

Evaluation and Improvement of Snow Cover Detection from MODIS Images

M. Tasdighian¹ and M. Rahimzadegan^{2*}

Abstract

Information from snow cover as one of the major resources of the groundwater, drinking, and agriculture water has a significant importance in water resources management. One of the important sources of data for snow cover detection are the MODIS satellite images, from which the snow products are routinely produced. This research aims to improve the snow cover detection algorithm of MODIS using topography correction and Land Surface Temperature (LST) thresholding. In this regard, Northwestern part of Iran was selected as a pilot area. Because of the lack of field snow area data the Landsat 8 images were chosen as ground truth. Five appropriate simultaneous MODIS and Landsat 8 images in years 2014 and 2015 were prepared and 5 samples with 10000 pixels in each MODIS image were selected. Three algorithms were then implemented. The first one with MODIS snow product method achieved the mean absolute relative error of 3.44 percent. In the second algorithm topographic correction was implemented which reduced the error to 2.25 percent. The third algorithm investigated land surface temperature thresholding effect, which in the best value of LST with considering 278 K threshold yielded to mean absolute relative error of 2.58 percent. Hence, results indicated the proficiency of the provided algorithms in the study area, comparing with the standard method.

Keywords: MODIS images, Landsat 8 images, Snow cover area, Land Surface Temperature, Topographic correction.

Received: August 16, 2016

Accepted: November 12, 2016

ارزیابی و بهبود الگوریتم تشخیص پوشش برف از تصاویر سنجنده MODIS

مسعود تصدقیان^۱ و مجید رحیم زادگان^{۲*}

چکیده

اطلاعات از پوشش برف به عنوان یکی از منابع تامین آب‌های زیرزمینی، شرب و کشاورزی برای مدیریت بهینه منابع آبی اهمیت بسزایی دارد. از جمله منابع اطلاعاتی مهم برای شناسایی سطح برف، تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS است که محصول سطح برف به صورت منظم از آن‌ها تولید می‌گردد. هدف این پژوهش ارتقاء دقت الگوریتم شناسایی سطح برف از تصاویر MODIS با بهره‌گیری از تصحیح توپوگرافی و آستانه‌گذاری دمای سطحی است. در این راستا، شمال غرب کشور به عنوان محدوده پایلوت انتخاب و به دلیل عدم جمع‌آوری داده‌های سطح برف، تصاویر Landsat 8 بعنوان داده واقعیت زمینی برگزیده شد. ۵ تصویر تقریباً همزمان MODIS و Landsat 8 مناسب در سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۵ تهیه و از هر تصویر MODIS تعداد ۵ نمونه ۱۰۰۰۰ پیکسلی انتخاب و سه الگوریتم پیاده‌سازی گردید. 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 گردید. الگوریتم سوم مؤید تاثیر اعمال حد آستانه دمای سطح زمین بود که با برگزیدن آستانه ۲۷۸k، متوسط قدر مطلق خطاهای نسبی ۲/۵۸ گردید. بنابراین نتایج نشان دهنده کارایی الگوریتم‌های ارائه شده در این تحقیق نسبت به روش استاندارد در مناطق مورد مطالعه بود.

کلمات کلیدی: تصویر MODIS، تصویر Landsat 8، سطح پوشش برف، دمای سطح زمین، تصحیح توپوگرافی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۵/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۸/۲۲

1- M.Sc. Graduate, Water Resources Management, Civil Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Water Resources Department, Civil Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: rahimzadegan@kntu.ac.ir.

*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

۲- استادیار گروه مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۶ امکانپذیر است.

سنجش از دور ابزاری قوی جهت بررسی مناطق غیرقابل دسترس می‌باشد. عرض جاروب وسیع تصاویر ماهواره‌ای و امکان تصویربرداری مجدد از یک منطقه توسط ماهواره‌ها، آن‌ها را برای مطالعه پدیده متغیری مانند برف به ابزاری مناسب تبدیل کرده است (Rees, 2005). استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در مقایسه با سایر روش‌ها دارای هزینه کمتر بوده، چرا که استفاده از این فناوری به نیروی انسانی کم و عملیات زمینی بسیار محدود نیازمند است (Dozier, 1989). از طرف دیگر سطوح برفی دارای تغییرات زیادی نسبت به زمان بوده، در نتیجه پایش آن‌ها نیازمند استفاده از تصاویری با قدرت تفکیک زمانی بالاست، بطوری که در برخی از فصول کسب اطلاعات روزانه و یا حداقل دورروانه از پهنه برف مورد نیاز است (Berezowski et al., 2015). به دلیل آنکه بازتابندگی حاصل از برف با سایر پدیده‌های طبیعی بجز ابرها، کاملاً متمایز است (شکل ۱)، تصاویر ماهواره‌ای ابزاری مناسب برای پایش این پدیده به شمار می‌رود (Rees, 2005). برف در محدوده مرئی^۲ طیف الکترومغناطیس دارای بازتابندگی بالا و در محدوده مادون قرمز موج کوتاه^۳ (SWIR) دارای بازتابندگی پایین است. به دلیل بازتابندگی بالا در محدوده مرئی، برف در اولین تصویر گرفته شده از ماهواره هواشناسی TIROS-1 در آوریل سال ۱۹۶۰ مشاهده شد (Singer and Popham, 1963). از آن پس با پیشرفت فناوری و ظهور سنجنده‌هایی با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالاتر نظیر AVHRR^۴، Landsat، SPOT، ASTER^۵ و MODIS^۶ توان عملیاتی ماهواره‌ها جهت تهیه نقشه‌های پوشش برف بهبود یافت و تصاویر مرئی و مادون قرمز^۷ بصورت گسترده و موفقیت‌آمیزی در تعیین نواحی برفی و بررسی ویژگی‌های سطوح برفی استفاده گردیدند (Matkan, 2003). همچنین برآورد سطح پوشش برف با استفاده از تصاویر سنجش از دور بطور معنی‌داری روند محاسبه و کارایی مدل‌های ذوب برف را بهبود می‌بخشد (Armstrong and Hardman, 1991; Kite, 1991; Seidel et al., 1994; Singh and Jain, 2003).

استفاده از نسبت بازتابندگی محدوده مرئی به مادون قرمز موج کوتاه جهت شناسایی برف را نخستین بار (Kyle et al., 1978) ارائه نمودند. (Bunting and d'Entremont, 1982) کاربردی بودن این نسبت را در نگاشت (تهیه نقشه سطح) برف تایید کرده و بعدها توسط (Dozier, 1989) در نگاشت برف کوه‌های سیرا نوادا^۸ استفاده شد. این روش اساس شناسایی برف و یخ در تصاویر ماهواره‌ای نوری است (Hall et al., 1998b).

برف یکی از اشکال مهم بارش در چرخه هیدرولوژی مناطق کوهستانی بوده که در تامین منابع آب آشامیدنی و کشاورزی به صورت جریان‌های تاخیری در فصول پرآبی و جریان‌های کمینه در فصول کم آبی و تولید انرژی نقش مهمی ایفا می‌کند. از سوی دیگر رواناب حاصل از ذوب برف به دلیل نقش تاخیری آن منبع اصلی تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و در برخی از موارد به دلیل همزمانی با بارش‌های بهاره منشا بروز سیلاب‌های مخرب با حجم جریان بیش از ظرفیت رودخانه‌ها می‌شود (Ghanbarpour et al., 2005). برف بدلیل آلبیدی^۱ بالا بطور مستقیم بر روی دمای سطح زمین از طریق بازتابندگی انرژی خورشیدی اثر می‌گذارد. همچنین پوشش برف، رطوبت خاک و هوا، هیدرولوژی حوضه آبریز و بودجه انرژی سطح را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Vikhamar and Solberg, 2003; Wang et al., 2008). پوشش برف و رطوبت خاک، مهمترین متغیرها در فرآیند تبادل گرما و رطوبت بین زمین و جو هستند (Maurer et al., 2003). همچنین وجود برف در حوضه، تاثیر زیادی بر رطوبت موجود در سطح و در نتیجه جاری شدن رواناب دارد (Berezowski et al., 2015). با توجه به نقش برف در فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی، داشتن اطلاعاتی درباره کمیت و پارامترهای مرتبط با آن جهت برنامه‌ریزی‌ها ضروری بوده و میزان دقت در برآورد گستره برف از اهمیت بالایی برخوردار است (Vikhamar and Solberg, 2003; Wang et al., 2008).

جهت برآورد سطح پوشش برف روش‌های تجربی و سنتی متفاوتی وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به اندازه‌گیری‌های زمینی برف به‌وسیله ایستگاه‌های هواشناسی، نمونه‌برداری‌های میدانی و عکس‌های هوایی اشاره نمود که هر کدام از این روش‌ها معایب خاص خود را دارند (Hall et al., 1995). برای مثال اندازه‌گیری‌های زمینی برف به‌وسیله ایستگاه‌های هواشناسی، بدلیل تعداد محدود این ایستگاه‌ها و ماهیت نقطه‌ای داده‌های حاصل، برای مطالعه پدیده پیوسته‌ای چون برف مناسب نیستند. از طرف دیگر اکثر ایستگاه‌های هواشناسی در مناطق قابل دسترس مانند کوهپایه‌ها قرار دارند، در حالی که قسمت اعظم پوشش برف در ارتفاعات و نقاط صعب‌العبور بوده و ایستگاه‌های هواشناسی به‌ندرت آن‌ها را پوشش می‌دهند (Mobasheri et al., 2010). اندازه‌گیری‌ها و نمونه‌برداری‌های میدانی برف نیز بدلیل زمان‌بر بودن و هزینه بالا مقرون به صرفه نبوده و به صورت محدود قابل اجرا هستند.

