

پایش تغییرات فضایی - زمانی سطوح برفی زاگرس با استفاده از تصاویر NOAA-AVHRR

مهدی شرافت^۱، امان‌اله فتح‌نیا^{۲*}

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۲- استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه رازی، کرمانشاه

دریافت: ۹۷/۱۲/۲۶ پذیرش: ۹۸/۳/۱۸

چکیده

تغییرات فضایی- زمانی وسعت نواحی برفی نکته‌ای مهم در مطالعه‌ی تغییر اقلیم و عاملی تأثیرگذار در آلودگی سطحی و بالانس انرژی سطح زمین و تغییرات فصلی به حساب می‌آید و کمی‌سازی این تغییرات اهمیت ویژه‌ای دارد. در این پژوهش، با استفاده از تصاویر NOAA-AVHRR در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۵-۱۹۹۶، سطوح برفی زاگرس بررسی و مدل مناسبی بر مبنای ترکیب باندهای انعکاسی، حرارتی و مدل رقومی ارتفاع برای استخراج برف از تصاویر NOAA-AVHRR در کوه‌های زاگرس ارائه شد. در دوره‌ی مورد مطالعه، بیشترین مساحت برف در آوریل سال ۱۹۹۷ با مقدار ۲۷۶۳۷/۶ کیلومتر مربع و کمترین مساحت برف در ژولای ۲۰۰۱ با مقدار ۳/۶ کیلومتر مربع مشاهده شد. از نظر فضایی نیز بیشترین وسعت مناطق برفی در اکثر سال‌ها در ارتفاعات استان‌های چهارمحال و بختیاری، شرق لرستان و نیز ارتفاعات مرزی استان‌های اصفهان و کهگیلویه و بویراحمد دیده شد. البته در ماه آوریل و به‌ویژه سال ۱۹۹۷، در اکثر استان‌های واقع در محدوده‌ی مورد مطالعه (به‌جز بوشهر، هرمزگان و یزد) برف مشاهده شده است. در مجموع، میانگین تغییرات سطح برف در دوره‌ی مورد مطالعه ۰/۲۲- و کاهشی است. بیشترین کاهش به ماه ژولای (۰/۳۵-) و کمترین کاهش به ماه آوریل (۰/۱۷-) مربوط است.

واژگان کلیدی: تغییرات پوشش برف، کوه‌های زاگرس، تصاویر AVHRR.

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین مناطق برفگیر ایران رشته‌کوه‌های زاگرس است که منابع عظیم آب شیرین را در خود دارد. تداوم حیات بسیاری از مناطق مرکزی و جنوبی کشور به رودهایی وابسته است که از این کوه‌ها سرچشمه می‌گیرند و کاهش تغییرات شدید رژیم آبدهی این رودخانه‌ها در طول سال، ممکن است تهدیدی جدی برای واحدهای کشاورزی و تولیدی باشد. با این حال، با اندازه‌گیری میزان آب ذخیره‌شده در نواحی کوهستانی در قالب توده‌های برفی، اطلاع از میزان تغییرات آن در طول زمان و فرآیند انباشت و ذوب آن، هدایت این جریان‌ها به پشت سدها و ارائه راهکارهایی برای جذب تدریجی و تزریق آب‌های زیرزمینی، می‌توانیم علاوه بر جلوگیری از بروز سیل، در زمان کم‌آبی از این منابع در بخش‌های کشاورزی و صنعتی و مصارف انسانی استفاده کنیم. یکی از مهم‌ترین منابع آب شیرین، نزولات برفی هستند که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی، در تغییرات اقلیمی سطح کره‌ی زمین نقش عمده‌ای دارند. ازمنظر جهانی، پایش برف و داشتن اطلاعات دقیق از توزیع فضایی سطوح برفی برای پیش‌بینی وضع هوا و مدل‌سازی هیدرولوژیکی و آب و هواشناسی لازم است (Hüsler & et-al, 2005: 1215; LU & et-al, 2012: 496). یک ویژگی مهم مناطق کوهستانی پوشش برف است که با داشتن بازتاب بالا، تأثیر زیادی بر آب‌وهوای محلی، کاهش تابش خالص در سطح و در نتیجه، انتقال انرژی دارد. پوشش برف علاوه بر اینکه یک عامل مهم برای توسعه‌ی اکوسیستم است، برای فعالیت‌های انسانی اهمیت زیادی دارد (Kleindienst & et-al, 2000: 297). از این رو، امروزه در روند مدیریت کارآمد منابع آبی، به‌کارگیری داده‌های سنجنش‌ازدور با هدف کسب اطلاعات دقیق از پوشش برف، به‌صورت عملیاتی اجرا می‌شود (Johansson & et-al, 2001: 5). به‌طور کلی، برای سنجنش برف از داده‌های ایستگاه‌های برف‌سنجی و داده‌های تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌شود (بنی‌حیب و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۴). با این حال، برخی از محققان معتقدند که داده‌های سنجنش‌ازدور در مقایسه با روش‌های مساحی سنتی، ارزیابی‌های بهتری از محدوده‌های پوشش برف ارائه می‌کند (Metcalf & Buttle, 1999: 66). هرچند این سنجنش ازسوی عوامل بازدارنده‌ی زیادی از جمله اشیاء سنجنده، پوشش ابر، وجود سایه، پوشش جنگلی و صخره‌ها محدود می‌شود، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و کاربرد الگوریتم‌های موجود، امکان استخراج سطح تحت پوشش برف با دقت مناسب وجود دارد (Zhou & et-al, 2013: 146). ماهواره NOAA^۱-AVHRR^۲ با داشتن قدرت تفکیک زمانی بالا، دید وسیع و از همه مهم‌تر

1. National Oceanic and Atmospheric Administration

2. Advanced Very High Resolution Radiometer



داده‌های بایگانی‌شده‌ی بلندمدت، از پتانسیل بالایی برای مطالعه‌ی تغییرات سطوح برفی برخوردار است (LU & et-al, 2005: 1215). هدف تحقیق حاضر بررسی تغییرات فضایی-زمانی سطح برف کوه‌های زاگرس از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۵ با استفاده از تصاویر NOAA-AVHRR و ارائه‌ی یک الگوریتم مناسب است.

۲- مباحث نظری

درزمینه‌ی برف‌سنجی، مطالعات زیادی شده است. پوگیو و گیمونا (۲۰۱۵) تغییرات زمانی-فضایی سطح برف کشور اسکاتلند را برای دوره‌ی آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ با استفاده از تصاویر MODIS^۱ درارتباط با عوامل محیطی، ازجمله توپوگرافی و ارتفاع، بررسی کردند. آن‌ها در این مطالعه، از شاخص NDSI^۲ برای آشکارسازی سطوح برفی استفاده کردند. ژو و همکاران (۲۰۱۳) با مقایسه‌ی داده‌های سنجنده‌ی AVHRR برای سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۸ و سنجنده‌ی MODIS برای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۸، تغییرات سطح برف آسیای مرکزی را مطالعه کردند. آن‌ها با استفاده از روش آستانه‌گذاری برپایه‌ی آلبدوی باندهای مرئی و دمای درخشندگی باندهای حرارتی و روش تفکیک طیفی، سطوح برفی را استخراج و سری زمانی را محاسبه کردند. هاسلر^۳ و همکاران (۲۰۱۲) یک الگوریتم تازه را به‌منظور بازیابی برف از داده‌های سنجنده‌ی AVHRR و مطالعه‌ی تغییرات سطوح برفی بین سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۱ برای کوه‌های آلپ ارائه کردند. کراوفورد^۴ و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از تصاویر لندست طی سال‌های ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۱، سطوح برفی کوه‌های ترین در آمریکای جنوبی را استخراج کردند و میزان دقت آن‌ها را با استفاده از داده‌ی ایستگاه‌های زمینی و اندازه‌گیری آب معادل برف براساس یک زمان مینا (فصل ذوب) بررسی کردند. شاه‌رودی و روساوه^۵ (۲۰۱۴) برای آشکارسازی پیکسل‌های برفی در شرایط مختلف، ازجمله وجود سایه، ابر و اثر پوشش‌های مختلف، از امواج مایکروویو استفاده کردند و نتایج را با محصولات ماهواره‌های NOAA، NSE^۶، IMS^۷ و CMC^۸ مقایسه کردند. یافته‌های آن‌ها تشابه ۷۸ تا ۹۲ درصد را نشان داد.

1. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
2. Normalized Difference snow Index
3. Hüsler
4. Crawford et
5. Rossow
6. near-real time ice and snow extent
7. Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System
8. Canadian Meteorological Center

جاین^۱ و همکاران (۲۰۰۸) میزان دقت تصاویر MODIS, AVHRR و IRS^۲ در بررسی پوشش برف در کوه‌های هیمالیا را با یکدیگر مقایسه کردند. آن‌ها داده‌های ثبت‌شده‌ی سه سنجنده‌ی مذکور را در ۱۵ برهه‌ی زمانی و برای یک دوره‌ی چهارساله به‌کار بردند و آن‌ها را با مشاهدات زمینی پوشش برف مقایسه کردند. درپایان، مشخص شد که مطابقت خوبی میان سطح برف تخمین‌زده‌شده با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و روش‌های زمینی وجود دارد. ژوا^۳ و همکاران (۲۰۰۵) سطوح برفی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای AVHRR و MODIS را با نمونه‌های زمینی مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که MODIS برف را بیشتر در مناطق مرتفع حوضه و با دقتی زیاده‌تر از AVHRR برآورد می‌کند.

