سنجش از دور
و
GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

سال چهاردهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۱
Vol.14, No. 1, Spring 2022

۵۹-۷۲

مقاله پژوهشی

پایش تغییرات پوشش برف طی دورهٔ سرد سال در ایران بر اساس داده‌های سنجندهٔ مادیس

محمود احمدی[۱*] و زهراسادات سیدمیرزایی[۲]

۱. دانشیار دانشکدهٔ علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۲. کارشناس ارشد اقلیم‌شناسی کاربردی، دانشکدهٔ علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۷

چکیده

مطالعهٔ پوشش برف، در جایگاه یکی از منابع مهم تأمین آب شیرین، اهمیت بسیاری دارد. با توجه به کوهستانی‌بودن ایران، امکان اندازه‌گیری زمینی مساحت زیر پوشش برف وجود ندارد. بر این اساس، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی ذخیره‌گاه‌های برف بسیار مهم است. در این پژوهش، تغییرات زمانی- مکانی پوشش برف ایران طی دورهٔ سرد سال، با استفاده از داده‌های پوشش برف‌سنجندهٔ مادیس ماهوارهٔ ترا، طی دورهٔ آماری ۲۰۱۸-۲۰۰۳ بررسی شد. روند تغییرات پوشش برف و شیب این روند، با استفاده از آزمون‌های ناپارامتریک من- کندال و سنس و نقطهٔ تغییر پوشش برف با استفاده از آزمون بوشند مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد بیشترین مقدار پوشش برف متعلق به ماه ژانویه، با ۱۶/۱۵٪ و کمترین مقدار پوشش برف مختص به ماه اکتبر، با کمتر از ۱٪ است. کانون اصلی پوشش برف ایران، در دورهٔ سرد سال، در مناطق مرتفع بیش از ۴۰۰۰ متر به‌دست آمده است. روند تغییرات پوشش برف، در تمامی ماه‌های مورد مطالعه، منفی و بیشینهٔ شدت کاهشی پوشش برف نیز متعلق به ژانویه بوده است. نقطهٔ تغییر نیز در همین ماه و سال ۲۰۰۸ محاسبه شد که از نظر آماری در سطح ۰.۰۵ معنی‌دار است. روند کاهشی درخور توجه پوشش برف ایران، در دورهٔ سرد، تهدید بزرگی برای منابع آبی ایران به‌شمار می‌رود.

کلیدواژه‌ها: پوشش برف، سنجندهٔ مادیس، آزمون من- کندال، روند تغییرات پوشش برف، ایران.

* نویسندهٔ مکاتبه‌کننده: تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکدهٔ علوم زمین. تلفن: ۰۹۱۲۱۴۸۷۴۹۷

Email: ma_ahmadi@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

برف، به‌دلیل داشتن سپیدایی بالا و هدایت حرارتی کم، در تعادل انرژی جهانی و گردش جوّ نقش مهمی ایفا می‌کند (Hall & Riggs, 2007). همچنین ذخیرهٔ آب شیرین در مناطق کوهستانی و به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک پایین‌دست به‌شمار می‌رود و تأثیر پررنگی در منابع آب منطقه‌ای دارد (Barnett et al., 2005; Zhou et al., 2013). پوشش و ذوب برف مؤلفه‌های مهمی در چرخهٔ هیدرولوژیکی‌اند (Fayad et al., 2017) و دلیل دیگر اهمیتشان این است که منبع آب شیرین برای دورهٔ خشکسالی محسوب می‌شوند؛ بنابراین شناخت درست برف، در کشوری خشک و کم‌آب همچون ایران که وابستگی بسیار به آب معادل آن دارد، از اهمیت درخور توجهی برخوردار است.

با آشکارشدن آثار نامطلوب تغییر اقلیم، تشخیص روند نزولات جوّی در مناطق گوناگون جهان مهم‌تر شده است (Stocker et al., 2013). از اواخر دههٔ ۱۹۷۰ یا اوایل دههٔ ۱۹۸۰، از نظر آماری، کاهش روند برف در نیمکرهٔ شمالی به‌طور گسترده گزارش شده است (Brown & Robinson, 2011; Zhang & Ma, 2018). ازآن‌جاکه پوشش برف در برابر تغییرات دمای هوا و بارش بسیار حساس است، تشخیص روند تغییرات پوشش برف در شرایط تغییر اقلیم اهمیت دارد. مطالعات برف در مناطق کوهستانی، به‌دلیل فرایندهای پیچیدهٔ آن در چنین محیط‌هایی از یک‌سو و وردایی زمانی- مکانی پوشش برف در مناطق ناهمگن کوهستانی از دیگرسو، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است (Andreadis et al., 2009)؛ بنابراین، مطالعهٔ پوشش برف در کشور خشکی همچون ایران که به آب ناشی از ذوب برف در دورهٔ گرم نیاز مبرم دارد، اهمیت شایان توجهی دارد.

برای بررسی واکنش منطقه‌ای سیستم‌های هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی در برابر تغییر اقلیم، باید توزیع مکانی برف به‌دقت مطالعه شود (Zhou et al., 2013; Zhang et al., 2015; Xiao et al., 2017). مطالعات دربارهٔ پوشش برف موضوع‌های متنوعی را در زمینهٔ مناطق پوشیده از برف، چگالی، عمق برف و آب معادل برف دربر می‌گیرد (Zhang & Ma, 2018). بیشتر مطالعات دربارهٔ تغییرپذیری برف در مقیاس کلان مبتنی‌بر مشاهدات سنجش از دور است. برآوردهای پوشش برف برپایهٔ داده‌های ماهواره‌ای این قابلیت را دارند که درکی جامع درمورد پوشش برف را در مقیاس کلان تا منطقه‌ای، به‌دست دهند.

در چند دههٔ گذشته، طیف گستردهٔ محصولات سنجش از دور برای تخمین پوشش برف یا آب معادل برف[1] تولید شده است؛ مانند داده‌های حاصل از تابش‌سنج مایکروویو اسکنر چندکاناله[2] (Chang et al., 1987)، تصویرگر/ مایکروویو سنجندهٔ ویژه[3]، تابش‌سنج پیشرفته با توان تفکیک بسیار بالا[4] (Simpson et al., 1998)، تابش‌سنج تصویربرداری با توان تفکیک متوسط[5] (Hall et al., 2007)، ماهوارهٔ مشاهدات زیست‌محیطی[6] (Che et al., 2008). در میان این محصولات، پوشش روزانهٔ برف مادیس در مطالعات بسیار و به‌طور گسترده کاربرد داشته است. داده‌های برف مربوط به سنجندهٔ مادیس، علاوه‌بر تفکیک افقی بالا (پانصد متر و بیشتر)، از نظر زمانی نیز اهمیت شایان توجهی دارند و ازاین‌رو داده‌های در دسترس این سنجنده در مقیاس‌های روزانه، هشت‌روزه، شانزده‌روزه، ماهیانه، فصلی و سالیانه در دسترس است (Yu et al., 2015). از طرف دیگر، داده‌های اعتبارسنجی‌شدهٔ محصول پوشش برفی مادیس داده‌های بسیار سودمندی را از پوشش برفی، در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد (Parajka & Blöschl, 2012).

