

جغرافیا و توسعه - شماره ۱۰ - پاییز و زمستان ۱۳۸۶

صص: ۲۳-۳۶

وصول مقاله: ۱۳۸۵/۱۲/۲۰

تأیید نهایی: ۱۳۸۶/۸/۱۹

## محاسبه آب معادل از پوشش برفی با پردازش تصاویر سنجنده MODIS<sup>۱</sup>

سلام ادهمی  
کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS

دکتر علی اکبر رسولی  
دانشیار مرکز GIS دانشگاه تبریز

### چکیده

در مناطق کوهستانی شمال غرب ایران، بویژه در فصول سرد سال، بارش برف به عنوان مهمترین عنصر اقلیمی شناخته می شود. آب ذوب معادل ناشی از پوشش برفی می تواند، با اعمال عکس العمل های متقابل و مرتبط به هم در یک حوضه ی آبریز، سایر پارامترهای هیدرولوژیکی نظیر: جریان آب های سطحی، نحوه ی تغذیه سفره های آب زیرزمینی، وقوع سیلاب و پوشش گیاهی را متأثر سازد.

تحقیق در محدوده ی حوضه ی آبریز «آجی چای» که از دو کوهستان مهم سیلان و سهند سرچشمه گرفته و به دریاچه ارومیه ختم می گردد، صورت گرفته است. به منظور طراحی نقشه ی برف، تصاویر ماهواره ای سنجنده MODIS در محیط نرم افزار ERDAS Imagine بر اساس الگوریتم های مختلف به صورت مرحله ای پردازش شد. سپس، در محیط نرم افزار ArcGIS ضمن بهره گیری از داده های نقطه ای ثبت شده توسط ایستگاه های برف سنجی، سایر عملیات تحلیل مکانی نظیر: تبدیل نقشه های توپوگرافی آنالوگ به فرمت رقومی، ایجاد مدل ناهمواری منطقه، استخراج اتوماتیک محدوده ی حوضه ی آبریز و طراحی چندضلعی های «تیسن» به ترتیب اجرا شد.

با همپوشانی منطقی چندضلعی های حاصله و نقشه سطح پوشش برف در محدوده تأثیر هر ایستگاه زمینی در محیط GIS، میزان همبستگی بین مقادیر بارش برف ثبت شده، مساحت هر کدام از زیرحوضه ها و آب ذوب معادل مثبت ارزیابی شد و این مقدار برای سال آبی ۸۴-۱۳۸۳ (۲۰۰۵ میلادی) در کل حوضه (با مساحت ۳۶۳۲۴۹ هکتار) حدود شصت و شش میلیون مترمکعب محاسبه گردید.

1- Moderate Resolution Imaging Spectro-Radiometer

نتایج نهایی نشان دهنده قابلیت پردازش تصاویر MODIS در روند مطالعه پوشش برفی می باشد، چرا که این سنجنده دارای تعداد باندهای بیشتر، میزان تفکیک مکانی قابل استناد و سری های زمانی متوالی است. بنابراین، با اجرای الگوریتم اتوماتیک برفی می توان تصاویر ماهواره ای را به صورت بهنگام پایش و خصوصیات هیدروکلیماتیک حوضه های آبریز در مقیاس منطقه ای را جهت کاربردهای متنوع پردازش نمود.

کلیدواژه ها: حوضه ی آبریز آجی چای، سنجش از دور، تصاویر MODIS، الگوریتم نقشه برفی، سطح پوشش برف، آب ذوب معادل و GIS

### مقدمه

برآورد دقیق سطح پوشش برف و حجم آب معادل مربوطه، به عنوان یکی از عملیات محوری و اساسی در زمینه مدیریت منابع آب، بویژه در مناطقی که بارش برف سهم زیادی در نزولات جوی دارد، محسوب می شود. بنابراین، مدل سازی ویژگی های سطحی بارش برف از دیدگاه هیدروکلیماتی نقش بسزایی در زمینه های مختلف نظیر: مدیریت حوضه های آبخیز، کنترل سیلاب، فرسایش خاک، پیش بینی خشکسالی و تأمین آب مصرفی اهمیت بسزایی دارد (Maidment, 1992: 7/1).

ایران سرزمین کم آبی است که در منطقه ی خشک و نیمه خشک کره ی زمین قرار گرفته و لذا بارش برف مهمترین عامل تأثیرگذار در میزان ذخایر آب، بویژه در فصول گرم سال، محسوب می گردد (قنبرپور و همکاران، ۱۳۸۴: ۵۰۳). بعلاوه، برف یکی از فاکتورهای مهم کنترل کننده ی هیدرواقليم هر ناحیه ی جغرافیایی است (قائمى و نوحى، ۱۳۵۵: ۱۲). در شمال غرب ایران نزولات جوی در فصول سرد سال بیشتر به صورت برف است و بدلیل وسعت مناطق کوهستانی در این نواحی، ذخایر برفی در طول سال ماندگار بوده و بنابراین مدیریت علمی این ذخایر آبی جهت تأمین آب مصرفی (شرب، صنعتی و کشاورزی) ضروری است (عادلی، ۱۳۸۴: ۱۱۲).

