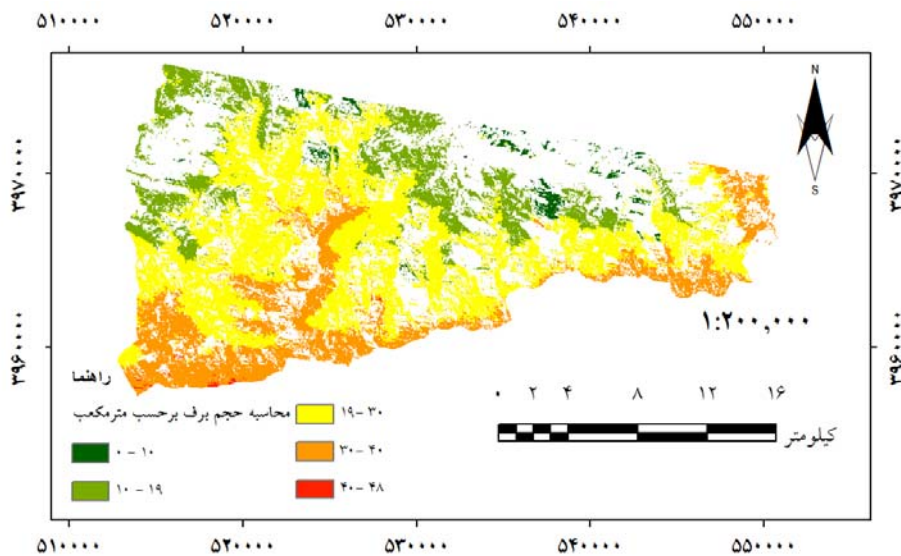
در ابتدا استفاده کردیم و سپس از ۲۰ درصد باقی مانده برای محاسبه دقت مدل استفاده کردیم که به RMSE برابر ۲/۹۷ مدل رسیدیم.

پس از محاسبه فرمول آب معادل برف با استفاده از نقشه‌های عمق برف نقشه‌های عمق آب معادل برف را نیز محاسبه کردیم.

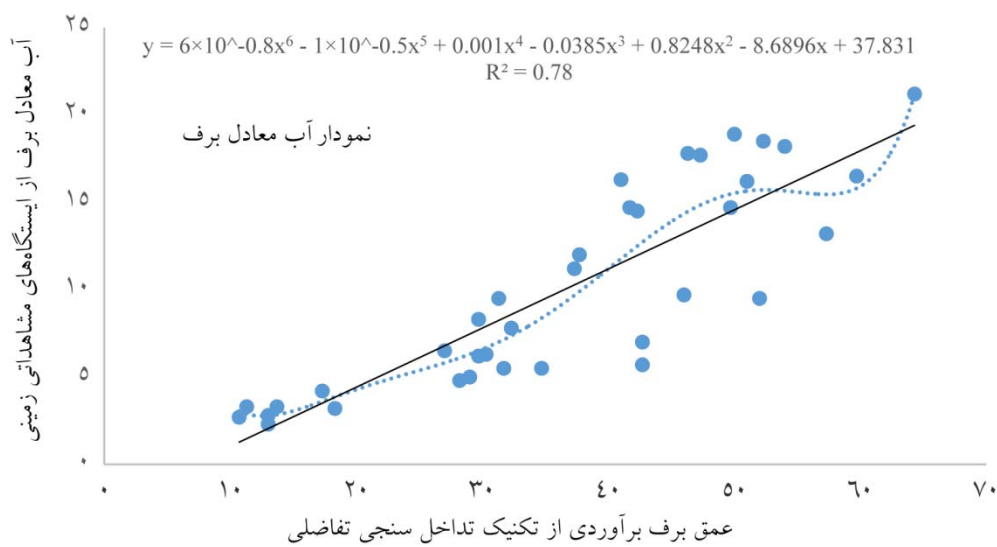
اندازه‌گیری زمینی بهترین معادله مدل شد بصورت رابطه ۳ می‌باشد.

$$y = 6 \times 10^{-0.8x^6} - 1 \times 10^{-0.5x^5} + 0.001x^4 - 0.0385x^3 + 0.8248x^2 - 8.6896x + 37.831 \quad [3]$$

