

Trend analysis of snow accumulation season start in Iran using remote sensing data

Mohammad Sadegh Keikhosravi Kiany¹, Seyed Abolfazl Masoodian^{2*}

1- Postdoctoral Researcher in Climatology, Department of Physical Geography, University of Isfahan, Isfahan, Iran

2- Professor of Climatology, Department of Physical Geography, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract

The purpose of the present study was to investigate the temporal and spatial variations of the snow cover accumulation season in Iran. For this purpose, in the first step, the data of the sixth version of MODIS Terra and MODIS Aqua for the period of 2000 to 2018 (1379-1397 AH) on a daily basis on a 500×500 m spatial resolution were obtained for the whole of Iran. To reduce the cloud cover effect on the satellite data, three methods of reducing cloud effects were applied to raw data. In the next step, for each hydrological year and each of the 7,541,502 pixels covering Iran's territory, the first day that snow cover was reported by the MODIS (based on the first day of Mehr) was extracted and that day was recorded as the start of the snow season on the desired pixel. Finally, an array of $7,541,502 \times 1$ was constructed in which columns indicated the first snow cover day. This process was repeated over 18 years of available data, and finally, a time-space matrix at $18 \times 7,541,502$ was constructed in which the rows represented the time and columns represented pixels. The analysis revealed that the snow cover accumulation season over the western and northeastern highlands of the country is advancing to winter; meanwhile, the northern and northwestern highlands of the country are retracting to autumn.

Key words: Snow Accumulation; Iran, MODIS Terra, MODIS Aqua.

* s.a.masoodian@geo.ui.ac.ir

واکاوی روند تغییرات آغاز فصل انباشت پوشش برف در ایران با بهره‌گیری از داده‌های

سنجش از دور

محمد صادق کیخسروی کیانی، پژوهشگر پسادکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

سید ابوالفضل مسعودیان*، استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

وصول: ۱۳۹۸/۱۰/۱۱ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۵، صص ۱-۱۴

چکیده

بررسی پوشش برف در کشوری همچون ایران، امری بسیار حیاتی است و تمدن ایرانی به پوشش برفی کوهستان‌های این کشور وابسته است. هدف از پژوهش حاضر، بررسی تغییرات زمانی و مکانی زمان‌بندی فصل انباشت پوشش برف در ایران است. بدین منظور در گام نخست، داده‌های نسخه ششم سنجنده مودیس ترا و مودیس آکوا برای دوره زمانی ۱۳۷۹/۱/۱ تا ۱۳۹۷/۶/۳۱ به صورت روزانه و در تفکیک مکانی ۵۰۰×۵۰۰ متر برای کل گستره ایران دریافت شد؛ سپس به منظور کاهش اثر ابرناکی در داده‌های ماهواره‌ای، سه روش کاهش اثر ابرناکی بر داده‌های خام اولیه اعمال شد. در مرحله دوم به تفکیک هر سال آبی روی هریک از ۷۵۴۱۵۰۲ یاخته‌ای که گستره ایران را می‌پوشاند، نخستین روز گزارش برف با سنجنده مودیس (برپایه روز اول مهر) استخراج و به مثابه شروع فصل برف روی یاخته مدنظر ثبت شد. در نهایت آرایه‌ای در ابعاد ۱×۷۵۴۱۵۰۲ ساخته شد که روی هریک از ستون‌های آن، شمار روز مربوط به نخستین بارش برف ثبت شده بود. این فرایند روی ۱۸ سال داده موجود تکرار و در نهایت آرایه‌ای در ابعاد ۱۸×۷۵۴۱۵۰۲ تولید شد که در آن سطرها، نماینده زمان و ستون‌ها، نماینده یاخته‌های مکانی بودند. بررسی‌ها نشان می‌دهد در ارتفاعات غربی و شمال شرقی کشور، آغاز فصل انباشت پوشش برف در حال پیشروی به سوی زمستان است؛ این در حالی است که در ارتفاعات شمالی و شمال غرب کشور، شروع فصل انباشت پوشش برف در حال رفتن به عقب یعنی پسروی به سوی پاییز است.

واژه‌های کلیدی: انباشت پوشش برف، ایران، سنجنده مودیس ترا، سنجنده مودیس آکوا.