پایش اصولی سطح پوشش برف (SCA<sup>۱</sup>)، ارزیابی سطوح ذوب برف حاصله را دقیق تر نمایان می سازد. به طور کلی، انباشت و ذوب برف معمولاً با استفاده از مشاهدات زمینی مدل سازی می شود. به منظور ایجاد مدل های هیدرولوژیکی کارآمد و مطمئن و همچنین بهبود پیش بینی ها، دقت بیشتر و روش های کم هزینه تر در روند برآورد مقادیر SCA مورد نیاز است (بنی هاشمی، ۱۳۸۲: ۷۵). برخی از محققان معتقدند که داده های سنجش از دور می تواند ارزیابی های بهتری از محدوده های پوشش برف در حوضه های آبریز نسبت به روش های مساحی سنتی ارائه دهد (Metcalfe & Buttle, 1999: 66). از این رو، امروزه در روند مدیریت کارآمد منابع آبی، به کارگیری داده های سنجش از دور با هدف کسب اطلاعات دقیق از پوشش برف به صورت عملیاتی اجرا می گردد (Johansson et al, 2001: 595). با عنایت به پیشرفت های

موجود در چند دهه‌ی گذشته، توسط کشورهای مختلف سنجنده‌های ماهواره‌ای متعدد و متنوعی طراحی و به فضا ارسال شده که یکی از مهمترین آنها ماهواره «ترا»<sup>۱</sup> است. سنجنده MODIS ماهواره مذکور با توجه به قابلیت‌های فنی و اپتیکی خود تصاویر متنوعی را در باندهای مختلف الکترومغناطیس عرضه می‌دارد (صادقی نایینی، ۱۳۸۲: ۲۱).

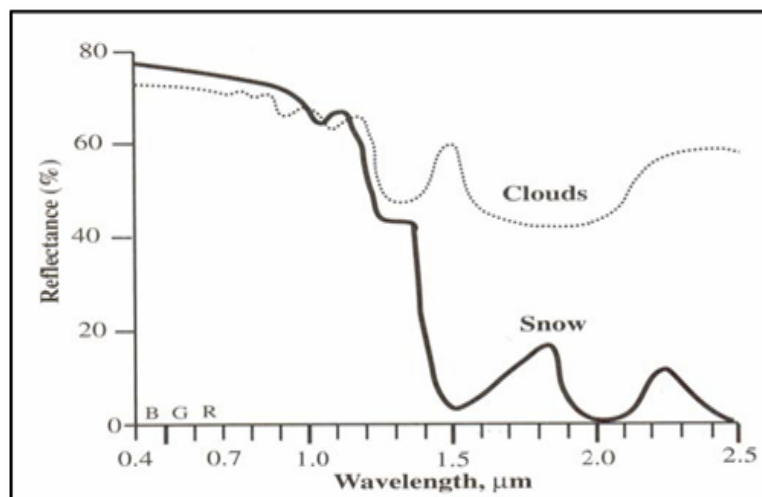
### مبانی نظری

به منظور مدل‌سازی مشخصات سطحی پوشش برف با استفاده از تصاویر سنجنش از دور، آگاهی از خصوصیات فیزیکی برف و فرآیند ذوب آن امری ضروری است (نجف‌زاده و همکاران، ۱۳۸۳: ۳). ثابت شده است که در محدوده‌ی نور مرئی و مادون قرمز نزدیک (NIR<sup>۲</sup>) برف تازه دارای بیشترین انعکاس نسبت به سطوح دیگر از جمله: آب، خاک و پوشش گیاهی می‌باشد. معمولاً، ویژگی برف تازه آن را از پوشش ابری متمایز ساخته و همانگونه که در شکل (۱) دیده می‌شود، برف در محدوده‌ی مادون قرمز میانی (حدود ۱/۵ الی ۲/۵ میکرومتر) دارای کمترین میزان انعکاس نسبت به پدیده ابر است (Riggs et al, 2003:12).

بر اساس مطالعات «گومز» و همکاران مشخص شده است که درصد بازتابش به خصوصیات متعدد برف مانند: اندازه، ابعاد و شکل دانه‌ها، آب موجود در آن، زبری سطح و ضخامت آن نیز بستگی دارد (Gomez et al, 2001: 67). بازتابش برف در هر دو ناحیه نور مرئی و مادون قرمز نزدیک، با افزایش طول عمر برف کاهش می‌یابد. اما این کاهش در محدوده‌ی مادون قرمز نزدیک مشهودتر است. کاهش بازتابش در طول موج مادون قرمز نزدیک، ناشی از افزایش بعد ذرات برف، ذوب و انجماد مجدد آن بوده و کاهش آن در محدوده‌ی نور مرئی، ممکن است به دلیل آلودگی‌هایی جوی صورت گیرد. بنابراین، نمی‌توان همواره از طول موج‌های حرارتی برای جداسازی ابر از برف استفاده نمود، چرا که ممکن است ابرها گرمتر یا سردتر از سطح پوشش برفی باشند (Samantha, 2004:59). ضمناً باید اندازه‌ی حوضه‌ی آبریز و قدرت تفکیک زمانی، به عنوان دو فاکتور اساسی در روند انتخاب سنجنده‌ها مورد نظر باشد. از دیگر فاکتورهای مؤثر در انتخاب تصاویر ماهواره‌ای، تعداد باندهای هر سنجنده است، که در مرحله‌ی پردازش باید مورد توجه قرار گیرد (Simpson, et a, 2003:13).

1 - Terra

2- Near-Infrared



شکل ۱: نمودار بازتابش ابر و برف در طول موج‌های مختلف تصاویر MODIS

از میان ماهواره‌های هواشناسی خورشید آهنگ مدار قطبی، با هدف ایجاد نقشه‌های برفی، در مقایسه با سایر سنجنده‌ها، MODIS هم قدرت تفکیک مکانی قابل قبول و هم قدرت بازنگری زمانی سریع به همراه تنوع زیادی از باندهای طیفی خاص را عرضه نموده است (Strabala, 2003:96). یادآور می‌گردد، این سنجنده بر روی اولین ماهواره<sup>۱</sup> NASA EOS به نام Terra نصب و در ۱۸ دسامبر ۱۹۹۹ به فضا پرتاب گردید. همچنین این سنجنده بر روی ماهواره Aqua، که در ۳ «می» ۲۰۰۲ در مدار مربوطه قرار گرفت، نیز کار گذاشته شده است. سنجنده MODIS دارای ۳۶ باند است که ۱۱ باند آن در محدوده‌ی نور مرئی، ۹ باند در محدوده‌ی مادون قرمز نزدیک، ۶ باند در مادون قرمز حرارتی، ۴ باند در محدوده‌ی مادون قرمز موج کوتاه (SWIR<sup>۲</sup>) و ۶ باند آن برای محدوده‌ی مادون قرمز امواج بلند (LWIR<sup>۳</sup>) تنظیم شده است. همچنین، در فن‌آوری سنجنده MODIS باندهای مادون قرمز<sup>۴</sup> IR و مادون قرمز نزدیک نیز در محدوده‌ی طیف الکترومغناطیس قرار گرفته است. قدرت تفکیک باندهای سنجنده این سنجنده متفاوت بوده و بین ۲۵۰ متر تا ۱۰۰۰ متر در نوسان است. مشخصات اصلی باندهایی که در تفکیک و شناسایی پوشش برف کاربرد دارند، در جدول (۱) ارائه شده است.