کلیندینت^۴ و همکاران (۲۰۰۰) برای تعیین خط برف در آلپ‌های سوئیس، داده‌های سنجنده‌ی AVHRR را طی سال‌های ۱۹۹۲، ۱۹۹۶، ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹ بررسی کردند. آن‌ها با مقایسه‌ی نتایج حاصل از سنجنده‌ی AVHRR با داده‌های IRS، نتیجه گرفتند که حتی با قدرت تفکیک فضایی ۱/۱ کیلومتر نیز تعیین کمی خط برف امکان‌پذیر است. علی‌محمدی و جلوخانی نیارکی (۱۳۸۳) با به‌کارگیری باندهای انعکاسی و حرارتی، پوشش برف در حوضه‌ی سد کرج را با متوسط کاپای ۰/۸۱ از غیربرف جدا کردند. بنی‌حبیب و همکاران (۱۳۹۲) برای پایش سطح برف حوضه‌ی سد شاه‌چراغی، تصاویر سنجنده‌ی AVHRR را طی سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۷ بررسی کردند. آن‌ها از دو روش تحلیل آستانه برپایه‌ی آلبدو باندهای مرئی و دمای درخشندگی باندهای حرارتی برای جداسازی برف، براساس نوع ماهواره استفاده نمودند. دینی و همکاران (۱۳۸۶) سطوح برف‌گیر ناحیه‌ی البرز مرکزی را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجدیند. آن‌ها در این تحقیق، از داده‌های سنجنده‌ی AVHRR و MODIS برای شناسایی سطوح برف‌گیر در البرز مرکزی استفاده کردند و برای جداسازی سطح برف از زمین و ابر، روش آستانه‌گذاری برای آلبدو باندهای مرئی و دمای درخشندگی باندهای حرارتی را به‌کار بردند. پرهت و ثقفیان (۱۳۸۶) طی تحقیقی، قدرت تفکیک‌پذیری اطلاعات ماهواره‌ها در تعیین سطح برف را ارزیابی کردند. آن‌ها سنجنده‌ی AVHRR و TM در منطقه‌ی زاگرس و سرشاخه‌های کارون را مقایسه نمودند. نتایج تحقیق نشان داد که مساحت پوشش برفی در تصاویر ماهواره‌ی NOAA درمقایسه با ماهواره‌ی لندست بین ۱۵ تا ۱۷ درصد تفاوت دارد. پرهت و همکاران (۱۳۸۱) با استفاده از باندهای دو، سه و چهار سنجنده‌ی AVHRR، روشی را برای تفکیک برف از ابر و زمین ارائه کردند که با استفاده از بارزسازی، تحلیل چندطیفی و تحلیل هیستوگرام، باتوجه به ویژگی‌های فیزیکی، برف، ابر و زمین را از

1. Jain
2. Indian Remote Sensing
3. Zhoua
4. Kleindienst

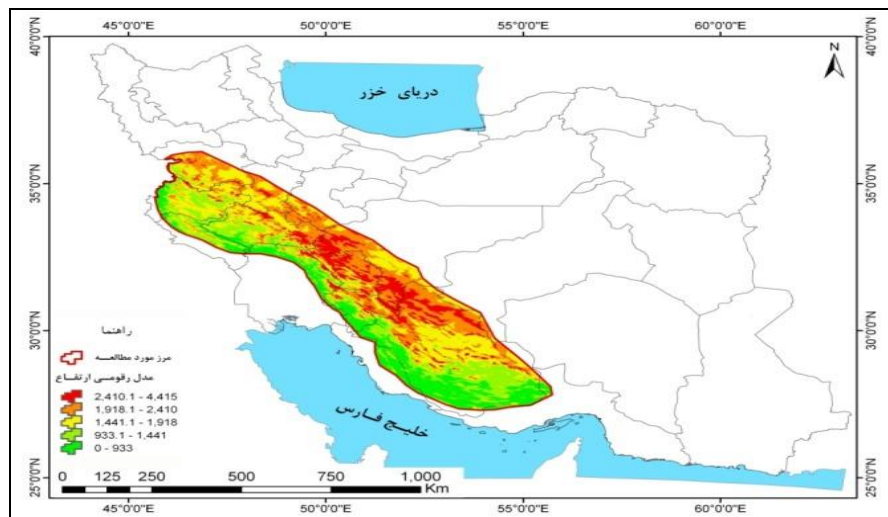


یکدیگر تفکیک می‌کند. بررسی انتقال رطوبت روی غرب ایران نشان‌دهنده‌ی ورود منابع عمده‌ی تأمین رطوبت بارش‌های غرب ایران در زمستان از دریاهای عمان و عرب است (فرج‌زاده اصل و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۹۳). همچنین، مقدار بارش در دامنه‌های روبه‌باد زاگرس کاهش می‌یابد و به سمت عرض‌های جغرافیایی و ارتفاعات بالای زاگرس نیز چنین است (مجرد و مرادی‌فر، ۱۳۸۲: ۱۶۳). هدف تحقیق حاضر بررسی تغییرات زمانی و مکانی پوشش برفی زاگرس با استفاده از تمامی باندهای NOAA-AVHRR و مدل رقومی ارتفاع است. در این پژوهش، علاوه‌بر ترکیب مدل‌های موجود، آستانه‌های بارزسازی برف برای شناسایی برف در رشته‌کوه زاگرس تصحیح شد.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- منطقه‌ی مورد مطالعه

رشته‌کوه‌های زاگرس بزرگ‌ترین واحد ساختمانی ایران است که با روند شمال غرب-جنوب شرق در طول بیش از ۱۲۰۰ کیلومتر و با عرض حدود ۶۰۰ کیلومتر (جداری عیوضی، ۱۳۷۴: ۴۵)، از حوالی مریوان در استان کردستان تا تنگه‌ی هرمز در بندرعباس کشیده شده است. این منطقه در طول و عرض‌های جغرافیایی وسیعی گسترده شده که شامل استان‌های کرمانشاه، ایلام، کهگیلویه و بویراحمد، چهارمحال و بختیاری، بوشهر، خوزستان و فارس و نیز بخش‌هایی از استان‌های همدان، مرکزی، کردستان، اصفهان و هرمزگان است (شکل ۱).



شکل ۱ موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه

۲-۳- روش پژوهش

در تحقیق حاضر، از تصاویر روزانه‌ی NOAA-AVHRR (۲۶۱ تصویر)، با قدرت تفکیک مکانی ۱/۱ کیلومتر، برای دوره‌ی آماری ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۵ و مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متر استفاده کردیم. ابتدا تصاویر را با استفاده از نرم‌افزار ENVI تصحیح هندسی کردیم. بعد از تصحیح رادیومتریک، آلبدوی باندهای انعکاسی و دمای درخشندگی باندهای حرارتی را با استفاده از ضرایب موجود در HDR فایل هر تصویر، توسط نرم‌افزار ERDAS محاسبه کردیم. در مرحله‌ی بعد، برای هر تصویر دمای سطح زمین را برآورد نمودیم. در این تحقیق، برای محاسبه‌ی دمای سطح زمین، از الگوریتم کول و همکاران (۱۹۹۴) استفاده کردیم.

$$TS = T_4 + [1.29 + 0.28(T_4 - T_5)] \times (T_4 - T_5) + 45(1 - \varepsilon_4) - 40\varepsilon$$

TS دمای سطح زمین، T_4 و T_5 به ترتیب دمای روشنایی باندهای ۴ و ۵ سنجنده‌ی AVHRR، ε_4 قابلیت انتشار در باند ۴ و $\Delta\varepsilon$ تفاضل قابلیت انتشار در باندهای ۴ و ۵ سنجنده‌ی AVHRR ماهواره‌ی NOAA است. باتوجه به اینکه هدف ما از محاسبه‌ی دمای سطح زمین، استفاده از آن برای تفکیک برف از عوارض و پدیده‌های دیگر مانند ابر و زمین بوده است، در این تحقیق، از ضرایب ثابت برای قابلیت انتشار باند ۴ و ۵ سنجنده‌ی AVHRR استفاده کردیم (جدول ۱).