1. Snow Water Equivalent (SWE)
2. Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR)
3. Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I)
4. Advanced Very High-Resolution Radiometer (AVHRR)
5. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)
6. Geostationary Observational Environmental Satellite (GOES)

اهمیت تغییرات پوشش برف باعث شده است مطالعات بسیاری آن را در سطح جهانی بررسی کنند. (Marchane et al., 2015) پوشش برف هفت حوضه را در کوه‌های اطلس واقع در کشور مراکش، با استفاده از داده‌های سنجندهٔ مادیس از سپتامبر ۲۰۰۰ تا ژوئن ۲۰۱۳ مطالعه کردند. درستی‌سنجی داده‌های سنجندهٔ مورد نظر با پنج ایستگاه برف‌سنجی دقت ۸۹درصدی این سنجنده را نشان داده است. پوشش برفی، از آوریل تا مه، روند افزایشی و از فوریه تا مارس، روند کاهشی را نشان داده است. همچنین، به اذعان این تحقیقات، داده‌های سنجندهٔ مادیس را می‌توان با اطمینان برای پوشش برف به‌کار برد و نگارندگان عملکرد آن را در مدیترانهٔ جنوبی تأیید کرده‌اند. (Tang et al., 2017) تغییرات زمانی- مکانی پوشش برف را در کوه‌های تیان‌شان[1]، واقع در آسیای میانه، براساس فرآوردهٔ پوشش برفی سنجندهٔ مادیس و طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۵ مطالعه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که روزهای پوشیده از برف در بخش مرکزی رشته‌کوه ۱۱/۸۸ و در بخش شرقی آن ۸/۰۳ ٪ کاهش داشته است. (Nicolet et al., 2018) تغییرات آب‌وهوایی و وابستگی فضایی آن به عمق برف را در کوه‌های آلپ فرانسه، با استفاده از داده‌های ۸۲ ایستگاه هواشناسی و در بازهٔ زمانی ۲۰۱۲-۱۹۷۰ ارزیابی کردند. یافته‌های آنها نشان از کاهش شدید عمق برف در فصل زمستان و در نتیجه، افزایش دما داشته است. (Malmros et al., 2018) تغییرات پوشش برفی و سپیدایی ناشی از برف را در آند مرکزی و در کشورهای شیلی و آرژانتین، طی دورهٔ ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۶، با استفاده از داده‌های سنجندهٔ مادیس ارزیابی کردند. نتیجهٔ کلی این پژوهش نشان داده است که پوشش برفی، به‌همراه طول دورهٔ برفی، در منطقهٔ مورد مطالعه روندی کاهشی داشته و این روند کاهشی، به‌احتمال بسیار، تأثیرات منفی در دسترسی به منابع آب پایین‌دست گذاشته است.

(Eythorsson et al., 2019)، با استفاده از تصاویر سنجندهٔ مادیس، تأثیرات تغییر اقلیم در ذخایر برف قطب شمال را مطالعه کردند. آنها آب‌وهوای این منطقه را طی دورهٔ زمانی ۲۱۰۰-۱۹۵۰، مطابق با طبقه بندی کوپن- گیگر و همچنین با استفاده از میانگین همادی پیش‌بینی‌های پروژهٔ مقایسهٔ مدل آب‌وهوایی (CMIP) برای سناریوی RCP4.5، تحلیل کردند. به گفتهٔ آنها، این پوشش برفی بین سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۰۱ کاهش درخور توجهی داشته است. (Yang et al., 2019) پوشش برف را در حوضهٔ رودخانهٔ ایرتیش[2] بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان از کاهش ۱۰/۲درصدی سالیانهٔ پوشش برف، با سطح معنی‌داری ($p<0.05$) داشته است. Li et al., (2019) روند تغییرات پوشش برف را در رشته‌کوه‌های تیان‌شان، طی دورهٔ آماری ۲۰۱۵-۱۹۶۱، مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند عمق و پوشش برف این منطقه کوهستانی روند کاهشی دارد.

(Azizimoghadam, 2015) روند تغییرات پوشش سطح برف در ایران را با تکنیک RS و GIS و تأثیر آن را در منابع آب حوضهٔ دز مطالعه کرده است. نتایج کار وی بیانگر کاهش سطح برف طی دورهٔ آماری، ناشی از کاهش بارش در سطح حوضه بود. اگرچه افزایش دما در حوضه می‌تواند سبب کاهش سطح برف شود؛ با توجه به یافته‌های این ارزیابی درمورد سال‌های یادشده، این پارامتر چندان تأثیرگذار نبوده است. (Kikhosravikiyane & Masoudiyan., 2016A) ارتباط روزهای برف‌پوشان را با ارتفاع، شیب و جهت شیب در ایران واکاوی کردند. آنها برای ارزیابی داده‌های برف، از سنجندهٔ مادیس و ماهواره‌های ترا[3] و آکوا[4] بهره بردند. طبق نتایج، بین

1. Tianshan
2. Irtysh
3. Terra
4. Aqua

روزهای برف‌پوشان با ارتفاع لزوماً رابطهٔ خطی برقرار نیست و گروه‌های ارتفاعی رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. این دو محقق (۱۳۹۵ب) روزهای برف‌پوشان ایران را به‌کمک داده‌های ماهواره‌ای، فصل‌بندی و مطالعه کردند. نتایج پژوهش آنها چهار فصل برف‌پوشان را درمورد ایران نشان داده است. (Khoshkho, 2016) با استفاده از مدل برف تک‌لایه[1]، عمق برف را در ایستگاه سقز شبیه‌سازی کرد. نتایج اعتبارسنجی مدل نشان داد که در بیشتر موارد، مدل واسنجی‌شدهٔ SLSM کارآیی مطلوبی در دنبال‌کردن روند تغییرات داده‌های مشاهداتی عمق برف دارد اما مقادیر بالای عمق برف را تا حدودی کمتر از میزان واقعی برآورد می‌کند.

طبق بررسی پیشینهٔ تحقیق، تا کنون پژوهشی به‌طور مستقل تغییرات زمانی- مکانی پوشش برف در ایران را با رویکرد تغییرات زمانی- مکانی، روند و نقطهٔ تغییر آن ارزیابی نکرده است؛ بنابراین در مطالعهٔ پیش رو، با استفاده از آخرین محصول سنجندهٔ مادیس (نسخهٔ ۶)، این کار انجام شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند برای مطالعات در زمینهٔ تغییرات آب‌وهوایی، پوشش برفی و مدیریت منابع مفید باشد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- منطقهٔ مورد مطالعه

ایران در مدارهای ۲۵ درجه و ۲۹ درجه و ۴۷ دقیقهٔ عرض شمالی و نصف‌النهارهای ۴۴ درجه و ۲ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۲۰ دقیقهٔ طول غربی، با وسعتی حدود ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومترمربع، در جنوب‌غرب آسیا قرار گرفته است. اشکال طبیعی و عناصر فضایی عمده در ایران عبارت‌اند از: ۱) کوه‌ها، شامل رشته‌کوه‌های بزرگ البرز و زاگرس، مرکزی و رشته‌کوه‌های منفرد شرق ایران، ۲) فلات‌ها شامل فلات مرتفع آذربایجان، کردستان و فلات مرکزی ایران، ۳) دشت‌ها، شامل دشت‌های گرم‌وخشک داخلی (کویر لوت، کویر نمک و غیره)، دشت‌های حاصلخیز ساحلی (گیلان، مازندران، گلستان، خوزستان و هرمزگان)، دشت‌های حاصلخیز میان‌کوهی (کشف‌رود، مغان، ماهی‌دشت، اسدآباد، اصفهان، سیستان و دیگر موارد)، دشت‌های حاصلخیز پای‌کوهی (کرج، ورامین، گرمسار، سرخس و غیره)، ۴) دریاچه‌ها، شامل ارومیه، بختگان، جازموریان، هامون و غیره، ۵) باتلاق‌ها و نمک‌زارها.