1- Earth Observing System

2- Shortwave-IR

3- Longwave-IR

4- Infrared

جدول ۱: باندهای مورد استفاده در استخراج پوشش برف توسط سنجنده MODIS

شماره باند	طول موج میکرومتر ( $\mu m$ )	محدوده طیفی	مقدار بازتابش طیفی ( $W/m_2 \mu m - sr$ )	توان تفکیک مکانی متر (m)
۱	۰/۶۲۰-۰/۶۷۰	مرئی	۲۱/۸	۲۵۰
۲	۰/۸۴۱-۰/۸۷۶	مادون قرمز نزدیک	۲۴/۷	۲۵۰
۴	۰/۵۴۵-۰/۵۶۵	مرئی	۲۹/۰	۵۰۰
۶	۱/۶۲۸-۱/۶۵۲	مادون قرمز نزدیک	۷/۳	۵۰۰

مأخذ: هال<sup>۱</sup> و همکاران سال ۲۰۰۲

بنابراین، تصاویر حاصله از سنجنده MODIS را می‌توان جهت استخراج نقشه‌های برفی در محدوده‌ی حوضه‌های آبریز با استفاده از توابع خاص در محیط نرم‌افزار ERDAS مورد پردازش قرار داد. یادآور می‌شود، الگوریتم نقشه برفی سنجنده MODIS الگوریتم خودکاری است که نقشه‌های برف را با قدرت تفکیک ۲۵۰ و ۵۰۰ متری استخراج می‌کند. با اتوماتیک شدن نقشه برفی، اعمال تأثیرات شخصی اپراتور حذف می‌گردد.

مطالعه‌ی «کلاین» نشان داده است که توانایی نمایش برف با استفاده از سنجنده MODIS، در باندهای منحصر به فرد و قدرت تفکیک بالا پیشرفت معنی‌داری نسبت به دیگر سنجنده‌های مشابه دارد (Klein, et al, 1998: 364). تصاویر حاصله دارای دامنه‌ی طیفی وسیعی بوده و تکنیک‌هایی که در الگوریتم نقشه برفی مربوطه به کار برده می‌شود مبتنی بر آشکارسازی در مقیاس‌های محلی و ناحیه‌ای است (الماس پور و اردبیلی، ۱۳۸۲: ۱۴). در روند پردازش، تصاویری به منظور استخراج پوشش برف انتخاب می‌گردد که دارای خصوصیتی از قبیل LIB، بدون ابر و در روشنایی روز برداشت شده باشند. ضمناً، باید پیکسل‌هایی مورد ارزیابی قرار گیرند که در هنگام روشنایی روز با نور کافی و آسمان بدون ابر ثبت شده‌اند (Riggs et al, 2003:45). الگوریتم نقشه برفی MODIS از باندهای ۴ و ۶ این سنجنده بطور اتوماتیک جهت استخراج شاخص برفی تفاضلی نرمال شده<sup>۲</sup> اجرا و بر اساس معادله (۱) محاسبه می‌گردد (ERDAS, 2003:118).

$$NDSI = \frac{MODIS_{Band\ 4} - MODIS_{Band\ 6}}{MODIS_{Band\ 4} + MODIS_{Band\ 6}} = \frac{green - SWIR}{green + SWIR} \quad (1)$$

از شاخص NDSI می‌توان برای تفکیک برف و یخ از یکدیگر و همچنین جهت جداسازی برف از ابرهای ارتفاع بالای اتمسفر نظیر ابرهای کومولونیمبوس استفاده نمود. در واقع، این شاخص معیاری برای محاسبه‌ی مقدار نسبی خواص تفاضلی است که از بازتابش بین باندهای

### 1 -Hall

### 2- Normalized Difference Snow Index (NDSI)

مرئی و مادون قرمز طول موج کوتاه برف حاصل می‌شود. شاخص مذکور به گسترده‌ی شرایط نوردی غیرحساس بوده و نسبت به تأثیرات اتمسفری، قابل تنظیم است. به بیان دیگر شاخص NDSI فقط به مقادیر بازتابش در یک باند بستگی ندارد، بلکه به میزان ارزش رقومی بازتابش<sup>۱</sup> پیکسل‌ها نیز وابسته است. «آرکر» و همکاران ثابت کردند که برف خالص دارای NDSI بالایی است، اما با مخلوط شدن با دیگر مواد (نظیر: خاک و دود) از درصد خلوص آن کاسته می‌شود (Archer et al, 1998:39). همچنین شاخص NDSI به عنوان جداکننده‌ی ابر- برف از ابرهایی که هم در بخش نورمرئی و هم در بخش مادون قرمز دارای انعکاس بالایی هستند، به کار گرفته می‌شود. در مجموع، الگوریتم نقشه برفی دارای دو معیار دیگر نیز می‌باشد. اولین معیار با عنوان زمینه‌ی برفی مطرح است.