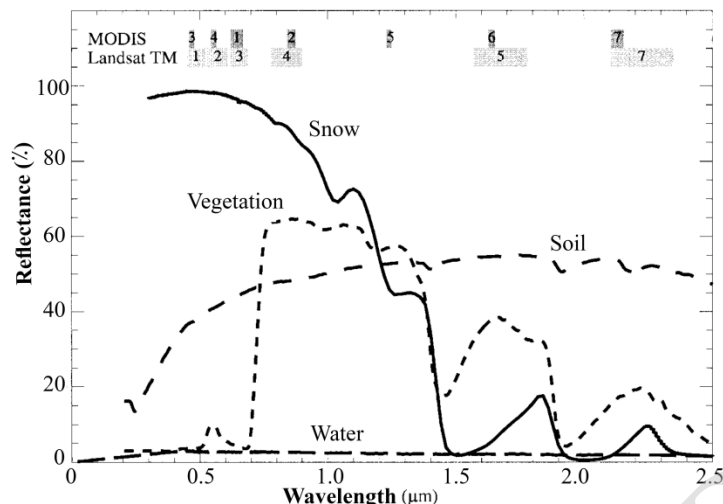


Fig. 1. General reflectance curves for dominant land covers and MODIS land Landsat TM band passes (Klein et al., 1998)

شکل ۱. منحنی رفتار طیفی پوشش‌های غالب زمین و محل

همچنین NDSI حساسیت کمی نسبت به تغییرات شرایط تابش خورشید داشته و برای تأثیرات جوی و هندسه دید، نسبتاً نرمال شده و وابسته به بازتابندگی در یک باند تنها نمی‌باشد (Hall et al., 1998b). لازم به ذکر است که این روش تأثیرات مذکور را تا حد زیادی کاهش می‌دهد، اما آن‌ها را بطور کامل حذف نمی‌کند (Salomonson and Appel, 2004).

Hall et al. (1998a) و Hall et al. (2002) نیز با به‌کارگیری ترکیب دو شاخص NDSI و NDVI در آلاسکا و مقایسه آن با الگوریتم اولیه پوشش برف MODIS به دقت بالاتری در تصاویر Landsat TM رسیدند. (Vikhamar and Solberg, 2003) روشی با نام SnowFrac را جهت بررسی پوشش برف در سطح زیرپیکسل^{۱۱} در جنگل‌های نروژ بر اساس جداسازی طیفی تصاویر MODIS ارائه دادند. در این روش از تصاویر TM با قدرت تفکیک ۳۰ متر جهت شناسایی پیکسل‌های خالص استفاده شد.

Salomonson and Appel (2004) امکان استفاده از شاخص NDSI جهت تخمین کسر پوشش برف^{۱۲} درون یک پیکسل ۵۰۰ متری MODIS را بررسی کردند. در این تحقیق شاخص NDSI جهت استخراج برف بصورت خودکار استفاده شد و تا حدود زیادی سبب کاهش خطاهای جوی و هندسی گردید. همچنین در این تحقیق، جهت توسعه ارتباط بین NDSI و کسر پوشش برف درون یک پیکسل MODIS، از داده‌های همزمان Landsat ETM⁺ با قدرت تفکیک ۳۰ متر بعنوان واقعیت زمینی^{۱۳} استفاده گردید.

قرارگیری باندهای MODIS و Landsat (Klein et al., 1998) بازتابندگی برف تازه در ناحیه مرئی طیف الکترومغناطیس بسیار بالا بوده ولی در مادون قرمز نزدیک کاهش می‌یابد، بخصوص اگر با درشت‌تر شدن دانه‌بندی برف همراه باشد (Wiscombe and Warren, 1980; Choudhury and Chang, 1981; Warren, 1982). بر این اساس، نسبت نرمال شده این باندها جهت تعریف شاخص نرمال شده تفاضلی برف^{۱۴} (NDSI) در تصاویر Landsat TM در سال ۱۹۹۵ برای شناسایی پهنه‌های برفی، نخستین بار مطابق با رابطه ۱ استفاده گردید (Hall et al., 1995).

$$NDSI = \frac{R_G - R_{SWIR}}{R_G + R_{SWIR}} \quad (1)$$

در این رابطه R_G و R_{SWIR} به ترتیب بازتابندگی‌ها در طول موج‌های سبز و مادون قرمز موج کوتاه طیف الکترومغناطیس هستند. این روش توسط سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا^{۱۵} (NASA) برای تولید محصول برف MODIS و با نام‌های MOD10 و MYD10 به ترتیب برای سکوه‌های Terra و Aqua معرفی گردید. برف خالص دارای NDSI بالایی است، ولی این کمیت با وارد شدن سایر پوشش‌ها در پیکسل موردنظر (پیکسل‌های مختلط) کاهش می‌یابد. عبارت دیگر NDSI برف در پیکسل‌های مختلط کمتر از پیکسل‌های با پوشش برف خالص است (Rees, 2005). کاربرد NDSI براساس این واقعیت است که برف و یخ در ناحیه مرئی بطور مشخص بازتابنده‌تر از ناحیه مادون قرمز موج کوتاه طیف هستند، این در حالی است که بازتابندگی بیشتر ابرها در مادون قرمز موج کوتاه نیز بالا است اما بازتابندگی برف کم است (Hall et al., 1998b).

(2009) Richter et al. به مقایسه سه روش تصحیح توپوگرافی، شامل روش تصحیح نیمه تجربی C، روش تصحیح گاما و روش اصلاح شده Minnaert پرداختند و نتیجه گرفتند اگرچه هیچ کدام از روش‌های مذکور در همه نمونه‌ها قابل استفاده نیست، اما روش اصلاح شده Minnaert در بیشتر نمونه‌ها عملکرد مناسبی داد.

(2013) Tang et al. الگوریتمی برای نگاشت برف فلات تبت با استفاده از تصاویر MODIS ارائه دادند. آن‌ها ابتدا برای حذف اثر ابر از شاخص نرمال شده تفاضلی ابر^{۱۴} (NDCI) با به بکارگیری محصول ابر سنجنده MODIS (MOD35) استفاده نمودند. سپس جهت طبقه بندی بهتر پوشش برف، محصول دمای سطح زمین^{۱۵} (MOD11_L2 (LST) را استفاده نمودند. در این مرحله با در نظر گرفتن آستانه حرارتی ۲۸۳ کلوین (معادل تقریباً ۱۰ درجه سانتیگراد) برای LST، پیکسل‌های برفی را از سایر پیکسل‌ها تفکیک نمودند. این حد آستانه بدان دلیل انتخاب شد که پیکسل‌های که قطعاً برف نیستند (دارای دمای سطحی بیش از ۱۰ درجه سانتیگراد هستند)، از پردازش‌های بعدی کنار گذاشته شوند. مقایسه سطح برف بدست آمده از داده‌های Landsat ETM+ و محصول پوشش برف تصاویر MODIS (MOD10_L2) برای قله اورست در سال ۲۰۰۲، نشان داد که محصول پوشش برف تصاویر MODIS میزان برف را با خطای ۲۰/۱ تا ۵۵/۷ درصد بیشتر تخمین می‌زند، در حالی که الگوریتم ارائه شده، دارای خطایی در حدود ۰/۳ تا ۹/۸ درصد بود. نتایج این الگوریتم در مقایسه با داده‌های میدانی برای منطقه هندوکش- هیمالیا در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ نیز دقت بالای ۹۰ درصد را ارائه نمود.

(2013) Rittger et al. سه محصول رایج MODIS شامل نگاشت برف جهانی باینری MODIS که از اولین محصولات استاندارد این سنجنده است، محصول کسر پوشش برف MODIS و یک محصول دیگر برای کسر پوشش برف بنام MODSCAG را بررسی نموده، نتایج آن‌ها را با نقشه‌های برف حاصل از داده‌های Landsat ETM+ (با قدرت تفکیک ۳۰ متر) مقایسه کردند. بررسی‌های تحقیق مذکور، بر روی ۱۷۲ تصویر در مناطق مختلف آمریکا انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که محصول MOD10A1 و محصول اول کسر پوشش برف، در شناسایی برف در طول دوره گذار تجمع و یا ذوب برف ناتوان بوده، در حالی که قدرت محصول MODSCAG در شناسایی برف در طول این دوره، ثابت بود. RMSE کسری بطور متوسط در سراسر مناطق مورد مطالعه، برای MOD10A1 برابر ۰/۲۳ و برای MODSCAG برابر ۰/۱۰ بدست

آمد. همچنین MODSCAG در کلاس‌های مختلف عوارض زمین دارای دقت بیشتر و تغییرات کمتر نسبت به دو محصول دیگر بود. (Satir, 2016) به بررسی و مقایسه تبدیلات تصویری روی تصاویر ماهواره‌ای برای طبقه‌بندی سطح برف در یک مقیاس محلی در تصاویر ماهواره‌ای Landsat در کشور ترکیه پرداخت. شاخص‌های مختلف شناسایی سطح برف شامل NDSI، شاخص نرمال شده تفاضلی برف-یخ^{۱۶} (NDSII)، شاخص نرمال شده تفاضلی مولفه‌های اصلی برف^{۱۷} (NDPCSI) و تبدیل Tasseled Cap رطوبت^{۱۸} (WET) در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. ضریب دقت کاپا در این روش‌ها به ترتیب با استفاده از داده‌های زمینی ۰/۷۴، ۰/۷۶، ۰/۴۰ و ۰/۷۷ به دست آمد که نشان دهنده کارایی و دقت قابل قبول برای دو روش اول و روش آخر بود.