مقدمه

در پژوهشی دیگر، بی و همکاران^۳ (۲۰۱۵) به‌منظور بررسی زمان آغاز و پایان پوشش برف در شمال شرق فلات تبت از داده‌های سنجنده مودیس^۴ برای بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳ بهره گرفتند. یافته‌های آنها نشان داد طی دوره زمانی مدنظر، زمان آغاز انباشت و گدازش برف تغییراتی داشته است؛ اما پراکنش مکانی شمار روزهای برف‌پوشان، کم‌وبیش یک رفتار پایداری را از خود نشان داده است.

دهری و همکاران^۵ (۲۰۱۱) برای ارزیابی ویژگی‌های فصلی پوشش برف در آبگیر رودخانه سوات^۶ در کشور پاکستان، داده‌های سنجنده مودیس ترا^۷ را به کار گرفتند. واکاوی‌ها نشان داد بیشترین گستره پوشش‌های برفی در این منطقه در پایان ماه ژانویه و آغاز فوریه قابل مشاهده است. در این هنگام از سال، ۶۴ درصد از گستره حوضه پوشیده از برف است. کمترین گستره پوشش برفی نیز طی ماه آگوست بوده است که در این ماه حدود ۲ درصد از مساحت حوضه، آن هم در ارتفاعات، پوشش برفی دارد.

در پژوهشی نیز شی و همکاران^۸ (۲۰۱۴) برای واکاوی ویژگی‌های فصلی پوشش برف در حوضه رودخانه تاریم^۹ در بخش‌های غربی چین، داده‌های دو سنجنده مودیس ترا و مودیس آکوا^{۱۰} را برای دوره زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ بررسی کردند. نتایج نشان داد گستره‌های برفی در این منطقه از ماه مارس شروع به

پوشش برف به سبب داشتن سپیدایی زیاد نقش مهمی در ترازمندی انرژی زمین دارد و بر آب‌وهوا تأثیر می‌گذارد (Akyurek et al., 2010: 3728). دوام و ماندگاری پوشش برف در یک پهنه فارغ از ژرفا و عمق آن، نشان‌دهنده شرایط آب‌وهوایی آن منطقه است (Leathers & Luff, 1997: 1536). بررسی تغییرات پوشش برف، یکی از جنبه‌های مهم واکاوی تغییرات جهانی آب‌وهواست (Gurney et al., 1993: 1).

با پرتاب ماهواره‌های متنوع به فضا و با گسترش روش‌های دورکاوی، این امکان فراهم شده است تا پدیده‌های محیطی بهتر رصد شود. داده‌های ماهواره‌ای با داشتن پوشش زمانی و مکانی مناسب همراه با تفکیک مکانی خرد، منابع ارزشمندی در پژوهش‌های محیطی به شمار می‌آیند. طی دو دهه گذشته پژوهش‌های بسیاری به‌منظور ارزیابی تغییرات زمانی انباشت و گدازش و همچنین ویژگی‌های فصلی پوشش‌های برفی به کمک داده‌های دورکاوی انجام شده است؛ برای نمونه هال و همکاران^۱ (۲۰۱۵) به‌منظور بررسی تغییرات زمان گدازش برف در حوضه دریاچه فرمونت^۲ در ایالات متحده از داده‌های ماهواره لندست برای بازه زمانی ۱۹۷۲ تا ۲۰۱۳ بهره گرفتند. بررسی‌ها نشان داد زمان گدازش برف در این منطقه در دهه ۲۰۰۰ در مقایسه با سال‌های ۱۹۷۲-۱۹۹۹ زودتر آغاز می‌شود و افزایش دمای شبانه در فصل بهار و پاییز سبب گدازش زود هنگام پوشش‌های برفی در این منطقه شده است.

³ Bi et al⁴ MODIS⁵ Dahri et al⁶ Swat River upstream⁷ MODIS Terra⁸ She et al⁹ Tarim River¹⁰ MODIS Aqua¹ Hall et al² Fremont

سیچوان^۵ در کشور چین، از داده‌های سنجنده مودیس در تفکیک زمانی ۸ روزه و برای سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ بهره گرفتند. یافته‌ها نشان داد کمترین میزان پوشش برف در ماه آگوست و بیشترین میزان در ماه مارس دیده می‌شود. طی ماه ژانویه تا مارس گستره پوشش برف به تندی افزایش می‌یابد، اما طی ماه‌های مارس تا می به تندی کاهش می‌یابد.