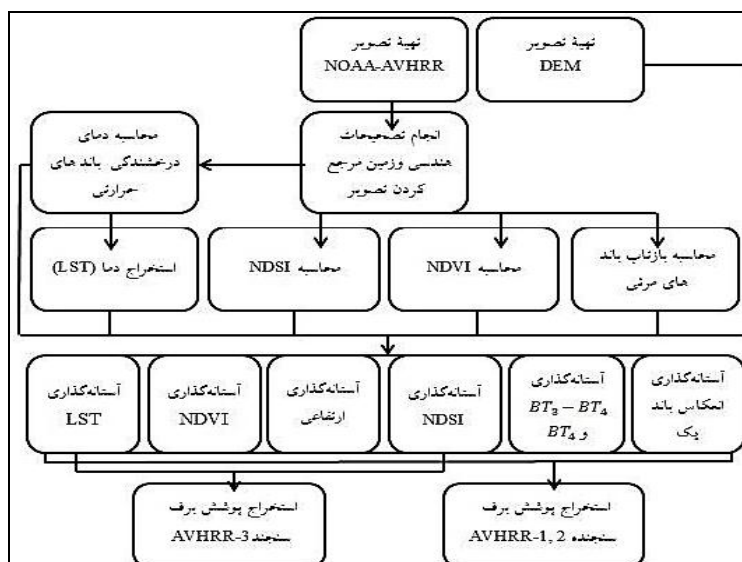
جدول ۱ قابلیت انتشار استفاده شده برای ماه‌های مختلف (Vázquez & et-al, 1997: 218)

زمان	ε_4	ε_5
آوریل، می و ژوئن	۰/۹۷	۰/۹۸
ژوئای	۰/۹۶	۰/۹۷

در ادامه، پس از محاسبه‌ی NDVI و NDSI، برای شناسایی و جداسازی برف از پدیده‌های دیگری چون ابر و زمین، باتوجه به نوع سنجنده‌ی AVHRR، از دو روش متفاوت استفاده کردیم (شکل ۲)؛ زیرا باند 3a که طول موج ۱/۶۴-۱/۵۸ میکرومتر را در گذر روزانه برداشت می‌کند، از سال ۱۹۹۸ محدوده‌ی ۳/۹۳-۳/۵۵ میکرومتر را در گذر شب برداشت می‌کند. مدل استخراج برف در این تحقیق شامل یک روش آستانه‌گذاری هفت مرحله‌ای است (شکل ۲). در اولین مرحله، با اعمال آستانه‌ی مناسب روی NDVI، منابع آبی را شناسایی و از تصویر حذف کردیم. دومین مرحله آستانه‌گذاری روی آلبدوی باند یک سنجنده‌ی AVHRR بود؛ زیرا برف انعکاس بالایی در محدوده‌ی مرئی دارد و بنابراین، با آستانه‌گذاری مناسب در این مرحله، جداسازی برف از پوشش‌های دیگر که انعکاس پایینی دارند، امکان‌پذیر است. در مرحله‌ی سوم، آستانه‌گذاری



روی NDSI (در تصاویری که باند 3a دارند) را اعمال کردیم. از شاخص NDSI برای تفکیک برف و یخ از یکدیگر و همچنین برای جداسازی برف از ابرهای ارتفاع بالای اتمسفر، نظیر ابرهای کومولونیمبوس، استفاده کردیم. در مرحله بعد، با آستانه‌گذاری روی تفاضل دمای درخشندگی باند ۳ و ۴ و دمای درخشندگی باند ۴ (در تصاویری که باند 3b دارند)، قسمت اعظم ابرها را از برف جدا نمودیم؛ زیرا باند ۳ و ۴ سنجنده AVHRR به‌طور مؤثری برای جداسازی برف از ابر به کار می‌روند (Akyurek & sorman, 2002: 245). در باند ۳، زمین بازتاب کمتری از ابر و برف دارد و در باند ۴، دمای درخشندگی برف کمتر از ابر است (بنی‌حبیب و همکاران، ۱۳۹۲: ۲۰). بنابراین، حاصل تفاضل باند ۳ از ۴ سنجنده AVHRR برای برف کمتر از ابر است (Baum & Qing, 1999: 798). در ادامه‌ی آستانه‌گذاری روی دمای سطح زمین با هدف حذف ابرهای سطوح بالا، جداسازی برف از پوشش‌های سطحی با انعکاس نزدیک به برف (گچ و نمک) را انجام دادیم. در مرحله‌ی آخر، با استفاده از تصویر رقومی ارتفاع (DEM)، آستانه‌ی ارتفاعی را برای برف تعیین کردیم تا پیکسل‌هایی که پایین‌تر از خط برف قرار دارند از تصویر حذف شوند (Zhou & et-al, 2013: 153). این روش به راحتی بسیاری از ابرهای سطح پایین را نیز حذف می‌کند. مطالعات روی تصاویر MODIS نشان می‌دهد که آستانه‌گذاری ارتفاعی ۲۰ تا ۶۰ درصد اثر ابر را کاهش می‌دهد؛ البته درمورد ابر گسترده ممکن است به خوبی عمل نکند (ماکسیمیلیانوس، ۲۰۱۳: ۴۴).



شکل ۲ مدل تعیین سطح برف با استفاده از ماهواره‌ی NOAA سنجنده‌ی AVHRR

پس از اعمال مدل‌های استخراج سطح برف روی تصاویر و طبقه‌بندی آن‌ها به کلاس‌های برف و غیربرف، برای یکی کردن تصاویر در هر ماه از روش ^۱SMVC استفاده کردیم. به این ترتیب، برای هر دوره‌ی ماهانه (۲۰۱۵-۱۹۹۶)، ۲۰ تصویر به‌دست آمد. آستانه‌های مورد استفاده در این تحقیق را در جدول ۲ ارائه کرده‌ایم.

جدول ۲ آستانه‌های مورد استفاده برای جداسازی برف از غیربرف

نوع سنجنده	آستانه‌های مستقل	آستانه‌های مشترک
AVHRR- 1, 2	BT (3.7μ) - BT (11μ) < 11 265 < BT (11μ) < 285	NDVI > -0.1 Reflectance Band 1 > 0.2 آوریل 14 < LST < 4-، می 16 < LST < 2-، ژوئن و ژولای 18 < LST < 2- DEM > 2000
	NDSI > 0.3	AVHRR- 3

۴- نتایج و یافته‌های تحقیق

۴-۱- تغییرات زمانی سطح برف کوه‌های زاگرس

جدول ۳ مساحت سطح برف رشته‌کوه زاگرس برای ماه‌های آوریل، می، ژوئن و ژولای را از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۵ نشان می‌دهد که نتایج آن برای هر ماه، به شرح زیر است:

۱- آوریل: بیشترین مساحت برف آوریل، در سال ۱۹۹۷ با مقدار ۲۷۶۳۷/۶ کیلومترمربع و کمترین مساحت آن در سال ۲۰۰۸ با مقدار ۲۵۰۹/۵ کیلومترمربع بود. متوسط مساحت برف این ماه در سال‌های مورد مطالعه، حدود ۸۰۸۱ کیلومترمربع بود که ۷ سال مساحتی بیشتر از میانگین و ۱۳ سال مساحتی کمتر از میانگین داشت. مساحت برف سال ۱۹۹۶ نیز با مقدار ۱۹۸۲۵/۹ کیلومترمربع، قابل توجه بود.

1.- Snow Maximum Vluue Composite



۲- می: بیشترین مساحت برف ماه می نیز مانند آوریل در سال ۱۹۹۷ با مقدار ۹۲۳۴/۷ کیلومترمربع و کمترین مساحت آن در سال ۲۰۰۸ با مقدار ۲۳۱/۱ کیلومترمربع بود. متوسط مساحت برف این ماه ۱۸۱۱/۱ کیلومترمربع بود که ۶ سال مساحتی بیشتر از میانگین و ۱۴ سال کمتر از میانگین داشت. مساحت برف ماه می ۲۰۰۴ نیز ۳۹۶۸/۸ کیلومترمربع بود.

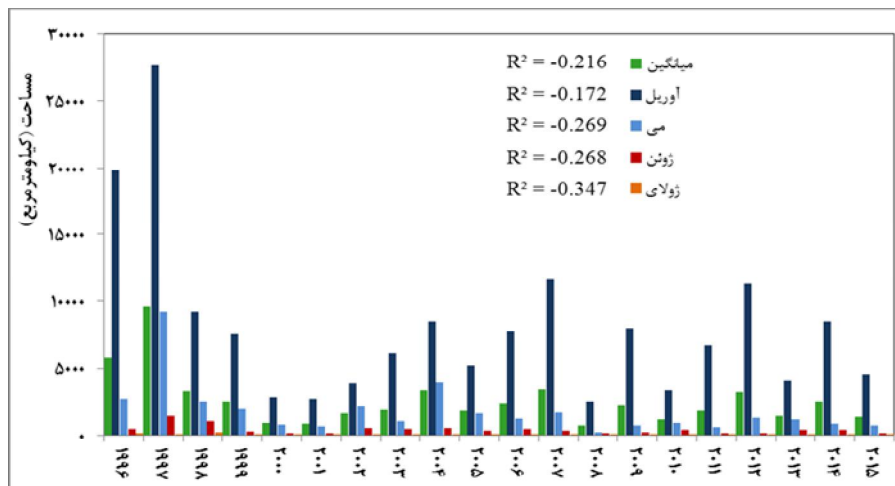
۳- ژوئن: در این ماه هم سال ۱۹۹۷ با مقدار ۱۴۷۱/۴ کیلومترمربع بیشترین مساحت برف را داشت؛ ولی کمترین مساحت برف در سال ۲۰۱۲ با مقدار ۱۲۵,۸۴ کیلومترمربع بود. متوسط مساحت برف این ماه ۴۰۸/۹ کیلومترمربع بود که ۸ سال مساحتی بیشتر از میانگین و ۱۲ سال مساحتی کمتر از آن داشت. دومین بیشینه‌ی مساحت برف به سال ۱۹۹۸ با مقدار ۱۰۴۷/۹ کیلومترمربع مربوط بود. در همه‌ی سال‌ها، بیشترین میزان کاهش سطح برف در گذار ماه می به ژوئن رخ داده است.