اولین مطالعات برف‌سنجی در ایران در سال ۱۳۶۷ توسط مرکز سنجش از دور ایران جهت برآورد سطح پوشش برف در مناطقی از البرز مرکزی شامل حوضه‌های آبریز کرج، سد لتیان، رودخانه کردان، سد لار و سد انحرافی طالقان انجام شد و پس از آن نیز تحقیقات بسیاری صورت پذیرفت (Mobasheri et al., 2010; Shams et al., 2014).

(2014) Shams et al. با استفاده از تصاویر ASTER به ارزیابی و بهبود تصاویر برف MODIS در مناطق دارای شیب بین ۲۰ تا ۵۰ درصد پرداختند. در این بررسی با بکارگیری شاخص NDSI تصاویر ASTER دو مدل برای بهبود تصاویر برف MODIS ارائه شد. در مدل اول آستانه ۰/۴ برای شاخص NDSI تصاویر ASTER لحاظ شد. از رابطه NDSI‌های دو تصویر، مدل خطی ارائه شد که MODMASTER نامیده شد. این مدل دارای ۷۶ درصد همبستگی و RMSE در حدود ۰/۰۴۷ بود. مدل دوم که MODFASTER نامیده شد نیز جهت تخمین کسر پوشش برف در هر پیکسل طراحی شد که دارای همبستگی ۷۵ درصد و RMSE در حدود ۰/۰۹ بود. در مجموع این تحقیق نشان دهنده تأثیر کم توپوگرافی در شناسایی سطح برف از تصاویر MODIS در شیب‌های متوسط بود.

(2015) Ahmadi et al. در تحقیقی به بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب ناشی از ذوب برف در منطقه مطالعاتی بالادست حوضه آبریز زاینده‌رود پرداختند. در تحقیق مذکور از محصولات روزانه و هشت روزه پوشش برف سنجنده MODIS برای پیش پوشش برف در منطقه مطالعاتی استفاده گردید. به همین منظور در ابتدا دقت محصولات سنجنده MODIS با برداشت‌های انجام شده در

همچنین بدلیل وجود توپوگرافی شدید در این منطقه، منطقه‌ای مناسب برای بررسی اثر تصحیح توپوگرافی می‌باشد. میانگین بارش سالانه این منطقه ۲۵۰ الی ۳۰۰ میلی‌متر بوده و دارای بیشینه ارتفاع ۳۷۰۷ متر از سطح دریا می‌باشد.

شکل ۲ یکی از تصاویر اخذ شده در این پژوهش که مربوط به ناحیه‌ای واقع در شمال غرب کشور را نشان می‌دهد که بخشی از استان‌های آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی شامل قسمتی از دریاچه ارومیه که بطور تقریبی در طول جغرافیایی ۴۵ الی ۴۸ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ الی ۳۹ درجه شمالی قرار دارد را در بر گرفته است. طول و عرض جغرافیایی گوشه شمال غرب تصویر مذکور به ترتیب ۴۴/۹۷ درجه شمالی و ۳۸/۵۳ درجه شرقی و طول و عرض جغرافیایی گوشه جنوب شرق این تصویر به ترتیب ۴۷/۵۳ درجه شمالی و ۳۶/۳۹ درجه شرقی است.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

برای انجام پیاده‌سازی‌های مورد نظر این پژوهش، بعد از انتخاب منطقه مورد مطالعه، به دلیل قدرت تفکیک زمانی ضعیف‌تر سنجنده تصویربرداری عملیاتی زمین^{۱۹} (OLI) مستقر بر ماهواره Landsat 8 که در این پژوهش به عنوان داده واقعیت زمینی انتخاب شده است، ابتدا آرشیو تصاویر ماهواره Landsat 8 در سایت EarthExplorer متعلق به سازمان زمین‌شناسی آمریکا (به آدرس <http://earthexplorer.usgs.gov>)، مربوط به منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ بررسی شده و تصاویر با پوشش بسیار کم ابر (زیر ۵ درصد) انتخاب و دانلود گردید (جدول ۱). کلیه تصاویر تهیه شده دارای فرمت داده سلسله مراتبی^{۲۰} (HDF) بودند که در آن اطلاعات پشتیبان مربوط به تصاویر در کنار خود تصاویر موجود هستند. سپس محصولات سنجنده MODIS در سایت مربوط به این سنجنده متعلق به NASA (به آدرس modis.gsfc.nasa.gov) با نزدیک‌ترین تاریخ و ساعت گذر به تصاویر Landsat منتخب، شامل محصول MOD02HKM با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر برای استخراج مقادیر بازتابندگی جهت تعیین سطح برف، محصول MOD021KM با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر برای استخراج زوایای آزیموت و زینت خورشیدی جهت اعمال تصحیح توپوگرافی و محصول MOD11_L2 از محصولات سطح ۲ برای استخراج دمای سطح زمین با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر دانلود شده و با استفاده از اطلاعات موجود در آن‌ها، زمین مرجع گردیدند (جدول ۱).

ایستگاه‌های زمینی بررسی گردید. نتایج بیانگر دقت کلی ۷۳/۴٪ برای محصول روزانه پوشش برف و مقدار ۸۴/۲٪ برای محصول هشت روزه پوشش بود که نشان دهنده مقادیر قابل قبولی بود. به همین دلیل، با استفاده از پوشش برف استخراج شده و متغیرهای دیگر مدل، شبیه‌سازی ذوب برف با استفاده از مدل گردش عمومی HadCM3 در زیرحوضه مورد مطالعه انجام گرفت. نتایج در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی نشان دهنده دقت قابل قبول این مدل در شبیه‌سازی رواناب بود. در نهایت با استفاده از خروجی‌های ریزمقیاس شده مدل گردش عمومی شبیه‌سازی برف-رواناب برای بازه ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰ به عنوان آینده نزدیک، و ۲۰۷۱ تا ۲۰۹۹ به عنوان آینده دور، نتایج نشان دهنده کاهش حجم رواناب سالانه در زیرحوضه، کاهش شدید رواناب تولید شده در فصول بهار و تابستان و افزایش رواناب در فصول زمستان و پاییز بود.

در تحقیقات انجام شده معمولاً شناسایی برف در حد یک یا چند پیکسل انجام شده، در حالی که در این تحقیق شناسایی برف در پهنه‌های بزرگتر در دستور کار قرار گرفت. همچنین بر اساس مطالعات انجام شده دقت الگوریتم استخراج سطح برف در تصاویر MODIS در حد الگوریتم‌های جهانی کارایی مناسبی داشته و در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای نیاز به بهبودهایی دارد تا دقت مناسبی را ارائه نماید. در مطالعه حاضر، هدف بهبود دقت الگوریتم استخراج سطح پوشش برف از تصاویر MODIS با بهره‌گیری از تصحیح اثرات توپوگرافی و دمای سطح زمین (LST) است. به نظر می‌رسد به جهت آنکه در کشور ما بیشتر پوشش برفی در مناطق کوهستانی که دارای توپوگرافی شدید هستند وجود دارد، تصحیح توپوگرافی بتواند تاثیر مثبتی در الگوریتم استخراج سطح پوشش برف داشته باشد. به دلیل عدم جمع‌آوری داده‌های پوشش برف در کشور، مانند بسیاری از تحقیقات انجام شده تصویر سنجنده OLI مستقر بر ماهواره Landsat 8 (قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر) که دارای قدرت تفکیک مکانی بهتر نسبت به MODIS است، به عنوان داده واقعیت زمینی انتخاب گردید.

۲- روش تحقیق

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه انتخاب شده در این مطالعه، شمال غرب ایران شامل قله کوه سهند و بخشی از محدوده اطراف دریاچه ارومیه است. این منطقه دارای آب و هوای سرد کوهستانی بوده و بعلت وجود برف در ارتفاعات، منطقه‌ای مناسب برای بررسی سطح پوشش برف است.

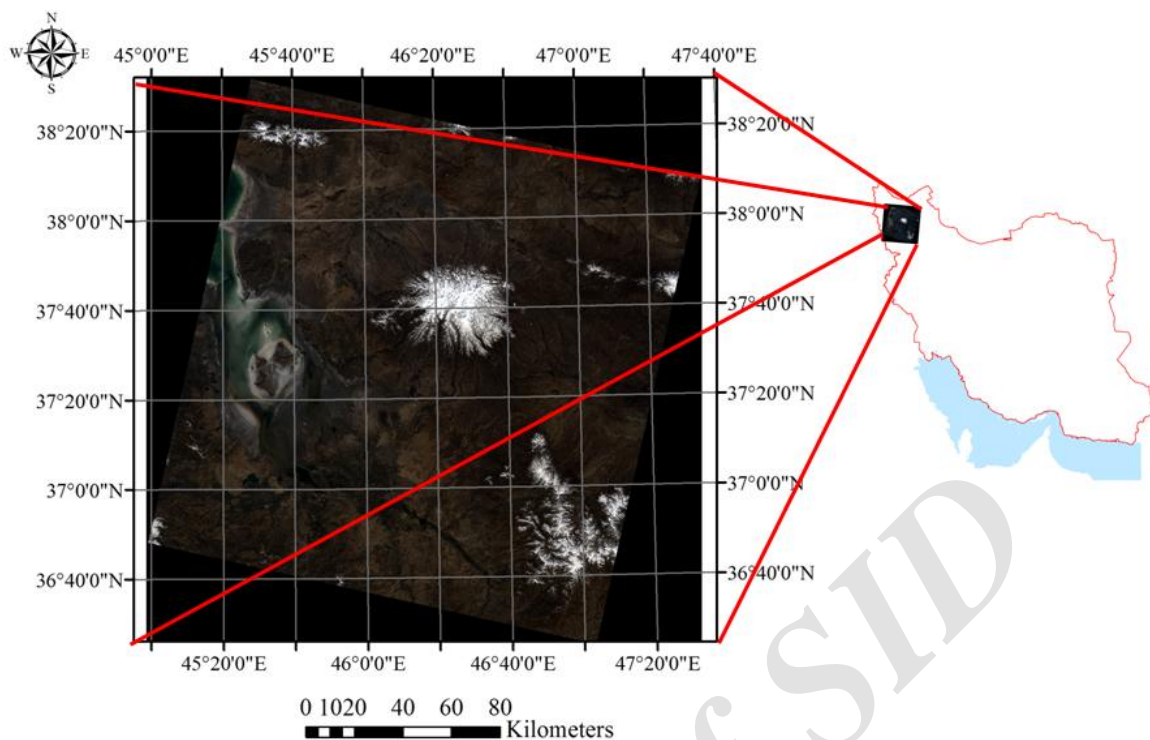


Fig. 2. Landsat 8 scene of the study area for 26 February 2015

شکل ۲- نمایی از منطقه مورد مطالعه در تصویر Landsat 8 اخذ شده مربوط به تاریخ ۲۶ فوریه ۲۰۱۵