هوانگ و همکاران^۶ (۲۰۱۱) برای واکاوی ویژگی‌های فصلی پوشش برف در منطقه شینجانگ، داده‌های سنجنده مودیس را به کار گرفتند. بررسی‌های آنان نشان داد در ماه‌های ژانویه و فوریه گستره پوشش برف در منطقه به اوج می‌رسد و از ماه مارس نیز به سبب افزایش دما کاهش می‌یابد.

کرجسی و همکاران^۷ (۲۰۱۵) ویژگی‌های فصلی پوشش برف را در ده حوضه در کشور اسلواکی^۸ به کمک داده‌های سنجنده‌های مودیس ترا و مودیس آکوا واکاوی کردند. بررسی‌ها نشان داد گستره‌های چشمگیر پوشش برف از ماه دسامبر آغاز می‌شود و در ماه‌های ژانویه و فوریه به بیشینه خود می‌رسد.

خادکا و همکاران^۹ (۲۰۱۴) به منظور ارزیابی پوشش برف در ارتفاعات و فصول مختلف در حوضه تاماکوشی^{۱۰} در کوهستان‌های هیمالیا از داده‌های سنجنده مودیس برای بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ بهره گرفتند. بررسی این پژوهشگران نشان داد مقدار پوشش برف در زیر ارتفاع ۴۵۰۰ متر از تراز دریا چندان چشمگیر نیست. در فصول زمستان و بهار در

ذوب شدن می‌کنند تا اینکه در ماه آگوست پوشش برف به کمترین میزان خود می‌رسد. انباشت پوشش برف از ماه سپتامبر شروع می‌شود و در ماه فوریه به بیشترین میزان می‌رسد.

کی و لئو^۱ (۲۰۱۴) برای بررسی ورودش‌های فصلی پوشش برف در منطقه شینجانگ^۲ کشور چین، داده‌های دو سنجنده مودیس ترا و مودیس آکوا را بررسی و ادغام کردند. واکاوی‌ها نشان داد اوج پوشش برف در این منطقه در اواخر ژانویه است. در این هنگام از سال حدود ۴۰ درصد از این منطقه پوشیده از برف است. زمان ذوب برف از اواخر فوریه شروع می‌شود و پایین‌ترین گستره پوشش برف در میانه ماه آگوست قابل مشاهده است. طی این ماه، مساحت پوشش برفی فقط ۳ درصد از کل منطقه را شامل می‌شود.

پو و زو^۳ (۲۰۰۹) به منظور واکاوی ویژگی‌های فصلی درصد پوشش برف در فلات تبت از داده‌های سنجنده مودیس برای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ بهره گرفتند. یافته‌های آنها نشان داد بیشترین میزان پوشش برف ۳۳ درصد در ماه فوریه است. در طول فصل برف (از اوایل ماه اکتبر تا پایان ماه آوریل) میزان پوشش برف بیش از ۲۳ درصد است؛ اما پس از ماه می گستره پوشش برف شتابان کاهش می‌یابد و به ۵/۳ درصد می‌رسد؛ از ماه سپتامبر نیز گستره پوشش برف به تندی افزایش می‌یابد.

یانگ و همکاران^۴ (۲۰۱۲) برای بررسی ویژگی‌های فصلی پوشش برف در مناطق غربی

⁵ Sichuan

⁶ Huang et al

⁷ Krajci et al

⁸ Tamakoshi

⁹ Khadka et al

¹⁰ Tamakoshi

¹ Ke & Liu

² Xinjiang

³ Pu & Xu

⁴ Yang et al

ارتفاعات بیش از ۴۵۰۰ متر، میزان پوشش برف بسیار چشمگیر است؛ این در حالی است که در فصل تابستان فقط ارتفاعات بیش از ۵۵۰۰ متر پوشش برف چشمگیری دارند.