حدود ۲۱٪ از کل فضای ایران (۳۵۰هزار کیلومترمربع) را کوهستان‌ها، ۶۶٪ (۱۰۹۸هزار کیلومترمربع) را حوضه‌های داخلی خشک و نیمه‌خشک و ۱۳٪ (دویست‌هزار کیلومترمربع) را دشت‌ها و جلگه‌های ساحلی تشکیل می‌دهد. ایران کشوری است ناهموار و میانگین ارتفاع آن از سطح دریا حدود ۱۳۰۰ متر است؛ بااین‌حال دامنهٔ تغییرات ارتفاع در آن بسیار زیاد است و از کرانه‌های خزر که ارتفاع آن پایین‌تر سطح آب‌های آزاد است، تا قلهٔ دماوند که بیش از ۵۶۰۰ متر بالاتر از سطح آب‌های آزاد قرار دارد، متغیر است. دو رشته‌کوه بزرگ البرز و زاگرس از مهم‌ترین عوامل غیرجوّی مؤثر آب‌وهوای ایران است؛ به همین دلیل، مرز بین نواحی آب‌وهوایی ایران اغلب از پیکربندی ناهمواری‌ها پیروی می‌کند (شکل ۱). بخش شایان توجهی از بارش ایران در دورهٔ سرد سال رخ می‌دهد. در مناطق مرتفع، این بارش به‌صورت برف است و در دورهٔ گرم سال به‌منزلهٔ منبع آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. از نظر زمانی نیز، این مطالعه صرفاً دورهٔ سرد سال را کانون توجه خود قرار داده است و ماه‌های زمستان و پاییز را دربر می‌گیرد.

۲-۲- داده‌های پوشش برف‌سنجندهٔ مادیس ماهوارهٔ ترا

در تمامی تحلیل‌ها درمورد پوشش برف، از داده‌های سنجندهٔ مادیس استفاده شد. این سنجنده یک تابش‌سنج تصویربرداری با توان تفکیک متوسط است که تصاویر روزانه از سطح زمین و ابرها را در ۳۶ باند طیفی، از طریف دو ماهواره (ترا و آکوا) ارائه می‌دهد (Hall et al., 2002). در این پژوهش از محصول پوشش برفی مجموعهٔ ۶، مادیس استفاده شد؛ داده‌های این

1. Single Layer Snow Model (SLSM)

محصول نمایانگر حداکثر پوشش برف و حداقل پوشش ابر در مقیاس زمانی روزانه است (Riggs et al., 2006). داده‌های پوشش برفی برحسب درصد، با تفکیک افقی ۰.۱ × ۰.۱ درجهٔ قوسی (نزدیک به دَه کیلومتر)، در مقیاس زمانی روزانه برای دورهٔ ۲۰۱۸-۲۰۰۳ برداشت شد. همان‌طورکه اشاره کردیم، این داده‌ها در مقیاس زمانی روزانه دانلود شد و سپس به داده‌های ماهیانه (ماه‌های تجمعی ۱۹۲) تبدیل شدند. تعداد یاخته‌های[1] موجود در پهنهٔ ایران، با تفکیک افقی دَه کیلومتر، ۱۵۵۶۶ است که در شکل (۱) نشان داده شده است.

۲-۳- روش پردازش داده‌ها

۲-۳-۱- محاسبهٔ روند تغییرات پوشش برف با آزمون ناپارامتریک من‌ـ کندال (M-K)

برای بررسی روند تغییرات پوشش برف در تحقیق، از روش ناپارامتری من‌ـ کندال استفاده شد. این روش را نخستین‌بار (Mann, 1945) و سپس (Kendall, 1975) بهبود و تحول دادند. این روش برپایهٔ مرتبهٔ داده‌ها در یک سری زمانی استوار است. مزیت این آزمون بر سایر آزمون‌های مطالعهٔ روند، استفاده از مرتبهٔ داده‌ها در سری زمانی بدون درنظرگرفتن مقادیر متغیرهاست.

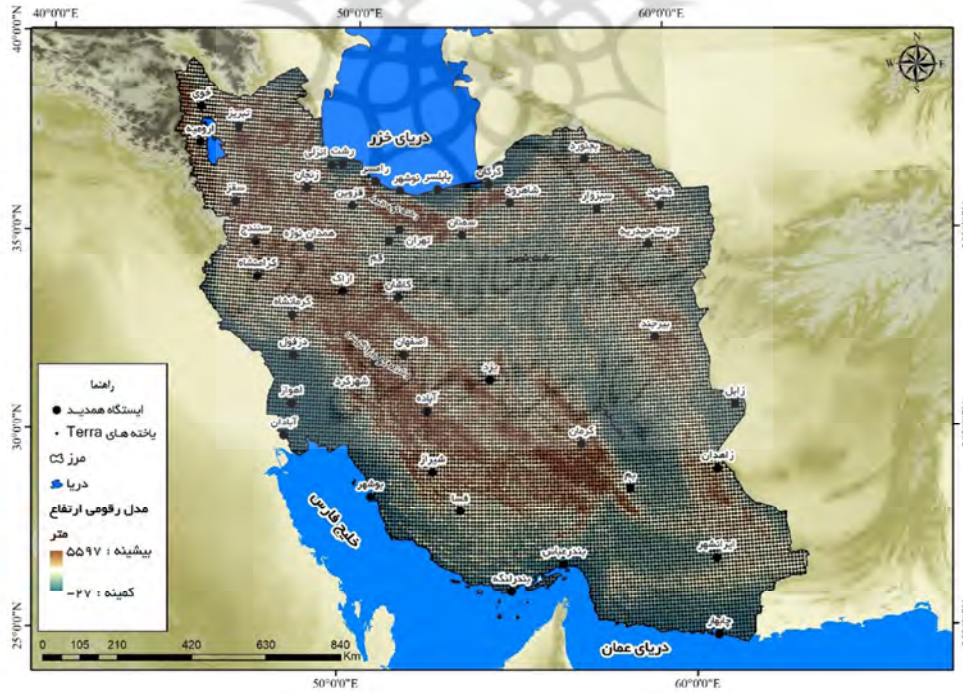
آزمون من‌ـ کندال براساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$Z=\begin{cases}\frac{S-1}{\sqrt{V(s)}} & if \quad s>0\\ 0 & if \quad s=0\\ \frac{S+1}{\sqrt{V(s)}} & if \quad s<0\end{cases}$$ (۱) رابطه

در رابطه (۲)، S نشانهٔ تفاوت مقادیر با یکدیگر و $V(S)$ واریانس S است.

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} sgn(x_j-x_i),$$ رابطه (۲)

$$V(S)=\frac{1}{18}\left[n(n-1)(2n+5)-\sum_{p=1}^{q} t_p\,(t_p-1)(2t_p+5)\right]$$ رابطه (۳)



شکل ۱. موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه به‌همراه یاخته‌های سنجندهٔ مادیس با تفکیک افقی ۱/۰×۰/۱ درجهٔ قوسی

1. Pixel

در رابطه (۳)، q نشان‌دهندهٔ تعداد گروه‌ها و tp بیانگر تعداد مقادیر داده در گروه p است. x_j و x_i مقادیر مربوط به گام‌های سری زمانی‌اند و $sgn(x_j - x_i)$ تابع علامت است که طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$sgn(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & if \quad (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & if \quad (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & if \quad (x_j - x_i) < 0 \end{cases}$$

رابطه (۴)

در رابطه (۴)، فرض می‌شود که آمارهٔ S به‌طور متناوب نرمال است و مقدار مورد انتظار $E(S) = 0$ نیز برای اندازهٔ نمونه $n \geq 8$ باشد (داداشی رودباری و همکاران، ۱۳۹۹).