Table 1. Temporal characteristics of the utilized images
جدول ۱- مشخصات زمانی تصاویر استفاده شده

Number	Image acquisition date			Acquisition time of OLI image UTC	Acquisition time of MODIS Terra image UTC
	Day	Month	Year		
1	10	February	2014	7:39	7:05
2	14	January	2015	7:27	6:55
3	6	February	2015	7:32	7:00
4	26	February	2015	7:33	7:05
5	15	February	2015	7:26	6:55

۲-۳- پیاده‌سازی الگوریتم‌های مورد نظر

جهت انجام پیاده‌سازی‌های مورد نظر در این تحقیق، از هریک محصولات MOD02HKM منتخب سه محدوده ۱۰۰ در ۱۰۰ پیکسل از مناطقی که دارای پوشش برف بودند، جداسازی شده و مطابق الگوریتم‌های معرفی شده در ادامه، بررسی‌های مورد نظر انجام گردید. در حقیقت ۱۵ محدوده مطالعاتی در ۵ تصویر MOD02HKM منتخب (هر تصویر سه محدوده) مورد استفاده قرار گرفت.

کلیه پیش‌پردازش‌های این پژوهش در نرم‌افزار ENVI 5.1 و محاسبات و پیاده‌سازی کدهای مورد نیاز برای الگوریتم‌ها در نرم‌افزار

همچنین محصول ابر سنجنده MODIS (MOD35) مربوط به تاریخ‌های منتخب برای کنار گذاشتن پیکسل‌های تصاویر MODIS با احتمال ابری بودن بیش از ۵ درصد از پردازش‌های بعدی و معادل آن‌ها از تصاویر Landsat نیز دانلود گردید. کلیه محصولات سنجنده MODIS تهیه شده نیز دارای فرمت HDF بودند.

همچنین برای استخراج اطلاعات شیب و جهت شیب که در تصحیح توپوگرافی مورد نیاز است، تصویر مدل رقومی ارتفاعی^{۲۱} (DEM) حاصل از SRTM^{۲۲} (تهیه شده در سال ۲۰۰۷) با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر مربوط به ناحیه مذکور، تهیه گردید.

اجرای مدل، در تصویر Landsat 8 ناحیه‌ای بزرگتر از مقدار فوق انتخاب و این ناحیه نیز از داخل تصویر Landsat 8 جداسازی شد.

گام دوم: با توجه به باندهای ۲، ۴ و ۶ سنجنده MODIS و باندهای معادل آن‌ها در Landsat 8، یعنی باندهای ۵، ۳ و ۶ شروطی بر اساس روابط مورد استفاده در محصول برف سنجنده MODIS (MOD10)، روی پیکسل‌های دو تصویر اعمال شد. روابط مذکور برای تصاویر MODIS عبارتند از:

$$B_2 \geq 0.11 \quad (2)$$

$$B_4 \geq 0.10 \quad (3)$$

$$NDSI = \frac{B_4 - B_6}{B_4 + B_6} \geq 0.4 \quad (4)$$

که در روابط فوق B_2 و B_4 و B_6 به ترتیب باندهای ۲ و ۴ و ۶ سنجنده MODIS هستند. رابطه (۲) برای تفکیک برف از آب بوده، زیرا همانطور که در مقدمه ذکر گردید، برف در ناحیه مادون قرمز نزدیک دارای بازتابندگی بالایی بوده و پیکسلی که بازتابندگی آن در این محدوده طیفی کمتر از ۰/۱۱ باشد احتمال حضور برف در آن منتفی خواهد بود. رابطه دوم به دلیل بازتابندگی بالای برف در ناحیه مرئی طیف الکترومغناطیس، متضمن وجود برف در تصویر بوده و رابطه آخر برای تفکیک برف از سایر عوارض سطحی بخصوص ابرها می‌باشد. برای تصویر Landsat 8 نیز روابط معادل به صورت زیر پیاده‌سازی گردید:

$$B_5 \geq 0.11 \quad (5)$$

$$B_3 \geq 0.10 \quad (6)$$

$$NDSI = \frac{B_3 - B_6}{B_3 + B_6} \geq 0.4 \quad (7)$$

و در این روابط B_5 و B_3 و B_6 به ترتیب باندهای ۵ و ۳ و ۶ سنجنده Landsat 8 هستند.

گام سوم: با توجه به اینکه ابعاد پیکسل‌های محصول MOD02HKM ۵۰۰ متر و ابعاد پیکسل‌های تصویر Landsat 8، ۳۰ متر است، می‌توان گفت هر پیکسل MOD02HKM تقریباً با $289 (17^2)$ پیکسل Landsat 8 معادل است. برای پیدا کردن پیکسل‌های معادل MOD02HKM در تصویر جداسازی شده Landsat 8، از طول و عرض جغرافیایی پیکسل‌های دو تصویر استفاده شد. ابتدا با محاسبه کمترین فاصله بین مرکز پیکسل‌های MODIS و Landsat 8، پیکسل معادل مرکز پیکسل‌های MODIS را یافته، سپس با حرکت به اندازه ۸ پیکسل به طرف بالا، پایین، چپ و راست روی تصویر Landsat 8، بلوک‌هایی با ابعاد

Matlab R2012 انجام گردیده است. همچنین جهت آماده‌سازی خروجی‌ها از نرم‌افزار Arc GIS 10.2 استفاده شده است. در مرحله اول بر روی داده‌های مورد استفاده پیش‌پردازش انجام گردید تا داده‌ها آماده ورود به الگوریتم‌های مورد نظر شوند. در این پژوهش سه الگوریتم برف‌سنجی شامل ۱- آستانه‌گذاری روی NDSI، ۲- تصحیح توپوگرافی و آستانه‌گذاری روی NDSI و ۳- آستانه‌گذاری روی LST و آستانه‌گذاری بر روی NDSI پیاده‌سازی گردید که در ادامه به تشریح هر یک از الگوریتم‌ها و نتیجه پیاده‌سازی آن‌ها خواهیم پرداخت.

۲-۳-۱- پیش پردازش داده‌ها

در این مرحله تصحیح رادیومتریک بر روی تصاویر Landsat 8 منتخب انجام گردید. جهت انجام این تصحیح، با اعمال ضرایب Gain و Offset موجود در فایل پشتیبان تصاویر، داده خام^{۲۳} به تابندگی^{۲۴} و سپس به بازتابندگی تبدیل شدند. همچنین تصاویر Landsat 8 با استفاده از اطلاعات طول و عرض جغرافیایی موجود در آن‌ها، زمین مرجع گردیدند. در مورد تصاویر و محصولات مورد استفاده از سنجنده MODIS هم تصحیحات رادیومتریک توسط Scale و Offset موجود در فایل پشتیبان محصولات انجام شد و تصحیح هندسی با بهره‌گیری از اطلاعات طول و عرض جغرافیایی موجود در فایل با فرمت HDF تصاویر اعمال گردید. بدین ترتیب کلیه تصاویر و محصولات آماده ورود به مرحله پیاده‌سازی الگوریتم‌ها شدند.

۲-۳-۲- پیاده سازی الگوریتم برف‌سنجی توسط شاخص NDSI

برای پیاده‌سازی این الگوریتم برف‌سنجی، شاخص NDSI روی پیکسل‌های محصولات MOD02HKM منتخب سنجنده MODIS و تصاویر Landsat 8 معادل آن پیاده‌سازی شده و نتایج به دست آمده مقایسه و ارزیابی شدند. برای این الگوریتم، عملیاتی با چهار گام در نظر گرفته شد:

گام اول: ابتدا ناحیه‌ای به اندازه ۱۰۰۰۰ پیکسل (مربعی از پیکسل‌ها به ابعاد ۱۰۰ در ۱۰۰) از محصول MOD02HKM انتخاب و این ناحیه از داخل محصول مورد نظر جدا شد. معادل این محدوده بر اساس طول و عرض جغرافیایی در تصویر Landsat 8 نیز مشخص گردید، اما برای جلوگیری از خطاهای احتمالی در حین

۱۷ در ۱۷ پیکسل ایجاد گردید. هر بلوک ۱۷ در ۱۷ (شامل ۲۸۹ پیکسل) از تصویر Landsat 8 معادل یک پیکسل از محصول MOD02HKM در نظر گرفته شد.

گام چهارم: با توجه به محاسبه شاخص NDSI در گام سوم، میانگین NDSI پیکسل‌های هر بلوک Landsat محاسبه شده و عدد بدست آمده بعنوان NDSI کل بلوک لحاظ گردید. با این کار یک تصویر با ۱۰۰۰۰ پیکسل در تصویر بریده شده Landsat 8 ایجاد شد که با تصویر MODIS قابل قیاس است.