«هال» و همکاران ثابت نمودند که الگوریتم نقشه برفی در شرایط پوشش برف کامل در مناطق با پوشش گیاهی کم پشت، از قبیل علفزارها، زمین‌های کشاورزی و توندراها به بهترین نحو عمل می‌کند (Hall et al, 2001:72). در این شرایط، باند دو MODIS اساساً جهت شناسایی برف مورد پردازش قرار می‌گیرد و مؤلفه‌های NDSI الگوریتم نقشه‌ی برفی، به طور مؤثر ابرها (به استثناء ابرهای ارتفاع بالا) را فیلتر می‌کند. این ابرها در برگیرنده‌ی تکه‌های یخ بوده و ممکن است باعث طبقه‌بندی نادرست پوشش برف شوند. با توجه به این معیار، در صورتی می‌توان نتایج شاخص NDSI را قبول کرد که میزان انعکاس باند دو بیشتر از ۱۱ درصد باشد.

دومین معیار تحت‌عنوان اهداف تیره توسط «کلاین»<sup>۲</sup> و همکاران مطرح شده است. در این حالت، انعکاس ۱۰ درصد در باند چهار به عنوان حد پایین تشخیص و تفکیک پوشش گیاهی از برف شناخته می‌شود. برای پیکسل‌های طبقه‌بندی شده به عنوان برف، انعکاس در باند چهار باید مساوی یا بیشتر از ۱۰ درصد بوده باشد. علی‌رغم ارزش بالای شاخص NDSI، در مواردی هدف‌های تیره مانع طبقه‌بندی صحیح برف می‌شوند. بنابراین، با توجه به دو معیار فوق الذکر، الگوریتم پوشش برف در صورتی یک پیکسل را برف تلقی خواهد نمود که شرایط مندرج در ذیل محقق شده باشد (Klein, et al, 1998:364).

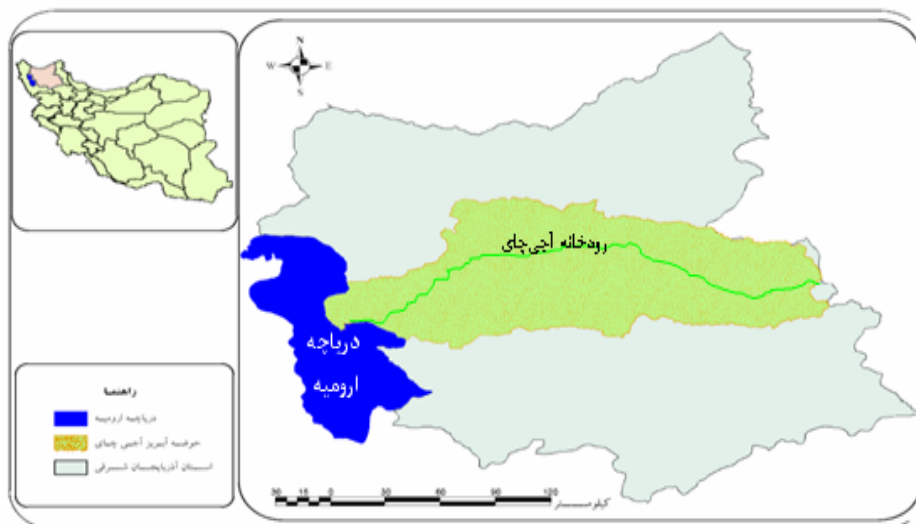
- باند دو ( $0.841 - 0.867 \mu m$ ) دارای بازتابش بیش از ۱۱ درصد باشد،
- باند چهار ( $0.545 - 0.665 \mu m$ ) دارای بازتابش برابر یا بیشتر از ۱۰ درصد باشد،
- و در مجموع باید مقدار شاخص NDSI بیشتر از ۰/۴ برآورد گردد.

1- Digital Number (DN)

2 - Klein

### مشخصات جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز آجی چای بین مختصات جغرافیایی  $۴۵^{\circ} ۲۶'$  تا  $۴۷^{\circ} ۵۰'$  طول شرقی  $۳۷^{\circ} ۳۹'$  تا  $۳۸^{\circ} ۲۸'$  عرض شمالی محدود گشته است. حوضه مورد مطالعه با وسعتی معادل ۱۲۷۷۹ کیلومترمربع، جزو بزرگترین حوضه‌های آبریز داخلی واقع در شمال غرب کشور به شمار می‌رود. این حوضه از شرق به حوضه آبریز «قره سو»، از جنوب به سر شاخه‌های «قزل‌اوزن»، از شمال به حوضه آبریز «اهرچای» و از غرب به دریاچه ارومیه محدود شده است. از لحاظ ارتفاعی بلندترین نقطه‌ی حوضه در کوهستان سبلان، به ارتفاع ۴۸۵۰ متر و پست‌ترین نقطه‌ی حوضه نیز، به ارتفاع ۱۳۰۰ متر در مصب آجی چای به دریاچه ارومیه، قرار گرفته است، لذا اختلاف ارتفاعی معادل ۳۵۵۰ متر در داخل حوضه مشاهده می‌شود. موقعیت حوضه آجی چای در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: نقشه موقعیت حوضه آجی چای در استان و کشور

یادآور می‌گردد که منطقه‌ی مورد مطالعه دارای اقلیمی نیمه خشک و از نوع سرد کوهستانی می‌باشد که درصد بالایی از مقادیر بارش‌های سالانه، بویژه در فصول پاییز و زمستان، به صورت جامد ریزش می‌کند (رسولی و عزیززاده، ۱۳۸۵: ۳۰). ضمناً، با توجه به عملکرد سیستم‌های جوی سینوپتیک حاکم در منطقه و نقش توپوگرافی محلی، حد پایداری عنصر برف در طول سال، بویژه در مناطق مرتفع حوضه آبریز، نسبت به سایر مناطق جغرافیایی کشور متفاوت می‌نماید (رسولی، ۱۳۷۴: ۱۲۱).

## مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل: تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS، نقشه‌های توپوگرافی و داده‌های زمینی ثبت شده در ۱۱ ایستگاه برف‌سنجی (جدول ۳) می‌باشد. نظر بر اینکه آب معادل برف برای یک سال آبی ثابت در نظر گرفته می‌شود، تصاویر ذکر شده در جدول ۲ به دلیل نزدیک بودن به فصل ذوب و زمان برداشت داده‌های ایستگاه‌های برف‌سنجی، با هدف برآورد آب معادل برف سال آبی ۸۴-۱۳۸۳ (۲۰۰۵ میلادی) از سازمان فضایی ایران با سطح پردازشی LIB تهیه گردید (جدول ۲).

جدول ۲: تاریخ تصاویر استفاده شده در تحقیق جاری

ردیف	زمان (تاریخ میلادی)
۱	۲۰۰۵/۲/۱۶
۲	۲۰۰۵/۲/۱۸
۳	۲۰۰۵/۲/۲۳
۴	۲۰۰۵/۳/۱
۵	۲۰۰۵/۳/۱۵
۶	۲۰۰۵/۳/۲۵
۷	۲۰۰۵/۴/۳
۸	۲۰۰۵/۴/۱۷

ضمناً داده‌های پایه، ۲۳ شیت نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ در فرمت رقومی جهت استخراج محدوده‌ی حوضه و تعیین خط برف مورد استناد قرار گرفت. مراحل آماده‌سازی داده‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS اجرا و به ترتیب: عملیات تغییر فرمت داده‌ها، تلفیق لایه‌ها، اعمال تصحیحات هندسی، ایجاد مدل<sup>۱</sup> DEM، استخراج پارامترهای هیدرولوژیکی (از جمله تعیین محدوده‌ی حوضه‌ی آبریز و شبکه‌ی آبراهه‌ها) صورت پذیرفت. در مرحله‌ی پردازش، از تصاویر سنجنده MODIS طی دو مرحله نقشه پوشش برف استخراج گردید: ابتدا، در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار<sup>۲</sup> ERDAS بر روی تصویر سطح B<sup>۱</sup>، عملیات زمین- مرجع نمودن تصاویر با سیستم تصویر «لامبرت» اعمال و بارزسازی‌های رادیومتریک انجام شد. سپس، با اجرای الگوریتم اتوماتیک پوشش برف، اقدام به استخراج محدوده‌های پوشش برف گردید (شکل ۳). در روند عملیات پردازش تصاویر مشاهدات، مراحل زیر به ترتیب اجرا شد. در مرحله‌ی اول، ابتدا، معیارهای بازتابی دوگانه (یعنی مقدار بازتابش پیسکل‌ها در باند دو بیشتر از ۱۱ درصد و مقدار بازتابش پیسکل‌ها در باند چهار مساوی یا بیشتر از ۱۰ درصد) و

1-Digital Elevation Model

2- ERDAS Macro Language (EML)



به شرط  $NDSI > 0.4$  بر اساس معادله ۱ اعمال گردید. در مرحله دوم، بر اساس معادله (۲) آزمون‌های سه‌گانه مشروط به منظور استخراج مقادیر  $NDSI$  اجرا شد.

$$\text{Snow Map} = \text{CONDITIONAL} \{ (NDSI > 0.4) NDSI, (B2 > \%11) NDSI, (B4 > \%10) NDSI \} \quad (۲)$$

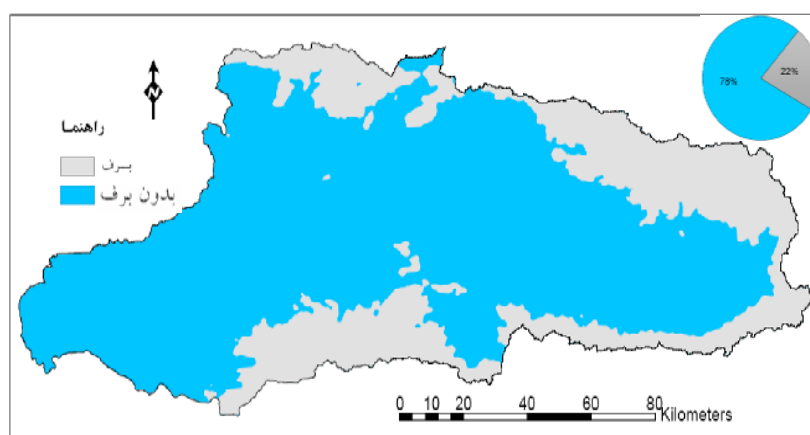
در مرحله سوم، فیلتر بارزسازی اکثریت<sup>۱</sup>: با هدف کاهش نقش بازتابش پیکسل‌های منفرد اجرا شد. این فیلتر به صورت پنجره‌ای در ابعاد ۳ در ۳ پیکسل بوده و با اعمال آن، پیکسل‌های بارزش  $NDSI$  مشخص به عنوان پوشش برفی طبقه‌بندی شدند. لازم به ذکر است که نقشه‌ی برفی نهایی در فرمت باینری بوده و از منطق بولین پیروی می‌کند و در این مدل، معادله (۲) تنها پیکسل‌هایی تحت عنوان برف شناخته شدند که بیش از ۴۰ درصد سطح پیکسل (برابر با ۲۵ هکتار) دارای پوشش برفی بودند.

