



ارزیابی دقت شاخص NDSI استخراج شده از تصاویر MODIS در مناطق دارای شیب متوسط

مینا شمس^۱، محمدرضا مباحشری^{۲*}، سیدباقر فاطمی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲. دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳. دانشجوی دکتری گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۱۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۰۲/۲۱

چکیده

سطوح برفی در طول زمان تغییرات زیادی می‌یابند و در نتیجه برای پایش آنها به استفاده از تصاویری با قدرت تفکیک زمانی نسبتاً بالا نیاز است. برای این منظور، سنجنده MODIS مستقر روی ماهواره‌های Terra/Aqua مناسب به نظر می‌رسد. پارامترهای گوناگونی بر دقت برآورد سطح پوشش برف (SCS) تأثیر می‌گذارند که توپوگرافی سطح (شیب و جهت شیب) یکی از آنهاست. قدرت تفکیک مکانی پایین تصاویر MODIS و وجود پیکسل‌های مختلط، دقت برآورد SCS با استفاده از این تصاویر را کم می‌کند. در پژوهش حاضر، نتایج SCS حاصل از تصاویر MODIS، از طریق مقایسه با تصاویر دارای قدرت تفکیک مکانی متوسط مانند ASTER واقع بر سکوه‌های مشابه MODIS، ارزیابی می‌شود. در این پژوهش شاخص NDSI برگرفته از MODIS و ASTER در مناطقی با شیب ۲۰ تا ۵۰ درصد مقایسه گردید و دو مدل MODMASTER و MODFASTER برای بهبود دقت تخمین SCS به وسیله MODIS ایجاد شد. نتایج به دست آمده از MODMASTER، نشانگر پارامتر همبستگی (R^2) با شاخص برف مشابه MODIS به میزان تقریباً ۷۶ درصد و RMSE در حدود ۰/۰۴۷ است. در مدل MODFASTER، که برای تخمین کسر پوشش برف در هر پیکسل ایجاد شده، پارامتر همبستگی (R^2) در حدود ۷۵ درصد و RMSE در حدود ۰/۰۹ در مقایسه با کسر پوشش برف محاسبه شده به وسیله ASTER است. مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با مقادیر به دست آمده از سایر پژوهش‌ها نشان‌دهنده بهبود در برآورد سطح پوشیده شده از برف است.

کلیدواژه‌ها: ASTER، برف‌سنجی، شاخص NDSI، MODIS.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولی‌عصر، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، گروه سنجش از دور و فتوگرامتری،

تلفن: ۰۹۱۲۱۲۲۶۶۳۰

۱- مقدمه

Robinson et al., 1993, Rango et al., 2000, Salomonson et al., 2004). از دهه ۱۹۷۰ بررسی پوشش برف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای رایج شد (Dadashi Khanaghah, 2008). پیشرفت‌های اخیر در فناوری و تعدد ماهواره‌ها، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای را برای بررسی پوشش برف ضروری ساخته است (Sirguey et al., 2009; König et al., 2001; Dozier et al., 2004; Hall et al., 2002). تاکنون روش‌های گوناگونی برای مطالعه برف با استفاده از داده‌های ماهواره‌های مختلف گزارش شده است (Dozier et al., 1989; Kelly et al., 2003; Shi et al., 1994).

در سال ۱۹۷۸، کیل و همکاران از نسبت بازتابندگی باند مرئی به فروسرخ نزدیک برای شناسایی سطوح برفی استفاده کردند. سازمان فضایی ایالات متحده آمریکا این نسبت را برای داده‌های سنجنده MODIS و با نام شاخص برف NDSI¹ معرفی کرد. به‌طور کلی این تکنیک اساس شناسایی برف و یخ در تصاویر ماهواره‌ای است.

بر مبنای این واقعیت که برف دارای بازتابندگی بالا در ناحیه مرئی و بازتابندگی پایین در فروسرخ میانی است (Nolin et al., 2000) برای تشخیص برف از ابر و مناطق فاقد برف از NDSI استفاده می‌شود. NDSI شاخصی بهنجار است که از نسبت اختلاف بازتابندگی مرئی ρ_4 (باند ۴ سنجنده MODIS) و فروسرخ میانی ρ_6 (باند ۶ سنجنده MODIS) تقسیم بر مجموع بازتابندگی در این دو باند به دست می‌آید.

رابطه (۱)

$$NDSI_{MODIS} = \frac{\rho_4 - \rho_6}{\rho_4 + \rho_6}$$

NDSI در مناطق با پوشش‌های مختلف دارای مقادیری بین +۱ و -۱ خواهد بود. حد آستانه پذیرفته شده برای تشخیص برف به وسیله این شاخص،

پوشش برف و تغییرات زمانی آن، پارامترهایی اساسی در مطالعات هیدرولوژیکی و اقلیم‌شناسی در مناطق با عرض جغرافیایی بالا و متوسط به شمار می‌آیند (Zhang et al., 2010). در مناطق گسترده‌ای از جهان پوشش برف و یخ و رواناب حاصل از ذوب آنها، منابع تولید آب برای مصارف شهری، کشاورزی و صنعتی قلمداد می‌شوند (Xiao et al., 2001). افزون بر این، ذوب برف می‌تواند خسارت‌های فراوانی به بار آورد. بنابراین داشتن اطلاعات درباره سطوح پوشیده از برف به عملکرد بهتر در مدیریت منابع آب، پیش‌بینی و مدیریت بحران می‌انجامد (Dadashi Khanaghah, 2008).

اندازه‌گیری‌های زمینی برف به وسیله ایستگاه‌های هواشناسی، به دلیل محدودیت تعداد ایستگاه‌ها و ماهیت نقطه‌ای بودن اندازه‌گیری‌های آنها، برای بررسی پدیده پیوسته‌ای مانند برف چندان مناسب نیستند. دیگر اینکه اکثر ایستگاه‌ها در مناطق کوهپایه و در دسترس قرار دارند، در حالی که قسمت اعظم پوشش برف در ارتفاعات و نقاط صعب‌العبور است (Taghavi, 2002).

ماهواره‌ها، ابزاری قوی برای بررسی مناطق غیرقابل دسترس به شمار می‌آیند. پوشش سطح وسیعی از زمین به وسیله هر تصویر ماهواره‌ای و قابلیت تصویربرداری مجدد از یک منطقه به وسیله سنجنده‌ها (قدرت تفکیک زمانی)، داده‌های ماهواره‌ای را برای بررسی پدیده‌های متغیر مانند برف مناسب می‌سازد (Jelokhani Niaraki, 2005).

برای نخستین بار در سال ۱۹۶۰ با استفاده از ماهواره TIROS-1 سنجش شد (Matkan, 2002). از سال ۱۹۶۶ که نخستین نقشه‌های برف به صورت کاربردی به وسیله NOAA تهیه شد، استفاده از سنجنده‌ها در انجام مطالعات جهانی و روزانه برای بررسی تغییرات زمانی و مکانی پوشش برف پیشرفت‌های زیادی کرده است (Frei et al., 1998).

