

مقایسه دو روش NDSI و LSU در برآورد سطح برف به وسیله سنجنده MODIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سقز)

هیرش انتظامی - کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

سید کاظم علوی پناه* - استاد گروه سنجش از دور و GIS دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

علی درویشی بلورانی - استادیار گروه سنجش از دور و GIS دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

حمیدرضا متین فر - استادیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان

کامران چپی - استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۱۳ تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۹/۱۳

چکیده

آب حاصل از ذوب برف نقش عمده‌ای در تأمین آب مورد نیاز برای فعالیت‌های کشاورزی، منابع طبیعی، صنعتی، و نیازهای انسانی، به‌ویژه در مناطق کوهستانی، دارد. در مقایسه با روش‌های سنتی، کاربرد داده‌های سنجش از دور برای برآورد سطح پوشش برف قابلیت‌های بیشتری دارد. در این مطالعه، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و با به‌کارگیری دو الگوریتم NDSI و LSU، سطح پوشش برف حوضه سقز در استان کردستان محاسبه شده است. برای مقایسه دقت این روش‌ها، از تصاویر IRS، که دارای قدرت تفکیک مکانی بالایی هستند (۲۴ متر)، استفاده شد. بدین منظور، سطح برف در تصاویر هم‌زمان MODIS و IRS برآورد شد. سپس، در مناطق مختلف و یکسان در دو تصویر، بیکسلی‌های انتخاب‌شده، سطح برف، و رابطه خطی رگرسیونی بین نتایج حاصل از IRS و دو روش به‌کاررفته برای تصاویر MODIS جداگانه محاسبه شد. برای بررسی معنی‌دار بودن رابطه از آزمون آماری t (احتمال ۹۵ درصد) و رابطه رگرسیونی استفاده شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از رگرسیون، روش LSU همبستگی بیشتری (۹۸ درصد) دارد و در آزمون t نیز اختلاف معنی‌داری بین تصاویر IRS و روش LSU وجود ندارد. بنابراین، روش LSU، در مقایسه با روش NDSI، از دقت بیشتری در برآورد سطح برف برخوردار است.

کلیدواژه‌ها: تصویر مادیس، حوضه سقز (کردستان)، سطح پوشش برف، NDSI، LSU

مقدمه

بیش از ۳۰ درصد از سطح زمین به صورت فصلی پوشیده از برف است و ۱۰ درصد از این سطح با یخچال‌های دائمی پوشیده شده است (دوزیر، ۲۰۰۰). تقریباً ۵ درصد از بارش جهانی، که به سطح زمین می‌رسد، به شکل برف است (هاینکس، ۱۹۶۷). البته، در نواحی قطبی این مقدار به ۵۰ تا ۹۰ درصد می‌رسد (وینتر و هال، ۱۹۹۹). در مناطق کوهستانی، که بارش بیشتر به صورت برف است، تعیین و تخمین وسعت برف از لحاظ مقدار آب مورد انتظار از ذوب

برف- برای تولید رواناب و تأمین آب حوضه اطلاعات بارزشی است (سالومونسن و اپل، ۲۰۰۳). برف برای هیدرولوژی و اقلیم متغیر ژئوفیزیکی بسیار مهمی است (بارنت و همکاران، ۱۹۸۹؛ روس و والش، ۱۹۸۶؛ نولین و استرو، ۱۹۹۷). همچنین، پوشش برف، به سبب پتانسیل آن در ذخیره آب، برای آشامیدن، کشاورزی، تولید نیروی برق آبی و نقش آن در سیلاب بااهمیت است (رانگو، ۱۹۹۳؛ رانگو و شالابی، ۱۹۹۸). عایق ایجادشده به وسیله برف گیاهان را از درجه حرارت پایین زمستان محافظت می‌کند. بنابراین، محاسبه سطح پوشش برف، عمق برف، و آب معادل آن از اهمیت بسیاری برخوردار است (ریس، ۱۹۵۹؛ سامانتا، ۲۰۰۴).

در مقایسه با روش‌های سنتی، کاربرد داده‌های سنجنش از دور، به دلیل ارزان‌تر بودن، راحت‌تر بودن، و توانایی سنجنش منطقه بزرگ‌تر، بسیار سودمندتر است. هجدهم دسامبر ۱۹۹۹، ماهواره Terra با ترکیبی از پنج سنجنده پرتاب شد. یکی از این سنجنده‌ها MODIS^۱ است. Terra ماهواره‌ای خورشیدآهنگ است با ارتفاع اسمی ۷۰۵ کیلومتر. مدار آن قطبی و زمان محلی عبور آن از استوا ۱۰:۳۰ صبح است. هدف آن اندازه‌گیری دمای سطح، رنگ اقیانوس، پوشش گیاهی و جنگل، ابر و هواویزه‌ها، و پوشش برف است (کلین و همکاران، ۱۹۹۸). برآورد میزان پوشش برف یکی از محصولات ژئوفیزیکی به‌دست‌آمده از MODIS است. تنوع قدرت تفکیک مکانی، توانایی تشخیص ابر/ برف، و ایجاد پوشش سراسری MODIS پتانسیل به‌کارگیری آن را افزایش می‌بخشد (فلورارو و همکاران، ۲۰۰۶). این سنجنده دارای قدرت تفکیک رادیومتریکی ۱۲ بیت، تفکیک طیفی ۳۶ باند در طول موج‌های ۰/۴ میکرون تا ۱۴/۴ میکرون، قدرت تفکیک زمانی بالا (سیکل تکرار زمانی ۱ تا ۲ روز)، و قدرت تفکیک مکانی متوسط (۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر) است.