۲-۳-۲- بررسی شدت روند پوشش برف در ایران با آزمون ناپارامتریک سن

برای برآورد شیب روند تغییرات پوشش برف، از روش ناپارامتریک سن[1] استفاده شده است. این روش را ابتدا (Theil, 1992) مطرح کرد و سپس (Sen, 1968) آن را بسط و گسترش داد. روش حاضر همانند بسیاری دیگر از روش‌های ناپارامتریک، مثلاً من- کندال، بر ارزیابی تفاوت بین مشاهدات سری زمانی استوار است (Dadashirodbari et al., 2015). این روش را زمانی می‌توان به‌کار برد که روند موجود در سری زمانی روندی خطی باشد؛ یعنی $f(t)$ در معادله (۵) برابر است با:

$$f(t) = Qt + B$$ رابطه (۵)

در این معادله، Q شیب خط روند و B مقدار ثابت است. برای محاسبهٔ شیب خط روند، یعنی Q، ابتدا باید شیب بین هر جفت دادهٔ مشاهداتی با استفاده از معادله (۶) به‌دست آید.

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k}$$ رابطه (۶)

در معادلهٔ بالا، $j > k$، x_j و x_k به‌ترتیب داده‌های مشاهداتی در زمان‌های j و k است (Ahmadi et al .,2018).

۲-۳-۳- آشکارسازی نقطهٔ تغییر پوشش برف ایران در فصل‌های سرد سال

در این پژوهش، نقطهٔ تغییر پوشش برف ایران طی فصل‌های سرد سال با استفاده از آزمون بوشند[2] (۱۹۸۲) بررسی شد. نقطهٔ تغییر نقطه‌ای است که سری داده‌ها، پیش از آن، دارای توزیعی معین با میانگین $\gamma 0$ و برای سال‌های بعد از آن، دارای توزیعی معین با میانگین $\gamma 1$ است (Alizadechobari & Najafi, 2017; Dadashirodbari & Ahmadi, 2019). در این آزمون، فرض H_0 نشان‌دهندهٔ فقدان نقطهٔ تغییر در سری زمانی و H_1 بیانگر رخداد یک نقطهٔ تغییر در سری داده‌های مورد استفاده در نقطه‌ای نامعلوم است. در صورت ردشدن فرض صفر و با تأیید وجود سری زمانی نقطهٔ تغییر، فرض مقابل آن پذیرفته می‌شود (Alizadechobari & Najafi,2017). در پژوهش حاضر، معنی‌داری آزمون بوشند با استفاده از روش مونت کارلو در سطح آماری ۹۵٪ آزموده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- درستی‌سنجی محصول برف‌سنجندهٔ مادیس

برای درستی‌سنجی پوشش برف‌سنجندهٔ مادیس، از ایستگاه‌های برف‌سنجی وزارت نیرو استفاده شد. داده‌های در دسترس بسیار محدود بود؛ به‌طوری‌که داده‌های مورد نظر فقط برای سال‌های آبی ۸۸-۱۳۸۷ تا ۹۴-۱۳۹۳ و در قالب گزارش برف‌سنجی دفتر مطالعات پایهٔ منابع آب وزارت نیرو، در سایت مرتبط، وجود داشت. برای درستی‌سنجی داده‌ها از ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن، به‌دلیل گسسته‌بودن داده‌ها، استفاده شد. طبق نتایج، از پنج ایستگاهی که داده‌های آن در دسترس بوده است مقدار همبستگی بین داده‌های مادیس و ایستگاه‌های برف‌سنجی بین ۰/۸۱ تا ۰/۹۳ در تغییر است. این مقدار همبستگی کاملاً نشان از دقت مناسب و مطلوب محصول برف‌سنجندهٔ مادیس در ایران دارد.

1. Sen's Slope Estimator Nonparametric Method
2. Buishand

جدول ۱. درستی‌سنجی محصول برف‌سنجندهٔ مادیس با ایستگاه‌های برف‌سنجی منتخب

ردیف	نام ایستگاه	استان	ارتفاع	ضریب همبستگی
۱	شهرکرد	چهارمحال و بختیاری	۲۱۶۰	۰/۸۸
۲	الموت ۱	قزوین	۲۳۹۷	۰/۸۱
۳	پل مون	مازندران	۲۰۰۰	۰/۹۲
۴	قیدار	زنجان	۱۹۰۰	۰/۸۹
۵	پیست اسکی سهند	آذربایجان‌شرقی	۲۹۰۶	۰/۹۳

۳-۲- مشخصات آماری پوشش برف دورهٔ سرد سال در ایران براساس داده‌های سنجندهٔ مادیس ماهوارهٔ ترا

جدول ۲ مشخصات آماری پوشش برف ایران را در دورهٔ سرد سال، براساس داده‌های سنجندهٔ مادیس MODIS ماهوارهٔ ترا، طی دورهٔ آماری ۲۰۱۸-۲۰۰۳ نشان می‌دهد. کمینهٔ پوشش برف در سطح یاخته‌های دَه‌کیلومتری (مادیس)، طی تمامی ماه‌های سرد سال، فاقد پوشش برفی است. این مسئله، با توجه به وسعت شایان توجه مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، دور از انتظار نبوده است. بیشینهٔ پوشش برف در ماه‌های فصل زمستان به ۱۰۰٪ و در ماه‌های فصل پاییز به ۹۹٪ رسیده است. کمینه و بیشینهٔ عنوان‌شده به این مفهوم نیست که کل کشور زیر پوشش برفی قرار گرفته یا کل کشور فاقد پوشش برف است بلکه بیشینه و کمینهٔ آن را در گسترهٔ کشور نشان می‌دهد. برای نمونه، صددرصد پوشش برفی فقط معطوف به سطح زیریاخته‌های ارتفاعات ایران، همچون زاگرس و البرز است.

چارک اول پوشش برف در ایران همانند مقدار کمینه صفر درصد به‌دست آمده است. این آماره نشان داده که در یک‌چهارم از مساحت ایران، طی دورهٔ ۲۰۱۸-۲۰۰۳، اصلاً برف نباریده است. چهارک سوم پوشش برف نیز در اکتبر برابر با صفر است؛ بر این اساس، در این ماه، در ۷۵٪ ایران طی دورهٔ آماری بلندمدت مورد مطالعه برف وجود نداشته است. همین شرایط کمابیش درمورد ماه مارس نیز صادق است. بیشترین مقدار به‌دست‌آمده برای چارک سوم که به‌تعبیری می‌توان از آن به‌منزلهٔ پهنه‌های پربرف ایران یاد کرد، در ژانویه حاصل شده است. بر همین اساس، بیشینهٔ گسترهٔ میانگین پوشش برف در ایران طی ژانویه و فوریه مشاهده می‌شود. بیشترین مقدار انحراف پوشش برف نیز در ژانویه با ۲۶/۱۶٪ محاسبه شد. بر این اساس، از نظر زمانی بیشینهٔ پوشش برفی در ایران به فصل زمستان و دو ماه ژانویه و فوریه تعلق دارد و پس از آن، ماه دسامبر در فصل پاییز را می‌توان نام برد.