۴- ژولای: بیشینه‌ی مساحت برف در ماه ژولای در سال ۱۹۹۸ با مساحت ۲۰۸/۱ کیلومترمربع و کمینه‌ی آن در سال ۲۰۰۱ با مساحت ۳/۶ کیلومترمربع بود. میانگین مساحت برف در ماه ژولای در سال‌های مورد مطالعه ۵۵/۶ کیلومترمربع بود که ۶ سال مساحتی بیشتر از میانگین و ۱۴ سال مساحتی کمتر از آن داشت. در رتبه‌ی دوم، سال ۱۹۹۶ با مساحت ۱۶۹/۴ کیلومترمربع قرار دارد. آنچه در این ماه جلب توجه می‌کند، کمترین مساحت برف مربوط به سال ۱۹۹۷ با مقدار ۴۵/۶ کیلومترمربع است که پایین‌تر از میانگین قرار دارد.

۵- میانگین فصل ذوب: این نمودار که شامل میانگین چهار ماه مورد مطالعه برای هر سال است، بسیار به نمودار آوریل نزدیک است؛ زیرا به دلیل بالا بودن سطح برف در آوریل، نمودار میانگین نیز از آن بسیار تأثیر پذیرفته است. بنابراین، در اینجا هم سال ۱۹۹۷ دارای بیشترین مساحت برف با مقدار ۹۵۹۷/۴ کیلومترمربع و سال ۲۰۰۸ دارای کمترین مساحت برف با مقدار ۷۲۲/۴ کیلومترمربع است. میانگین کل مساحت برف ۲۵۸۹/۱ کیلومترمربع است که ۶ سال مساحتی بیشتر و ۱۴ سال مساحتی کمتر از آن داشته است.

جدول ۳ مساحت برف کوه‌های زاگرس از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۵

ماه سال	آوریل	می	ژوئن	ژولای	میانگین
۱۹۹۶	۱۹۸۲۵/۹	۲۶۶۶/۸	۵۰۳/۴	۱۶۹/۴	۵۷۹۱/۴
۱۹۹۷	۲۷۶۳۷/۶	۹۲۳۴/۷	۱۴۷۱/۴	۴۶	۹۵۹۷/۴
۱۹۹۸	۹۲۰۴/۵	۲۴۶۸/۴	۱۰۴۷/۹	۲۰۸/۱	۳۲۳۲/۲
۱۹۹۹	۷۵۴۸	۱۹۸۴/۴	۲۷۸/۳	۳۸/۷	۲۴۶۲/۴
۲۰۰۰	۲۸۰۲/۴	۷۹۳/۸	۱۳۶/۷	۵۳/۲	۹۴۶/۵
۲۰۰۱	۲۶۹۴/۷	۶۸۶/۱	۱۴۴	۳/۶	۸۸۲/۱
۲۰۰۲	۳۸۷۵/۶	۲۱۷۶/۸	۵۱۷/۹	۱۱۵	۱۶۷۱/۳
۲۰۰۳	۶۰۸۱/۵	۱۰۸۵/۴	۴۶۳/۴	۲۴/۲	۱۹۱۳/۶
۲۰۰۴	۸۵۱۱/۱	۳۹۶۸/۸	۵۶۷/۵	۱۱۹/۸	۳۲۹۱/۸
۲۰۰۵	۵۲۱۶/۳	۱۶۲۳/۸	۳۱۵/۸	۸۲/۳	۱۸۰۹/۶
۲۰۰۶	۷۷۲۹/۵	۱۲۴۵/۱	۴۵۷/۴	۱۰۱/۶	۲۳۸۳/۴
۲۰۰۷	۱۱۵۹۳	۱۷۱۳/۴	۳۲۴/۳	۱۹/۴	۳۴۱۲/۵
۲۰۰۸	۲۵۰۹/۵	۲۳۱/۱	۱۴۴	۴/۸	۷۲۲/۴
۲۰۰۹	۷۹۵۴/۵	۷۴۴/۲	۱۹۱/۲	۳۸/۷	۲۲۳۲/۱
۲۰۱۰	۳۳۱۶/۶	۹۳۲/۹	۴۰۶/۶	۹/۷	۱۱۶۶/۴
۲۰۱۱	۶۶۹۳/۷	۵۷۷/۲	۱۳۹/۲	۱۴/۵	۱۸۵۶/۱
۲۰۱۲	۱۱۲۵۷/۸	۱۳۲۰/۱	۱۲۵/۸	۸/۵	۳۱۷۸/۱
۲۰۱۳	۴۰۹۸/۳	۱۱۶۰/۴	۳۹۴/۵	۶/۱	۱۴۱۴/۸
۲۰۱۴	۸۵۱۷/۲	۸۷۰	۴۱۳/۸	۸/۵	۲۴۵۲/۴
۲۰۱۵	۴۵۵۲	۷۳۸/۱	۱۳۵/۵	۳۹/۹	۱۳۶۶/۴
میانگین	۸۰۸۱	۱۸۱۱/۱	۴۰۸/۹	۵۵/۶	۲۵۸۹/۱

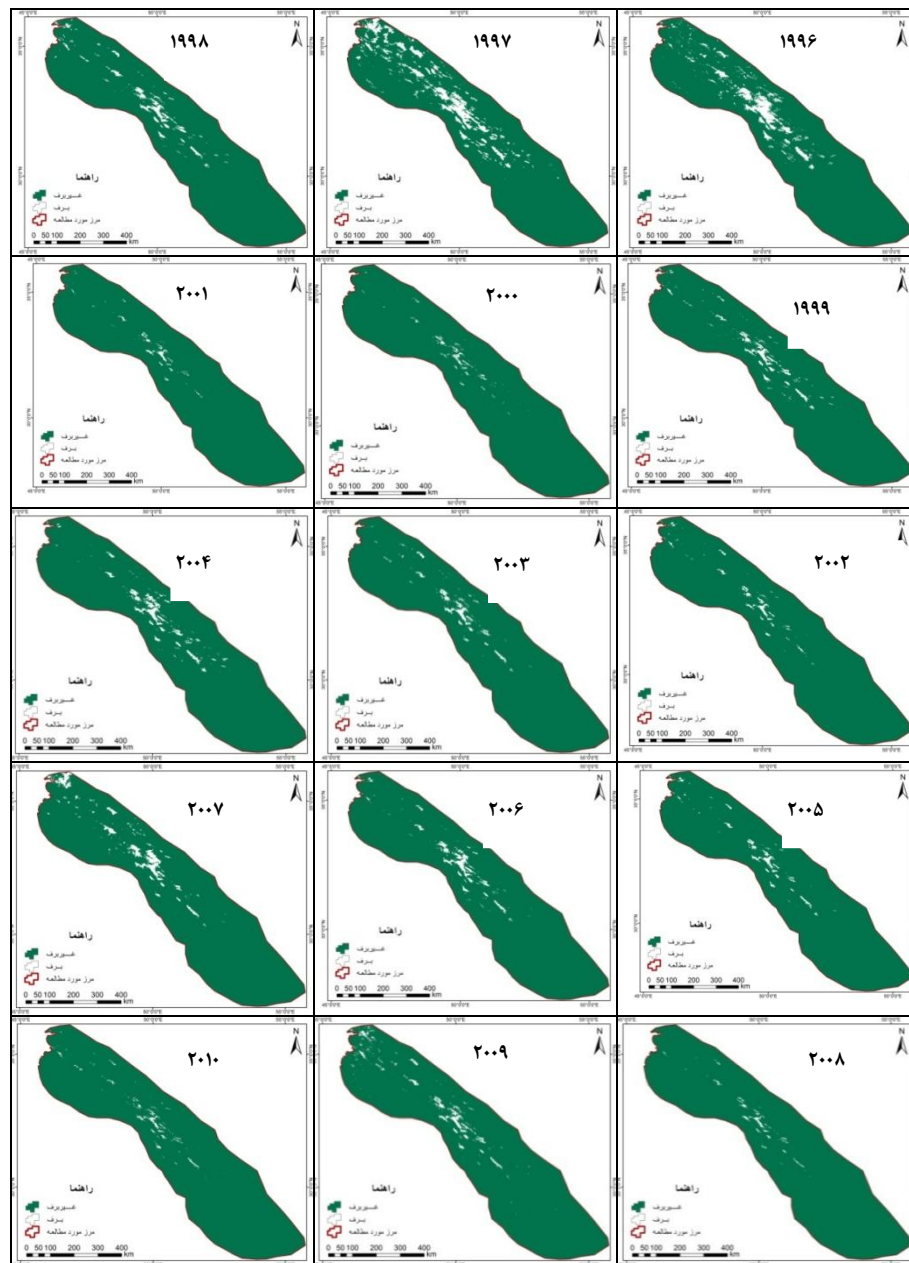


شکل ۳: نمودار میزان تغییرات ماهانه‌ی مساحت پوشش برفی در دوره‌ی ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۵