در گذشته، در زمینه برف‌سنجی مطالعاتی انجام گرفته است؛ می‌توان به مواردی اشاره کرد: فویا و همکاران (۲۰۰۲)، برای تخمین سطح پوشش برف در سطح زیر پیکسل، از داده‌های AVHRR^۲ استفاده کردند. در این تحقیق از روش PCA^۳ برای شناسایی خالص‌ترین پیکسل‌های تصویر استفاده شده است. سالومونسن و اپل (۲۰۰۶) به تخمین برف با استفاده از شاخص NDSI^۴ در تصاویر ETM^۵ و MODIS اقدام کردند. شفیع‌زاده مقدم (۱۳۸۷) از تصاویر ASTER^۶ برای برآورد سطح برف در تصاویر MODIS در منطقه سوربان استان فارس استفاده کرد. در این تحقیق از دو مدل ارتقای شاخص و ارتقای سطح پوشش برای ارتقای شاخص NDSI و سطح پوشیده‌شده از برف در هر پیکسل MODIS استفاده شده است. داداشی خانقاه (۱۳۸۷)، با استفاده از الگوریتم‌های مختلف، به مطالعه پوشش برف در حوزه‌های کرج و لنیان پرداخت. در این تحقیق روش NDSI با ۹۲ درصد دقت دقیق‌ترین روش انتخاب شده است. هدف از اجرای این تحقیق بررسی قابلیت تصاویر سنجنده MODIS در برآورد سطح برف و همچنین تعیین بهترین و دقیق‌ترین روش برآورد سطح برف است. الگوها و روش‌های گوناگونی برای تعیین سطح برف وجود دارد؛ بر اساس آنچه

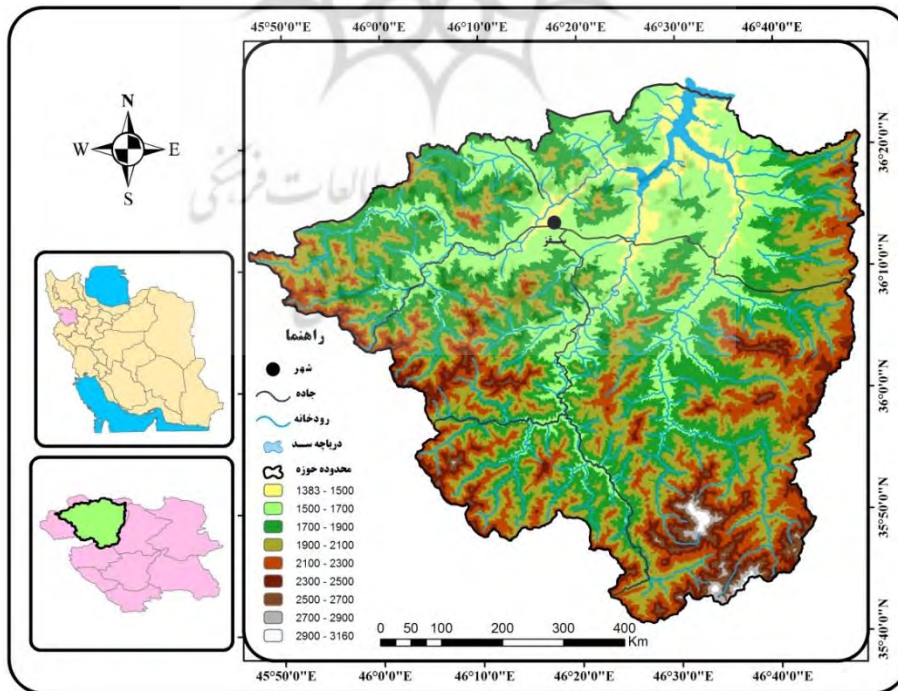
1. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
2. Advanced Very High Resolution Radiometer
3. Principal Component Analysis
4. Normalized Difference Snow Index
5. Enhanced Thematic Mapper Plus
6. Advanced Space borne Thermal and Reflection Radiometer

در مرور منابع توضیح داده شد، از بسیاری از این روش‌ها در مطالعات داخلی و خارجی استفاده شده است. در این تحقیق روش‌های بررسی سطح برف در دو رده اصلی Pixelbase و Subpixel در نظر گرفته شده است. بر این اساس، مهم‌ترین و معتبرترین الگو و روش از هر یک از دو حالت Pixelbase و Subpixel انتخاب و سطح برف در حوضه مورد مطالعه، مطابق این روش‌ها، محاسبه شده است. سپس، دقت این دو روش مقایسه شده است. فرضیه اصلی این تحقیق این است که الگوریتم^۱ LSU (از روش‌های Subpixel) در مقایسه با الگوریتم NDSI (از روش‌های Pixelbase) - به سبب کاربرد تصویر در حد زیر پیکسل - دقت بسیار زیادی در برآورد سطح برف دارد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز سقز در شمال استان کردستان و زاگرس شمالی قرار دارد. این حوضه یکی از زیرحوضه‌های مهم دریاچه ارومیه است. این حوضه، که حدوداً منطقه‌ای است شامل ۴۵۵۰ کیلومتر مربع، در طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۴۸ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه شمالی قرار دارد. این حوضه در منطقه‌ای کوهستانی، سردسیر، و مرطوب واقع شده، ارتفاع حداقل و حداکثر حوضه به ترتیب ۱۳۸۲ و ۳۱۶۰ متر، و ارتفاع متوسط حوضه ۲۲۶۰ متر است (شکل ۱). میانگین بارش سالانه آن حدود ۵۰۰ میلی‌متر است که حدود ۴۰ درصد آن به صورت برف است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای کردستان، ۱۳۸۷).



شکل ۱. نقشه مدل رقومی ارتفاع حوضه آبخیز سقز و موقعیت آن

کالیبراسیون داده‌ها

در این مطالعه، برای تعیین سطح پوشش برف منطقه از تصاویر سنجنده MODIS استفاده شد. پیش از آنکه پوشش برف محاسبه شود، تصاویر کالیبره شده و تصحیحات لازم بر روی آن‌ها انجام گرفته است. این تصحیحات شامل تصحیح هندسی و اتمسفری است.

تصاویر ماهواره‌ای دارای انحرافات است که مانع انطباق تصویر با زمین می‌شود. با استفاده از پارامترهای مداری و نقشه توپوگرافی ۲۵۰۰۰ منطقه مورد نظر، برای حذف جابه‌جایی‌های تصویر، تصحیح هندسی انجام شد که خطای RMS آن کمتر از ۰/۲ پیکسل بود. اتمسفر با ذراتی که دارد موجب پراکنش نور و پایین آمدن تابین در تصویر می‌شود. برای حذف این خطا و بالا بردن تابین تصویر، تصحیح اتمسفری انجام شد. این تصحیح با استفاده از الگوریتم FLAASH در نرم‌افزار ENVI صورت گرفت.