در پژوهش حاضر دو هدف کلیدی بررسی می‌شود؛ نخست آنکه روند مکانی تغییرات آغاز فصل انباشت پوشش برف در ایران چگونه بوده است؛ دوم آنکه روند زمانی تغییرات آغاز فصل انباشت پوشش برف در ایران چه رفتاری را از خود نشان داده است. با توجه به اینکه رودخانه‌های بزرگ ایران از دل انباره‌های برفی سرچشمه می‌گیرند، بررسی تغییرات زمانی و مکانی آغاز انباشت پوشش برف اهمیت بسیاری دارد؛ همچنین این موضوع بررسی می‌شود که تغییرات زمان‌بندی بارش چگونه بر آغاز انباشت پوشش برف در کشور تأثیر می‌گذارد.

روش‌شناسی پژوهش

در پژوهش حاضر به منظور بررسی روند تغییرات آغاز فصل انباشت پوشش برف در ایران، داده‌های نسخه ششم سنجنده‌های مودیس تررا (MOD10A1) و مودیس آکوا (MYD10A1) برای بازه زمانی ۱۳۷۹/۷/۱ تا ۱۳۹۷/۶/۳۱ به صورت روزانه به کار گرفته شد. یکی از موانع طبیعی پایش پوشش برف، مسئله ابرناکی است. ابرناکی سبب می‌شود پوشش‌های برفی زیر ابر از میدان دید ماهواره پنهان بمانند. برای کاستن از ابرناکی و رصد بهتر پوشش برف، پژوهشگران علوم زمین فنون مختلفی را پیشنهاد داده‌اند؛ یکی از آنها، ادغام داده‌های سنجنده مودیس تررا و مودیس آکواست. ماهواره تررا در ساعت ۱۰:۳۰ دقیقه از روی منطقه عبور می‌کند؛ این در حالی

است که ماهواره آکوا در ساعت ۱۳:۳۰ دقیقه یعنی سه ساعت دیرتر از فراز منطقه می‌گذرد. ممکن است ماهواره تررا هنگام صبح یاخته‌ای را به‌مثابه یاخته ابری شناسایی کند، اما همان یاخته در بعدازظهر با ماهواره آکوا به‌مثابه یاخته برفی شناسایی شود؛ در این حالت وجود پوشش ابر هنگام صبح سبب شده است پوشش برفی زیرین از دید ماهواره پنهان بماند؛ بنابراین می‌توان یاخته‌هایی را بازشناخت که با ماهواره تررا صبح‌هنگام به‌مثابه یاخته‌های ابری و با ماهواره آکوا عصرهنگام به‌مثابه یاخته‌های برفی شناسایی شده‌اند و یاخته‌هایی با این شرط را به یاخته‌های برفی تبدیل کرد.

ادغام داده‌های دو ماهواره را پژوهشگران بسیاری پیشنهاد داده‌اند؛ برای نمونه پاراجکا و بلوشل^۱ (۲۰۰۸)، وانگ و همکاران^۲ (۲۰۰۹)، وانگ و شی^۳ (۲۰۰۹)، برجرون و همکاران^۴ (۲۰۱۴)، شی و همکاران^۵ (۲۰۱۴)، زانگ و همکاران^۶ (۲۰۱۲)، کی و لئو^۷ (۲۰۱۴) و دایاتز و همکاران^۸ (۲۰۱۴) این روش را به منظور کاهش پوشش‌های ابری و برآورد هرچه بهتر پوشش برف به کار گرفته‌اند. با اعمال این روش، داده‌های دو سنجنده تررا و آکوا برای دوره بررسی شده ادغام شد. در مرحله بعد نیز یک پالایه مکانی با پنجره‌ای ۴ یاخته‌ای روی داده‌ها اعمال شد؛ یعنی هریک از یاخته‌های ابری در یک قاب با ۳ یاخته همسایه دیگر مقایسه می‌شد و اگر سه یاخته دیگر

¹ Parajka & Blöschl

² Wang et al

³ Wang & Xie

⁴ Bergeron et al

⁵ She et al

⁶ Zhang et al

⁷ Ke & Liu

⁸ Dietz et al

آن، شمار روز مربوط به نخستین بارش برف ثبت شده بود (برپایه روز اول مهر). این فرایند روی ۱۸ سال داده موجود تکرار شد. همه مراحل محاسبات به کمک عملیات‌های برنامه‌نویسی در نرم‌افزار MATLAB انجام شد. برای محاسبه روند از شیب خط رگرسیون بهره گرفته شد؛ اما از آنجا که تعداد ۷۵۴۱۵۰۲ یاخته سنجنده مودیس گستره ایران را می‌پوشانید، به جای به‌کارگیری توابع محاسبه شیب خط در نرم‌افزار متلب اقدام به کدنویسی آن شد تا در زمان محاسبه صرفه‌جویی شود و محاسبات روی ماتریس‌ها به تفکیک هریک از سال‌ها انجام و از به‌کارگیری حلقه در عملیات‌های کدنویسی پرهیز شد.