1. Normalized Difference Snow Index

الگوریتم خود استفاده کرده است. مباحثی و همکاری‌ها (۲۰۱۱) رفتار شاخص NDSI در مناطق مسطح و با شیب پایین (کمتر از ۲۰ درصد) را بررسی کردند. با توجه به قدرت تفکیک مکانی پایین سنجنده MODIS و مشکل پیکسل‌های مختلط و همچنین دسترسی‌نداشتن به داده‌های زمینی، در این تحقیق ضمن استخراج سطح زیر پوشش برف برای مناطق با شیب نسبتاً بالا (۲۰ تا ۵ درصد) و بررسی تأثیر شرایط توپوگرافی روی مقادیر شاخص، نتایج حاصل از این سنجنده با استفاده از تصاویر همزمان ASTER با قدرت تفکیک مکانی متوسط مقایسه و ارزیابی می‌شوند. در پایان، مدلی ساده برای بهبود نتایج سنجنده MODIS با در نظر گرفتن پارامتر هندسه سطح (شیب) تهیه می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

مراحل انجام تحقیق شامل تعیین مناطق مورد مطالعه و تهیه داده‌های مورد نیاز، آماده‌سازی داده‌ها، اعمال شاخص تفاضل نرمال شده برف روی تصاویر، بررسی و مقایسه نتایج حاصل، ارائه مدل و در نهایت ارزیابی مدل است. این مراحل در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

۲-۱- منطقه مطالعه شده

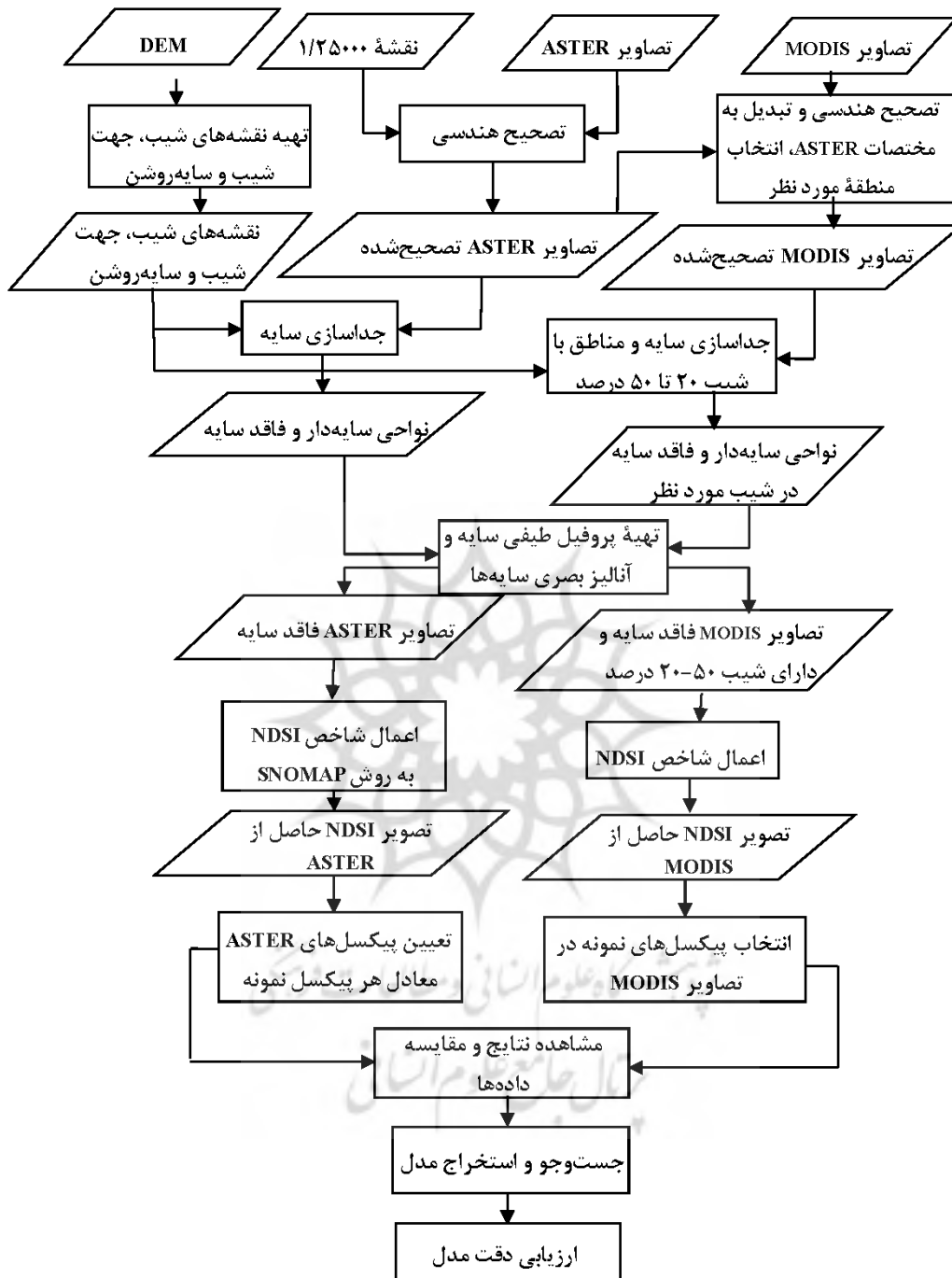
مناطق مطالعه شده در این پژوهش شهرهای سوریان، کرندغرب و سردشت‌اند و تصاویر مربوط به شهرهای سوریان و کرندغرب یک‌جا و تصویر سردشت جداگانه بررسی شده است. شهر سوریان مرکز شهرستان بوانات در طول جغرافیایی ۳۶°۵۳ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳°۳۳ شمالی، در شمال شرقی استان فارس قرار دارد. حداقل ارتفاع این منطقه از سطح دریا ۱۵۰۵ متر و حداکثر ارتفاع آن (قله کوه ختاوند یا خاتون) ۳۳۶۲ متر است. این منطقه کوهستانی و سردسیر است و زمستان‌های نسبتاً طولانی و سرد و دوره تابستانی کوتاه و خنک دارد. طول مدت یخبندان در این ناحیه به‌طور متوسط ۷۰ روز است.

۰/۴ است (Hall et al., 1995). عوامل متعددی از جمله اندازه و شکل ذرات برف، دما، عمق برف، ناهمواری سطح، زاویه زینت خورشیدی، و آلودگی بر میزان بازتابندگی برف و در نتیجه مقادیر حاصل از شاخص NDSI تأثیرگذارند (Klein et al., 1998).

NDSI ضمن آنکه اختلاف طیفی برف، ابر و مناطق فاقد برف را نشان می‌دهد، مانند اکثر روش‌های تفاضلی نسبی سبب کاهش تأثیرات جوی و هندسه دید بر مقادیر به دست آمده می‌شود اما آنها را به‌طور کامل حذف نمی‌کند (Salomonson & Appel, 2004). هال و همکاریانش (۲۰۰۲ و ۱۹۹۸) و کلین و همکاریانش (۱۹۹۸) از اختلاف طیفی مناطق برفی و فاقد برف که به وسیله MODIS رؤیت‌شدنی است، برای ارائه روشی خودکار به منظور مشاهدات جهانی و روزانه برف بر اساس NDSI استفاده کردند. از روش SNOMAP به صورت خودکار برای تهیه محصولات پوشش برف جهانی استفاده می‌شود. این روش مبتنی بر طبقه‌بندی پیکسل‌ها به صورت باینری (برف و فاقد برف) در تصاویر MODIS است. SNOMAP افزون بر شاخص NDSI از معیارهای دیگری نیز برای کاهش خطای تعیین برف در سواحل، دریاچه‌ها و مناطق جنگلی استفاده می‌کند. این معیارها در راهنمای کاربران تصاویر MODIS^۱ دسترس‌اند (MODIS website).