در مرحله چهارم، در محیط نرم‌افزار ArcGIS، لایه‌های رقومی حوضه مورد مطالعه در فرمت رستری (مطابق با سیستم تصویر سنجنده MODIS) زمین مرجع شد. با تولید DEM منطقه با استناد به نقشه‌های توپوگرافی، تابع اتوماتیک مسیر جریان<sup>۲</sup> اجرا گردید و از این طریق محدوده‌ی حوضه‌ی آبریز آجی‌چای استخراج شد. ضمناً، از طریق اجرای تابع مثلث‌بندی «تیسن»<sup>۳</sup>، با توجه به موقعیت ایستگاه‌های برف‌سنجی، محدوده‌ی تاثیرگذاری هر ایستگاه به صورت پلیگون جداگانه‌ای مدل‌سازی شد (رسولی، ۱۳۸۴: ۲۹۵). در نهایت، از طریق همپوشانی و انطباق نقشه چندضلعی تیسن و نقشه پهنه‌بندی پوشش برفی، میزان آب معادل برف برای هر ایستگاه محاسبه گردید (رسولی، ۱۳۷۶: ۶۹). در مرحله نهایی، با توجه به هدف اصلی تحقیق، حجم آب معادل برف از طریق معادله (۳)، محاسبه گردید.

$$V = S \times H \quad (۳)$$

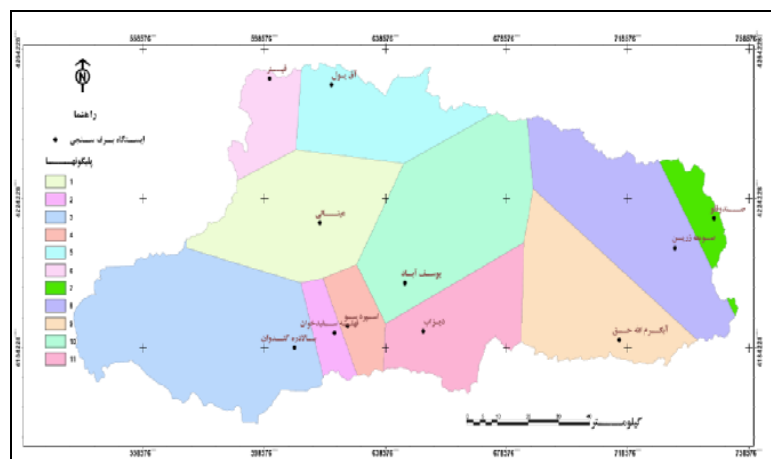
در معادله‌ی فوق با احتساب فاکتور  $H$  به عنوان ارتفاع برف در هر ایستگاه برحسب متر و  $S$  معرف سطح مساحت پوشیده شده به وسیله‌ی برف در هر پلیگون برحسب متر مربع، مقدار پارامتر  $V$  یعنی حجم کل آب معادل برآورد می‌گردد. یادآور می‌گردد، میزان ارتفاع برف در هر کدام از ایستگاه‌ها، از طریق برداشت‌های میدانی، اندازه‌گیری شده است (جدول ۴).

در مطالعه‌ی حاضر، با اجرای الگوریتم پوشش برف بر روی تصویر سنجنده MODIS نقشه‌ی برفی نهایی طراحی گردید که در شکل (۳)، به همراه نمودار دایره‌ای که بیانگر درصد پوشش برف در کل سطح حوضه‌ی آبریز است، نشان داده شده است. در این مرحله، میزان سطح پوشش برف معادل ۳۶۳۲۴۹ هکتار برآورد شد.



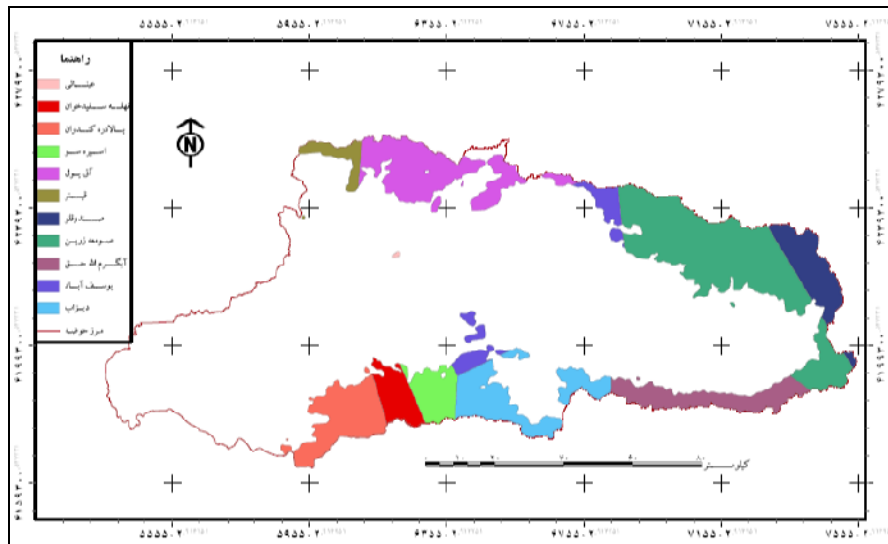
شکل ۳: نقشه‌ی برفی حاصل از تصویر تاریخ ۱۳۸۵/۱۲/۲۵

ضمناً، نقشه‌ی پلیگون‌های تیسن به همراه موقعیت ایستگاه‌های برف‌سنجی در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴: نقشه پلیگون‌های تیسن به همراه ایستگاه‌های برف‌سنجی

با همپوشانی نقشه‌های پوشش برف و پلیگون‌های تیسن، نقشه جدیدی ایجاد شد که بیانگر سطح پوشش برف در هر پلیگون می‌باشد (شکل ۵).



شکل ۵: نقشه‌ی سطح پوشش برف در هر پلیگون تیسن

مقادیر سطحی پوشش برف برحسب هکتار در جدول (۳) برای سال آبی ۸۴-۸۳ ارائه شده است.