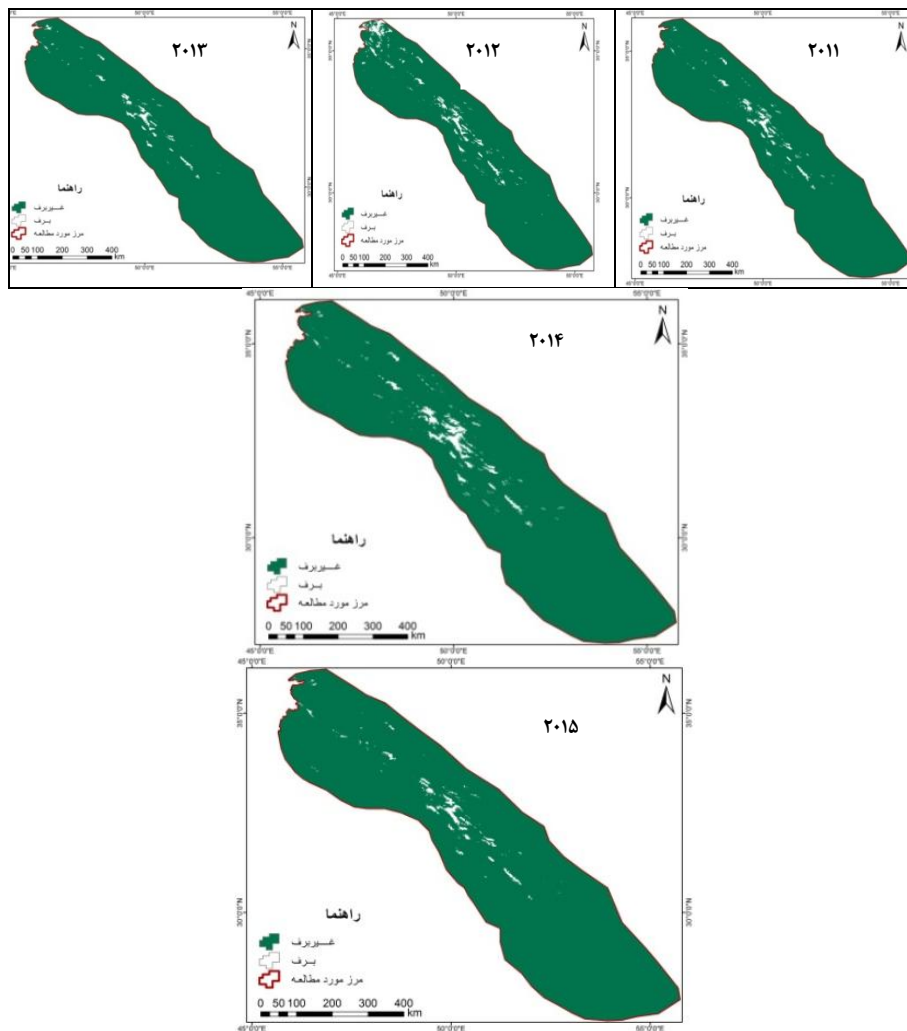
چنانکه در شکل ۳ می‌بینیم، بیشترین میزان تغییرات ماهانه‌ی مساحت پوشش برفی در رشته‌کوه زاگرس به ماه ژوئیه به مقدار ۰/۳۵- و کمترین مقدار تغییرات مساحت به ماه آوریل به مقدار ۰/۱۷- مربوط است. در مجموع، میانگین کاهش سطح برف در دوره‌ی مطالعاتی حدود ۰/۲۲- است.

۴-۲- تغییرات فضایی سطح برف کوه‌های زاگرس

پس از اعمال الگوریتم‌های استخراج برف روی تصاویر سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۵ و استخراج سطح برف ماهانه، تصاویر نهایی را به‌عنوان نماینده‌ی هر ماه ارائه کردیم (شکل ۴ تا ۷). با توجه به تصاویر ذکرشده، نقش ارتفاعات در ماندگاری برف در فصل ذوب به‌خوبی دیده می‌شود؛ به‌طوری که عمده‌ترین توده‌های برفی زاگرس، در ماه آوریل در ارتفاعات الیگودرز و ازنا (بلندترین قله‌ی زاگرس میانی که دارای هشت قله‌ی بلند و به‌هم‌پیوسته با ارتفاع بیش از ۳۲۰۰ متر است)، کوه‌های بختیاری و رشته دینار (در فاصله‌ی لرستان تا جلگه‌های شیراز که از یک سو به فلات داخلی و از سوی دیگر به جلگه‌های خوزستان منتهی می‌شود) وجود دارد. نواحی ذکرشده در تمامی سال‌های مورد مطالعه در ماه آوریل پوشیده از برف بوده‌اند. همان‌طور که گفتیم، بیشترین مساحت برف مشاهده‌شده در ماه آوریل، در سال ۱۹۹۷ بوده است که به‌خوبی در شکل ۴ دیده می‌شود. بالا بودن وسعت برف در آوریل ۱۹۹۶ نیز در این شکل کاملاً مشخص است.

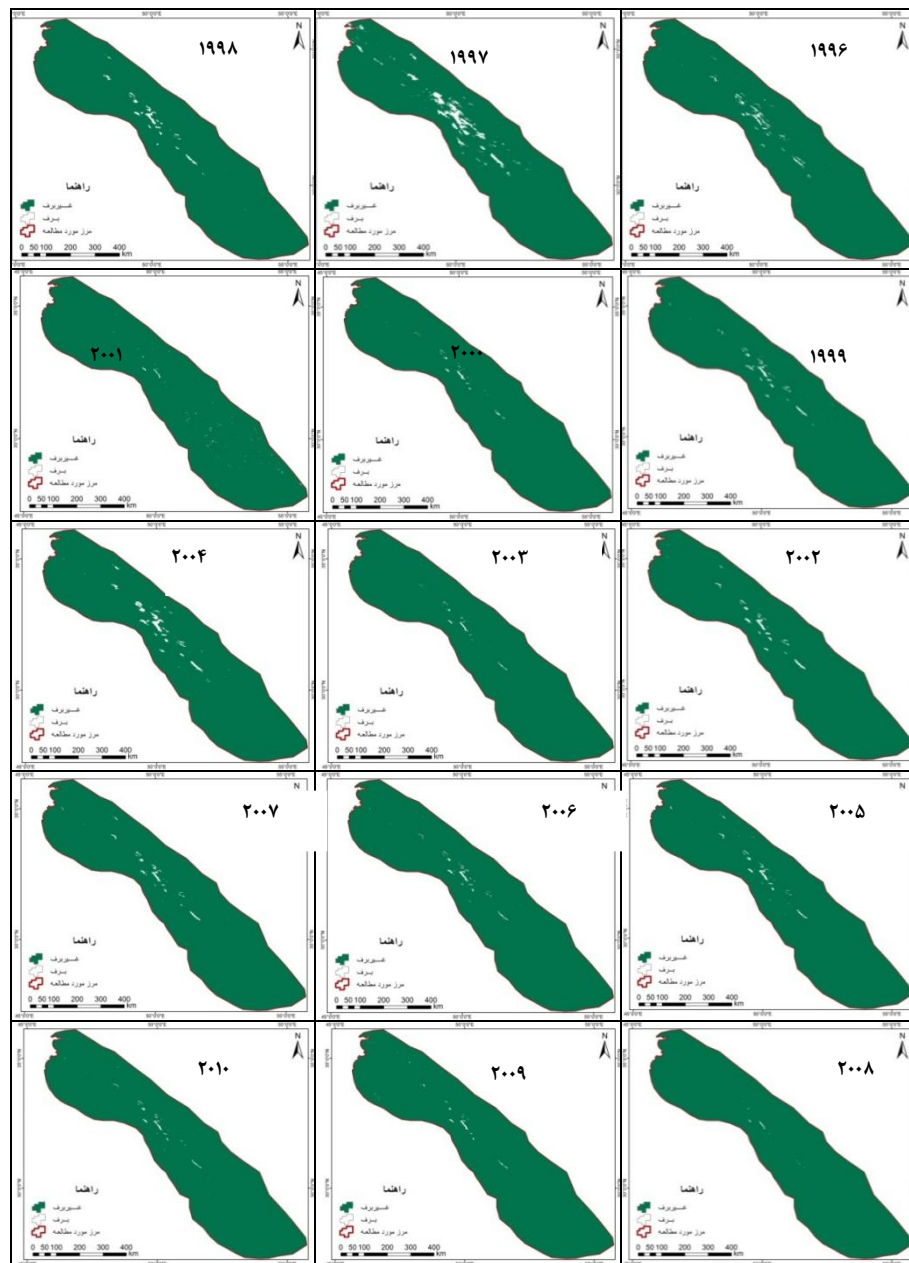


شکل ۴ تغییرات فضایی سطح برف زاگرس در ماه آوریل از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۵