سرگتی و همکاران (۲۰۰۹)، روشی جامع را برای تهیه نقشه‌های برف فصلی در مناطق کوهستانی با استفاده از محصولات Level-1B سنجنده MODIS پیشنهاد کردند. در این روش، تکنیک جداسازی طیفی خطی برای تخمین کسر برف در سطح زیرپیکسل به کار گرفته شده است. بدین‌منظور از ۸ تصویر هم‌زمان و فاقد ابر (level-1B) MODIS/ASTER استفاده شد و تأثیرات جوی و توپوگرافی سطح در تصاویر با استفاده از مشاهده‌های روزانه پارامترهای جو تصحیح گردید. کورن (۲۰۱۰) تأثیر پارامترهای شیب و جهت شیب در تخمین برف به وسیله داده‌های MODIS را بررسی کرده و از تصاویر هم‌زمان Landsat-ETM⁺ برای ارزیابی

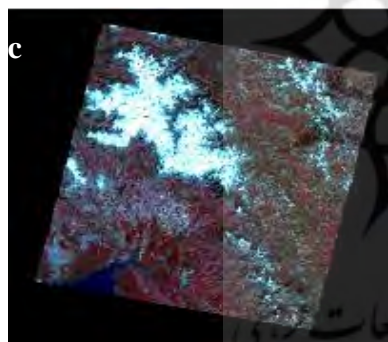
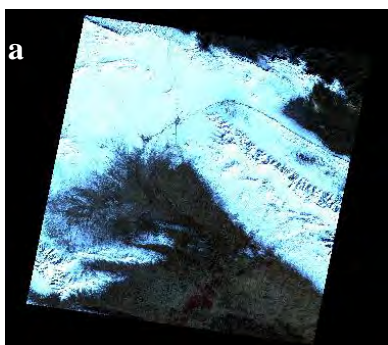
1. MODIS User Guid



شکل ۱. روندنمای تحقیق

دربا ۳۸۷ متر و حداکثر ارتفاع آن ۲۴۷۰ متر است. طول مدت یخبندان در این ناحیه به‌طور متوسط ۷۸ روز است. شهر سردشت در طول جغرافیایی ۰۹' ۳۶°

شهر کرد غرب در طول جغرافیایی ۱۴' ۴۶° شرقی و عرض جغرافیایی ۱۷' ۳۴° شمالی در غرب استان کرمانشاه قرار دارد. حداقل ارتفاع این منطقه از سطح



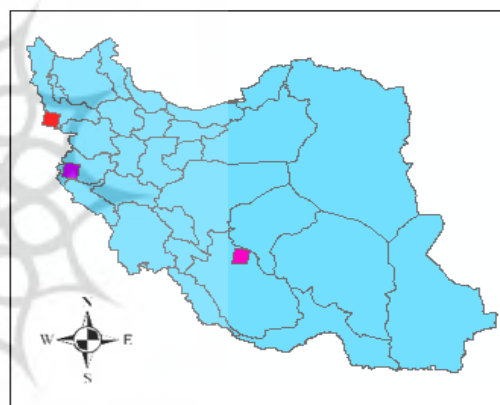
شکل ۳. تصاویر Aster در مناطق مطالعه شده

- (a) تصویر تاریخ ۲۰۰۲/۰۱/۱۵
 (b) تصویر تاریخ ۲۰۰۲/۰۲/۰۳
 (c) تصویر تاریخ ۲۰۰۶/۰۴/۱۰

۲-۳- آماده سازی داده ها

ابتدا تصاویر Aster با استفاده از نقشه ۱/۲۵۰۰۰ زمین مرجع شدند، سپس تصاویر MODIS نسبت به تصاویر Aster تصحیح هندسی شدند. با استفاده از پارامترهای موجود در فایل Header، میزان بازتابندگی

شرقی و عرض جغرافیایی ۲۹' ۴۵° شمالی در جنوب غربی استان آذربایجان غربی قرار دارد. حداقل ارتفاع این منطقه ۱۵۶۰ متر و حداکثر ارتفاع آن ۱۷۸۹ متر است. شهرستان سردشت تحت تأثیر جبهه های هوایی است که از شمال غربی و گاه غرب وارد استان می شوند و به ویژه در زمستان و بهار باعث ریزش های جوی نسبتاً خوبی در این منطقه می گردند. شرایط توپوگرافی شهرستان سردشت باعث می شود که میزان ریزش های جوی حاصل از این توده های هوایی بیش از سایر مناطق استان باشد. طول مدت یخبندان در این منطقه به طور متوسط ۶۶ روز است (شکل ۲). معیار انتخاب این مناطق، وجود نواحی با شیب مورد نظر و دارای پوشش برف است.



شکل ۲. مناطق مطالعه شده

۲-۲- داده های استفاده شده

در پژوهش حاضر از تصاویر MODIS با قدرت تفکیک ۵۰۰ متر مربوط به تاریخ های ۲۰۰۲/۰۱/۱۵ و ۲۰۰۲/۰۲/۰۳ و ۲۰۰۶/۰۴/۱۰ با سطح پردازشی L1B و فرمت HDF، سه فریم تصویر Aster (با قدرت تفکیک ۳۰ متر) هم زمان با تصاویر MODIS آنها، نقشه های ۱/۲۵۰۰۰ دارای فرمت DGN برای تصحیح هندسی تصاویر Aster و مدل رقومی ارتفاع^۱ Aster GDEM به منظور استخراج پارامتر شیب استفاده شده است (شکل ۳).

1. ASTER Global DEM

۲-۴- اعمال شاخص NDSI روی تصاویر

برای هر پیکسل ۵۰۰ متری MODIS فاقد ابر، سایه و دارای شیب ۲۰ تا ۵۰ درصد مقدار NDSI محاسبه شد. به منظور ارزیابی عملکرد شاخص تشخیص برف MODIS، مقدار NDSI به روش SNOMAP (Hall et al., 1995) برای پیکسل‌های تصاویر ASTER محاسبه و با اعمال حد آستانه ۰/۴، پیکسل‌های برفی در تصاویر ASTER تعیین شدند.

به منظور بررسی تأثیر شیب روی مقادیر شاخص، داده‌ها به سه کلاس شیبی ۳۰-۴۰، ۴۰-۵۰ و ۳۰-۴۰ درصد طبقه‌بندی شدند و عملکرد شاخص در این کلاس‌ها به وسیله دو معیار جدید MODMASTER^۴ و MODFASTER^۵ با استفاده از تصاویر مربوط به تاریخ‌های ۲۰۰۲/۰۲/۰۳، ۲۰۰۲/۰۱/۱۵، ۲۰۰۲/۰۲/۰۳ تعریف شد. برای ارزیابی عملکرد این معیارها، افزون بر بررسی آنها روی این دو تصویر، نتایج حاصل روی تصویر ۲۰۰۶/۰۴/۱۰ بررسی شد.