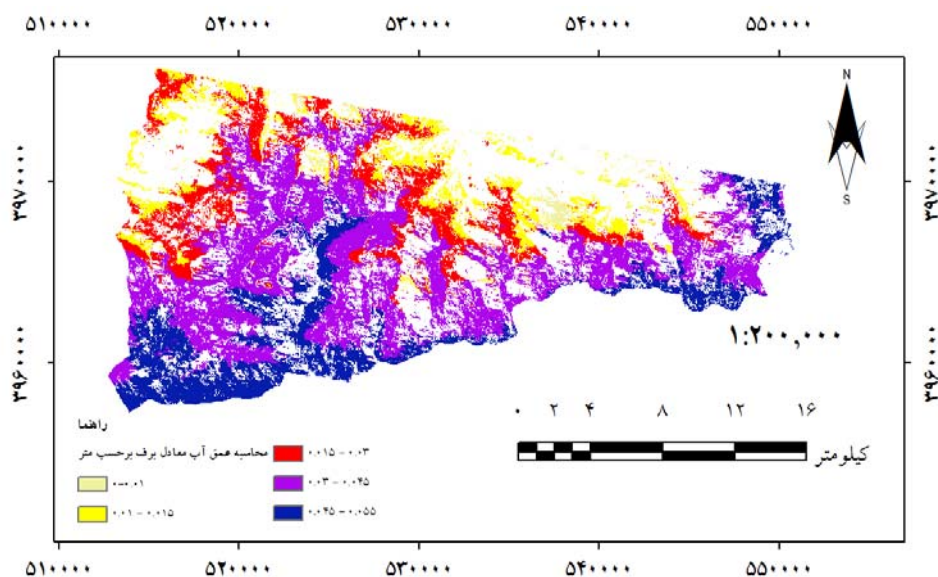
که در رابطه؛ X نشان‌دهنده عمق برف و Y نشان‌دهنده آب معادل برف است برای بالا بردن دقت کار ۸۰ درصد از داده‌ها



شکل ۷. نقشه حجم برف



شکل ۸. همبستگی بین داده‌های زمینی آب معادل برف با عمق معادل برف از تصاویر terra SAR



شکل ۹. نقشه عمق آب معادل برف

نتیجه گیری

نتایج حاصل از پوشش برف نشان می‌دهد که با استفاده از تصاویر MODIS با فواصل مناسب، نظیر هشت روزه امکان پای زمانی رو مکانی پوشش برف و پتانسیل ذخایر برف زمستان میسر شده. این موضوع در رابطه با محصولات MODIS به علت دارا بودن قدرت تفکیک مناسب و دسترسی آسان و رایگان از طریق اینترنت از جمله اهم امتیازات این سنجنده است که می‌تواند در روند برآورد سطح پوشش برف و برآورد مقدار آب معادل برف بسیار مؤثر و سودمند باشد؛ که با توجه به نتایج بدست آمده از مقایسه داده‌های زمینی و داده‌های سطح برف به دست آمده از سطح محصولات تصاویر MODIS به طور میانگین نشان‌دهنده دقت حدود ۹۲ درصد برای محصولات تصاویر MODIS است که دقت نسبتاً بالایی است به دلیل گستردگی بالای پوشش برف و تغییرات آن در فواصل زمانی کوتاه، مناسب است. داده‌های تصاویر راداری نیز به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالا و نفوذ در برف می‌توانند به صورت کاربردی در حوزه‌های آبریز کوچک و متوسط مورداستفاده قرار بگیرند. ضرایب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و مقادیر برآورد شده عمق برف ۸۵ درصد است. ظاهراً روابط همبستگی بین داده‌های زمینی و نقشه‌های