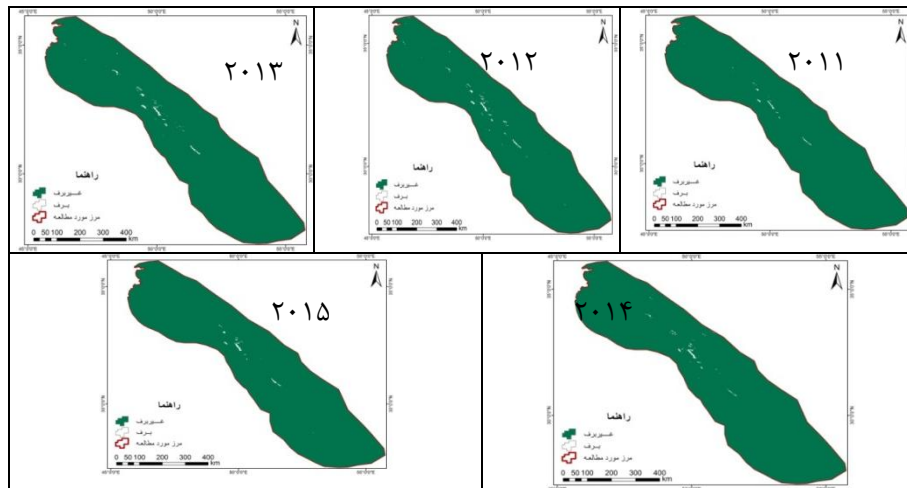


ادامه شکل ۴

در شکل ۵ می‌بینیم که وسعت نواحی برفی در ماه می در مقایسه با آوریل بسیار کاهش یافته؛ ولی وسعت برف ماه می ۱۹۹۷ همچنان قابل توجه است. به طور کلی، با مقایسه‌ی تصاویر ۴ ماه مورد مطالعه در می‌یابیم که بیشترین میزان تغییر در سطوح برفی در تمامی سال‌ها در گذار آوریل به می رخ داده است که این تغییرات احتمالاً با تغییرات دما و نوع بارش ارتباط دارد.

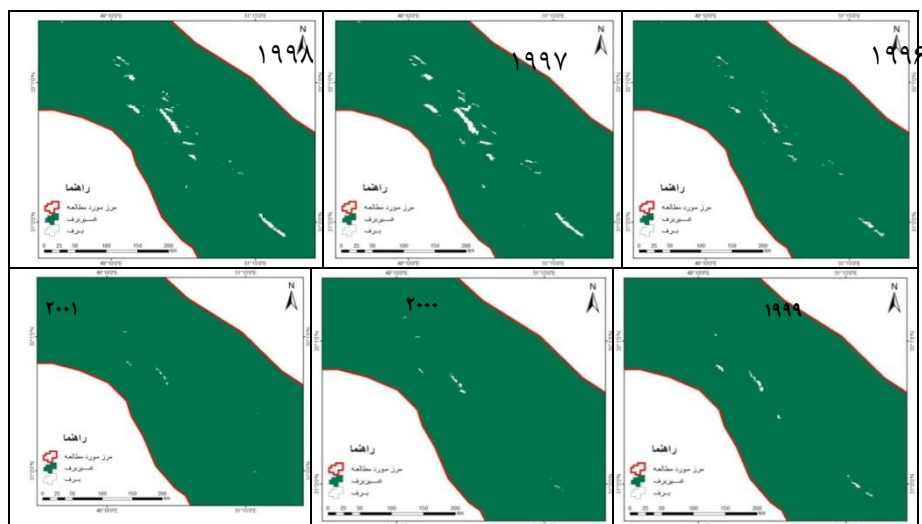


شکل ۵ تغییرات فضایی سطح برف زاگرس در ماه می از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۵

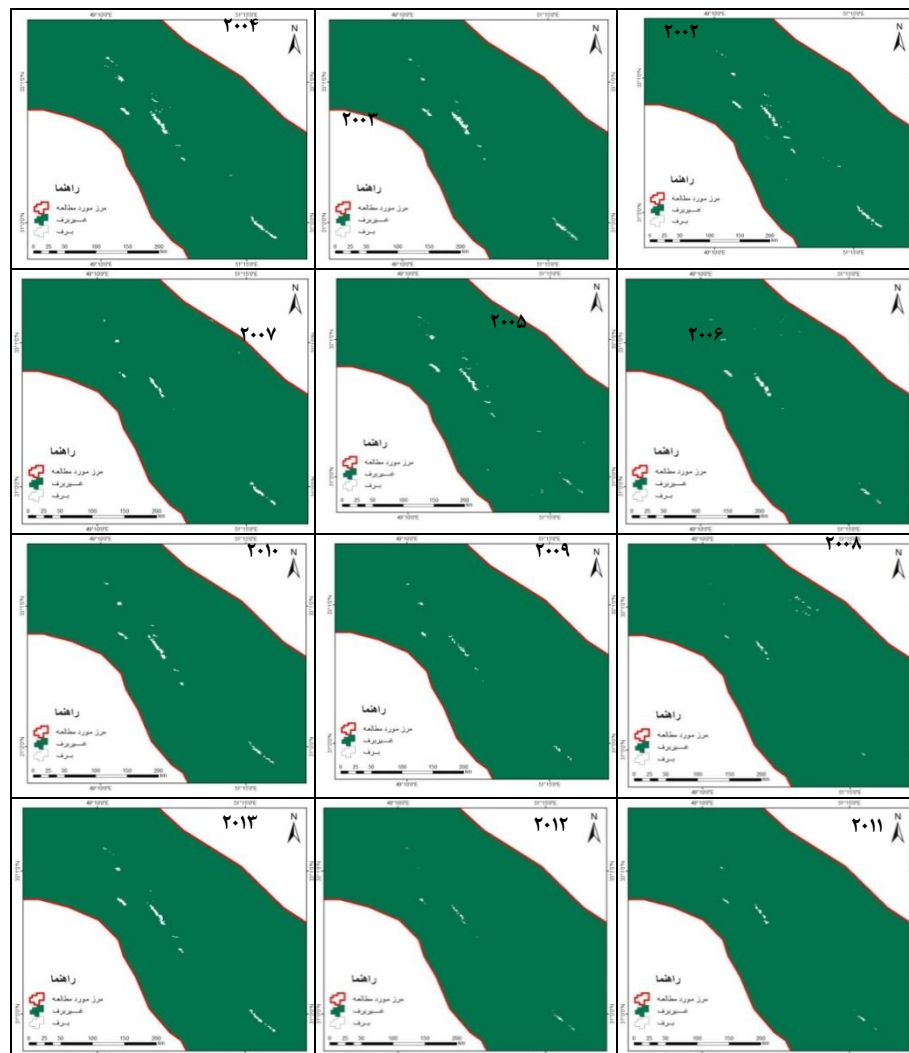


ادامه شکل ۵

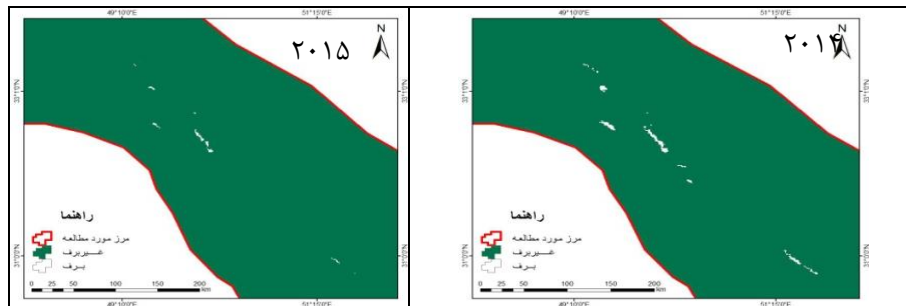
شکل ۶ تغییرات فضایی سطح برف زاگرس در ماه ژوئن در دوره‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. باتوجه به اینکه سطوح برفی در این ماه بسیار کاهش یافته‌اند، نواحی برفی را بزرگنمایی کرده‌ایم تا به‌خوبی مشخص شوند. در ماه ژوئن، سطوح برفی بیشتر در استان‌های چهارمحال و بختیاری، نواحی شرقی لرستان و ارتفاعات بین استان‌های اصفهان و کهگیلویه و بویراحمد دیده شده‌اند.