۲-۵- معیار MODMASTER

در این مطالعه با توجه به قدرت تفکیک تصاویر، هر پیکسل MODIS معادل ۲۷۷ پیکسل ASTER در نظر گرفته شده است. در این معیار ارزیابی، شاخص میانگین NDSI پیکسل‌های برفی ASTER (دارای NDSI بیشتر از ۰/۴) موجود در هر پیکسل ۵۰۰ متری MODIS با مقدار NDSI مربوط به MODIS این پیکسل مقایسه می‌شود. بدین منظور ابتدا تأثیر شیب‌های مختلف از طریق تقسیم داده‌ها به سه کلاس شیبی ۳۰-۴۰، ۴۰-۵۰ و ۳۰-۴۰ درصد بررسی و سپس داده‌ها در یک کلاس شیبی کلی (۲۰-۵۰ درصد) بررسی شد.

بالای جو^۱ برای تصاویر ASTER در باندهای ۱ و ۴ محاسبه گردید (رابطه ۲).

رابطه (۲)

$$\rho = \frac{L_{\lambda} \pi d^2}{ESUN_{\lambda} \cos \theta_x}$$

L_{λ} رادیانس در سنجنده ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$)، $ESUN_{\lambda}$ میانگین تابش فرودی خورشید در بالای جو در هر باند ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$)، d فاصله نسبی زمین تا خورشید متناسب با تاریخ عبور ماهواره از محل θ_z ، زاویه زینتی خورشیدی بر حسب درجه که به تاریخ و زمان عبور ماهواره از منطقه و طول و عرض جغرافیایی محل بستگی دارد.

از آنجاکه هدف پژوهش حاضر بررسی عملکرد MODIS با در نظر گرفتن مشخصات هندسی زمین (شیب) است، با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و به کمک روش میانگین‌گیری، به هر پیکسل ۵۰۰ متری تصاویر MODIS مربوط به تاریخ‌های ۲۰۰۲/۰۱/۱۵، ۲۰۰۲/۰۲/۰۳، ۲۰۰۶/۰۴/۱۰، یک ارتفاع اختصاص داده شد. سپس برای هر پیکسل، شیب و جهت شیب محاسبه گردید و مناطق دارای شیب مورد نظر (۲۰ تا ۵۰ درجه)، از تصاویر استخراج شدند.

وجود سایه روی مقادیر حاصل از NDSI تأثیرگذار است. برای به دست آوردن نتایج مطمئن در تخمین برف، لازم است نواحی خارج از سایه و مناطق واقع در آن جدا شوند (Koren, 2010). بدین منظور براساس آزمون و ارتفاع خورشید در منطقه و با استفاده از GDEM، نقشه سایه‌روشن^۳ تهیه شد و منطقه به دو گروه سایه و فاقد سایه تفکیک گردید.

وجود پوشش ابر در تصاویر، یکی از مشکلات اساسی برف‌سنجی است. در پژوهش حاضر افزون بر مقادیر شاخص برف برای تعیین پیکسل‌های ابری، از محصولات MOD35 نیز استفاده شد و نمونه‌ها از مناطق فاقد پوشش ابر انتخاب شدند.

1. Top-of-the-atmosphere reflectance
2. Julian Day
3. Hillshading Map
4. MODis compared with Mean values of ASTER
5. MODis compared with Fraction of ASTER

ارزیابی دقت شاخص NDSI استخراج شده از تصاویر MODIS در مناطق دارای شیب متوسط

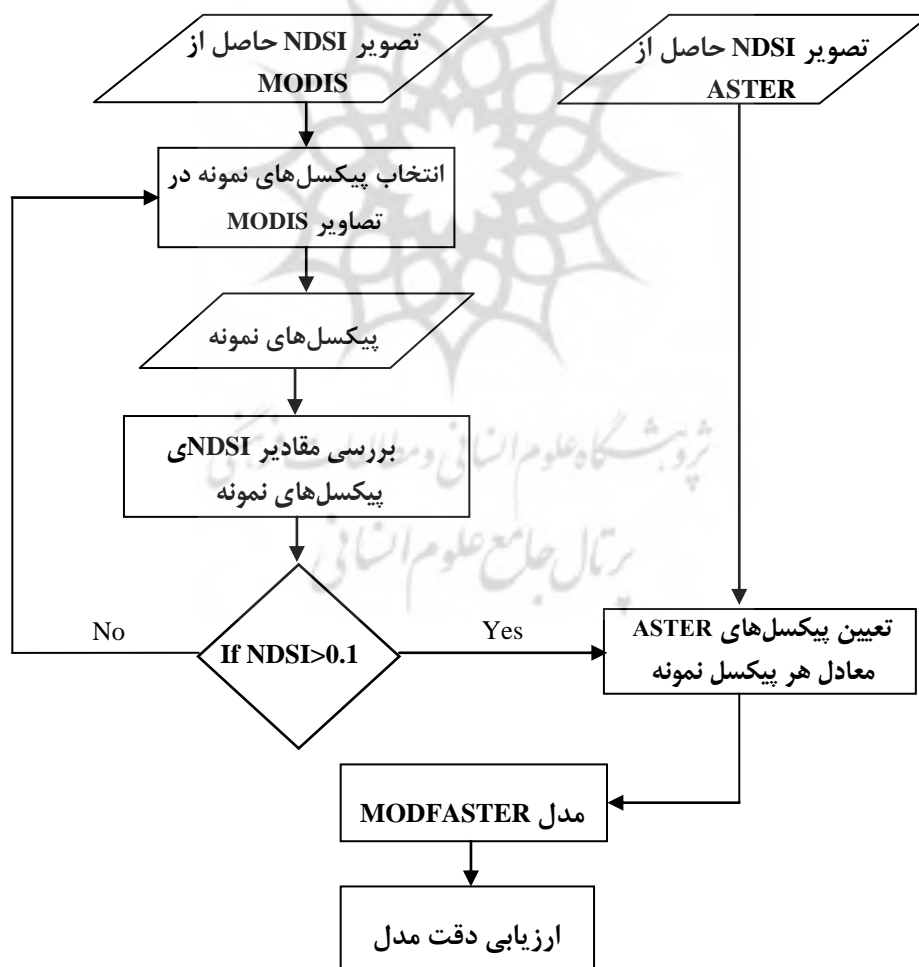
جدول ۱. نتایج به دست آمده از رگرسیون خطی بین NDSI مربوط به MODIS و میانگین NDSI مربوط به ASTER

مدل	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
MODMASTER	۰/۸۷۱	۰/۷۶	۰/۷۶۲	۰/۰۵۵۰۰

۲-۶- معیار MODFASTER

شاخص NDSI قابلیت طبقه بندی پیکسل ها به دو کلاس برف و فاقد برف (طبقه بندی باینری) را دارد، اما قادر به تعیین مساحت نواحی برفی در هر پیکسل نیست. با استفاده از تصویر ASTER با قدرت تفکیک مکانی بهتر می توان تعیین کرد که میزان NDSI حاصل از هر پیکسل ۵۰۰ متری MODIS، معادل چند درصد پوشش برف در آن پیکسل است. مراحل ایجاد این مدل در شکل ۴ آمده است.