برآوردی از عمق برف میزان نسبتاً بالایی از همبستگی را نشان می‌دهند. یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار را می‌توان قدرت تفکیک مکانی بالا داده‌های TERRA SAR عنوان کرد. داده‌های مورد استفاده دارای قدرت تفکیک مکانی بالای ۳ متر در فرکانس‌های ۹/۵ مگاهرتز هستند. نتایج عمق سنجی برف با استفاده از تصاویر Terra SAR-X به نسبت بقیه ماهواره‌های برف سنجی دقیق‌تر است ولی چون زمان برداشت آن در نزدیک‌ترین حالت ۱۱ روز است به نسبت قدرت تفکیک زمانی پایین را از منطقه مورد مطالعه دارد با توجه اهمیت بالای نقشه عمق برف با دقت بالا یکی از روش‌های مناسب برای عمق سنجی برف با دقت بالا است نهایتاً در یک جمع‌بندی می‌توان به این نتیجه رسید که برای سنجش عمق برف مناسب‌ترین تصاویر، تصاویر رادار هستند که هرچه طول موج در محدوده میکروویو کمتر باشد بهترین نتایج را از تغییرات ارتفاعی سطح برف دارد عمق آب معادل موجود، به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب و یک پارامتر اصلی برای شبیه‌سازی وضعیت اقلیمی، حائز اهمیت هست. با توجه به نمودار ۴ به روابط همبستگی بین داده‌های زمینی و نقشه‌های برآوردی از عمق برف و آب معادل برف به صورت یک رابطه خطی نشان‌دهنده ضریب همبستگی به ۰.۷۷٪ است که میزان

10. Evans JR, Kruse FA. 2013. Snow depth retrieval using Ku-Band Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). In Proceedings: 36th Conference on Radar Meteorology, 16-20 September, Breckenridge.
11. Evans JR. 2013. Determining Snow Depth using Airborne Multi-Pass Interferometric Synthetic Aperture Radar, Doctoral Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, 198 pp.
12. Ferretti A, Monti-Guarnieri A, Prati C, Rocca F, Massonet D. 2007. InSAR principles-guidelines for SAR interferometry processing and interpretation, ESA Publications. 110 pp.
13. Foster J, Chang A, Hall D. 1997. Comparison of snow mass estimates from a prototype passive microwave snow algorithm, a revised algorithm and a snow depth climatology. *Remote Sensing of Environment*, 62(2): 132-142.
14. Galloway DL, Hudnut KW, Ingebritsen S, Phillips SP, Peltzer G, Rogez F, Rosen P. 1998. Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. *Water Resources Research*, 34(10): 2573-2585.
15. Gens R. 1999. Quality assessment of interferometrically derived digital elevation models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 1(2): 102-108.
16. Hall DK, Riggs GA, Salomonson VV, DiGirolamo NE, Bayr KJ. 2002. MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment*, 83(1): 181-194.
17. Hall DK, Riggs GA, Salomonson VV. 1995. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 54(2): 127-140.
18. Kelly RE, Chang AT, Tsang L, Foster JL. 2003. A prototype AMSR-E global snow area and snow depth algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2): 230-242.
19. Lyapustin A, Tedesco M, Wang Y, Aoki T, Hori M, Kokhanovsky A. 2009. Retrieval of snow grain size over Greenland from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 113(9): 1976-1987.
20. Marshall H-P, Birkeland K, Elder K, Meiners T. 2008. Helicopter-based microwave radar

بالایی از همبستگی را نشان می‌دهد یکی از موارد تأثیرگذار در میزان ضریب همبستگی داده‌های عمق و آب معادل برف مشاهداتی و برآوردی، میزان خطای موجود در اندازه‌گیری داده‌های زمینی است.

منابع مورد استفاده

۱. رسولی، ع. ا. و س. ادهمی. ۱۳۸۶. محاسبه آب معادل از پوشش برفی با پردازش تصاویر سنجنده MODIS. جغرافیا و توسعه، ۵(۳-۴): ۲۳-۳۶.
۲. طالبی، ع. ۱۳۹۲. بررسی امکان تعیین خصوصیات فیزیکی برف با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای نوری و ماکروویو (مطالعه موردی شیرکوه یزد). گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، دانشگاه یزد. ۱۵۰ صفحه.
۳. فتح‌زاده، ع. ۱۳۸۷. برآورد توزیع مکانی آب معادل برف در حوضه آبخیز کرج با استفاده از سنجنش از دور و مدل بیلان انرژی. رساله دکتری، دانشگاه تهران. ۱۴۳ صفحه.
۴. واجدیان، س. ۱۳۸۷. پایش دگرشکلی پوسته با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی رادار با دریاچه مصنوعی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران. ۱۱۲ صفحه.
5. Braunisch H, Wu B-I, Kong JA. 2000. Phase unwrapping of SAR interferograms after wavelet denoising. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International, IEEE, 24-28 July, Hilton Hawaiian Village, Honolulu Hawaii USA.*
6. Chander G, Markham BL, Helder DL. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM⁺, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5): 893-903.
7. Deghani M, Zoj MJV, Saatchi S, Biggs J, Parsons B, Wright T. 2009. Radar interferometry time series analysis of Mashhad subsidence. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 37(1): 147-156.
8. DeWalle DR, Rango A. 2008. Principles of snow hydrology. Cambridge University Press, 428 pp.
9. Esmaili M, Motagh M. 2009. Remote sensing measurements of land subsidence in Kerman Valley, Iran, 2003-2009. In: *AGU Fall Meeting Abstracts, American Geophysical Union, Fall Meeting 2009.*