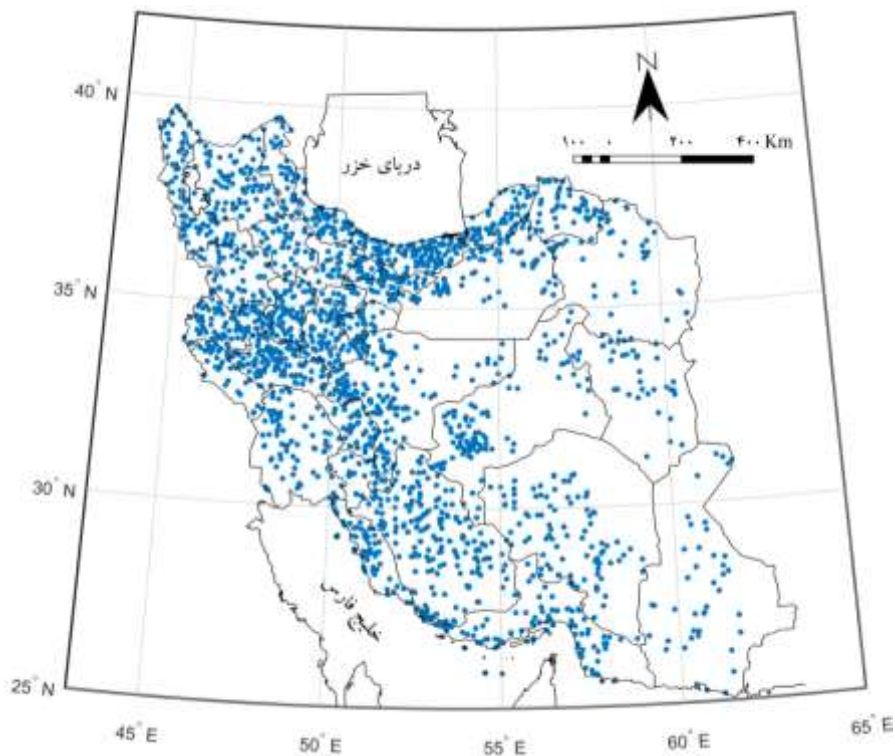
همچنین به منظور بررسی نقش بارش در تغییرات زمانی انباشت پوشش برف، داده‌های نسخه سوم پایگاه بهنگام‌شده اسفزاری به کار گرفته شد. نسخه سوم این پایگاه بارشی بازه زمانی ۱۳۴۹/۱/۱ تا ۱۳۹۴/۱۲/۲۹ را پوشش می‌دهد و تفکیک مکانی ۱۰×۱۰ کیلومتر دارد. این پایگاه برپایه ۲۱۸۸ ایستگاه همدید، اقلیم‌شناسی و باران‌سنجی در کشور و به کمک روش میان‌یابی کریجینگ ساخته شده است. شکل (۱)، موقعیت ایستگاه‌های به کار گرفته شده را در ساخت این پایگاه نشان می‌دهد.

محدوده پژوهش حاضر، کل گستره ایران است؛ اما از آنجا که یافته‌های نگارندگان نشان می‌دهد از ارتفاع ۱۷۰۰ به بالا شرایط برای انباشت پوشش برف مهیا می‌شود، بررسی‌های مربوط به انباشت برف روی پهنه‌هایی انجام شد که ارتفاع ۱۷۰۰ متر و بیشتر دارند. شکل (۲)، گستره‌هایی از سرزمین ایران را نشان می‌دهد که ارتفاع ۱۷۰۰ متر و بیشتر دارند.