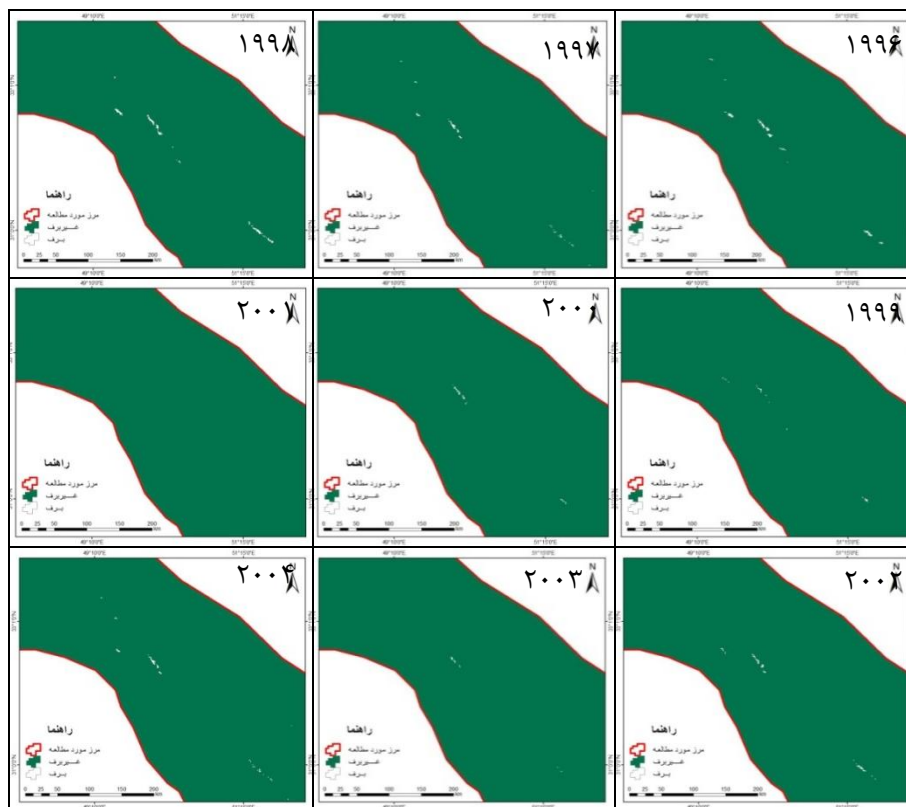
شکل ۶: تغییرات فضایی سطح برف زاگرس در ماه ژوئن از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۵



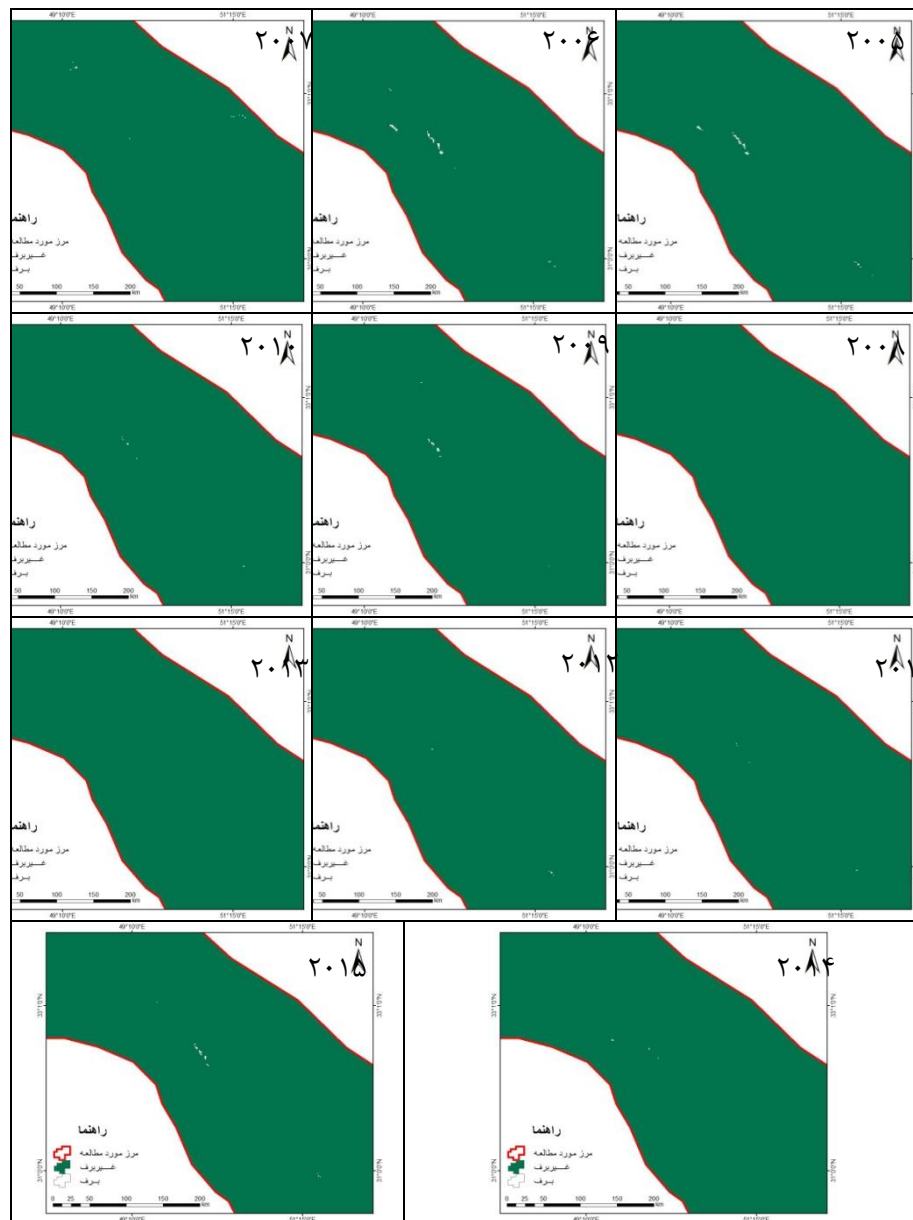
ادامه شکل ۶



ادامه شکل ۶



شکل ۷ تغییرات فضایی سطح برف زاگرس در ماه ژولای از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۵



ادامه شکل ۷



تغییرات فضایی سطح برف زاگرس در ماه ژولای در دوره‌ی مورد مطالعه (شکل ۷) نشان می‌دهد که در بیشتر سال‌ها، وسعت برف ناچیز بوده و به ارتفاعات چهارمحال و بختیاری و نواحی مرزی بین استان‌های اصفهان و کهگیلویه و بویراحمد محدود شده است، در برخی از تصاویر، وسعت برف به دلیل مقدار اندک بارش در برخی از سال‌ها، قابل دیدن نیست. البته، نباید فراموش کنیم که در این تحقیق، از تصاویر سنجنده‌ی AVHRR با قدرت تفکیک مکانی ۱/۱ کیلومتر استفاده شده است و این سنجنده‌ی زمانی یک پیکسل را برفی تشخیص می‌دهد که سطح غالب آن پیکسل را برف تشکیل داده باشد؛ بنابراین، ممکن است که بسیاری از سطوح برفی در این ماه، به دلیل وسعت کم، توسط سنجنده مشخص نشده باشند.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

با بررسی سطوح برف زاگرس دریافتیم که بیشترین مساحت برف ماه آوریل، می و ژوئن در سال ۱۹۹۷، بیشترین مساحت برف ماه ژولای در سال ۱۹۹۸، کمترین مساحت برف ماه‌های آوریل و می در سال ۲۰۰۸، کمترین مساحت برف ماه ژوئن در سال ۲۰۱۲ و کمترین مساحت برف ماه ژولای در سال ۲۰۰۱ بود. از نظر فضایی نیز بیشترین وسعت مناطق برفی در ارتفاعات استان‌های چهارمحال و بختیاری، نواحی شرقی لرستان و ارتفاعات بین استان‌های اصفهان و کهگیلویه و بویراحمد دیده می‌شود. گرچه در ماه آوریل در بیشتر استان‌های واقع در محدوده‌ی مورد مطالعه (به جز بوشهر، هرمزگان و یزد)، برف دیده شده، با افزایش دما از وسعت نواحی برفی کاسته شده است؛ به طوری که در ماه ژولای، تنها ارتفاعات چهارمحال و بختیاری و نواحی کوهستانی مرز استان‌های اصفهان و کهگیلویه و بویراحمد برفگیر بوده‌اند. در مجموع، هرچه به سمت ماه‌های گرم سال می‌رویم، سطح برف کمتر می‌شود؛ به طوری که بیشترین کاهش به ماه ژولای به مقدار ۰/۳۵- و کمترین کاهش به ماه آوریل به مقدار ۰/۱۷- مربوط است و میانگین کاهش حدود ۰/۲۲- است که باتوجه به افزایش دما و کاهش بارش، قابل توجیه است. مطالعه‌ی حاضر در برخی موارد، با پژوهش‌های محققان دیگر قابل مقایسه است؛ از جمله پژوهش ژو و همکاران (۲۰۱۳) برای حوضه‌ی آسیای مرکزی، تحقیق هاسلر و همکاران (۲۰۱۲) برای حوضه‌ی آلپ، پژوهش بنی‌حبیب و همکاران (۱۳۹۲) برای حوضه‌ی سد شاه‌چراغی و مطالعه‌ی دینی و همکاران (۱۳۸۶) برای ناحیه‌ی البرز مرکزی. در تحقیق حاضر، از روش آستانه‌گذاری باندهای مرئی و دمایی درخشندگی باندهای حرارتی سنجنده‌ی AVHRR برای استخراج سطوح برفی استفاده کردیم. هدف این مطالعه، همانند پژوهش ژو و همکاران، بررسی تغییرات سطح برف در زمانی طولانی با استفاده از سنجنده‌ی AVHRR است. از جمله تفاوت‌های پژوهش

حاضر استفاده از مدل رقومی ارتفاع، شاخص NDVI و شاخص LST در تفکیک بهتر دیگر عوارض از برف برای رشته کوه های زاگرس است. بنی حبیب و همکاران (۱۳۹۲) برای حوضه ی سد شاه چراغی (رشته کوه البرز)، براساس سری زمانی سطح برف روندی مشاهده نکردند؛ اما در مطالعه ی حاضر، سطوح برفی رشته کوه های زاگرس کاهش یافته است. پرهمت و همکاران (۱۳۸۱) برای حوضه ی زاگرس جنوب غربی، تنها دقت روشی را برای تفکیک برف از ابر و سطح زمین بررسی کرده اند؛ اما در این مطالعه، تغییرات سطوح برفی زاگرس را در دوره ی زمانی ۲۰ ساله با ترکیب هفت الگوریتم بررسی کردیم.