جدول ۲. مشخصات آماری میانگین پهنه‌ای پوشش برف ایران در دورهٔ سرد سال براساس داده‌های سنجندهٔ مادیس ماهوارهٔ ترا

آماره	متوسط آماری بلندمدت (۲۰۱۸-۲۰۰۳)					
	ژانویه	فوریه	مارس	اکتبر	نوامبر	دسامبر
کمینه	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
بیشینه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۵۳۲	۹۹/۸۰۳	۹۹/۸۵۲
چارک اول	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
چارک سوم	۲۰/۸۱۷	۱۰/۲۶۱	۰/۶۴	۰/۰۰	۰/۲۷۱	۵/۹۷۹
میانگین	۱۶/۱۵۴	۱۲/۹۸۰	۴/۴۶۷	۰/۱۳۱	۱/۸۷۲	۱۰/۴۵۱
انحراف معیار	۲۶/۱۸۲	۲۵/۲۸۲	۱۴/۴۸۵	۲/۲۹۲	۷/۵۵۰	۸/۴۲۳

۳-۳- روند و شیب روند تغییرات پوشش برف دورهٔ سرد سال در ایران براساس داده‌های سنجندهٔ مادیس ماهوارهٔ ترا

روند تغییرات پوشش برف ایران و شیب این روند، در دورهٔ سرد سال، براساس داده‌های سنجندهٔ مادیس ماهوارهٔ ترا و با استفاده از آزمون‌های ناپارامتریک من-کندال و سن[1] به‌دست آمد و در جدول ۳ مطرح شد. براساس نتایج مندرج در این جدول، روند تغییرات پوشش برف در ایران طی تمامی ماه‌های سرد سال منفی است. این روند در کشور ما، طی ماه‌های متفاوت دورهٔ سرد سال، شدت و ضعف بسیار دارد. بیشترین شدت کاهشی برای پوشش برفی در ایران به فصل زمستان و ماه ژانویه بازمی‌گردد. بدین‌ترتیب ژانویه و دسامبر و نوامبر بیشینهٔ شدت روند کاهشی را نشان دادند. مقدار متوسط روند تغییرات پوشش برف، در ایران، فقط در ژانویه معنی‌دار است و در سایر ماه‌ها، این مقدار از نظر آماری معنی‌دار نیست. این مقدار در روند کاهشی به‌خوبی نشان‌دهندهٔ روند افزایشی گرمایش در سردترین ماه سال در کشور است. از طرف دیگر، ممکن است کاهش بارش برف در این ماه را نیز برساند.

شیب روند پوشش برفی در ایران هم رفتاری مشابه با روند را نشان داده و در تمامی ماه‌های سال، منفی به‌دست آمده است. بیشینهٔ شیب روند با مقدار ۰/۸۱- در ژانویه به‌دست آمده است. این مقدار نشان می‌دهد که پوشش برف در ژانویه، به‌ازای هر سال، کاهشی حدود یک‌درصدی دارد. پس از ژانویه، دسامبر بیشترین مقدار کاهش پوشش برف را براساس آزمون شیب روند، دارد و به‌ازای هر سال، کاهش آن ۰/۲۸-٪ است. بر این اساس، بیشینهٔ روند کاهشی و شدت روند تغییرات پوشش برف، در ایران، متعلق به ژانویهٔ فصل زمستان بوده است که تهدید جدی برای ذخیره‌گاه‌های برفی ایران و منابع آب کشور محسوب می‌شود.

۴-۳- نقطهٔ تغییر پوشش برف دورهٔ سرد سال در ایران، براساس داده‌های سنجندهٔ مادیس ماهوارهٔ ترا، با استفاده از آزمون بوشند

نقطهٔ تغییر پوشش برف نیز، در ایران، با استفاده از آزمون بوشند محاسبه و نتایج آن در جدول ۴ ارائه شد. استفاده از این آماره به‌علت آشکارسازی بهتر تغییرات پوشش برف در ایران بوده است. نتایج نشان داد، در شش‌ماههٔ سرد سال، فقط ماه ژانویه (از فصل زمستان) دارای نقطهٔ تغییر بوده که به‌لحاظ آماری نیز، در سطح ۰.۰۵ معنی‌دار است. نقطهٔ تغییر به‌دست‌آمده برای ماه ژانویه، در سال ۲۰۰۸ و با p-value، ۰/۰۰۷ بوده است. میانگین متوسط پوشش برف در کشور، طی ژانویه، پیش از نقطهٔ تغییر در سری زمانی (سال ۲۰۰۸) ۲۳/۴۱٪ و پس از نقطهٔ تغییر ۱۱/۷۹٪ به‌دست آمده است به‌عبارت دیگر، پس از سال ۲۰۰۸ (۲۰۱۸-۲۰۰۹) درصد پوشش برف در ایران، در مقایسه با دورهٔ اول، حدود ۵۰٪ کاهش داشته است.

جدول ۳. روند تغییرات پوشش برف ایران در دورهٔ سرد سال براساس داده‌های سنجندهٔ مادیس ماهوارهٔ ترا

آماره	متوسط آماری بلندمدت (۲۰۱۸-۲۰۰۳)					
	ژانویه	فوریه	مارس	اکتبر	نوامبر	دسامبر
روند (Z)	-۲/۳۹	-۰/۵۰	-۰/۷۷	-۱/۰۴	-۰/۶۸	-۱/۲۲
سطح معنی‌داری	۰/۰۵	-	-	-	-	-
شیب روند (Q)	-۰/۸۱۹	-۰/۱۸۰	-۰/۱۰۴	-۰/۰۰۲	-۰/۰۳۴	-۰/۲۸۸

1. Sen Slope Estimator (SSE)

جدول ۴. نقطهٔ تغییر پوشش برف ایران در دورهٔ سرد سال براساس داده‌های سنجندهٔ مادیس ماهوارهٔ ترا

آماره	متوسط آماری بلندمدت (۲۰۱۸-۲۰۰۳)					
	ژانویه	فوریه	مارس	اکتبر	نوامبر	دسامبر
نقطهٔ تغییر	۲۰۰۸	-	-	-	-	-
میانگین پیش از نقطهٔ تغییر	۲۳/۴۱۸	-	-	-	-	-
میانگین پس از نقطهٔ تغییر	۱۱/۷۹۶	-	-	-	-	-
p-value	۰/۰۰۷	۰/۵۲۸	۰/۶۳۲	۰/۰۵	۰/۹۶۴	۰/۳۴۶
alpha	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵

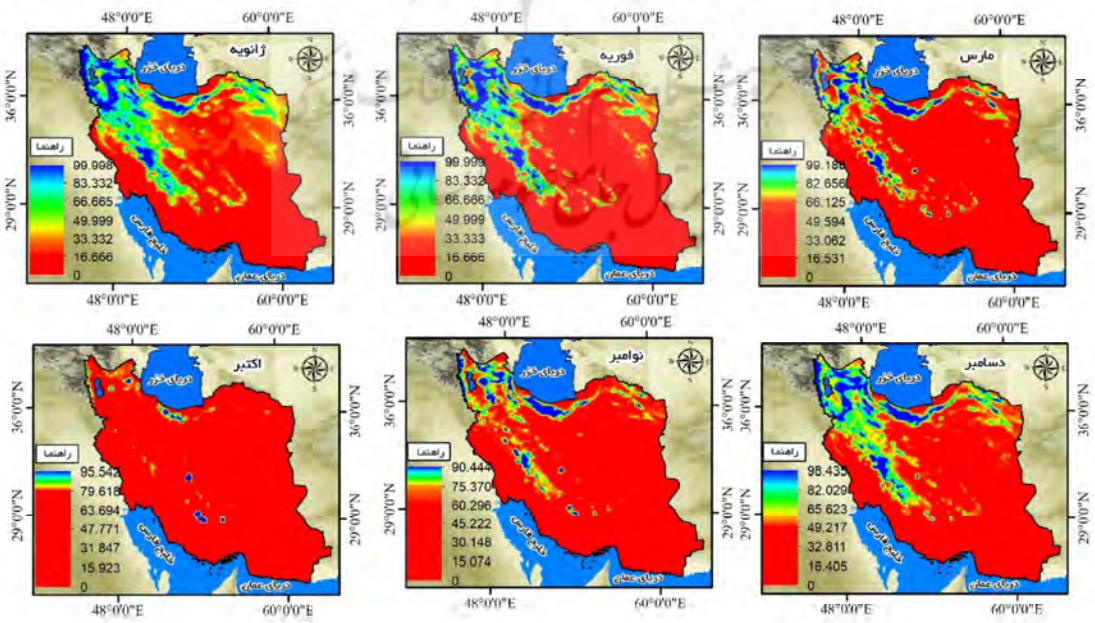
۳-۵- پراکنش زمانی- مکانی پوشش برف در ایران براساس خروجی سنجندهٔ مادیس