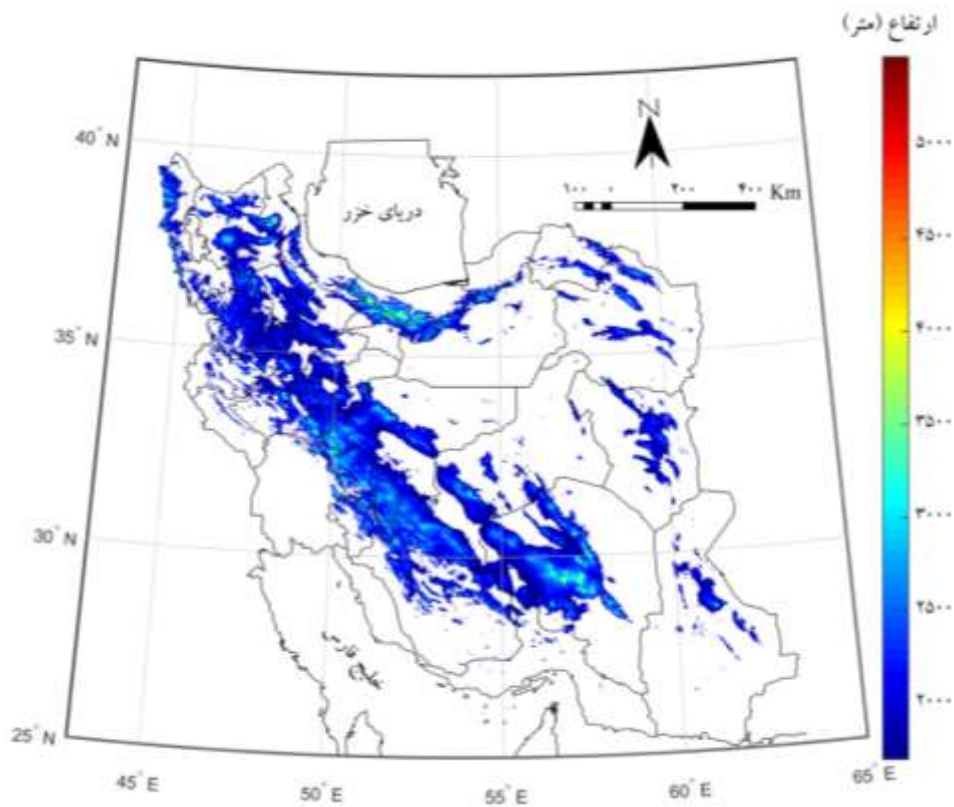
پدیده برف را گزارش می‌کردند، آن یاخته ابری نیز به پدیده برف تبدیل می‌شد؛ اما اگر سه یاخته دیگر پدیده زمین را نشان می‌دادند، آن یاخته ابری نیز به پدیده زمین تبدیل می‌شد. در ادامه فرایند محاسبه پنجره مکانی روی هریک از روزهای بررسی شده و داده‌های ادغام‌شده انجام شد؛ اما آخرین روش انجام‌شده روی داده‌ها به منظور کاستن از اثر ابرناکی، پالایه زمانی بود. در این روش یاخته‌هایی استخراج شد که مودیس روی آنها ابر گزارش می‌کرد و روز قبل و بعد همان یاخته‌ها بررسی شد؛ اگر در روز قبل و بعد آن یاخته پوشیده از برف می‌بود، یاخته ابری در روز بررسی شده نیز به یاخته برفی تبدیل می‌شد. برای حذف چشمگیر اثر ابرناکی این روش در پنجره‌های زمانی یک تا پنج‌روزه روی داده‌ها اعمال شد. به‌کار بستن پالایه را پژوهشگرانی چون دایاتز و همکاران (۲۰۱۳)، زانگ و همکاران (۲۰۱۲) و گی‌فورو و باردوسی^۱ (۲۰۰۹) پیشنهاد داده‌اند.