جدول ۳: میزان سطح پوشش برف در محدوده‌ی هر پلیگون به هکتار

نام ایستگاه	عینالی	فینر	قله‌سفیدخوان	یوسف آباد	اسپوره سو	صندوقلو	انبارم الله حق	کندوان	دیزناب	آق یول	صومعه زرین
سطح به هکتار	۲۱۰/۸۸	۹۰۸۲/۴۲	۱۶۳۹۰/۵۳	۱۶۵۴۸/۰۴	۱۸۰۸۲/۵۸	۲۶۵۲۱/۰۰	۲۸۹۱۴/۴۳	۳۵۷۹۱/۷۸	۳۷۷۶۵/۱۰	۵۱۹۵۸/۶۶	۱۱۳۲۸۵/۲۶

همچنانچه در جدول (۴) مشخص شده است در هر کدام از پلیگون‌های آجی‌چای (با مساحت‌های مشخص) و با توجه به مقدار بارش برف (ثبت شده در هر کدام از ایستگاه‌های مربوطه) مقادیر حجم آب معادل در کل حوضه حدود شصت و شش میلیون مترمکعب محاسبه شد. بطور حتم، می‌توان انتظار داشت که با استناد به سری‌های آماری دراز مدت هیدرو-کلیمایی، مقدار همبستگی بین متغیرهای نظیر: مقادیر بارش برف، مساحت زیرحوضه‌ها و آب معادل استحصال شده مثبت برآورد گردد. اما، نباید نقش سایر پارامترهای

مداخله گر مانند: ارتفاع از سطح دریا، جهت ناهمواری، مقادیر دمای هوا و خاک و وزش بادهای محلی را نادیده انگاشت. یادآور می‌گردد، در مطالعه‌ی جاری، با توجه به اهداف اصلی تحقیق، تأثیر چنین متغیرهایی بر روی آب ذوب معادل برف مورد بررسی قرار نگرفته است.

جدول ۴: محاسبه‌ی حجم آب معادل برف در هر پلیگون تیسن برحسب مترمکعب

ایستگاه ثبت بارش برف (پلیگون)	ارتفاع برف (متر)	مساحت (متر مربع)	حجم آب معادل (مترمکعب)
عینالی	۰/۰۳	۲۱۰۸۸۹۱	۶۳۲۶۶/۷
قهله سفیدخوان	۰/۰۴	۱۶۳۹۰۵۳۷۲	۶۸۹۸۷۷۶/۹
بالادره کندوان	۰/۰۸	۳۵۷۹۱۷۸۰۴	۷۵۷۳۵۴۰/۴
اسپره سو	۰/۰۴	۱۸۰۸۲۵۸۷۸	۳۳۳۶۲۳۷/۴
آق یول	۰/۰۵	۵۱۹۵۸۶۶۱۱	۵۰۱۹۲۰۶/۷
قینر	۰/۰۵	۹۰۸۲۴۲۶۸	۲۲۸۸۷۷۱/۶
صندوقلو	۰/۰۸	۲۶۵۲۱۰۰۵۰	۱۱۱۸۱۲۵۵/۹
صومعه زرین	۰/۰۵	۱۱۳۲۸۵۲۶۶۶	۱۷۷۱۷۸۱۵/۶
آبگرم الله حق	۰/۰۳	۲۸۹۱۴۴۳۰۲	۴۸۴۶۰۵۸/۲
یوسف آباد	۰/۱۴	۱۶۵۴۸۰۴۱۳	۳۲۳۸۴۵۱/۸
دیزناب	۰/۰۳	۳۷۷۶۵۱۰۷۹	۳۷۱۲۳۱۰/۱
مجموع	۰/۶۲	۳۵۴۵۵۰۷۳۳۴	۶۵۸۷۵۶۹۱/۲

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصله از مطالعه‌ی حاضر نشان می‌دهد که تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS جهت بررسی پارامترهای هیدرواقليمی نظیر برف بسیار مناسب هستند. دارا بودن قدرت تفکیک مناسب (از نقطه نظرهای زمانی، طیفی، رادئومتریک و مکانی) از اهم امتیازات این سنجنده، در روند برآورد سطح پوشش برف و تخمین مقادیر آب ذوب معادل برف، محسوب می‌گردد (Hall, et al, 2002:181).

با هدف پردازش تصاویر، الگوریتم نقشه برفی به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین الگوریتم‌های استخراج نقشه‌های برفی بر روی تصاویر موجود قابل اعمال است. در واقع، مدل نقشه‌ی برفی مختص سنجنده MODIS بوده و در بیشتر منابع تحقیقاتی به‌کارگیری آن توصیه شده است. از این رو، در نسخه‌های سه و چهار سنجنده MODIS برای محاسبه مقادیر پوشش برف جهانی به کار گرفته شده است. البته، نتایج تحقیق بیانگر این واقعیت است که تصاویر حاصله

از سنجنده مذکور و الگوریتم نقشه برفی مربوطه در محدوده‌ی حوضه‌های منطقه‌ای نیز قابل اجرا است، اما برای حوضه‌های آبریز کوچکتر محلی باید از داده‌های سایر سنجنده‌ها با تفکیک مکانی بزرگتر بهره گرفت. دقت نقشه برفی حاصله از طریق داده‌های ایستگاهی برف‌سنجی حوضه «آجی‌چای»، تفسیر بصری تصاویر وهمچنین مقایسه با مدل پوشش برف جهانی نتایج تحقیق جاری مورد تأیید قرار گرفت. در مجموع، موارد مندرج در ذیل از مزیت‌های کاربردی مطالعه جاری محسوب می‌گردد:

- پردازش بهنگام تصاویر ماهواره ای MODIS
  - امکان به کارگیری مدل نقشه‌ی برفی از طرف سازمان‌های ذینفع
  - تعیین دقیق محدوده‌های پوشش برفی با هدف تخمین آب حاصله از ذوب برفی به‌صورت کاربردی
- ضمناً، از معایب عمده‌ی الگوریتم خودکار نقشه‌ی برفی می‌توان به دو مورد ذیل اشاره نمود:
- ضرورت اعمال فاکتورهای متعدد در روند حذف نقش پوشش ابری
  - باینری بودن نقشه‌های برفی

در مطالعات آتی، به‌منظور بهبود کیفی مدل‌ها، می‌توان با اعمال منطق فازی در روند اجرای الگوریتم پوشش برفی و اعمال فیلترهای حرارتی پیشرفته (برای جلوگیری از بروز خطاهای ناشی از طبقه‌بندی نادرست ابر به عنوان برف) مدل‌های طراحی شده را با اطمینان بیشتری در مدیریت منابع آبی حوضه‌های آبریز کشور مورد استناد قرار داد.