شکل (۲) پراکنش زمانی- مکانی پوشش برف را برحسب درصد در ایران، طی ماه‌های سرد سال نشان می‌دهد. مطابق این شکل، بیشترین مقدار پوشش برف در فصل زمستان است. در ژانویه، پوشش برف در برخی یاخته‌های مناطقی همانند البرز و زاگرس تا ۱۰۰٪ نیز می‌رسد. بیشینهٔ پوشش برف مربوط به ارتفاعات برف‌گیر است و بر این اساس، تمامی کوه‌های با ارتفاع ۴۰۰۰ متر پوشش برفی بیشتر از ۸۰٪ دارند. این مناطق عبارت‌اند از دماوند، علم‌کوه، سبلان، شاخک (پنج قله)، سیاه‌سنگ، هرم، هفت‌خان، چالون، کوه هراز، کله‌برفی، کالو و موارد دیگر. سدهای مهم ایران نیز همچون امیرکبیر، لتیان، لار، مهاباد، زرینه‌رود و زاینده‌رود در مناطقی قرار دارند که طی ژانویه، پوشش برفی بیش از ۴۰٪ داشته‌اند. این امر می‌تواند برای منابع آبی ایران بسیار مفید باشد. کانون اصلی برف‌گیر ایران، یا به‌عبارتی ذخیره‌گاه اصلی برف در کشور، بالاتر از مدار ۳۶ درجهٔ شمالی قرار دارد. پایین‌تر از مدار ۲۹ درجهٔ شمالی، تقریباً در هیچ نقطه از کشور ما برفی دیده نمی‌شود. از نظر گسترهٔ مکانی، پوشش برف در شمال‌غرب ایران وسعت بسیاری دارد اما، از لحاظ ماندگاری، ارتفاعات علم‌کوه و دماوند در استان مازندران اهمیت فراوان دارند.

در ماه ژانویه، ۱۲/۲۹٪ از مساحت ایران را پهنه‌هایی با بیش از ۵۰٪ پوشش برفی تشکیل می‌دهد که این مقدار ۱۹۷۶۲۱ کیلومترمربع را دربر می‌گیرد. طی فوریه، در مقایسه با ژانویه، از پهنه‌های برف‌گیر بالا کاسته شده و میزان پهنه‌هایی با بیش از ۵۰٪ پوشش برفی به ۱۰/۰۴٪ رسیده است که این مقدار ۱۶۱۴۴۱ کیلومترمربع از کشور را دربر می‌گیرد. مناطق با پوشش برفی، از لحاظ مکانی، جابه‌جایی خاصی نداشته‌اند و در ذخیره‌گاه اصلی برف ایران قرار دارند. استان‌های دارای پوشش برفی شایان توجه در فصل زمستان عبارت‌اند از اردبیل، زنجان، آذربایجان‌شرقی، خراسان‌شمالی، آذربایجان‌غربی، همدان، تهران، اراک، کردستان و خراسان رضوی. در مناطق برف‌گیر این دَه استان، پوشش برفی بیش از ۲۰٪ بوده است و به‌دلیل مدیریت منابع آب و مسائل مربوط به سیلاب، اهمیت بسیار دارد. کانون اصلی برف‌گیر ایران را در دورهٔ سرد سال، می‌توان زاگرس شمالی، مرکزی و البرز معرفی کرد که ماندگاری پوشش برفی البرز بیشتر از زاگرس است. در ماه مارس، از مناطق دارای پوشش برفی بیش از ۵۰٪، به‌شدت کاسته شده و این مناطق فقط ۲/۱۹٪ از کل پهنه‌های برفی کشور را شامل می‌شود؛ یعنی ۳۵۲۱۴ کیلومترمربع. اصلی‌ترین مناطق برفی در این ماه البرز مرکزی، مرکز زاگرس و مناطق مرزی ایران با ترکیه بوده است.

در دو ماه ابتدایی فصل پاییز، درصد پوشش برف در ایران کاهش چشمگیری به‌نسبت ماه‌های آغازین زمستان دارد زیرا، برخلاف فصل زمستان که از ماه‌های پیش، مانند نوامبر و دسامبر، برف در ارتفاعات ایران بوده است، در دو ماه ابتدایی فصل پاییز به‌دلیل گذر از فصل تابستان، تقریباً برفی از ماه‌های پیشین نمانده است (البته استثناهایی دربارهٔ یخچال‌های ایران وجود دارد که با توجه به دَه‌کیلومتری‌بودن یاخته‌ها، چه بسا درخور اشاره نباشد). مناطق با پوشش برفی، در ماه‌های آغازین پاییز، فقط به بخش‌های بسیار کوچک رشته‌کوه‌های البرز، شمال‌غرب ایران و رشته‌کوه‌های بلند محدود می‌شود. در نوامبر، پوشش برفی ایران به کمترین مقدار خود طی سال می‌رسد و بیشینهٔ آن، در این ماه، ۹۰٪ است. در نوامبر، برخلاف اکتبر، از لحاظ مکانی بر پهنه‌های برف‌گیر بالای ایران افزوده شد. این مناطق ارتفاعات رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس را شامل می‌شود. بخش‌های اندکی از ارتفاعات خراسان نیز پوشش برفی بالایی را نشان دادند. اما باید توجه داشت که مقدار پوشش بیش از ۵۰٪ در نوامبر بسیار محدود است و حتی به ۱٪ هم نمی‌رسد (۰/۳۹۹). همان‌طورکه اشاره کردیم، این مناطق محدود به ارتفاعات است. در ماه دسامبر، شرایط برفی کشور تغییرات زیادی نشان داده؛ به‌طوری‌که پوشش برفی بیش از ۵۰٪ به ۴/۳۵٪ رسیده که پس از ژانویه و فوریه، سومین ماه دارای پوشش برفی بالاست. الگوی مکانی دسامبر، با اندکی جرح‌وتعدیل، همانند الگوی مکانی فوریه در زمستان است. مناطق مرکزی، جنوب، استان‌های مرزی غربی، جنوب‌غرب، جنوب‌شرق و شرق ایران در طول دورهٔ مورد بررسی، یا تقریباً فاقد برف‌اند و یا پوشش برفی اندکی دارند.