پس از آماده‌سازی و ساخت پایگاه پوشش برف، فرایند پردازش و محاسبه انباشت و گدازش برف انجام شد. در گام نخست داده‌های پوشش برف به صورت سال آبی درآمد؛ یعنی داده‌های روزانه پوشش برف روی ایران به صورت سال آبی از ۱ مهر تا ۳۱ شهریور در آرایه‌هایی جداگانه ساخته شد. در مرحله بعد روی هریک از ۷۵۴۱۵۰۲ یاخته‌ای که گستره ایران را می‌پوشاند، نخستین روزی که برف با سنجنده مودیس گزارش می‌شد (برپایه روز اول مهر) استخراج و آن روز به مثابه شروع فصل برف روی یاخته مدنظر ثبت شد. در نهایت آرایه‌ای در ابعاد ۱×۷۵۴۱۵۰۲ ساخته شد که روی هریک از ستون‌های

¹ Gafurov & Bárdossy



شکل ۱. موقعیت ۲۱۸۸ ایستگاه همدید، اقلیم‌شناسی و باران‌سنجی استفاده‌شده در ساخت پایگاه بارشی اسفزاری محدوده پژوهش



شکل ۲. مدل رقومی ارتفاع گستره‌هایی از ایران با ارتفاع ۱۷۰۰ متر و بیشتر

یافته‌های پژوهش

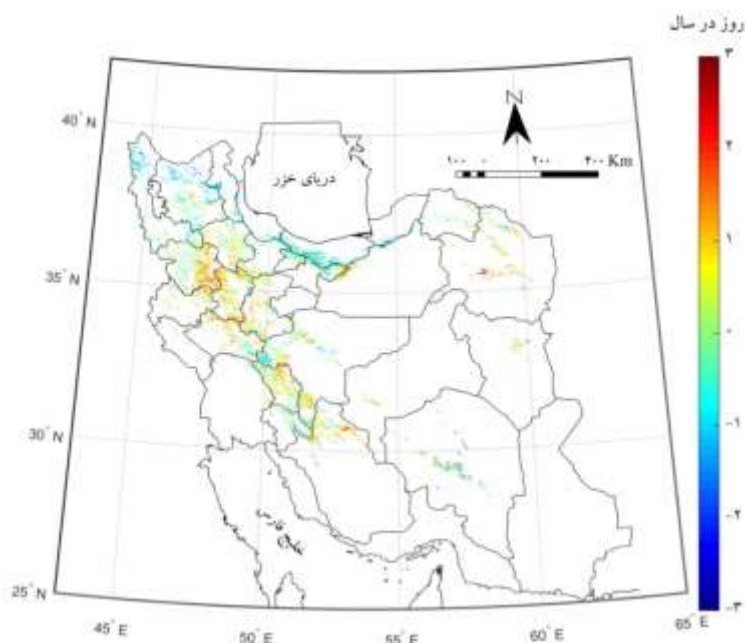
۱. روند مکانی تغییرات آغاز فصل انباشت پوشش

برف در ایران

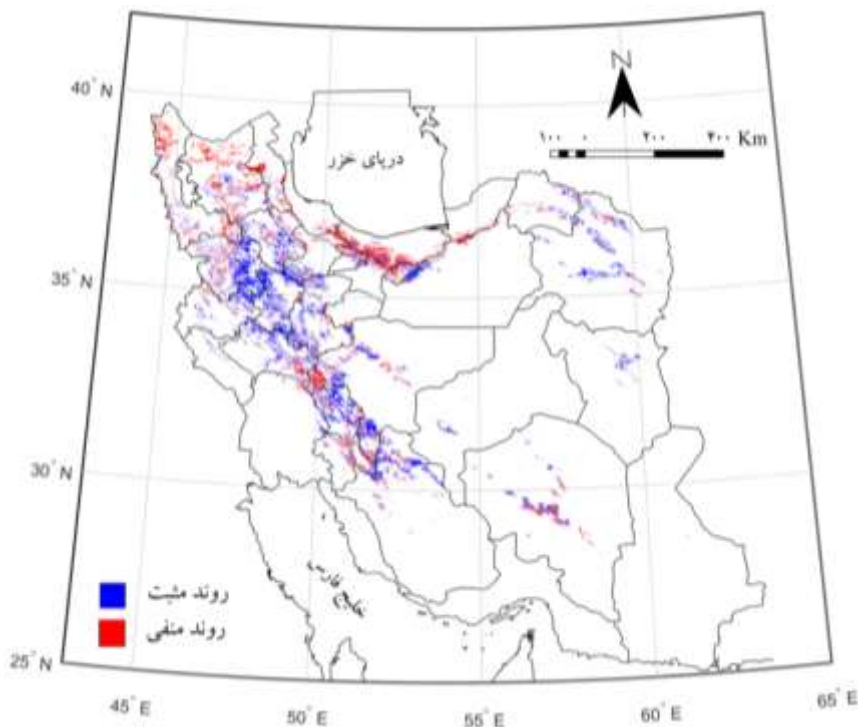
محاسبات مربوط به روند تغییرات مکانی فصل انباشت پوشش برف نشان می‌دهد به‌طور کلی روی بخش‌های غربی کشور و رشته‌کوه‌های زاگرس، روند معنادار افزایشی دیده می‌شود. در تفسیر روند افزایشی باید گفت نخستین زمانی که در فصل انباشت پوشش برف زمین از برف پوشیده می‌شود، در حال پیشروی به سوی اواخر پاییز و فصل زمستان است؛ به بیان روشن‌تر، نخستین روز برف‌پوشان در این مناطق دیرتر در حال رخ‌دادن است؛ اما در بخش‌هایی از نواحی زاگرس مرکزی آغاز فصل برف‌پوشان روند منفی دارد؛ یعنی نخستین روزهای برف‌پوشان زودتر از وضعیت بلندمدت در حال رخ‌دادن است؛ برای نمونه در بخش‌های غربی استان اصفهان، میزان روند آغاز فصل انباشت پوشش برف ۱- است. در تفسیر این عدد (۱-) باید گفت فرض می‌کنیم در منطقه غرب