۳-۳-۲- پیاده سازی الگوریتم برف‌سنجی توسط تصحیح توپوگرافی و شاخص NDSI

با توجه به اینکه توپوگرافی موجود در مناطق کوهستانی باعث تغییر زاویه تابش محلی و در نتیجه تغییر بازتابندگی رسیده به سنجنده شده و در نهایت در نتیجه الگوریتم برف‌سنجی تاثیرگذار هستند، در این الگوریتم ابتدا تصحیح توپوگرافی روی هر دو تصویر اعمال شده و اثر آن روی الگوریتم برف‌سنجی اول بررسی گردید. برای این کار از روش لامبرت (یا رابطه کسینوس‌ها) استفاده کردیم (Tang et al., 2013):

$$\cos \beta(x, y) = \cos \theta_s \cos \theta_n(x, y) + \sin \theta_s \sin \theta_n(x, y) \cos(\varphi_s - \varphi_n(x, y)) \quad (8)$$

در این رابطه x و y مختصات پیکسل مورد نظر در تصویر، θ_n شیب زمین، φ_n جهت شیب زمین، θ_s زاویه زینت و φ_s زاویه آزیموت خورشیدی می‌باشند. β نیز زاویه روشنایی محلی خورشید^{۲۵} است. با استفاده از رابطه بالا، رابطه تصحیح توپوگرافی به روش لامبرت بشرح زیر محاسبه خواهد شد:

$$\rho_H = \rho_T (\cos \theta_s / \cos \beta) \quad (9)$$

که در این رابطه ρ_H و ρ_T به ترتیب بازتابندگی از سطح مایل و بازتابندگی از سطح افقی یا سطح اصلاح شده می‌باشند. برای اعمال روابط مذکور زوایای آزیموت و زینت خورشیدی برای همه پیکسل‌های هر دو نمونه مرحله اول با استفاده از محصول MOD021KM بدست آمد. همچنین تصاویر شیب و جهت از تصویر DEM SRTM به دست آمد و به ترتیب برای تصحیح توپوگرافی محصول MOD021KM با قدرت تفکیک ۵۰۰ متر و تصویر Landsat 8 با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر نمونه‌برداری مجدد گردید. در نهایت مدلی ساخته شد که با ۶ ورودی توضیح داده شده در بالا، تصویر ناحیه مورد نظر را گرفته، الگوریتم شناسایی برف مرحله قبل را با انجام تصحیح توپوگرافی اجرا کرده و مساحت نواحی

برفی را بعد از تصحیح توپوگرافی محاسبه می‌نماید. به این ترتیب که پیکسل‌های با NDSI بیشتر از ۰/۴ را برف در نظر گرفته، البته برای جلوگیری از ورود خطای برف‌سنجی سنجنده MODIS به دلیل ابعاد بزرگ پیکسل‌ها و احتمال وجود پیکسل‌های مختلط، یکبار هم آستانه ۰/۳ برای شاخص NDSI پیکسل‌های نمونه این تصویر اعمال و نتایج بطور جداگانه بررسی شد.

۲-۳-۴- پیاده سازی الگوریتم برف‌سنجی توسط LST و شاخص NDSI

در این مرحله از پیاده سازی، دمای سطح زمین نیز وارد الگوریتم اولیه (بدون تصحیح توپوگرافی) گردید تا اثر این پارامتر به صورت جداگانه در مدل مورد بررسی قرار گیرد. ایده اولیه استفاده از دما برای شناسایی برف در تصاویر ماهواره‌ای با عنوان خط جدایی برف در الگوریتم‌های اولیه ارائه شده توسط (Hall et al., 1995) برای شناسایی سطح برف از تصاویر ماهواره‌ای مطرح شده بود، اما استفاده از دما به عنوان یک ماسک حرارتی، توسط (Tang et al., 2013) بطور مشخص در نظر گرفته شد. در تحقیق انجام شده توسط (Tang et al., 2013)، حد آستانه ۲۸۳ کلوین به عنوان ماسک حرارتی در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که با توجه به دمای یخ در شرایط استاندارد که حدود ۲۷۳ کلوین است، با کنار گذاشتن پیکسل‌ها با دمایی بالاتر از مقدار فوق، صرفاً محدوده‌هایی که با تقریب بالا می‌توان گفت برف نیستند، از چرخه الگوریتم خارج می‌شوند. انتخاب این عدد کاملاً تابع شرایط منطقه مورد مطالعه و جنس و سن برف است، اما برای اطمینان از آستانه‌های مذکور، در این تحقیق ۵ درجه کمتر و بیشتر از آستانه فوق نیز مورد آزمون قرار گرفته‌اند. در این راستا، برای بررسی حد آستانه دمایی مناسب، دماهای ۲۷۸، ۲۸۳ و ۲۸۸ کلوین (معادل ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه سانتیگراد) بعنوان دمای آستانه در نظر گرفته شد. به این ترتیب که بعد از انتخاب نمونه‌های دو تصویر و بعد از اعمال شاخص NDSI، حد آستانه LST نیز اعمال گردید، بطوریکه فقط پیکسل‌هایی را که همزمان دارای NDSI بالاتر از ۰/۴ و دمای سطح کمتر از حد آستانه دمای انتخابی بودند، به عنوان برف لحاظ شدند. در حقیقت حد آستانه در نظر گرفته شده برای LST صرفاً به منظور حذف پیکسل‌های با دمایی بالایی هستند که ممکن است به اشتباه در خروجی الگوریتم برف‌سنجی وارد شوند. مانند الگوریتم قبلی، در این الگوریتم نیز حد آستانه ۰/۳ هم برای مقادیر NDSI مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

الگوریتم اول بر روی تمام تصاویر منتخب اعمال شده و نتایج محاسبه گردید. برای نمونه نتایج پیاده‌سازی این الگوریتم، بر روی تصویر Landsat 8 و محصول MOD02HKM برای یکی از تاریخ‌های منتخب در شکل ۳ ارائه شده است. تصویر Landsat 8 بلوک‌بندی شده معادل محصول MODIS پس از اعمال فیلتر ابر در شکل ۴ نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود از نتیجه حاصل از تصویر MODIS و Landsat 8 از لحاظ ظاهری شباهت قابل قبولی با یکدیگر دارند.

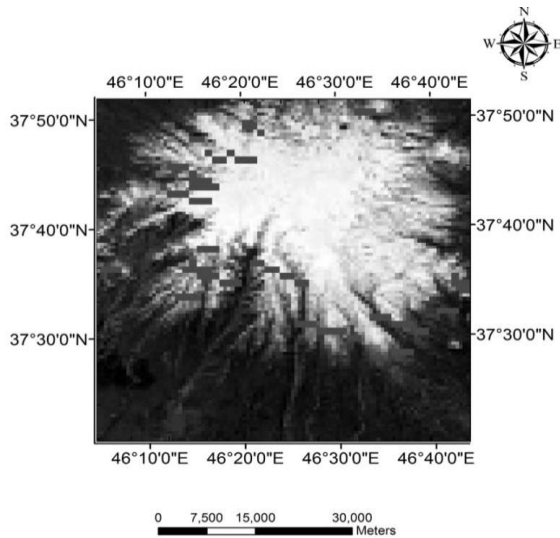


Fig. 4. NDSI image for gridded Landsat 8 image of the 26 February 2015 (with 10000 pixels)

شکل ۴- تصویر NDSI Landsat 8 بلوک بندی شده مربوط به تاریخ ۲۶ فوریه ۲۰۱۶ (دارای ۱۰۰۰۰ پیکسل)

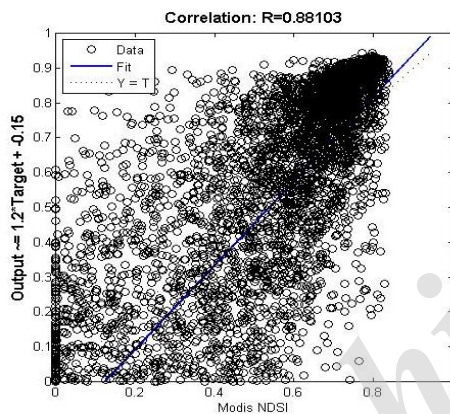


Fig. 5. Scatter plot of MODIS NDSI (x axis) versus Landsat 8 NDSI (y axis) for 26 February 2016

شکل ۵- نمودار پراکنش NDSI حاصل از MODIS (محور x) در مقابل NDSI تصویر Landsat 8 (محور y) برای تاریخ ۲۶ فوریه ۲۰۱۶

برای مقایسه بهتر سطح برف استخراج شده از اعمال الگوریتم اول از محصول MOD05HKM و Landsat 8، نمودار پراکنش NDSI تصویر Landsat 8 (محور y) در مقابل NDSI تصویر MODIS (محور x) برای تاریخ منتخب ترسیم شد و ضریب همبستگی بین آن دو محاسبه گردید (شکل ۵). در این نمودار مقادیر شکل ۴ در مقابل مقادیر شکل ۳ سمت راست قرار گرفته‌اند. ضریب همبستگی داده‌ها بالای ۸۸٪ بوده که نشان دهنده همبستگی مناسب بین نتایج استخراج شده است.