### منابع و مأخذ

- ۱- بنی‌هاشمی، سیده معصومه (۱۳۸۲): مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه‌ی آبخیز با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای (مطالعه‌ی مورد حوضه‌ی آبخیز نکارود - زیرحوضه لکشا). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. مرکز GIS و سنجش از دور دانشگاه تبریز.
- ۲- برهانی‌داریان، علیرضا؛ ظاهرپور، جمال؛ فاتحی‌مرج، احمد (۱۳۸۳): مدل‌های برفایی پیش‌بینی جریان حوزه آبریز به کمک RS و GIS.
- ۳- رسولی، علی‌اکبر؛ عزیززاده، محمدرضا (۱۳۸۵): مدل‌سازی مکانی پدیده سرماییش بادی در شمالغرب کشور. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی. شماره ۸۰.
- ۴- رسولی، علی‌اکبر (۱۳۷۴): توزیع آماری بارش‌های روزانه آذربایجان. مجموعه مقالات هفتمین کنگره جغرافیایی ایران جلد دوم. دانشگاه تهران.
- ۵- رسولی، علی‌اکبر (۱۳۷۶): عملیات انطباق منطقی نقشه‌ها در محیط GIS. نشریه دانشکده علوم انسانی و اجتماعی دانشگاه تبریز، شماره ۵.
- ۶- رسولی، علی‌اکبر (۱۳۸۴): تحلیلی برف‌آوری GIS. اداره چاپ و انتشارات دانشگاه تبریز. جلد اول. چاپ اول. تبریز.

- ۷- صادقی نایینی، علی (۱۳۸۲): معرفی سنجنده MODIS و تهیه نقشه پوششی ایران. دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. دانشکده نقشه برداری.
- ۸- عادل، ام البنین (۱۳۸۴): کلیماتولوژی بارش برف در شمال غرب ایران. پایان نامه کارشناسی ارشد. مرکز GIS و سنجش از دور دانشگاه تبریز.
- ۹- قائمی، هوشنگ؛ نوحی، احمد (۱۳۵۵): تجزیه و تحلیل آماری ریزش برف. انتشارات دفتر پژوهشی سازمان هواشناسی تهران.
- ۱۰- قنبرپور، محمدرضا، محسنی ساروی، محسن، ثقفیان، بهرام، احمدی حسن، عباس پور. کریم (۱۳۸۴): تعیین مؤثر در انباشت و ماندگاری سطح پوشش برف و سهم ذوب برف در رواناب. مجله منابع طبیعی. شماره ۵۸-۳.
- ۱۱- الماس پور، فرهاد؛ اردبیلی اصل، بهرام (۱۳۸۲): تعیین حجم ذخایر برفی حوضه های آبریز سدهای اهر، علویان و نهند. نشریه داخلی سازمان آب منطقه ای استان آذربایجان شرقی.
- ۱۲- نجف زاده، رضا؛ ابریشمچی، احمد؛ تجربی، مسعود؛ طاهری شهرآئینی، حمید (۱۳۸۳): شبیه سازی جریان رودخانه با مدل ذوب برف. مجله آب و فاضلاب ۱۵-۴.
- 13- Archer, D. R., Bailey, J. O., Barrett, E. C. and Greenhill, D. (1994); The potential of satellite remote sensing of snow over Great Britain in relation to cloud cover, *Nordic Hydrology*, 25.
- 14- ERDAS Imagine (2003) Filed and Tour Guide, Leica Company, USA.
- 15- Gomez, L. E., Rango, A. and Hall, D. K. (2001); Improved snow cover remote sensing for snowmelt runoff forecasting, *Proceedings symposium of remote sensing and hydrological 2000*, Santa Fe, New Mexico, USA. IAHS Pub. No. 267.
- 16- Hall, D. K., Riggs, G. A. and Salomonson, V. V. (2001); Algorithm theoretical basis document (ATBD) for MODIS snow and sea ice-mapping algorithms, The MODIS Snow/Ice Global Mapping Project Website.
- 17- Hall, D.K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V. DiGirolamo, N. E. and Bayr, K. J. (2002); MODIS snow-cover product, *Remote Sensing of Environment*, No. 83.
- 18- Johansson, B., Caves, R., Ferguson, R. and Turpin, O. (2001); Using remote sensing data to update the simulated snow pack of the HBV runoff model, *Proceedings symposium of Remote Sensing and Hydrological 2000*, Santa Fe, New Mexico, USA. IAHS Pub. No. 267.
- 19- 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, Troms.
- 20- Maidment, D. R. (1992); *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill, Inc, New York, USA.
- 21- Metcalfé, R. A. and Buttle, J. M. (1999); Semi-distributed water balance dynamics in a small Boreal Forest Basin, *Journal of Hydrology*, vol.226.
- 22- Riggs, G. A., Hall, D. K. and Salomonson, V. V. (2003); MODIS snow products user guide for collection 4 data products, The MODIS Snow/Ice Global Mapping Project Website.
- 23- Samantha K.M. (2004); Hydrological modeling using MODIS data for snow covered area in the Northern Boreal Forest of Manitoba. University of Calgary.
- 24- Simpson, J. J., J. R. Stitt, and M. Sienko (1998); Improved estimates of the arial extent of snow cover from AVHRR data" *Journal of Hydrology*, No. 204.
- 25- Strabala, K. (2003); MODIS Cloud Mask User's Guide, Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies Website. Last Viewed December 15.