برآورد سطح برف

با توجه به اینکه ابر مانع رسیدن بخش عمده‌ای از اطلاعات طیفی مکان زیرین خود به سنجنده می‌شود و تقریباً خصوصیات انعکاس طیفی مشابه با برف دارد، تفکیک برف از ابر بسیار مهم است و باید از طبقه‌بندی نادرست ابر، به عنوان برف، جلوگیری کرد. بدین منظور، برای حذف ابر از ماسک ابر آزادی خواه^۲ استفاده شد. در این معیار انعکاس باند ۶ باید بیشتر از ۰/۲ باشد (سینگ و سینگ، ۲۰۰۱).

محققان تا کنون برای تخمین سطح برف الگوریتم‌های مختلفی را ارزیابی کرده‌اند. در این تحقیق، از دو الگوریتم شاخص تفاضلی نرمال شده برف (NDSI) و الگوریتم LSU برای تخمین سطح برف استفاده شد. در روش LSU فرض بر آن است که رادیانس‌های اندازه‌گیری شده به وسیله سنجنده، ترکیبی خطی از رادیانس‌های منعکس شده به وسیله عضوهای (EM)^۳ است که هر یک علامت طیفی منحصر به فردی دارند (سابول و همکاران، ۱۹۹۲). هر EM بیانگر بازتاب پیکسل‌های خالص مربوط به یک پدیده است. در این روش، نخست باندهای مناسب برای جداسازی طیفی پدیده‌ها انتخاب شد. سپس، بر اساس انعکاس طیفی سه پدیده، به تعیین EMها اقدام شد و چند پدیده از جمله برف با انتخاب پیکسل خالص آن پدیده‌ها مشخص شد. سرانجام، خروجی الگوریتم LSU چهار تصویر است که یکی از آن‌ها RMS است و بقیه مربوط به عوارض سطحی‌اند که درصد هر عارضه را در هر پیکسل نشان می‌دهند. در این روش، مقدار برف هر پیکسل در دامنه‌ای بین صفر و یک قرار دارد که احتمال وجود برف در هر پیکسل را نشان می‌دهد. بنابراین، برای تعیین سطح برف آستانه‌گذاری انجام شد. برای افزایش دقت این روش، درصد بازتاب برف به طبقاتی با دامنه ۰/۱ تفکیک شد (۰-۰/۱، ۰/۱-۰/۲...، ۰/۲-۰/۳، ۰/۳-۰/۴، ۰/۴-۰/۵، ۰/۵-۰/۶، ۰/۶-۰/۷، ۰/۷-۰/۸، ۰/۸-۰/۹، ۰/۹-۱). سپس، مقدار برف هر یک از این طبقات جداگانه، با توجه به درصد آن دسته، محاسبه شد. سرانجام، برف به دست آمده برای هر فاصله در عدد وسط آستانه مربوطه ضرب شد تا سطح برف

1. Root Mean Square
2. Mask Liberal Cloud
3. Endmember

هر طبقه به دست آید. برای محاسبه سطح برف در هر تصویر، تصویر مورد نظر به فرمت قابل استفاده در GIS^۱ درآمد و در محیط نرم افزار ArcGIS مساحت برف محاسبه شد. سرانجام، مجموع برف همه طبقات مقدار نهایی سطح برف حوضه است که مطابق با رابطه ۱ محاسبه شده است.

$$S = \sum_{i=1}^n s_i x_i \quad (1)$$

$$x_i = \frac{a_i + b_i}{2}$$

که S مساحت برف تصویر، s_i مساحت نهایی برف در هر طبقه بعد از اعمال آستانه، x_i ضریب اعمال شده برای هر طبقه، و a_i و b_i به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار آستانه است.

شاخص NDSI، بر اساس رابطه ۲، از تفاوت بازتاب باندهای ۴ (۵۴۵ - ۵۶۰ نانومتر) و ۶ (۱۶۲۵ - ۱۶۲۸ نانومتر) سنجنده MODIS به دست می آید (کلین و همکاران، ۱۹۹۸).

$$NDSI = \frac{MODIS4 - MODIS6}{MODIS4 + MODIS6} \quad (2)$$

در شاخص NDSI برای تعیین نقشه برف سه معیار تعیین می شود: معیار اول تعیین آستانه برای NDSI است. مقدار NDSI به دست آمده برای پیکسل های مختلف متغیر است که دامنه ای بین صفر و یک را شامل می شود. در مطالعات قبلی از آستانه ۰/۴ استفاده شده است و پیکسل هایی با NDSI بالای ۰/۴ برای محاسبه سطح برف در نظر گرفته شده است (کلین و همکاران، ۱۹۹۸). در این تحقیق، برای افزایش دقت، آستانه ۰/۴ حذف شد و مانند روش قبلی بر اساس مقدار NDSI پیکسل ها در ۱۰ طبقه (۱ - ۰/۹، ۰/۲ - ۰/۱، ۰/۱ - ۰،) طبقه بندی شدند تا پیکسل ها با هر مقدار برف در سطح نهایی برف لحاظ شوند. سرانجام، برف به دست آمده برای هر فاصله در عدد وسط آستانه مربوطه ضرب شد تا سطح برف هر طبقه به دست آید (طبق رابطه ۱). معیار دوم برای تعیین برف مقدار انعکاس در باند ۲ (۸۴۱ - ۸۷۶ نانومتر) است که باید بزرگتر از ۱۱ درصد باشد تا به عنوان برف شناخته شود. این معیار در تمیز دادن آب و برف کمک می کند، زیرا آب فقط در باندهای مرئی بازتابش دارد و قابلیت زیادی در جذب در باندهای مادون قرمز دارد، که ممکن است NDSI بالایی داشته باشد (کلین و همکاران، ۱۹۹۸).

معیار سوم بازتاب در باند ۴ MODIS (۵۴۵ - ۵۶۵ نانومتر) است. اگر بزرگتر یا مساوی ۱۰ درصد باشد، می توانیم آن پیکسل را برف بدانیم. اگر کمتر از ۱۰ درصد باشد، برف نیست، چون انعکاس برف در این باند بالاست (کلین و همکاران، ۱۹۹۸).

سرانجام، با استفاده از نرم افزار ArcGIS برای هر یک از سه معیار بالا یک تصویر استخراج شد. سپس، با تلفیق این سه تصویر، سطح برف برای هر طبقه جداگانه محاسبه شد. مجموع سطح برف طبقات سطح برف نهایی حوضه است.