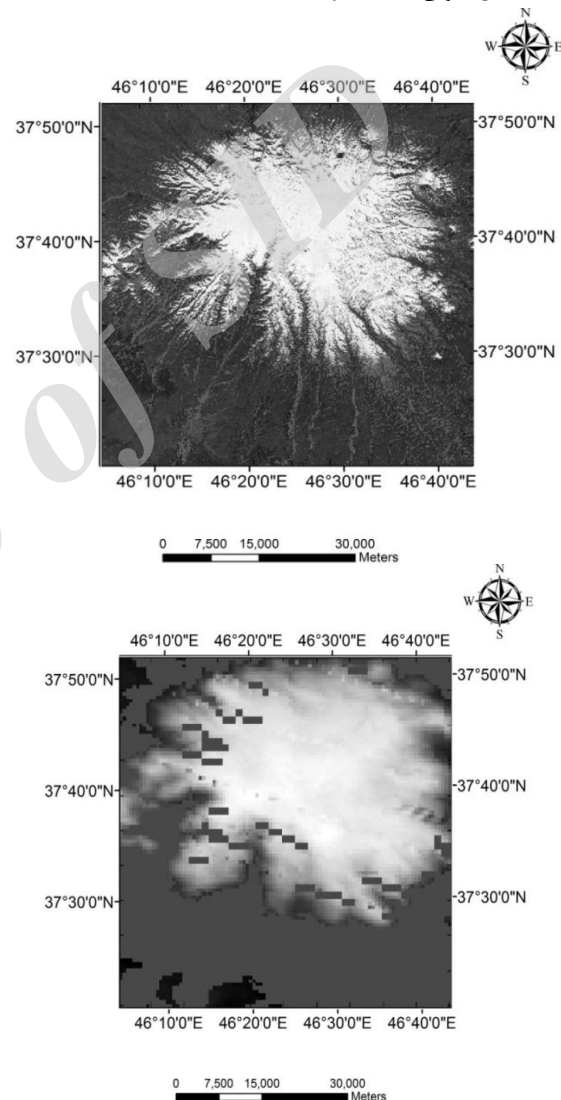


Fig. 3. Result of implementing the first algorithm on MODIS image of 26 February 2015 (right), and equivalent Landsat 8 image (left)

شکل ۳- نتیجه اعمال الگوریتم اول روی نمونه MODIS تاریخ ۲۶ فوریه ۲۰۱۵ (سمت راست) و تصویر Landsat 8 معادل آن (سمت چپ)

پوشش برف آن کمتر از ۵۰ درصد بوده (۳۶/۷۱ درصد) و نیز نمونه‌های ۳، ۹ و ۱۱ با بیشترین خطا داری کسر برف کمتر از ۵۰ درصد هستند. بنابراین کارایی این الگوریتم در تصاویر با پوشش‌های کم برف کاهش می‌یابد که علت می‌تواند به دلیل قدرت تفکیک سنجنده MODIS (یعنی ۵۰۰ در ۵۰۰ متر) باشد که با کاهش کسر پوشش برف، شانس ایجاد پیکسل‌های مختلط (برف و غیربرف) را افزایش می‌دهد.

در جدول ۳ نتایج حاصل از اعمال الگوریتم دوم (اعمال تصحیح توپوگرافی) ارائه شده است. در این جدول متوسط قدر مطلق خطای نسبی نمونه‌های مورد استفاده برای NDSI بیش از ۰/۴ به میزان ۲/۲۵ درصد محاسبه گردید که به طور متوسط بهبود ۱/۱۹ درصدی را نشان می‌دهد. برای NDSI بیش از ۰/۳ مقدار متوسط قدر مطلق خطای نسبی ۴/۶۸ درصد بدست آمد که کارایی بهتر آستانه ۰/۴ را مشخص می‌کند. همچنین مانند جدول ۲، نتایج ارائه شده در جدول ۳ نیز مؤید کارایی بهتر الگوریتم برای نمونه‌های با کسر پوشش برف بیشتر است.

جدول ۴ نشان دهنده نتایج الگوریتم سوم بر روی نمونه‌های منتخب است. برای بررسی دقیق‌تر کارایی این الگوریتم، شکل ۶ که بیانگر نمونه‌ای از نتایج اعمال الگوریتم با دو حد آستانه ۰/۳ و ۰/۴ بر روی یکی از نمونه‌های منتخب است، ارائه شده است.

جدول ۲ نتایج بدست آمده از اعمال الگوریتم اول (برف‌سنجی به روش پیشنهادی محصول برف MODIS یا MOD10) را نشان می‌دهد. در این جدول‌ها سطح برف هر مرحله از پردازش بر حسب کیلومتر مربع، توسط مدل محاسبه و شرایط هرکدام از اعداد نیز در بالای هر ستون نوشته شد. خطای نسبی محاسبه شده در هر یک از جدول‌ها با محاسبه نسبت تفاضل مقدار محاسباتی (به دست آمده از الگوریتم برای MODIS) به مقدار واقعی (محاسبه شده از Landsat 8) به دست آمده است.

در جدول ۲ مشاهده می‌شود آستانه ۰/۳ و ۰/۴ برای NDSI تصویر MODIS بطور جداگانه در ستون‌های سوم و چهارم، آستانه ۰/۴ برای NDSI تصویر Landsat 8 در ستون چهارم و میزان خطای برف‌سنجی در ستون پنجم ارائه شده است. در این جدول متوسط مقادیر قدر مطلق خطاهای نسبی با استفاده از الگوریتم اول که همان الگوریتم استاندارد MODIS است، به میزان ۳/۴۴ درصد محاسبه شد و برای NDSI بیش از ۰/۳ این مقدار برابر ۶/۸۶ درصد گردید که نشان دهنده مناسب‌تر بودن حد آستانه ۰/۴ می‌باشد.

از طرف دیگر برای بررسی ارتباط کارایی الگوریتم به کسر پوشش برف (تقسیم سطح پیکسل‌های برفی بر سطح کل نمونه ده هزار پیکسلی) نمونه انتخاب شده، کسر پوشش برف نیز بر حسب درصد در جدول ۲ ارائه شده است. بیشینه خطای مشاهده شده در این جدول (۸/۲۳ درصد برای نمونه ۹) مربوط به نمونه‌ای است که کسر

Table 2. Snow cover results of first algorithm (implementing NDSI) on samples with 10000 pixels
جدول ۲- نتایج سطح برف مربوط به الگوریتم اول (اعمال شاخص NDSI) روی نمونه‌های ۱۰۰۰۰ پیکسلی

Sample Number	Image date	MODIS sample pixels with NDSI>0.3	MODIS sample pixels with NDSI>0.4	Landsat-8 sample pixels with NDSI>0.4	Relative error (%) (MODIS with NDSI>0.4)	Snow cover fraction (%)
1	10 February 2014	2084.00	2067.00	2041.00	1.27	82.68
2		1853.25	1833.75	1764.50	3.92	73.35
3		1228.00	1203.75	1124.50	7.05	48.15
4	14 January 2015	895.50	826.25	806.00	2.51	33.05
5		381.25	370.50	388.25	-4.57	14.82
6		1020.75	958.50	942.50	1.70	38.34
7	6 February 2015	1186.75	1167.75	1128.75	3.46	46.71
8		1010.75	943.75	927.50	1.75	37.75
9		981.50	917.75	848.00	8.23	36.71
10	26 February 2016	1385.75	1311.75	1333.25	-1.61	52.47
11		437.25	367.25	398.50	-7.84	14.69
12		785.75	758.25	729.00	4.01	30.33
13	15 February 2015	1633.75	1593.25	1587.00	0.39	63.73
14		497.25	473.75	462.00	2.54	18.95
15		519.25	498.25	502.00	-0.75	19.93

Table 3. Snow cover results of second algorithm (topographic correction and NDSI) on samples with 10000 pixels

جدول ۳- نتایج سطح برف مربوط به الگوریتم دوم (تصحیح توپوگرافی و شاخص NDSI) روی نمونه‌های ۱۰۰۰۰ پیکسلی

Sample Number	Image date	MODIS sample pixels with NDSI>0.3	MODIS sample pixels with NDSI>0.4	Landsat-8 sample pixels with NDSI>0.4	Relative error (%) (MODIS with NDSI>0.4)	Snow cover fraction (%)
1	10 February 2014	2072.50	2055.50	2043.75	0.57	82.22
2		1809.00	1790.00	1780.25	0.55	71.60
3		1205.25	1181.50	1135.75	4.03	47.26
4	14 January 2015	881.25	813.25	817.50	-0.52	32.53
5		381.25	370.50	388.75	-4.69	14.82
6		1010.75	949.25	949.25	0.00	37.97
7	6 February 2015	1172.25	1154.50	1136.50	1.58	46.18
8		992.50	932.50	941.50	-0.96	37.30
9		916.25	864.00	891.50	-3.08	34.56
10	26 February 2016	1380.50	1306.75	1334.00	-2.04	52.27
11		436.25	367.00	400.50	-8.36	14.68
12		783.25	755.75	729.00	3.67	30.23
13	15 February 2015	1630.75	1590.50	1587.00	0.22	63.62
14		497.25	473.75	462.00	2.54	18.95
15		518.50	497.50	502.00	-0.90	19.90

متوسط قدر مطلق خطای نسبی نمونه‌های موجود به ترتیب برابر ۲/۵۸، ۳/۰۲ و ۳/۱۲ درصد به دست آمدند که نشان دهنده بهبود نتایج نسبت به مقدار ۳/۴۴ درصد الگوریتم اول بوده و همچنین بیانگر کارایی مناسب‌تر حد آستانه LST به مقدار ۲۷۸ کلون نسبت به ۲ آستانه دیگر است. این مورد می‌تواند به دلیل وارد شدن پیکسل‌های بدون پوشش برف و با دمای بالا در آستانه‌های بالاتر برای LST باشد که از هر دو آستانه با مقدار پایین NDSI و مقدار بالای LST عبور نموده‌اند.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی سطح برف بیش از نیم قرن است که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است و تصاویر ماهواره‌ای MODIS به عنوان یکی از منابع اطلاعاتی مناسب در این حوزه مطرح است. سنجنده مذکور بر روی دو ماهواره سوار بوده که دارای دو گذر روزانه از هر منطقه بوده و می‌تواند هر روز دو پوشش کامل از سطح زمین ارائه دهد. تیم تحقیقاتی این سنجنده محصولی استاندارد از هر تصویر MODIS با نام MOD10 تولید نموده و منتشر می‌نمایند که الگوریتمی برای شناسایی برف روی آن اعمال شده است. این محصول در سطح جهانی کارایی خوبی داشته ولی برای سطح منطقه‌ای و مدل‌های دقیق هیدرولوژیکی که نیاز به دقت بیشتری در پوشش سطح برف دارند، نیاز به روش مناسب‌تری است.