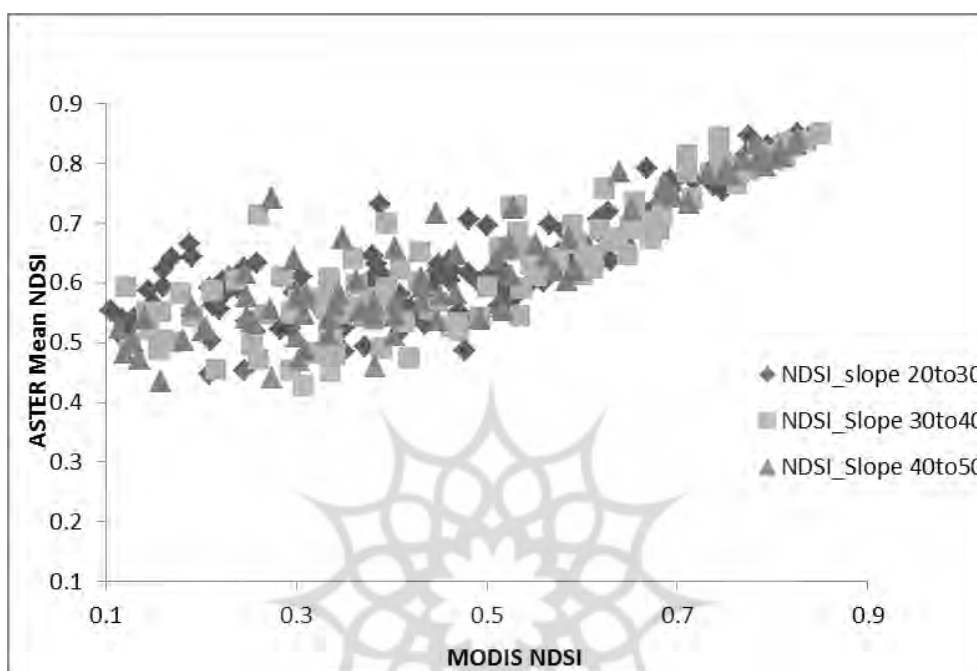
برای مدل سازی ارتباط بین NDSI حاصل از MODIS و میانگین NDSI حاصل از (ASTER Mean NDSI) در کلاس شیبی ۵۰-۲۰ درصد، از روش رگرسیون استفاده شد. برای این کار، ۲۳۹ نمونه از قسمت های مختلف تصویر، شامل مناطق کاملاً پوشیده از برف، نواحی نیمه برفی و مرزها انتخاب شدند (جدول ۱).



شکل ۴. مراحل ایجاد مدل MODFASTER

جدول ۲. نتایج به دست آمده از رگرسیون خطی بین کسر پوشش برف و NDSI مربوط به MODIS

مدل	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
MODFASTER	۰/۸۶۶	۰/۷۴۹	۰/۷۴۹	۰/۱۲۶۲۸



شکل ۵. مقایسه مقادیر NDSI به دست آمده از MODIS و میانگین ASTER در ۳ کلاس شیبی ۳۰-۲۰، ۴۰-۳۰ و ۵۰-۴۰ درصد

ASTER ابتدا نمودار پراکنش NDSI حاصل از MODIS برحسب میانگین NDSI حاصل از ASTER رسم گردید (شکل ۵).

همان گونه که در شکل ۵ دیده می شود، روند کلی تغییرات برای کلاس های شیبی مورد نظر و برای مقادیر متفاوت NDSI در شرایط زمانی و موقعیت جغرافیایی مناطق مطالعه شده مشابه است. بنابراین داده ها در حالت کلی و در شیب ۲۰-۵۰ درصد یک جا بررسی شدند و ارتباط بین مقادیر NDSI به دست آمده از MODIS و میانگین مقادیر NDSI به دست آمده از ASTER ارزیابی گردید (شکل ۶).

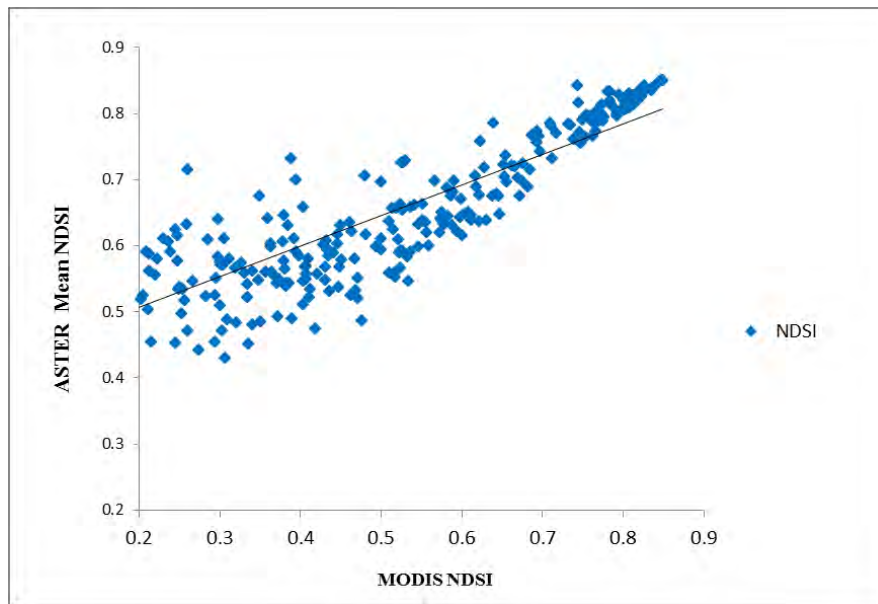
معیار MODFASTER، رابطه بین NDSI حاصل از MODIS و کسر پوشش برف حاصل از ASTER را درون هر پیکسل MODIS نشان می دهد. برای هر پیکسل میزان کسر پوشش از طریق تقسیم تعداد پیکسل های برفی ASTER به تعداد کل پیکسل های ASTER موجود در هر پیکسل ۵۰۰ متری محاسبه می شود. در این معیار نیز هر پیکسل MODIS معادل ۲۷۷ پیکسل ASTER در نظر گرفته شده و در آن از روش رگرسیون خطی^۱ برای ایجاد رابطه خطی بین کسر پوشش برف (FRA^۲) و NDSI مشاهدات MODIS استفاده شده است (جدول ۲).

۳- نتایج

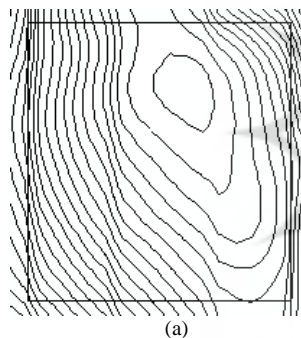
در معیار MODMASTER به منظور ایجاد ارتباط بین NDSI مربوط به MODIS و میانگین NDSI مربوط به

1. Ordinary Least-Squares Regression Approach
2. Snow FRAAction

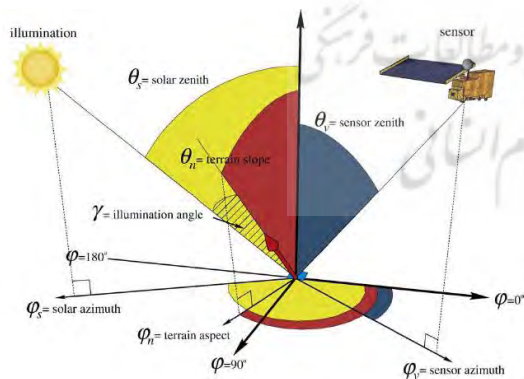
ارزیابی دقت شاخص NDSI استخراج شده از تصاویر MODIS در مناطق دارای شیب متوسط



شکل ۶. مقایسه شاخص MODIS NDSI و میانگین ASTER-NDSI در کلاس شیبی ۵۰-۲۰ درصد



(a)



شکل ۷. (a) منحنی میزان پیکسل نمونه، (b) نمای شماتیک موقعیت سنجنده و خورشید نسبت به پیکسل برای ایجاد برق خورشیدی منبع: برگرفته از Sirguy et al., 2009