- June, Friedrichshafen, Germany.
25. Shi J, Dozier J. 2000. Estimation of snow water equivalence using SIR-C/X-SAR. II. Inferring snow depth and particle size. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(6): 2475-2488.
 26. Wang X, Xie H, Liang T, Huang X. 2009. Comparison and validation of MODIS standard and new combination of Terra and Aqua snow cover products in northern Xinjiang, China. *Hydrological Processes*, 23(3): 419-429.
 27. Wegmuller U, Werner C. 1997. Retrieval of vegetation parameters with SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(1): 18-24.
 28. Zebker HA, Rosen PA, Hensley S. 1997. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B4): 7547-7563.
 - measurements in alpine terrain. In: *Proceedings of the International Snow Science Workshop*, Whistler, British Columbia, Canada.
 21. Oveisgharan S, Zebker HA. 2007. Estimating snow accumulation from InSAR correlation observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(1): 10-20.
 22. Richards J. 2009. *Remote Sensing with Imaging Radar*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 361 pp.
 23. Riggs G, Hall D. 2010. MODIS snow and ice products, and their assessment and applications. In: *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*. Springer, pp 681-707.
 24. Rott H, Cline D, Duguay C, Essery R, Haas C, Macelloni G, Malnes E, Pulliainen J, Rebhan H, Yueh S. 2008. CoReH₂O-A Ku-and X-band SAR mission for snow and ice monitoring. In: *Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, 7th European Conference on, 2-5



Calculating the physical properties of snow, using differential radar interferometry and TerraSAR-X and MODIS images

S. A. Alhossaini Almodaresi ^{1*}, J. Hatami ², A. Sarkargar ³

1. Assoc. Prof. College of Engineering, Department of RS & GIS, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran

2. MSc. Graduated of RS & GIS, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran

3. Assoc. Prof. Department of RS & GIS, Imam Hossein University, Tehran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 November 2015

Accepted 4 May 2016

Available online 20 August 2016

Keywords:

Snow depth

Active remote sensing

TerraSAR-X

MODIS

DInSAR techniques

ABSTRACT

The process of saving snow in mountainous areas of water resources is important. According to studies conducted by about 60 percent surface water and 57% groundwater flow in snowy areas. In recent years, the importance and applications of synthetic aperture radar data (SAR), according to a major advantage compared to other remote sensing systems are growing. In this study, using manufacturing satellites and MODIS algorithm Snow map snow cover and then with twelve radar image sensor TerraSAR-X and DInSAR in such a way that initially an image as the base image the rest of the images of the first image interferometry was performed between areas where snow cover the amount of displacement rather than results indicative of changes in depth of snow and then map snow depth maps of snow between October 2012 to May 2013. Mining was the next step, using Linear regression between the snow depth map of the DInSAR technique produced snow water equivalent depth data from ground stations were harvested SWE depth map of the results suggest overall accuracy of 91.3% and kappa coefficient consuming 84.45 Snow level map and map the depth of the snow by a factor of extension of 85% and RMSe of 2.78 to calculate the depth of snow water equivalent using the correlation between the data of snow depth derived from DInSAR and the ground water depth of snow a linear correlation coefficient of generalization 0.77 and RMSe of 2.97 was the result that was statistically at 99%.

* Corresponding author e-mail address: almodaresi@iauyazd.ac.ir