مقایسه دو روش

با توجه به قدرت تفکیک مکانی پایین سنجنده MODIS، برای بررسی دقت آن به یک واقعیت زمینی نیاز است. به

سبب فقدان داده‌های زمینی، از تصاویر IRS^۱ (سنجنده LISSIII) با قدرت تفکیک مکانی ۲۴ متر استفاده شد. در این مطالعه، با استفاده از دو شاخص NDSI و LSU، پیکسل‌های ۵۰۰ متر MODIS به عنوان برف یا غیر برف تعیین شدند. سپس، نتایج هر روش با سطح برف حاصل از تصاویر IRS، که با روش حداکثر احتمال (از روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده) در نرم‌افزار ENVI به دست آمده، مقایسه شد. برای این کار در قسمت‌های مشابه دو تصویر MODIS و IRS، یازده نمونه جدا شد و سطح برف حاصل از دو سنجنده MODIS (دو روش LSU و NDSI) و IRS در این نمونه‌ها محاسبه و با هم مقایسه شد. برای مقایسه آن‌ها از دو روش آزمون t و ضریب رگرسیون استفاده شد.

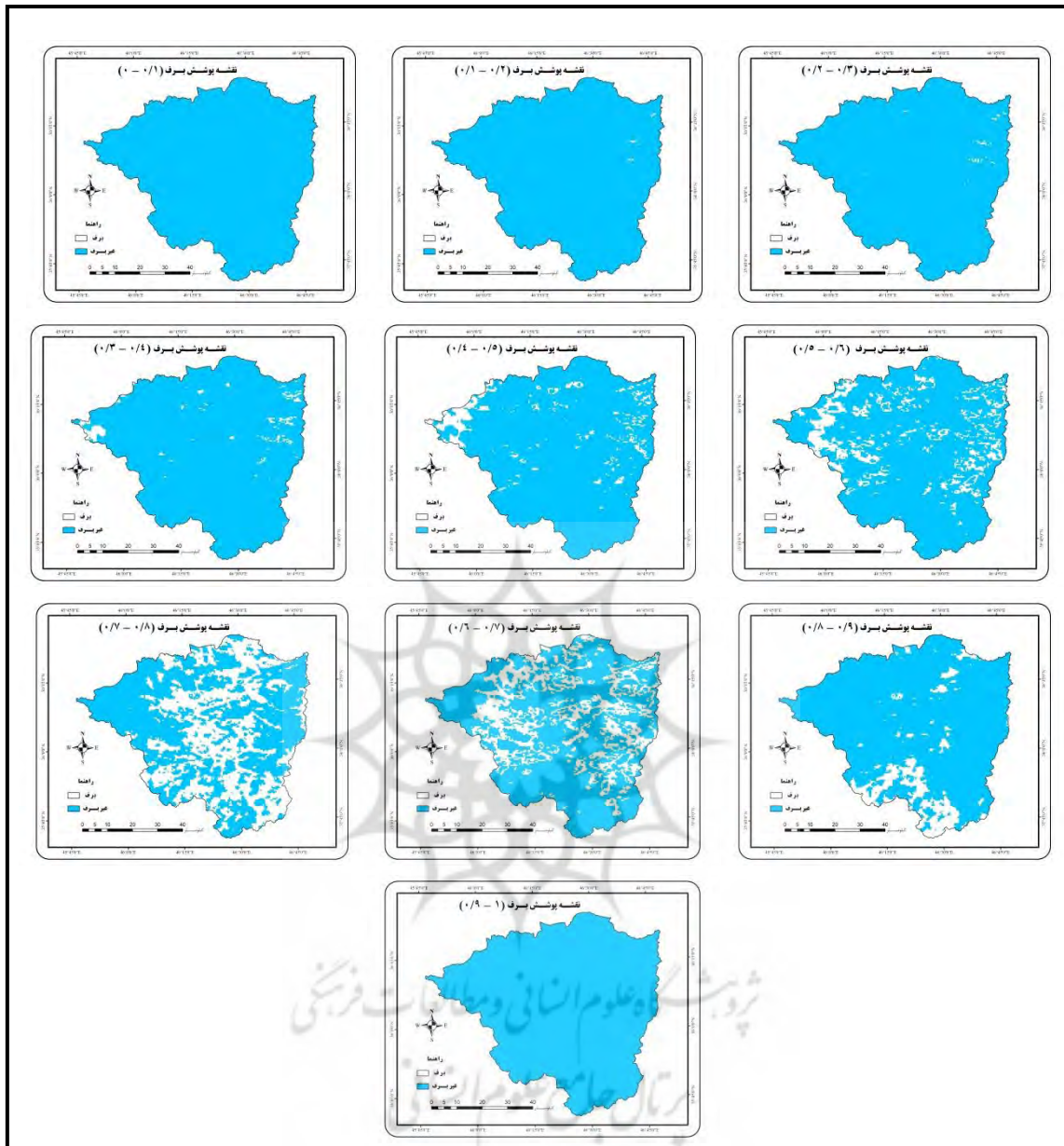
یافته‌های پژوهش

نتایج محاسبه سطح برف با روش NDSI

در این روش، نخست الگوریتم NDSI اجرا شد. سپس، مساحت پیکسل‌های موجود در هر یک از طبقات NDSI محاسبه شد. با اعمال آستانه‌هایی روی باند ۲ و باند ۴ و ترکیب آن‌ها با مساحت هر طبقه، مقدار سطح برف هر طبقه بدون لحاظ کردن مقدار NDSI به دست آمد. سرانجام، با ضرب این مساحت‌ها در مقدار میانگین هر طبقه، مقدار NDSI اعمال شد و سطح واقعی برف در هر طبقه محاسبه گردید. جدول ۱ و شکل ۲ نتایج به دست آمده از این روش را نشان می‌دهند.