۶- منابع

- بنی حبیب، محمدابراهیم؛ جمالی، فریمه سادات و بهرام ثقفیان. (۱۳۹۲). «پایش سطح برف حوضه سد شاه چراغی با استفاده از تصاویر NOAA-AVHRR». **پژوهش های جغرافیای طبیعی**. س ۴۵. ش ۳. صص ۱۳-۲۹.
- پرهمت، جهانگیر و بهرام ثقفیان. (۱۳۸۶). «مقایسه ی دقت تصاویر ماهواره ی AVHRR و TM در تعیین پوشش برفی». **نشریه ی دانشکده ی منابع طبیعی**. د ۶۰. ش ۲. صص ۳۸۳-۳۹۵.
- پرهمت، جهانگیر؛ ثقفیان، بهرام و حسین صدقی. (۱۳۸۱). «مدل تفکیک برف، ابر و زمین در تصاویر ماهواره ی نوا NOAA». **پژوهش و سازندگی**. ش ۵۶ و ۵۷. صص ۲-۱۴.
- جداری عیوضی، جمشید. (۱۳۹۰). **ژئومورفولوژی ایران**. ج ۱۱. انتشارات پیام نور.
- دینی، غلامرضا؛ ضیائیان فیروزآبادی، پرویز؛ علیمحمدی سراب، عباس و سپیده داداشی خانقاه. (۱۳۸۶). «بررسی سطوح برفگیر در البرز مرکزی با استفاده از داده های ماهواره ی MODIS و AVHRR و سامانه ی اطلاعات جغرافیایی (GIS)». **تحقیقات منابع آب ایران**. س ۳. ش ۳. صص ۸۷-۹۴.
- علی محمدی، عباس و معصومه جلوخانی نیارکی. (۱۳۸۳). «ارزیابی الگوریتم های مبتنی بر ترکیب باندهای انعکاسی و حرارتی سنجنده ی NOAA/AVHRR برای تهیه ی نقشه ی پوشش برف در حوضه ی آبریز سد کرج». **برنامه ریزی و آمایش فضا**. د ۸. ش ۱. صص ۱۱۷-۱۳۱.



- فرج‌زاده اصل، منوچهر؛ کریمی، مصطفی؛ قائمی، هوشنگ و محمدرضا مباشری. (۱۳۸۳). «چگونگی انتقال رطوبت در بارش زمستانه‌ی غرب ایران (مطالعه‌ی موردی بارش ۳-۷ ژانویه ۱۹۹۶)». *برنامه‌ریزی و آمایش فضا*. د ۱۳. ش ۱. صص ۱۹۳-۲۱۷.
- مجرد، فیروز و حاجیمراد مرادی‌فر. (۱۳۸۲). «مدل‌سازی رابطه‌ی بارش با ارتفاع در منطقه‌ی زاگرس». *برنامه‌ریزی و آمایش فضا*. د ۷. ش ۲. صص ۱۶۳-۱۸۲.
- Akyurek zuhal and sorman A. Ünal, (2002). Monitoring snow covered areas using NOAAVHRR data in the eastern part of Turkey, *Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques*, 47(2): 243-252.
- Baum B. A., and T. Qing, (1999) Grouped Threshold Approach for Scene Identification in AVHRR Imagery, *jornal of atmospheric and oceanic technology*, vol 16T, pp: 793-800.
- Crawford, C. J, Manson, S. M, Bauer Marvin. E., Hall, and Dorothy. K., (2013). Multitemporal snow cover mapping in mountainous terrain for Landsat climate data record development, *Remote Sensing of Environment*, 135, pp: 224-233.
- Hang Z., Elena A., Vladimir, A., (2013). deriving long term snow cover extent dataset from AVHRR and MODIS data: Central Asia case study, *Remote Sensing of Environment*, 136, 146-162.
- Hüsler. F., Jonas. T., Wunderle. S., Albrecht. S., (2012). Validation of a modified snow cover retrieval algorithm from historical 1-km AVHRR data over the European Alps, *Remote Sensing of Environment*, 121, 497-515.
- Jain, S. K., Goswami, A., and Saraf, A. K., (2008). Accuracy assessment of MODIS, NOAA and IRS data in snow cover mapping under Himalayan conditions, *International Journal of Remote Sensing*, 29(20):5863-5878.
- Johansson, B., Caves, R., Fergusun, R., 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*, Santa Fe New Mexico, USA. IAHS Pub. No. 267: 595-597.

- Kleindienst, H., Wunderle, S., Voigt, S., (2000). Snow line analysis in the swiss alps based on NOAA-AVHRR satellite data, proceedings of EARSeL-SIG-Workshop Land Ice and Snow, Dresden/FRG, June 16 – 17.
- Laura Poggio, Alessandro Gimona, (2015). Sequence-based mapping approach to spatio-temporal snow patterns from MODIS time-series applied to Scotland, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 34, 122–135.
- LU, S., OKI K., Kenji, O., (2005). Mapping snow cover using AVHRR NDVI 10-day composite data, J. Agric. Meteorol, 60 (6): 1215-1218.
- Metcalfe, R. A. and Buttle, J. M., (1999). Semi-distributed water balance dynamics in a small Boreal Forest Basin, Journal of Hydrology, vol. 226: 66-87.
- Metsämäki S., Pulliainen, J., Salminen, M., L. Kari, Wiesmann A., S. Rune, Böttcher, K., Hiltunen, M., Ripper, E., (2015). Introduction to GlobSnow Snow Extent products with considerations for accuracy assessment, Remote Sensing of Environment, 156, 96–108.
- Shahroudi, N., Rossow, W., (2014) Using land surface microwave emissivities to isolate the signature of snow on different surface types, Remote Sensing of Environment, 152, 638–653.
- Ulivieri, C., M. M., Castronuovo, R., Francioni and A., Cardillo, (1994). A split-window algorithm for estimating land surface temperature from satellites. Advances in Space Research, 14(3): 59-65.
- Vázquez, D. P., F. J. O., Reyes and L. A., Arboledas, (1997). A comparative study of algorithms for estimating land surface temperature from AVHRR Data. Remote Sensing of Environment, 62, 215-222.
- Zhoua, X., Xieb, H., Hendrickx, J. M. H., (2005). Statistical Evaluation of Remotely Sensed Snow-Cover Products with Constraints from Streamflow and SNOTEL Measurements, Elsevier Remote Sensing of Environment, 94, 214-231.
- Coll, C., Casselles, V., Sobrino, J.A. and Valor, E. (1994). On the Atmospheric Dependence of the Split -Window Equation for Land Surface Temperature, International Journal of Remote Sensing, Vol. 15: 105-122.



- Mojarad, F., Moradifar, H., (2003). Modeling of rainfall relationship with height in Zagros region, The Journal of Spatial Planning, vol. 7, No. 2, pp: 181-163. [In Persian]
- Porhemmat, J., Saghafian, B., (2007). Evaluation of Spatial Resolution of Satellite Data on Snow Cover Estimates, Journal of the Iranian Natural Res., Vol.60, No. 2, pp: 383-395. [In Persian]
- Porhemmat, J., Saghafian, B., Hossein, S., (2002). Separation of snow, cloud and earth in satellite images of NOAA, Pajouhesh Va Sazandgi, No. 56-57, pp: 2-14. [In Persian]
- Jedari Aevazi, J., (2011). Geomorphology of Iran, Payam Noor Publishing, 17 Editions. [In Persian]
- Dini, GH. R., Ziaeae Firouzabadi, P., Alimohammadi, A., Dadashi Khanghah, S., (2008). GIS-Based Snow Mapping in Central Alborz Mountain Chain Using MODIS and AVHRR Data, Iran-Water Resources Research, Vol. 3, No. 3, Pp: 1-8. [In Persian]
- Alimohamadi, A., Jelokhani Niaraki, M., (2004). Evaluation of algorithms based on combination of reflective and thermal bands of NOAA/AVHRR sensor for snow cover in Karaj Dam basin, The Journal of Spatial Planning, vol. 8, No. 1, pp: 117-131. [In Persian]
- Farajzadeh Asl, M., Karimi Ahmadabad, M., Ghaemi, H., Mobasheri, M. R., (2009). Mechanism of Water Vapor Transport in Winter Rainfall Over the West of Iran (A Case Study: 1-7 January 1996), The Journal of Spatial Planning, vol. 13, No. 1, pp: 193-217. [In Persian]
- Banihabib, M. E., Jamali, F. S., Saghafian, B., (2013). Detection of the Snow Cover Area Using NOAA-AVHRR in Shahcheraghi Dam Basin, Physical Geography Research Quarterly, Vol.45, No. 3, pp: 13-29. [In Persian]