همان گونه که در شکل ۶ دیده می شود، در مقادیر بالای NDSI هر دو مقدار ASTER و MODIS به یک مقدار همگرا می شوند (منطقه درون دایره قرمز)، ولی در مقادیر کوچک تر NDSI همواره میانگین ASTER از مقادیر MODIS کمتر است (منطقه درون دایره سبز). برخی از نمونه های ASTER دارای تغییرات جهش گونه اند. بررسی مناطق برداشت شده از نظر شیب و جهت شیب، توپوگرافی و موقعیت خورشید نشان داد که احتمالاً در نمونه های با مقادیر بالا، تعداد زیادی از پیکسل های ASTER دارای شرایط برق خورشیدی (Hotspot) در باند مرئی و در نتیجه اشباع شده هستند، در حالی که در باند جذبی، جذب کماکان به شدت اتفاق افتاده و همین امر سبب افزایش شدید میزان شاخص NDSI شده است. نمونه های با مقادیر کم NDSI، پیکسل های واقع در مناطق مرزی هستند. افزون بر موارد گفته شده، خطای ناشی از تصحیح هندسی نیز از عوامل بروز خطا به شمار می آیند. به عنوان نمونه برای یک پیکسل با مقادیر NDSI بالا، شرایط توپوگرافی (منحنی میزان) رسم شده است (شکل ۷).

1. Contour

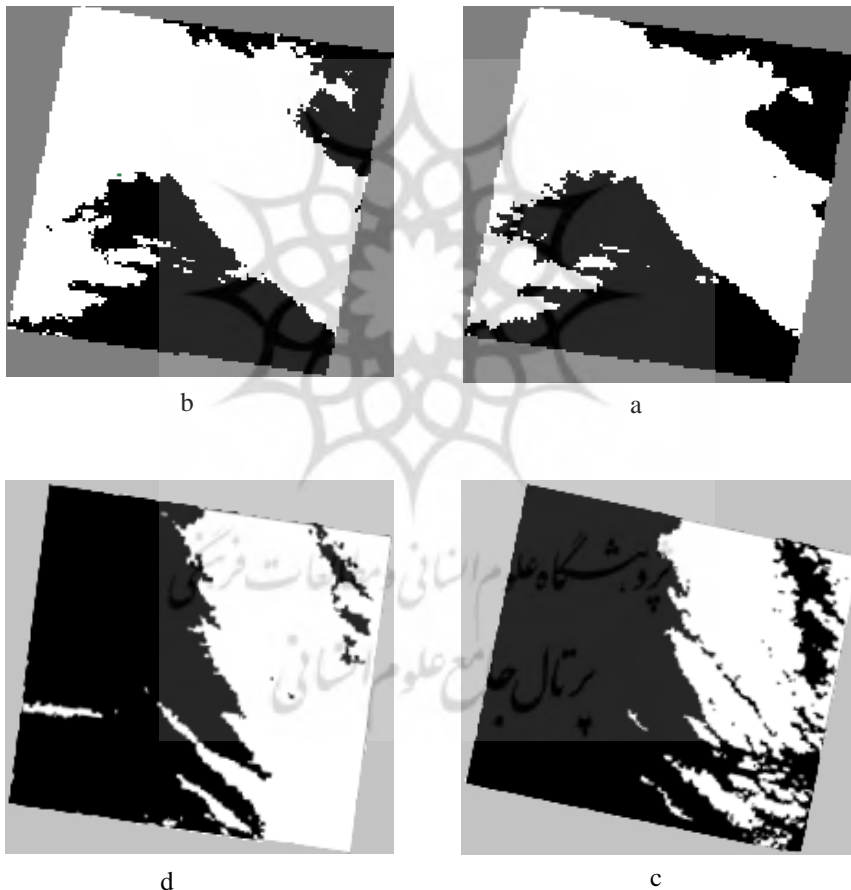
نقشه پوشش برف حاصل از اعمال شاخص NDSI و مدل MODMASTER روی تصاویر MODIS مربوط به مناطق سوریان (تاریخ ۲۰۰۲/۰۱/۱۵) و کرند غرب (تاریخ ۲۰۰۲/۰۲/۰۳) در شکل ۸ آمده است. در این شکل نواحی سفیدرنگ نشان‌دهنده نواحی برفی و مناطق سیاه‌رنگ نشان‌دهنده نواحی بدون برف است. برای بررسی رابطه بین NDSI مربوط به MODIS و کسر پوشش برف حاصل از ASTER درون هر پیکسل MODIS، نمودار پراکنش این داده‌ها رسم گردید (شکل ۹).

رابطه حاصل از ایجاد رگرسیون بین NDSI حاصل از MODIS و میانگین NDSI حاصل از ASTER در رابطه (۳) نشان داده شده است. میزان R^2 (همبستگی) حاصل از این رابطه ۰/۷۶ است.

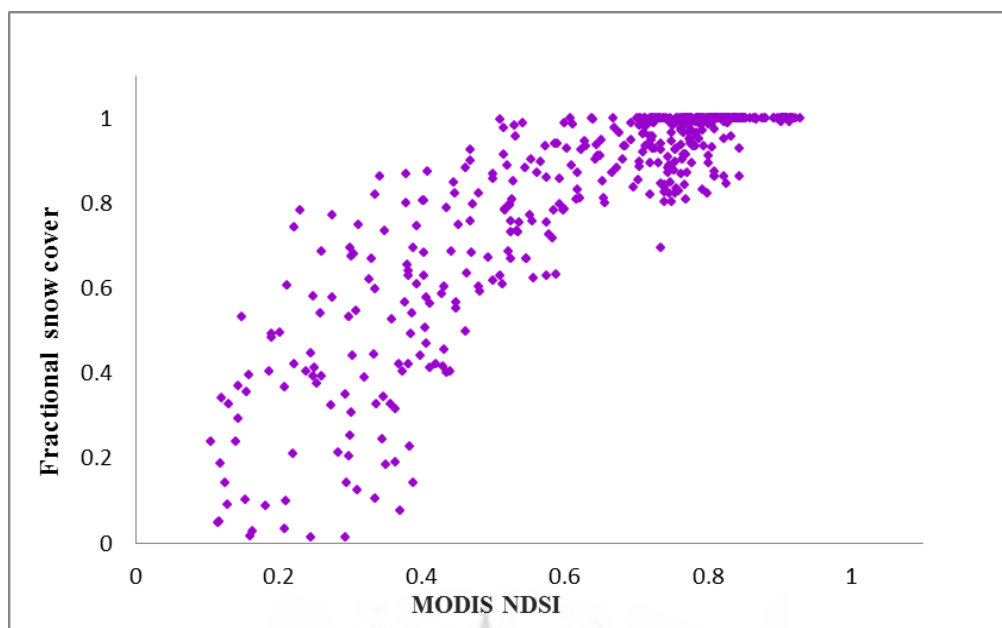
رابطه (۳)

$$NDSI_{model} = 0/46 \times NDSI_{(MODIS)} + 0/42$$

در این تحقیق برای ارزیابی دقت مدل‌ها از ریشه مربعات خطای متوسط (RMSE) استفاده شده است. میزان RMSE بین مقادیر NDSI مربوط به ASTER و MODIS برابر ۰/۰۴ است.