جدول ۱. نحوه محاسبه سطح برف با شاخص NDSI

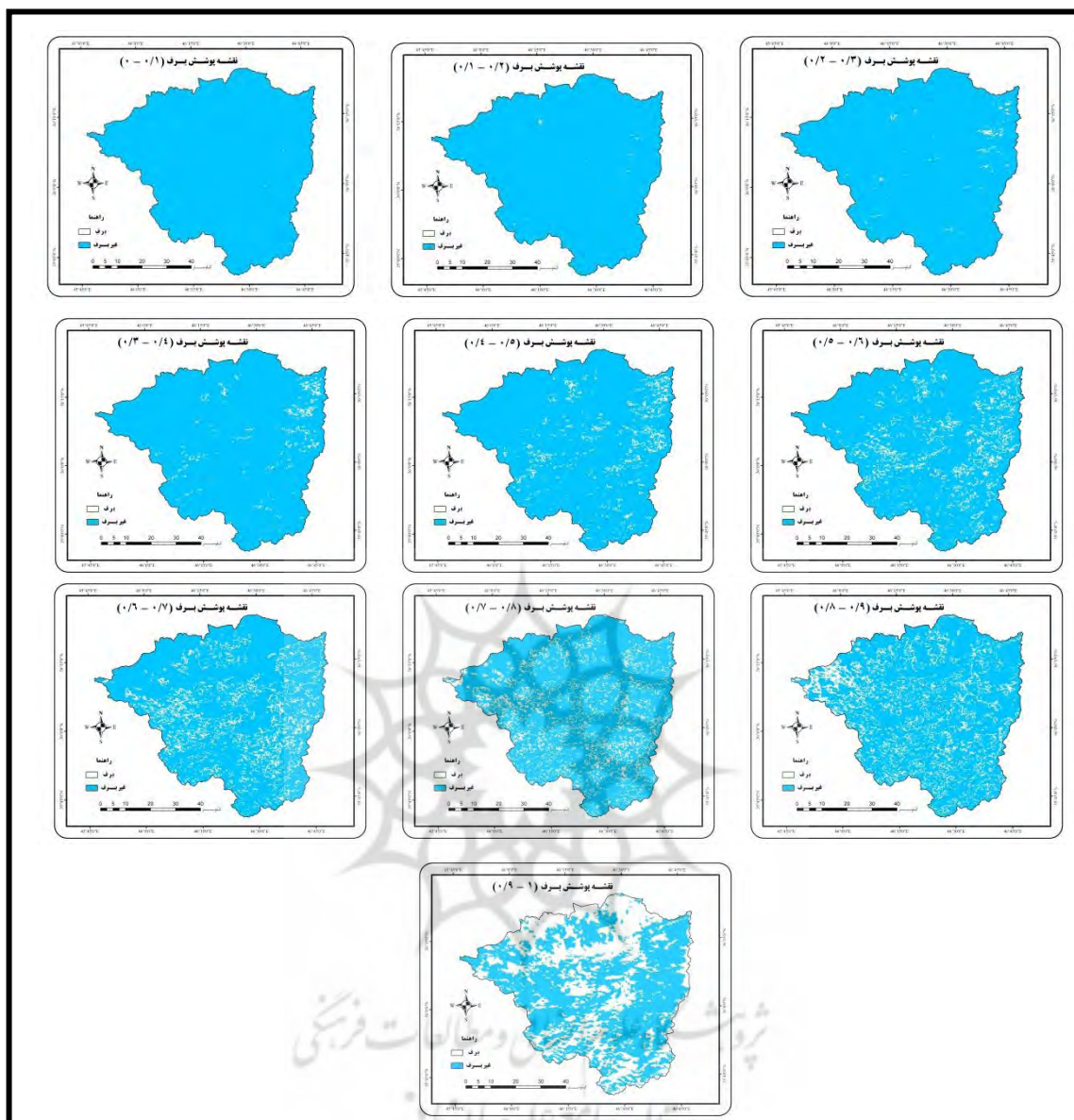
سطح نهایی برف S_i (متر مربع)	روش محاسبه	ضریب هر آستانه x	سطح برف (متر مربع) S_i	درصد برف (آستانه‌ها)
۰	$S_i = x_i * s_i$	۰/۰۵	۰	۰ - ۰/۱
۶۹۳۷۵۰	$S_i = x_i * s_i$	۰/۱۵	۴۶۲۵۰۰۰	۰/۱ ° ۰/۲
۳۱۹۱۱۲۵	$S_i = x_i * s_i$	۰/۲۵	۱۲۷۶۴۴۹۹	۰/۲ ° ۰/۳
۳۴۵۶۶۰۷۱	$S_i = x_i * s_i$	۰/۳۵	۹۸۷۶۰۲۰۲	۰/۳ ° ۰/۴
۱۲۳۸۳۹۰۶۱	$S_i = x_i * s_i$	۰/۴۵	۲۷۵۱۹۷۹۱۴	۰/۴ ° ۰/۵
۳۳۷۷۸۳۵۲۱	$S_i = x_i * s_i$	۰/۵۵	۶۱۴۱۵۱۸۵۶	۰/۵ ° ۰/۶
۸۱۴۳۱۳۷۱۸	$S_i = x_i * s_i$	۰/۶۵	۱۲۵۲۷۹۰۳۳۶	۰/۶ ° ۰/۷
۱۳۴۶۱۳۷۶۰۱	$S_i = x_i * s_i$	۰/۷۵	۱۷۹۴۸۵۰۱۳۵	۰/۷ ° ۰/۸
۴۲۲۹۹۰۵۶۰	$S_i = x_i * s_i$	۰/۸۵	۴۹۷۶۳۵۹۵۳	۰/۸ ° ۰/۹
۰	$S_i = x_i * s_i$	۰/۹۵	۰	۰/۹ ° ۱
$S = \sum S_i = ۳۰۸۳۵۱۵۴۰۷$			کل برف تصویر به روش NDSI (متر مربع)	



شکل ۲. برآورد پوشش برف با روش NDSI (هر یک از تصاویر مقدار برف موجود در یک طبقه را نشان می‌دهد).

نتایج محاسبه سطح برف با روش LSU

در روش LSU، از سطح زیر پیکسل برای تعیین سطح برف استفاده می‌شود. در این روش، پس از انتخاب Endmemberها (برف، آب، و سایر پدیده‌ها)، چهار تصویر به دست آمد که یکی از آنها سطح برف را نشان می‌دهد. این تصویر، سطح برف را برای هر پیکسل به صورت درصد از صفر تا ۱۰۰ نشان می‌دهد. همان طور که توضیح داده شد، پس از طبقه‌بندی پیکسل‌ها، مساحت هر طبقه محاسبه و در عدد وسط آن ضرب شد. جدول ۲ و شکل ۳ نتایج به دست آمده از این روش را نشان می‌دهند.