دربارهٔ تغییرات پوشش برف در ایران، باید نظر داشت که پوشش زمین ممکن است یکی از عوامل مهم قطعیت‌نداشتنِ پوشش برف باشد (Hall & Riggs, 2007). اختلاف طول موج باند ۶ در مادیس ترا با باند ۷ در مادیس آکوا باعث می‌شود بخشی از الگوریتم آشکارسازی برف در مادیس آکوا قابل استفاده نباشد. هرچند در این تحقیق از ماهوارهٔ ترا استفاده شد، باید در نظر داشت که پوشش برف مادیس، در مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم، عدم قطعیت بیشتری دارد (Riggs et al., 2015)؛ در نتیجه، دقت آن نیز



شکل ۲. تغییرات پوشش برفی ایران در ماه‌های سرد سال براساس داده‌های سنجندهٔ مادیس ماهوارهٔ ترا

کمتر است (Hall et al., 2001; Yang et al., 2015). بر این اساس، داده‌های پوشش برفی مادیس در مناطق جنگلی و مناطق زراعی یا کشاورزی کمترین دقت را دارد (Hall et al., 2001; Hall & Riggs, 2007)؛ بنابراین، نتایج بیان‌شده درمورد پوشش برفی ایران طبق داده‌های ترا، درمورد دورهٔ سرد سال، بدون درنظرگرفتن متغیرهای بیوفیزیکی سطح است و صرفاً به مقدار پوشش برفی به‌دست‌آمده از ماهواره معطوف می‌شود و ازاین‌رو در بحث‌های عملیاتی در این زمینه باید توجه ویژه داشت.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تغییرات زمانی- مکانی پوشش برف ایران طی دورهٔ سرد سال با استفاده از داده‌های پوشش برف‌سنجندهٔ مادیس ماهوارهٔ ترا بررسی شد. سپس با استفاده از آزمون‌های ناپارامتریک من- کندال و سن، روند و شیب روند داده‌های پوشش برف آشکار گردید. برای نقطهٔ تغییر پوشش برفی دورهٔ سرد سال، از آزمون بوشند استفاده شد.

نتایج نشان داد بیشینهٔ پوشش برفی، در دورهٔ مورد نظر، در ارتفاعات بالای ۴۰۰۰ متر قرار دارد و پوشش صددرصدی را نشان می‌دهد. متوسط پوشش برفی ایران، در پاییز و زمستان، بسیار متغیر بوده؛ به‌طوری‌که در ماه‌های اکتبر و نوامبر از فصل پاییز، این مقدار بسیار اندک است و مجموع دو ماه به ۲٪ نیز نمی‌رسد. بیشترین مقدار میانگین پوشش برف ایران در ماه ژانویه و به‌میزان ۱۶/۱۵ به‌دست آمده است و پس از آن، ماه فوریه قرار دارد که ۱۲/۹۸٪ از ایران به‌طور متوسط دارای پوشش برفی بود. روند پوشش برفی در تمامی شش ماه مورد مطالعه منفی بوده است. بیشترین گرایش کاهشی روند تغییرات پوشش برف ایران در ژانویه با نمرهٔ Z و ۲/۳۹ به‌دست آمده که این مقدار، از لحاظ آماری، در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است. مقدار شیب روند نیز نشان داد که پوشش برفی معمول در ژانویه، به‌ازای هر سال، ۰/۸۱٪ دچار کاهش شده است؛ به‌عبارت دیگر، می‌توان اذعان داشت که پوشش برف در این ماه، براساس داده‌های بلندمدت سنجندهٔ مادیس در ایران، به‌ازای هر سال ۱٪ کاسته می‌شود. کاهش پوشش برف در کشور طی دورهٔ سرد سال ممکن است باعث افزایش خشکسالی، کمبود منابع آبی جدید، ازبین‌رفتن ذخیره‌گاه‌های برفی ایران و در نهایت، افزایش رخدادهای سیلابی در مناطق پایین‌دست ارتفاعات شود.

نقطهٔ تغییر پوشش برف نیز روند کاهشی برف در ایران را تأیید کرده است؛ طبق مقادیر p-value و alpha محاسباتی، ماه ژانویه دارای نقطهٔ تغییر سری زمانی در پوشش برفی بوده و سال ۲۰۰۸ به‌منزلهٔ نقطهٔ تغییر شناسایی شد. میانگین پوشش برفی، پیش از نقطهٔ تغییر در ژانویه، ۲۳/۴۱٪ و پس از نقطهٔ تغییر، ۱۱/۷۹٪ به‌دست آمده است که این مقادیر در سطح ۰/۰۵ معنی‌دارند. مناطق برف‌گیر اصلی ایران که براساس داده‌های سنجندهٔ مادیس شناسایی شدند، عبارت‌اند از دماوند، علم‌کوه، سبلان، شاخک (پنج قله)، سیاه‌سنگ، هرم، هفت‌خان، چالون، کوه هراز، کله‌برفی و کالو. بیشترین مقدار پوشش برفی برحسب مساحت مناطق درگیر در ماه ژانویه مشخص شده است؛ در این ماه، مناطقی با بیش از ۵۰٪ پوشش برفی برابر با ۱۹۷۶۲۱ کیلومترمربع بوده است. نکتهٔ مهم در زمینهٔ تغییرات پوشش برفی ایران عدم قطعیت آن است؛ به‌طوری‌که پوشش گیاهی متراکم عدم قطعیت بسیاری (Riggs et al., 2006) در تغییرات پوشش برفی دارد.

۵- منابع

Ahmadi, M., Chatrchi, P., Dadashi Roudbari, A.A., **Precipitation trend modeling in the western of Asia affected by climate changes.** Earth Sciences Research 9 (35), 68-80.

Andreadis, K. M., Storck, P., & Lettenmaier, D. P. (2009). **Modeling snow accumulation and ablation processes in forested environments.** Water resources research, 45(5).

Alizadeh-Choobari, O., Najafi, M.S., 2017. **Trends and changes in air temperature and precipitation over different regions of Iran.** Journal of the Earth and Space Physics 43(3), 569-584.

AziziMoghadam, Reza, 2016. **Evaluation of Snow Cover Changes Trend Using GIS and RS and its impact on Dez basin water resources,** MSc. Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). **Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. Nature,** 438(7066), 303-309.

Brown, R. D., & Robinson, D. A. (2011). **Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922-2010 including an assessment of uncertainty.** The Cryosphere, 5(1), 219.

Buishand, T. A. (1982). **Some methods for testing the homogeneity of rainfall records.** Journal of hydrology, 58(1-2), 11-27.

Chang, A. T. C., Foster, J. L., & Hall, D. K. (1987). **Nimbus-7 SMMR derived global snow cover parameters.** Annals of glaciology, 9, 39-44.

Che, T., Li, X., Jin, R., Armstrong, R., & Zhang, T. (2008). **Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China.** Annals of Glaciology, 49, 145-154.

Dadashi Roudbari, A., Fallah Ghalheri, G., Karami, M., Baaghide, M., 2016. **Analysis of Precipitation Variations of Haraz Watershed Using by Statistical Methods and Spectrum Analysis Technique.** Hydrogeomorphology 3(7), 59-86.

Dadashi Roudbari, A.A., Ahmadi, M., 2019. **Spatio-temporal variation and change point of Iran Aerosol absorption index (AAI) based on the output of TOMS and OMI sensors.** Journal of the Earth and Space Physics 45(3), 609-623.

Dadashi Roudbari, A.A., Ahmadi, M., Shakiba, A., 2020. **Evaluation Seasonal Trend of Iran Aerosol Index (AI) Based on Nimbus 7, Earth Probe and Aura Satellite Data.** Physical Geography Research Quarterly 52(1), 51-64.