همانطور که در این شکل مشخص است، در برخی پیکسل‌های مختلط در محصول MOD02HKM که درصد پوشش برف پایین است (مانند پیکسل‌های موجود در گوشه بالا سمت راست نمونه مورد نظر)، آستانه ۰/۴ پیکسل را بدون برف اعلام می‌نماید، ولی همانطور که در شکل ۷ (نتیجه اعمال الگوریتم بر روی تصویر Landsat 8) مشخص است، این پیکسل‌ها دارای پوشش برف هستند. بنابراین یک راهکار، کاستن حد آستانه NDSI است، ولی این مورد می‌تواند موجب وارد شدن پیکسل‌های غیربرف به الگوریتم شود. برای جلوگیری از ایجاد این خطا می‌توان از آستانه‌گذاری بر روی مقدار دمای سطح استفاده نمود که باعث حذف پیکسل‌های با دمای سطحی بالا می‌شود.

در جدول ۴ برای هر نمونه نتایج سه حد آستانه ۲۷۸، ۲۸۳ و ۲۸۸ کلون (معادل ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه سانتیگراد) جداگانه در ۳ ردیف نوشته شده که هر ردیف، شامل مساحت پوشش برف مربوطه است. لازم به ذکر است که اعمال حد آستانه فقط به صورت یک فیلتر عمل نموده و پیکسل‌هایی که دارای دمای سطح بالایی هستند را حذف می‌نماید. در این جدول با توجه به مشکل‌دار بودن تصویر LST نمونه‌های ۵، ۱۰ و ۱۱، این نمونه‌ها در این مرحله فاقد خطای نسبی بوده (الگوریتم در بخش‌های دارای داده اعمال می‌شود)، ولی نتایج سایر نمونه‌ها آمده است. پس از اعمال حد آستانه NDSI به مقدار ۰/۴ و حد آستانه LST به مقدار ۲۷۸، ۲۸۳ و ۲۸۸ کلون،

Table 4. Snow cover results of third algorithm (Thresholding on LST and NDSI) on samples with 10000 pixels

جدول ۴- نتایج سطح برف مربوط به الگوریتم سوم (اعمال آستانه LST و شاخص NDSI) روی نمونه‌های ۱۰۰۰۰ پیکسلی

Sample number	Image date	LST filter temperature (K)	MODIS sample pixels with NDSI>0.3 and LST filter	MODIS sample pixels with NDSI>0.4 and LST filter	Landsat-8 sample pixels with NDSI>0.4	Relative error (%) (MODIS with NDSI>0.4)	Snow cover fraction (%)
1		278	2084	2067	2041	1.27	82.68
		283	2084	2067	2041	1.27	82.68
		288	2084	2067	2041	1.27	82.68
2	10 February 2014	278	1850.25	1831.25	1764.5	3.78	73.25
		283	1853.25	1833.75	1764.5	3.92	73.35
		288	1853.25	1833.75	1764.5	3.92	73.35
3		278	1217.5	1193.25	1124.5	6.11	47.73
		283	1228	1203.75	1124.5	7.05	48.15
		288	1228	1203.75	1124.5	7.05	48.15
4		278	884	821.75	806	1.95	32.87
		283	884.5	821.75	806	1.95	32.87
		288	895.5	826.25	806	2.51	33.05
5	14 January 2015	278	380.75	370.5	0	-	14.82
		283	380.75	370.5	0	-	14.82
		288	381.25	370.5	0	-	14.82
6		278	1014.25	957	942.5	1.54	38.28
		283	1014.75	957	942.5	1.54	38.28
		288	1020.75	958.5	942.5	1.70	38.34
7		278	1172.75	1160	1128.75	2.77	46.40
		283	1183.75	1166.25	1128.75	3.32	46.65
		288	1186.75	1167.75	1128.75	3.46	46.71
8	6 February 2015	278	992.75	938	927.5	1.13	37.52
		283	1003	942.75	927.5	1.64	37.71
		288	1010.75	943.75	927.5	1.75	37.75
9		278	938	887.25	848	4.63	35.49
		283	974.75	913.25	848	7.69	36.53
		288	981.5	917.75	848	8.23	36.71
10		278	1385.5	1311.75	0	-	52.47
		283	1385.75	1311.75	0	-	52.47
		288	1385.75	1311.75	0	-	52.47
11	26 February 2016	278	408.75	352.25	0	-	14.09
		283	417.25	356	0	-	14.24
		288	437.25	367.25	0	-	14.69
12		278	785.75	758.25	729	4.01	30.33
		283	785.75	758.25	729	4.01	30.33
		288	785.75	758.25	729	4.01	30.33
13		278	1633.75	1593.25	1587	0.39	63.73
		283	1633.75	1593.25	1587	0.39	63.73
		288	1633.75	1593.25	1587	0.39	63.73
14	15 February 2015	278	493.5	471.5	462	2.06	18.86
		283	497.25	473.75	462	2.54	18.95
		288	497.25	473.75	462	2.54	18.95
15		278	511.5	495.5	502	-1.29	19.82
		283	516.75	497.75	502	-0.85	19.91
		288	519.25	498.25	502	-0.75	19.93

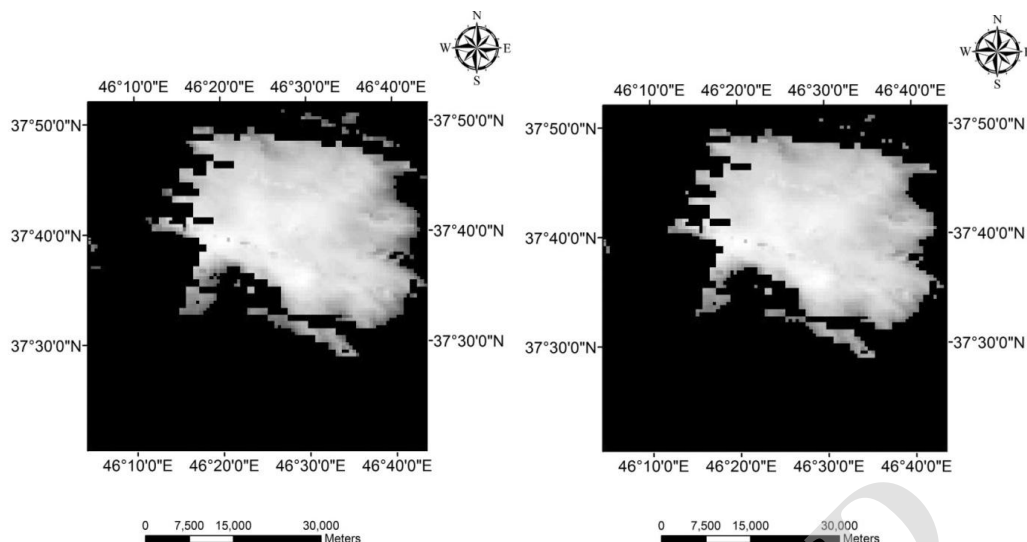


Fig. 6. Sample MODIS subimage of 26 February 2015 with $LST < 283\text{ K}$ and $NDSI > 0.4$ (right), and $NDSI > 0.3$ (left)

شکل ۶- نمونه تصویر MODIS تاریخ ۲۶ فوریه ۲۰۱۵ با LST کمتر از 283 K و $NDSI$ بیش از 0.4 (سمت راست) و 0.3 (سمت چپ)

کشور ما داده‌های زمینی مربوط به سطح برف با تعداد و پراکندگی مناسب جمع‌آوری نمی‌شود. بنابراین کلیه تصویر Landsat 8 مربوط به این منطقه را که در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ اخذ شده بود، مورد بررسی قرار گرفته و تصاویر با پوشش ابر کمتر از ۵ درصد انتخاب گردید. همچنین تصاویر MODIS با کوتاهترین فاصله زمانی نسبت به تصاویر Landsat 8 منتخب نیز تهیه گردیدند. سه الگوریتم برای پیاده‌سازی در نظر گرفته شد که الگوریتم اول همان الگوریتم مورد استفاده در MOD10 بود. متوسط مقادیر قدر مطلق خطاهای نسبی محاسبه توسط این الگوریتم به میزان $3/44$ درصد محاسبه گردید. همچنین نتایج نشان دهنده آن بود که کارایی الگوریتم در تصاویر با کسر پوشش برف کم، پایین است.