شکل ۳. برآورد پوشش برف با روش LSU (هریک از تصاویر مقدار برف موجود در یک طبقه را نشان می‌دهد).

نتایج مقایسه دو روش برآورد برف

برای مقایسه صحت دو روش LSU و NDSI تصویر ماهواره‌ای MODIS، از تصویر IRS همان روز، که دارای قدرت تفکیک مکانی بهتر (۲۴ متر) است، استفاده شد. برای این مقایسه، در قسمت‌های مختلف منطقه، نمونه‌هایی از هر دو تصویر جدا شد و سطح برف آن‌ها محاسبه گردید. در سطح تصویر، ۱۱ نمونه با ابعاد متغیر در نظر گرفته شد؛ جدول ۳ نتایج محاسبات را نشان می‌دهد. برای مقایسه نتایج این دو روش از دو آزمون به شرح زیر استفاده شد.

جدول ۲. نحوه محاسبه سطح برف با شاخص LSU

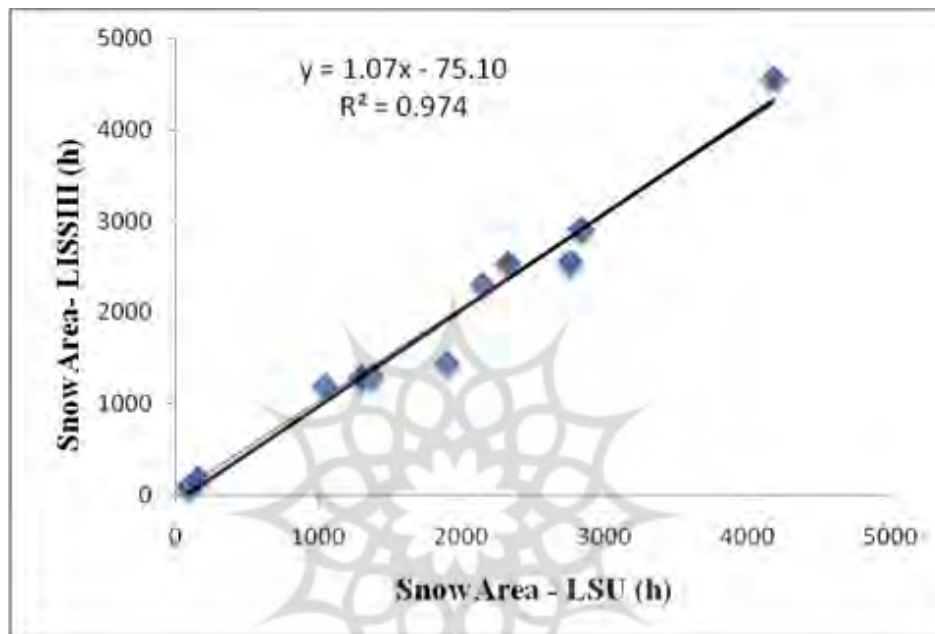
سطح برف (متر مربع) S_i	روش محاسبه $S_i = x_i * s_i$	ضریب هر آستانه x	سطح برف (متر مربع) S_i	درصد برف (آستانه‌ها)
۳۱۲۵۰	$S_i = x_i * s_i$	۰/۰۵	۶۲۵۰۰۰	۰ - ۰/۱
۹۷۹۹۹۹	$S_i = x_i * s_i$	۰/۱۵	۶۵۳۳۳۳۲	۰/۱ ° ۰/۲
۸۲۰۲۲۲۱	$S_i = x_i * s_i$	۰/۲۵	۳۲۸۰۸۸۱۷	۰/۲ ° ۰/۳
۳۳۹۲۵۰۶۶	$S_i = x_i * s_i$	۰/۳۵	۹۴۰۷۱۶۱۹	۰/۳ ° ۰/۴
۹۰۲۷۵۷۰۱	$S_i = x_i * s_i$	۰/۴۵	۲۰۰۶۱۲۶۶۹	۰/۴ ° ۰/۵
۱۹۹۲۹۵۱۸۴	$S_i = x_i * s_i$	۰/۵۵	۳۶۲۳۵۴۸۸۱	۰/۵ ° ۰/۶
۳۶۶۰۸۷۳۴۰	$S_i = x_i * s_i$	۰/۶۵	۵۶۳۲۱۱۲۹۳	۰/۶ ° ۰/۷
۴۹۹۴۲۷۸۳۰	$S_i = x_i * s_i$	۰/۷۵	۶۶۵۹۰۳۷۷۴	۰/۷ ° ۰/۸
۶۲۵۳۵۱۸۸۷	$S_i = x_i * s_i$	۰/۸۵	۷۳۵۷۰۸۱۰۲	۰/۸ ° ۰/۹
۱۷۹۵۰۹۲۷۶۹	$S_i = x_i * s_i$	۰/۹۵	۱۸۸۹۵۷۱۳۳۶	۰/۹ ° ۱
$S = \sum S_i = ۳۶۱۷۶۶۹۲۴۷$		کل برف تصویر به روش LSU		