Eythorsson, D., Gardarsson, S. M., Ahmad, S. K., Hossain, F., & Nijssen, B. (2019). **Arctic climate and snow cover trends–Comparing Global Circulation Models with remote sensing observations.** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 80, 71-81.

Fayad, A., Gascoin, S., Faour, G., López-Moreno, J. I., Drapeau, L., Le Page, M., & Escadafal, R. (2017). **Snow hydrology in Mediterranean mountain regions: A review.** Journal of Hydrology, 551, 374-396.

Hall, D. K., & Riggs, G. A. (2007). **Accuracy assessment of the MODIS snow products.** Hydrological Processes: An International Journal, 21(12), 1534-1547.

Hall, D. K., Foster, J. L., Salomonson, V. V., Klein, A. G., & Chien, J. Y. L. (2001). **Development of a technique to assess snow-cover mapping errors from space.** IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(2), 432-438.

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(1-2), 181-194.

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(1-2), 181-194.

Kendall, M. G. (1955). Rank correlation methods.

Keikhosrvai Kiany, M.S., Masoudian, S.A., 2017. **Trend Analysis of Snow–covered Days in Iran based on Remote Sensing Data.** Geography and Environmental Planning 28(1), 49-60.

Keikhosrvai Kiany, M.S., Masoudian, S.A., 2016. **Exploring the Relation of Snow-Covered Days with Elevation, Slope and Aspect in Iran.** Physical Geography Research Quarterly 48(1), 1-14.

Khoshkhoo, Y., 2016. **Simulation of the snow depth using Single Layer Snow Model (SLSM) at Saghez station.** Iranian Journal of Soil and Water Research 47(3), 517-527.

Li, Q., Yang, T., Zhou, H., & Li, L. (2019). **Patterns in snow depth maximum and snow cover days during 1961–2015 period in the Tianshan Mountains, Central Asia.** Atmospheric Research, 228, 14-22.

Malmros, J. K., Mernild, S. H., Wilson, R., Tagesson, T., & Fensholt, R. (2018). **Snow cover and snow albedo changes in the central Andes of Chile and Argentina from daily MODIS observations (2000–2016).** Remote sensing of environment, 209, 240-252.

Mann, H. B. (1945). **Nonparametric tests against trend.** Econometrica: Journal of the Econometric Society, 245-259.

Marchane, A., Jarlan, L., Hanich, L., Boudhar, A., Gascoin, S., Tavernier, A., ... & Berjamy, B. (2015). **Assessment of daily MODIS snow cover products to monitor snow cover dynamics over the Moroccan Atlas mountain range.** Remote Sensing of Environment, 160, 72-86.

Nicolet, G., Eckert, N., Morin, S., & Blanchet, J. (2018). **Assessing climate change impact on the spatial dependence of extreme snow depth maxima in the French Alps.** Water Resources Research, 54(10), 7820-7840.

Parajka, J., & Blöschl, G. (2012). **MODIS-based snow cover products, validation, and hydrologic applications.** Multiscale Hydrologic Remote Sensing: Perspectives and Applications, edited by: Chang, N.-B. and Hong, Y.

Riggs, G. A., Hall, D. K., & Román, M. O. (2015). **MODIS snow products collection 6 user guide.** National Snow and Ice Data Center: Boulder, CO, USA, 66.

Riggs, G. A., Hall, D. K., & Salomonson, V. V. (2006). **MODIS snow products user guide to collection 5.** Digital Media, 80(6), 1-80.

Sen, P. K. (1968). **Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau.** Journal of the American Statistical Association, 63(324), 1379-1389.

Simpson, J. J., Stitt, J. R., & Sienko, M. (1998). **Improved estimates of the areal extent of snow cover from AVHRR data.** Journal of Hydrology, 204(1-4), 1-23.

Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M. M., Allen, S. K., Boschung, J., ... & Midgley, P. M. (2014). **Climate change 2013: the physical science basis.** Contribution of working group I to the fifth assessment report of IPCC the intergovernmental panel on climate change.

Tang, Z., Wang, X., Wang, J., Wang, X., Li, H., & Jiang, Z. (2017). **Spatiotemporal variation of snow cover in Tianshan Mountains, Central Asia, based on cloud-free MODIS fractional snow cover product, 2001–2015.** Remote Sensing, 9(10), 1045.

Theil, H. (1992). **A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis.** In Henri Theil's Contributions to Economics and Econometrics (pp. 345-381). Springer Netherlands.

Xiao, L., Che, T., Chen, L., Xie, H., & Dai, L. (2017). **Quantifying snow albedo radiative forcing and its feedback during 2003–2016.** Remote Sensing, 9(9), 883.

Yang, J., Jiang, L., Ménard, C. B., Luojus, K., Lemmetyinen, J., & Pulliainen, J. (2015). **Evaluation of snow products over the Tibetan Plateau.** Hydrological Processes, 29(15), 3247-3260.

Yang, Y., Wu, X. J., Liu, S. W., Xiao, C. D., & Wang, X. (2019). **Valuating service loss of snow cover in Irtysh River Basin.** Advances in Climate Change Research, 10(2), 109-114.

Yu, J., Zhang, G., Yao, T., Xie, H., Zhang, H., Ke, C., & Yao, R. (2015). **Developing daily cloud-free snow composite products from MODIS Terra–Aqua and IMS for the Tibetan plateau.** IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 54(4), 2171-2180.

Zhang, F., Zhang, H., Hagen, S. C., Ye, M., Wang, D., Gui, D., ... & Liu, J. (2015). **Snow cover and runoff modelling in a high mountain catchment with scarce data: effects of temperature and precipitation parameters.** Hydrological processes, 29(1), 52-65.

Zhang, Y., & Ma, N. (2018). **Spatiotemporal variability of snow cover and snow water equivalent in the last three decades over Eurasia.** Journal of Hydrology, 559, 238-251.

Zhou, H., Aizen, E., & Aizen, V. (2013). **Deriving long term snow cover extent dataset from AVHRR and MODIS data: Central Asia case study.** Remote Sensing of Environment, 136, 146-162.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

سنجش از دور
و
GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران سال چهاردهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۱
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.14, No. 1, Spring 2022

73-88

Snow Cover Variability in the Cold Period of the Year in Iran Based on MODIS Measurements

Ahmadi M.[1*] and Seyedmirzaei Z.S.[2]

1. Associate Prof., Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University
2. M.Sc. of Applied Climatology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University

Abstract

The study of snow cover as one of the most important sources of freshwater supply is of great importance. Due to the mountainous conditions of Iran, it is not possible to measure the area of snow cover. Accordingly, the use of satellite imagery to identify snow storage is of great importance. In this study, the spatio-temporal changes of Iran snow cover for the cold period of the year were evaluated using the snow cover product of MODIS Terra satellite during the period of 2003-2018. The trend and slope of the snow cover were investigated using Man-Kendall non-parametric tests and the Sen's slope estimator and change-point of snow cover using Buishand test. The results showed that in January, the highest amount of snow cover is 16.6 percent, and the lowest amount of snow cover was computed in October, which is less than 1 percent. The main center of Iran's snow cover in the cold period of the year in the highlands is above 4000 meters. The snow cover trend is negative in all studied months and the maximum decrease in snow cover was calculated in January and the change-point was calculated in 2008 January, which is statistically significant at the level of 0.05. The significant decrease in snow cover during the cold period of the year which is a major threat to Iran's water resources.

Keywords: Snow cover, MODIS sensor, Man-Kendall tests, Trend of snow cover, Iran.

Correspondence Address: Shahid Beheshti University, Tehran. Tel: 09121487497
Email: ma_ahmadi@sbu.ac.ir