در الگوریتم دوم اثر تصحیح توپوگرافی روی تصاویر در خروجی نهایی پوشش سطح برف ارزیابی گردید که نشان دهنده متوسط مقادیر قدر مطلق خطاهای نسبی $2/25$ درصد بود که نشان دهنده بهبود دقت شناسایی سطح برف توسط این الگوریتم بود. الگوریتم سوم تاثیر اعمال حد آستانه بر دمای سطح زمین به دست آمده از تصویر MODIS را در نتایج نهایی بررسی می‌نمود. در این روش نیز با حد آستانه‌های 278 ، 283 و 288 کلونین برای تصویر LST آزمایش انجام گردید که حد آستانه 278 کلونین با متوسط مقادیر قدر مطلق خطاهای نسبی $2/58$ درصد کارایی بهتری را نشان داد. همچنین این روش در تصاویر با کسر پوشش برف نتایج ضعیف‌تری

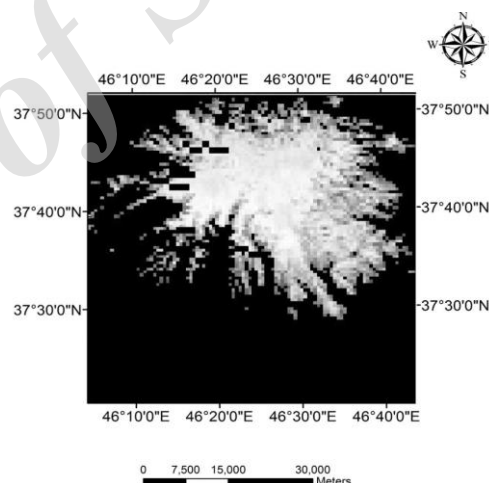


Fig. 7. Gridded Landsat 8 NDSI of 26 February 2015 with pixels of $NDSI > 0.4$

شکل ۷- تصویر Landsat 8 NDSI بلوک بندی شده با پیکسل‌های دارای $NDSI$ بیش از 0.4 مربوط به تاریخ ۲۶ فوریه ۲۰۱۵

لذا در این پژوهش بر آن بودیم که دقت الگوریتم مذکور را بهبود دهیم. بدین منظور منطقه شمال غرب کشور ایران شامل قله کوه سهند و بخشی از محدوده اطراف دریاچه ارومیه به عنوان منطقه پایلوت انتخاب شده و تصاویر Landsat 8 که دارای قدرت تفکیک مکانی بهتری (30 متر) نسبت به MODIS است، به عنوان داده واقعیت زمینی در نظر گرفته شد. این مورد بدان سبب بود که در

- 20-Hierarchical Data Format
- 21-Digital Elevation Model
- 22-Shuttle Radar Topography Mission
- 23-Raw Data
- 24-Radiance
- 25-local Solar Illumination Angle

را ارائه می‌نماید که این مورد می‌تواند به دلیل وجود پیکسل‌های مختلط در پیکسل‌های با قدرت تفکیک مکانی ضیف‌تر LST باشد.

بنابراین نتایج نشان دهنده کارایی تصحیح توپوگرافی و آستانه‌گذاری بر روی LST (دو الگوریتم پیشنهادی آخر) در نتیجه پیاده‌سازی‌های مربوط به شناسایی سطح برف از تصاویر MODIS بوده و همچنین کارایی بالای الگوریتم‌های مذکور در تصاویر با کسر پوشش برف متوسط و بالاتر (۵۰ درصد به بالا)، را بخصوص برای الگوریتم آستانه‌گذاری بر روی LST اثبات می‌نماید. این روش می‌تواند در مقیاس محلی که نیاز به دقت‌های بالاتر نسبت به الگوریتم جهانی بوده مورد استفاده قرار گرفته و دقت نتایج مدل‌های هیدرولوژیکی را در این مقیاس‌ها افزایش دهد. البته مقایسه نتایج الگوریتم‌ها با داده‌های دقیق‌تر (تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالاتر یا داده‌های زمینی)، در مورد LST، داده‌های توپوگرافی و داده‌های واقعیت زمینی می‌تواند به بهتر شدن کارایی الگوریتم‌های مذکور کمک شایانی نماید که این مورد می‌تواند در تحقیقات آتی مورد بررسی قرار گیرد.

۵- مراجع

- 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)
- Armstrong R, Hardman M (1991) Monitoring global snow cover. *IEEE, Piscataway, NJ,(USA)* 4:1947-1949
- Berezowski T, Chormański J, Batelaan O (2015) Skill of remote sensing snow products for distributed runoff prediction. *Journal of Hydrology* 524:718-732
- Bunting JT, d'Entremont RP (1982) Improved cloud detection utilizing Defense Meteorological Satellite Program near infrared measurements. DTIC Document
- Choudhury B, Chang A (1981) The albedo of snow for partially cloudy skies. *Boundary-Layer Meteorology* 2(3):371-38
- Dozier J (1989) Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment* 28:9-22
- Ghanbarpour MR, Saravi MM, Saghafian B, Ahmadi H, Abbaspour K (2005) An evaluation of regions effective in accumulation and persistence of snow cover and snowmelt contribution in runoff. *Iranian Journal of Natural Resources* 58 (3):503-515 (In Persian)
- Hall D, Foster J, Verbyla D, Klein A, Benson C (1998a) Assessment of snow-cover mapping accuracy in a variety of vegetation-cover densities in central Alaska. *Remote Sensing of Environment* 66(2):129-137
- Hall D, Tait A, Riggs G, Salomonson V, Chien J, Klein A (1998b) Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow-, Lake Ice-and Sea Ice-mapping Algorithms (ATBD MOD10). NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD. Available online at <http://modis.gsfc.nasa.gov/MODIS/Data/ATBDs/atbd-mod10.pdf>
- Hall DK, Riggs GA, Salomonson VV (1995) Development of methods for mapping global snow

۴- تشکر

نویسندگان این مقاله کمال تشکر و قدردانی خود را از جناب آقای دکتر علیرضا برهانی داریان که در طول انجام این تحقیق با مشورت‌ها و مساعدت‌هایشان یاریگر نگارندگان مقاله بودند، ابراز می‌دارند.

پی‌نوشت‌ها

- 1-Albedo
- 2-Visible
- 3-Shortwave InfraRed Reflectance
- 4-Advanced Very High Resolution Radiometer
- 5-Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
- 6-Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
- 7-InfraRed
- 8-Sierra Nevada Mountains
- 9-Normalized Difference Snow Index
- 10-National Aeronautics and Space Administration
- 11-Subpixel
- 12-Snow Fraction
- 13-Ground Truth
- 14-Normalized Difference Cloud Index
- 15-Land Surface Temperature
- 16-Normalized Difference Snow-Ice Index
- 17-Normalized Difference Principle Component Snow Index
- 18-Tasseled Cap Wetness Transformation
- 19-Operational Land Imager

- Satir O (2016) Comparing the satellite image transformation techniques for detecting and monitoring the continuous snow cover and glacier in Cilo mountain chain Turkey. *Ecological Indicators* 69:261-268
- Seidel K, Brusch W, Steinmeier C (1994) Experiences from real time runoff forecasts by snow cover remote sensing. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. IGARSS'94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation.*, International, 1994. IEEE, pp 2090-2093
- Shams M, Mobasher MR, Fatemi SB (2014) Assessment the accuracy of NDSI index extracted from MODIS images in areas with intermediate slope. *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS* 6(1):1-16 (In Persian)
- Singer F, Popham R (1963) Non-meteorological observations from weather satellites. *Astronautics and Aerospace Engineering* 1(3):89-92
- Singh P, Jain S (2003) Modelling of streamflow and its components for a large Himalayan basin with predominant snowmelt yields. *Hydrological Sciences Journal* 48(2):257-276
- Tang B-H, Shrestha B, Li Z-L, Liu G, Ouyang H, Gurung DR, Giriraj A, San Aung K (2013) Determination of snow cover from MODIS data for the Tibetan Plateau region. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21:356-365
- Vikhamar D, Solberg R (2003) Subpixel mapping of snow cover in forests by optical remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 84(1):69-82
- Wang X, Xie H, Liang T (2008) Evaluation of MODIS snow cover and cloud mask and its application in Northern Xinjiang, China. *Remote Sensing of Environment* 112(4):1497-1513
- Warren SG (1982) Optical properties of snow. *Reviews of Geophysics* 20(1):67-89
- Wiscombe WJ, Warren SG (1980) A model for the spectral albedo of snow. I: Pure snow. *Journal of the Atmospheric Sciences* 37(12):2712-2733
- cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment* 54(2):127-140
- Hall DK, Riggs GA, Salomonson VV, DiGirolamo NE, Bayr KJ (2002) MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment* 83 (1):181-194
- Kite G (1991) A watershed model using satellite data applied to a mountain basin in Canada. *Journal of Hydrology* 128(1):157-169
- Klein AG, Hall DK, Riggs GA (1998) Improving snow cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model. *Hydrological Processes* 12(10-11):1723-1744
- Kyle H, Curran R, Barnes W, Escoe D (1978) A cloud physics radiometer. In: *3rd Conference on Atmospheric Radiation, 1978.* pp 107-109
- Matkan A (2003) Snow Depth Estimation in Iran, Using: DMSP F11-SSM/I Satellite Data. *Geography-Scientific Journal of the IGA* (1):8-27
- Maurer EP, Rhoads JD, Dubayah RO, Lettenmaier DP (2003) Evaluation of the snow-covered area data product from MODIS. *Hydrological Processes* 17(1):59-71
- Mobasher MR, Moghadam HS, Shayan S (2010) An introduction to MODIS and SCMOD methods for correction of the MODIS snow assessment algorithm. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 38(4):674-685
- Rees WG (2005) *Remote sensing of snow and ice.* CRC Press, 312p
- Richter R, Kellenberger T, Kaufmann H (2009) Comparison of topographic correction methods. *Remote Sensing* 1(3):184-196
- Rittger K, Painter TH, Dozier J (2013) Assessment of methods for mapping snow cover from MODIS. *Advances in Water Resources* 51:367-380
- Salomonson V, Appel I (2004) Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index. *Remote Sensing of Environment* 89(3):351-360