جدول ۳. مقدار سطح برف در نمونه‌های جداشده از تصاویر MODIS و IRS

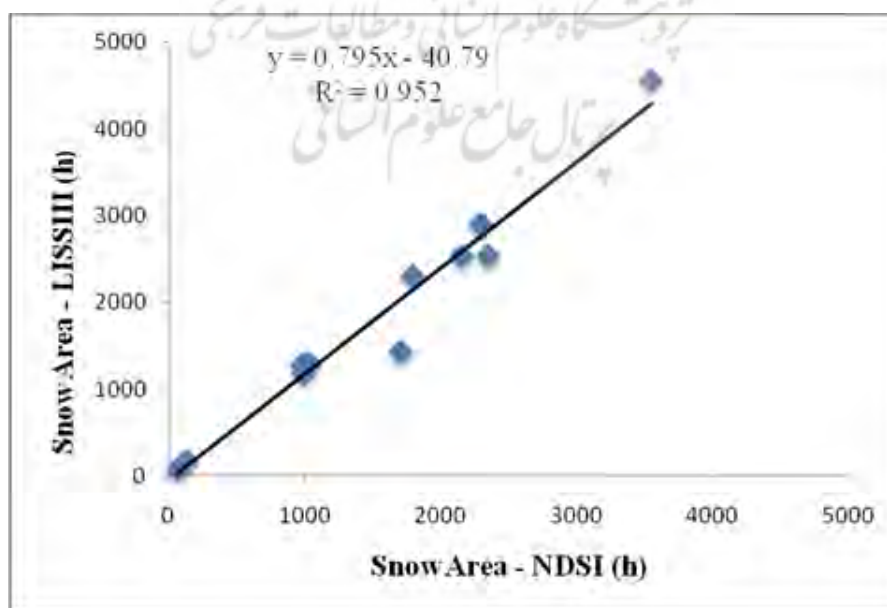
شماره نمونه	سطح برف حاصل از تصویر MODIS با روش LSU (هکتار)	سطح برف حاصل از تصویر MODIS روش NDSI (هکتار)	سطح برف حاصل از تصویر IRS (هکتار)
۱	۸۷	۶۷	۸۵
۲	۱۵۰	۱۲۹	۱۷۶
۳	۱۰۳۹	۹۹۳	۱۱۹۱
۴	۱۲۹۲	۹۸۱	۱۲۸۵
۵	۱۳۶۶	۱۰۴۲	۱۲۹۱
۶	۱۸۹۴	۱۷۱۰	۱۴۳۸
۷	۲۱۴۰	۱۷۹۸	۲۳۰۱
۸	۲۳۲۱	۲۳۴۷	۲۵۳۶
۹	۲۷۵۴	۲۱۵۸	۲۴۴۵
۱۰	۲۸۳۰	۲۲۹۵	۲۹۰۴
۱۱	۴۱۷۶	۳۵۵۱	۴۵۵۳

۱. همبستگی و رگرسیون

بر اساس نمونه‌های محاسبه‌شده، با استفاده از نرم‌افزار آماری Excel، نمودار پراکنش سطح برف به‌دست‌آمده از تصویر IRS در مقابل برف به‌دست‌آمده از دو روش NDSI و LSU (تصاویر MODIS) به صورت جداگانه ترسیم شد. بر اساس این نمودار پراکنش‌ها برای هر مقایسه یک رابطه خطی رگرسیونی به‌دست آمد و مقدار همبستگی تصاویر نیز با سطح معنی‌داری ۵ درصد با استفاده از همان نرم‌افزار محاسبه شد (شکل‌های ۴ و ۵).



شکل ۴. مقایسه محاسبه پوشش برف سنجنده LISSIII با روش LSU سنجنده MODIS



شکل ۵. مقایسه محاسبه پوشش برف سنجنده LISSIII با روش NDSI سنجنده MODIS

بر اساس نتایج، رابطه خطی بین روش NDSI و تصویر IRS به صورت رابطه ۳ است:

$$Y = 0.795X + 40.79 \quad (3)$$

این رابطه همبستگی بالای این دو را نشان می‌دهد که به بیش از ۹۶ درصد می‌رسد.

همچنین رابطه خطی بین روش LSU و تصویر IRS به صورت رابطه ۴ است:

$$Y = 1.07X + 75.10 \quad (4)$$

در این رابطه همبستگی بیش از ۹۸ درصد است.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه فوق، هر دو روش برآورد برف تصویر MODIS از دقت بسیار زیادی

برخوردارند، ولی روش LSU در مقایسه با روش NDSI دقت بیشتری دارد.

۲. روش آزمون t

برای مقایسه این دو روش از بررسی‌های آماری نیز استفاده شد. بر این اساس، آزمون t جفت‌شده در سطح احتمال ۹۵ درصد بر روی داده‌ها اعمال شد. توزیع فراوانی که در نمونه‌های کوچک استفاده می‌شود به توزیع t معروف است. این توزیع پخش فراوانی نمره‌های معیار در نمونه‌های کوچک را نشان می‌دهد (رضایی، ۱۳۹۱).

مقدار t جدول در سطح احتمال ۹۵ درصد (سطح معنی‌دار ۰/۰۵) و درجه آزادی ۱۰ برابر ۲/۲۲۸ است. در هر مقایسه‌ای اگر t به‌دست‌آمده از t جدول بزرگ‌تر باشد، اختلاف آن‌ها معنی‌دار است و برعکس اگر t به‌دست‌آمده از t جدول کوچک‌تر باشد، اختلاف آن‌ها معنی‌دار نیست (نتیجه قابل قبول است). نتایج این آزمون، که در جدول ۴ نشان داده شده، با t جدول مقایسه شد.

جدول ۴. مقایسه دو روش NDSI و LSU با استفاده از آزمون t

مقایسه‌ها	میانگین	انحراف معیار	مقدار t	درجه آزادی	مقدار P
LISSIII - NDSI	۲۹۴	۳۳۶/۵۶	۲/۸۹	۱۰	۰/۰۱۶
LISSIII - LSU	۲۳/۲۷	۲۲۲/۴۵	۰/۳۴۷	۱۰	۰/۷۳۶

مقایسه LISSIII – NDSI

احتمال معنی‌دار بودن آن برابر ۰/۰۱۶ است و مقدار t آن ۲/۸۹ است. بنابراین، چون ۲/۸۹ از ۲/۲۲۸ بزرگ‌تر و ۰/۰۱۶ از ۰/۰۵ کوچک‌تر است، اختلاف آن‌ها معنی‌دار است.

مقایسه LISSIII – LS

احتمال معنی‌دار بودن آن برابر ۰/۷۳۶ است و مقدار t آن ۰/۳۴۷ است. بنابراین، چون ۰/۳۴۷ از ۲/۲۲۸ کوچک‌تر و ۰/۷۳۶ از ۰/۰۵ بزرگ‌تر است، اختلاف آن‌ها معنی‌دار نیست.

نتایج این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که روش LSU در مقایسه با روش NDSI، از دقت بیشتری در محاسبه سطح برف حوضه برخوردار است.