شکل ۸. نقشه پوشش برف حاصل از اعمال شاخص NDSI و مدل MODMASTER روی تصاویر MODIS در مناطق مطالعه‌شده، (a) نقشه پوشش برف حاصل از اعمال شاخص NDSI روی تصویر MODIS در تاریخ ۲۰۰۲/۰۱/۱۵، (b) نقشه پوشش برف حاصل از اعمال مدل MODMASTER روی تصویر MODIS در تاریخ ۲۰۰۲/۰۱/۱۵، (c) نقشه پوشش برف حاصل از اعمال شاخص NDSI روی تصویر MODIS در تاریخ ۲۰۰۲/۰۲/۰۳، (d) نقشه پوشش برف حاصل از اعمال مدل MODMASTER روی تصویر MODIS در تاریخ ۲۰۰۲/۰۲/۰۳



شکل ۹. رابطه بین NDSI مربوط به MODIS و کسر پوشش برف حاصل از ASTER

رابطه (۴)

$$\text{MODFASTER} = 1/0.1 \times \text{NDSI}_{(\text{MODIS})} + 0/18$$

همچنین میزان RMSE در مدل MODFASTER، برابر ۰/۰۹ به دست آمده است. برای ارزیابی بیشتر مدل‌های ارائه شده، این مدل‌ها روی تصویر منطقه دیگری (تصویر ۲۰۰۶/۰۴/۱۰) آزمون شدند. به منظور ارزیابی مدل MODMASTER تعداد ۵۱۷ نمونه و برای مدل MODFASTER، ۷۵۶ نمونه از نقاط مختلف این تصویر شامل مناطق کاملاً پوشیده از برف، نواحی نیمه برفی و مرزها انتخاب شدند، سپس دو مدل روی این نمونه‌ها اعمال گردید. میزان RMSE به دست آمده برای دو معیار و در این منطقه در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. نتایج ارزیابی مدل‌ها روی تصویر ۲۰۰۶/۰۴/۱۰

مدل	RMSE
MODMASTER	۰/۰۶
MODFASTER	۰/۱۲

همان‌گونه که در شکل ۹ دیده می‌شود، در مقادیر پایین شاخص، پراکندگی داده‌ها زیاد است و در پیکسل‌های مختلط، توانایی تشخیص جزئیات و ترکیبات پیکسل را ندارد. در نمونه‌هایی با NDSI کوچک‌تر از ۰/۴، که MODIS آنها را به عنوان پیکسل غیربرفی ثبت کرده، کسر پوشش برف حاصل از ASTER مخالف صفر است. یعنی نواحی‌ای از این پیکسل‌ها دارای پوشش برف نیست ولی MODIS نمی‌تواند آنها را تشخیص دهد و ASTER با قدرت تفکیک بهتر و داشتن پیکسل‌های خالص‌تر توانسته است آنها را شناسایی کند. در مقادیر بالای شاخص، به‌ویژه بیشتر از ۰/۷، مقدار FRA به یک می‌رسد و ASTER این پیکسل‌ها را کاملاً پوشیده از برف شناسایی می‌کند. این امر بیانگر عملکرد مشابه دو سنجنده و قابلیت اطمینان نتایج حاصل از MODIS در این نمونه‌هاست.

رابطه بین کسر پوشش برف و NDSI مشاهدات MODIS در رابطه (۴) نشان داده شده است. میزان R^2 حاصل در این حالت ۰/۷۵ است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، رفتار شاخص NDSI در تصاویر MODIS با در نظر گرفتن پارامتر شیب بررسی شد. به دلیل پایین بودن قدرت تفکیک مکانی تصاویر MODIS (۵۰۰ متر)، از تصاویر هم‌زمان ASTER با قدرت تفکیک مکانی بهتر (۳۰ متر) برای مقایسه و ارزیابی نتایج حاصل از MODIS استفاده گردید و NDSI حاصل از MODIS در هر پیکسل به وسیله مقدار میانگین پیکسل‌های ASTER متناظر با آن (۲۷۷ پیکسل) مقایسه شد. برای رابطه بین این دو پارامتر در بررسی هم‌زمان داده‌های حاصل از دو منطقه کوند غرب و بوانات، R^2 معادل ۷۶ درصد و خطای RMSE معادل ۰/۰۴ به دست آمد. همچنین کسر مناطق پوشیده شده از برف در هر پیکسل ۵۰۰ متری MODIS در این دو منطقه به صورت یک‌جا به وسیله ASTER محاسبه و مدل‌سازی گردید. مدل به دست آمده دارای معیار دقت (R^2) ۷۵ درصد و RMSE معادل ۰/۰۹ است.

مباشری (۲۰۱۱) و همکارانش شاخص برف MODIS را با استفاده از تصاویر ASTER در مناطق با شیب کمتر از ۲۰ درصد بهبود بخشیدند. نتیجه کار آنها به صورت رابطه (۵) است، که با نتایج به دست آمده برای معادله MODMASTER مشابهت دارد. این امر بیانگر تأثیر کم پارامتر شیب روی نتایج شاخص است. با توجه به این موضوع که همواره اثر شیب در برآورد برف مبهم است، این تحقیق نشان داد که می‌توان فقط نتایج NDSI حاصل از MODIS را از جنبه قدرت تفکیک مکانی در مقایسه با ASTER اصلاح کرد و اثر شیب‌های متوسط (۲۰ تا ۵۰ درصد) چشمگیر نیست.

رابطه (۵)

$$NDSI(improved) = 0.273 + NDSI_{(ASTER)} \times 0.6533$$

برای ارزیابی مدل‌های فوق به طور هم‌زمان عملکرد مدل MODFASTER با نتایج کار بارتون (۲۰۰۱) و سالامونسان و اپل (۲۰۰۴ و ۲۰۰۶) مقایسه شد. سالامونسان و اپل در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۶ رابطه

بین NDSI و کسر پوشش برف (FRA) درون هر پیکسل ۵۰۰ متری MODIS را بررسی کردند. آنها از تصاویر Landsat ETM⁺ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر به عنوان حقیقت زمینی^۱ استفاده کردند (رابطه‌های ۶ و ۷).

رابطه (۶)

$$FRA = 0.06 + 1.21 \times NDSI_{(MODIS)}$$

رابطه (۷)

$$FRA = -0.01 + 1.45 \times NDSI_{(MODIS)}$$

بارتون (۲۰۰۱) با استفاده از شاخص NDSI در تصاویر ۵۰۰ متری MODIS، نقشه پوشش برف را به صورت باینری تهیه کرد و برای تعیین درصد پوشش برف درون هر پیکسل از این نقشه، نتایج حاصل از جداسازی طیفی پیکسل‌های تصویر Landsat TM را به عنوان حقیقت زمینی به کار گرفت. رابطه (۸) ارتباط بین NDSI حاصل از MODIS و کسر پوشش برف (FRA) را نشان می‌دهد.

رابطه (۸)

$$FRA = 0.18 + 0.37 \times NDSI + 0.26 \times (NDSI)^2$$

نتایج این مقایسه در جدول ۴ آمده است.