بحث و نتیجه‌گیری

کاربرد تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک‌های سنجش از دور، GIS، و مدل‌های آماری در بررسی و پایش پدیده‌های زمینی، مانند برف، با توجه به سریع و ارزان بودن آن‌ها، اهمیت فراوانی دارد. در این میان، بهره‌گیری از تصاویری با قدرت تفکیک مکانی و زمانی زیاد، می‌تواند بسیار مفید باشد. با توجه به اهمیت برف در مسائل مختلف زیست‌محیطی، در این تحقیق سعی شد، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، سطح برف محاسبه و دقیق‌ترین روش برآورد برف تعیین شود. بدین منظور، از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و IRS استفاده شد. بر اساس نتایج این تحقیق، استفاده از روش‌هایی که سنجش برف را در حد زیر پیکسل انجام می‌دهند موجب افزایش توانایی برف‌سنجی می‌شود (داداشی خانقاه در سال ۱۳۸۷ روش NDSI را دقیق‌ترین روش معرفی کرده است). در بیشتر مطالعات پیشین، که در داخل و خارج از کشور انجام شده، منحصراً از تصاویر سنجنده MODIS استفاده شده؛ در برخی موارد نیز از تصاویری با قدرت تفکیک بسیار زیاد مانند ETM و ASTER برای برآورد دقت تصاویر MODIS استفاده شده است. در این مطالعه از تصاویر IRS، که قدرت تفکیک بسیار زیادی دارند و قابلیت فراوانی در برف‌سنجی دارند، برای بررسی دقت استفاده شد. برخلاف مطالعات پیشین، که در بیشتر آن‌ها از یک الگوریتم استفاده شده است، در مطالعه حاضر از دو الگوریتم مجزا استفاده شد. همچنین، در این مطالعه همه پیکسل‌ها، حتی آن‌هایی که درصد اندکی برف داشتند، با همان نسبت در محاسبه لحاظ شدند؛ در حالی که در بیشتر مطالعات پیشین فقط پیکسل‌هایی که بیش از ۵۰ درصد برف دارند به عنوان برف و به صورت صد در صد برف در نظر گرفته شده است. سرانجام، نتیجه می‌گیریم که استفاده از سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای در برآورد برف نتایج قابل قبولی در بر دارد و با کاربرد آن می‌توان مشکلات موجود در برآورد سنتی برف را تا حد زیادی برطرف کرد.

منابع

داداشی خانقاه، س. (۱۳۸۷). بررسی پوشش برف در حوضه کرج و لتیان با به‌کارگیری الگوریتم‌های پردازش تصویر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی.

رضایی، ع. (۱۳۹۱). مفاهیم آمار و احتمالات، نشر مشهد.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای کردستان (۱۳۸۷). آمار سالانه استان کردستان.

شفیع‌زاده مقدم، ح. (۱۳۸۷). امکان سنجی ارتقای توان سنجنده MODIS با به‌کارگیری هم‌زمان سنجنده ASTER جهت برآورد مساحت سطح برف، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

Barnett, T.P.; Menil, L.D.; Schlese, U.; Roeckner, E. and Latif, M. (1989). The Effect of Eurasian Snow Covers on Regional and Global Climatic Variations, *Journal of Atmospheric Science*, 46(5): 661-685.

Dadashi Kh, S. (2008). Detection Snow Cover using Image Processing Algorithms in Karaj and Latyan Watershed, Master Thesis, Shahid Beheshti University.

- Dozier, J. (2000). *Remote Sensing of Alpine Snow Cover Invisible and Near-Infrared Wavelengths*, NASA Goddard Space Flight Center, USA.
- Flueraru, C.; Stancalie, G.; Savin, E. and Craciuescu, V. (2006). Validation of MODIS Snow Cover Products in Romania, Methodology and conclusions, *Paper Presented at the 9th AGILE Geographic information Science*, Visegrad Hungary, 21-28.
- Foppa, N.; Wunderle, S. and Hauser, A. (2002). *Spectral Unmixing of NOAA-AVHRR Data for Snow Cover Estimation*, Proceedings of EASEL-LISSIG-Workshop Observing our Cryosphere from Space, Bern, pp.155-162.
- Hoinkes, H. (1967). Glaciology in the International Hydrological Decade, *IAHS Commission on Snow and Ice: Reports and Discussions*, 79: 7-16.
- Klein, A.G.; Hall, D.K. and Riggs, G.A. (1998). Global Snow Cover Monitoring Using MODIS, *27th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 8-12 June 1998, Tromsø, 363-36.
- Kurdistan Regional Water Authority (2008). *Annual Statistics Kurdistan*.
- Nolin, A.W. and Stroeve, J. (1997). The Changing Albedo of the Greenland Ice Sheet: *Implications for Climate Modeling*. *Annals of Glaciology*, 25:51-57.
- Rango, A. (1993). Snow Hydrology Processes and Remote Sensing, *Hydrological Processes*, 7(2):121-138.
- Rango, A. and Shalaby, A. (1998). Operational Applications of Remote Sensing in Hydrology: Success, Prospects and Problems, *Hydrological Sciences Journal (Journal Des Sciences Hydrologiques)*, 43(6): 947-968.
- Rees, G.W. (1959). *Remote Sensing of Snow and Ice*, Cambridge University England.
- Rezaei, A. (2012). *Probability and Statistics*, Mashhad Publishing Co.
- Ross, B. and Walsh, J. (1986). Synoptic-Scale Influences of Snow Cover and Sea Ice, *Monthly Weather Review*, 114(10):1795-1810.
- Sabol, D.E.; Adams, J.B. and Smith, M.O. (1992). Quantitative Subpixel Spectral Detection of Targets in Multispectral Images, *Journal of Geophysical Research*, 97: 2659-2672.
- Salomonson, V.V. and Appel, I. (2003). Estimating Fractional Snow Cover from MODIS using the Normalized Difference Snow Index, *Elsevier Journal*, 89: 351-360.
- Salomonson, V.V. and Appel, I. (2006). Development of the Aqua MODIS NDSI Fractional Snow Cover Algorithm and Validation Results, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7).
- Samantha, K.M. (2004). *Hydrological Modeling Using MODIS Data for Snow Covered Area in the Northern Boreal Forest of Manitoba*, Thesis for the Degree of Masters of Science, University of Calgary.
- Shafizade, M.H. (2008). Feasibility Promote the Power of MODIS Sensor use Simultaneous ASTER Images to Estimate the Surface Area of Snow, Master Thesis, Tarbiat Modares University.
- Singh, P. and Singh, V.P. (2001). *Snow and Glacier Hydrology*, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Winther, J.G and Hall, D.K. (1999). Satellite-Derived Snow Coverage Related to Hydropower Production in Norway: Present and Future, *International Journal of Remote Sensing*, 20(15): 2991-3008.