همان‌گونه که دیده می‌شود مدل ارائه شده در مقایسه با مدل‌های پیشین دارای مقادیر RMSE بهتری در منطقه مطالعه شده است. عوامل گوناگونی روی دقت برآورد برف تأثیرگذار است؛ از جمله خطاهای موجود در آنالیز داده‌ها؛ نوع مدل انتخاب شده که در اینجا مدلی خطی است؛ میزان دقت تصحیح هندسی MODIS نسبت به ASTER و خطای اتمسفری؛ حد آستانه‌ای که استفاده می‌شود؛ و در نظر گرفتن بخش‌های مختلف مقادیر شاخص؛ و دسترسی نداشتن به داده‌های زمینی که افزون بر کاهش دقت، امکان ارزیابی دقیق مدل را نیز از بین می‌برد.

1. Ground truth

ارزیابی دقت شاخص NDSI استخراج شده از تصاویر MODIS در مناطق دارای شیب متوسط

جدول ۴. نتایج مقایسه مدل MODFASTER در این مقاله و مدل‌های بارتون و سالامونسان و اپل روی منطقه سردشت

مدل	Reference	RMSE
MODFASTEF		۰/۱۲
$FRA = ۰/۰۶ + ۱/۲۱ \times NDSI_{(MODIS)}$	Salomonson et al. (2004)	۰/۱۴
$FRA = -۰/۰۱ + ۱/۴۵ \times NDSI_{(MODIS)}$	Salomonson et al. (2006)	۰/۲۳
$FRA = ۰/۱۸ + ۰/۳۷ \times NDSI_{(MODIS)} + ۰/۲۶ \times (NDSI_{(MODIS)})^2$	Barton et al. (2001)	۰/۲۶

Frei, A., & Robinson, D.A., 1998, **Evaluation of Snow Extent and its Variability in Atmospheric Model Intercomparison Project**, Journal of Geophysical Research, 103, PP.8859° 8871.

Hall, D.K., Riggs, G.A., Salomonson, V.V., Digirolamo, N.E., & Bayr, K.J., 2002, **MODIS Snow-cover Products**, Remote Sensing of Environment, 83, PP. 181 194.

Hall, D.K., Riggs, G.A., & Salomonson, V.V., 1995, **Development of Methods for Mapping Global Snow Cover Using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Data**, Remote Sensing of Environment, 54(2), PP. 127° 140.

Hall, D.K., Foster, J.L., Verbyla, D.L., Klein, A.G. & Benson, C.S., 1998, **Assessment of Snow-Cover Mapping Accuracy in a Variety of Vegetation-Cover Densities in Central Alaska**, Remote Sensing of Environment, 66, PP. 129° 137.

Jelokhani Niaraki, M., 2005, **Preparation of Snow Cover Map Using NOAA-AVHRR and GIS Techniques (Case study: Karaj dam watershed)**, Master Thesis, Tarbiat Modares University.

ترکیب تصاویر با قدرت تفکیک‌های بالا می‌تواند تأثیر شایانی در رسیدن به نتایج بهتر در تصاویری با قدرت تفکیک پایین مانند MODIS داشته باشد. با توجه به هزینه پایین و دسترسی آسان به داده‌های MODIS، این فرایند از نظر اقتصادی نیز توجیه‌پذیر است. استفاده از داده‌های زمینی هم‌زمان با گذر ماهواره می‌تواند دقت را بالا ببرد.

۵- منابع

Barton, J.S., Hall, D.K., & Riggs, G.A., 2001, **Remote Sensing of Fractional Snow Cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Data**, Proceedings of the 57th Eastern Snow Conference, Syracuse, New York, USA, PP. 171° 183.

Dadashi khanaghah, S., 2009, **Study of Snow Cover in Basin of Karaj and Latian Usin Image Processing Algorithm**, Master s thesis, Shahid Beheshti University.

Dozier, J., & Painter, Thomas, H., 2004, **Multispectral and Hyperspectral Remote Sensing of Alpine Snow Properties**, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 32, PP. 465 494.

Dozier, J., 1989, **Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper**, Remote Sensing of Environment, 28, PP. 9 22

- Kelly, R.E., Chang, A.T., Tsang, L. & Foster, J.L., 2003, **A Prototype AMSR-E Global Snow Area and Snow Depth Algorithm**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(2), PP. 230-242.
- Klein, A.G., Hall, D.K. & Riggs, G.A., 1998, **Improving Snow Cover Mapping in Forests Through the Use of a Canopy Reflectance Model**, Hydrological Processes 12, PP. 1723-1744.
- König, M., Winther, J.G. & Isaksson, E., 2001, **Measuring Snow and Glacier Ice Properties from Satellite**, Reviews of Geophysics, 39(1), PP. 1-27.
- Koren, H., 2010, **Validation of the NLR Fractional Snow Cover Algorithm, Extended Report Including Topographic Radiometric Correction**, Norsk Regnesentral, Norwegian computing center.
- Kyle, H.L., Curran, R.J., Barnes, W.L. & Escoe, D., 1978, **A Cloud Physics Radiometer**, Third Conference on Atmospheric Radiation, American Meteorological Society, Davise, Calif., P. 107.
- Matkan, A.A., 2003, **Snow Depth Estimation in Iran, using: DMSP F11-SSM/I satellite data**, Journal of Geographical Science, 1.
- Mobasheri, M.R., Shafizadeh Moghadam, H., & Shayan, S., 2011, **An Introduction to MODIS and SCMOD Methods for Correction of the MODIS Snow Assessment Algorithm**, Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 4, PP. 674-685.
- Nolin, A., & Liang, S., 2000, **Progress in Bidirectional Reflectance Modeling and Applications for Surface Particulate Media: Snow and Soils**, Remote Sensing Reviews, 14, PP. 307-342.
- Rango, A., Walker, A.E. & Goodison, B.E., 2000, **Role of Snow and Ice**. In G. A. Schultz, & E. Engman (Eds.), Remote Sensing in Hydrology and Water Management, PP. 239-270.
- Robinson, D.A., Dewey, K.F., & Heim, R.R., 1993, **Global Snow Cover Monitoring: An Update**, Bulletin of the American Meteorological Society, 74(9), PP. 1689-1696.
- Salomonson, V.V., Appel, I., 2004, **Estimating Fractional Snow Cover from MODIS Using the Normalized Difference Snow Index**, Remote Sensing of Environment, 89, PP. 351-360.
- Salomonson, V.V., Appel, 2006, **Development of the Aqua MODIS NDSI Fractional Snow Cover Algorithm and Validation Results**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 7.
- Shi, J., Dozier, J. & Rott, H., 1994, **Snow Mapping in Alpine Regions with Synthetic Aperture Radar**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 32(1), PP. 152-158.
- Sirguey, P., Mathieu, R. & Arnaud, Y., 2009, **Subpixel Monitoring of the Seasonal Snow Cover with MODIS at 250 m Spatial Resolution in the Southern Alps of New Zealand: Methodology and Accuracy Assessment**, Remote Sensing of Environment, 113, PP. 160-181.

Taghavi Kish, S., 2005, **Determination of Snow Cover Using of MODIS Images and Investigation of Snowmelt Runoff Model Caused by Snow on it**, Master Thesis, Tehran University.

Zhang, Y., Yan, S. & Lu, Y., 2010, **Snow Cover Monitoring Using MODIS Data in Liaoning Province, Northeastern China**, Remote Sensing, 2, PP. 777-793.

<http://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/sug.pdf>

Xiao, X., Shen, Zh. & Qin, X., 2001, **Assessing the Potential of VEGETATION Sensor Data for Mapping Snow and Ice Cover: A Normalized Difference Snow and Ice Index**, International Journal of Remote Sensing, 13, PP. 2479° 2487.