اصفهان روی یک یاخته به‌طور میانگین، نخستین پوشش برف در روز ۵۰ام (۵۰ روز گذشته از اول مهر) یا به بیان دیگر، در ۲۰ آبان نمایان می‌شود. اگر بخواهیم این عدد را تفسیر کنیم، باید گفت انتظار می‌رود به‌ازای هر سال که پیش می‌رویم، نخستین روزی که این یاخته از برف پوشیده می‌شود، یک روز به عقب کشیده شود و اگر آن را در مقیاس ده‌سالانه حساب کنیم، یعنی این یاخته در تاریخ ۱۰ آبان می‌باید از برف پوشیده شود.

روند منفی آغاز فصل انباشت پوشش برف روی رشته‌کوه‌های البرز و بخش‌های شمال غربی کشور نیز دیده می‌شود (شکل ۳)؛ به نظر می‌رسد این روند منفی به سبب شروع زودهنگام بارش‌های پاییزی در دوره مطالعه شده است. برای هرچه بهتر نمایان‌شدن الگوهای روند مثبت و منفی در کشور، در نقشه‌ای جداگانه مناطقی که روند مثبت معنادار دارند، به رنگ آبی و مناطقی که روند آنها منفی معنادار است، به رنگ سرخ به نمایش گذاشته شدند (شکل ۴).



شکل ۳. روند تغییرات مکانی آغاز فصل انباشت پوشش برف در ایران برپایه روز اول مهر



شکل ۴. روند تغییرات مکانی آغاز فصل انباشت پوشش برف در ایران بدون در نظر گرفتن میزان تغییرات

بالاتر و پایین‌تر از این خط، روند معنادار دارند). در تفسیر نمرات مثبت آزمون من‌کندل باید گفت طی دوره زمانی بررسی شده در طبقات ارتفاعی ۱۷۰۰-۲۷۵۰ متری، آغاز فصل برف‌پوشان در حال پیشروی به سوی زمستان است؛ این در حالی است که از ارتفاعات ۲۸۰۰ متر به بالا، آغاز فصل برف‌پوشان در حال برگشت به عقب یعنی در حال پسروی به سوی پاییز است. به نظر می‌رسد این مسئله ریشه در تغییرات بارش پاییزه داشته باشد. برای موشکافی ژرف‌تر این مسئله، سری زمانی بارش ایران را به تفکیک هریک از ماههای مهر تا آذر (مشمول بر فصل انباشت پوشش برف)، روی مناطقی محاسبه کردیم که ارتفاع آنها ۱۷۰۰ متر و بیشتر بود. بررسی‌ها نشان می‌دهد سری زمانی بارش ماه مهر، شیب ملایم افزایشی دارد (شکل ۶، الف). در ماه آبان سری زمانی بارش،

۲. روند زمانی تغییرات آغاز فصل انباشت پوشش برف در ایران

به‌منظور بررسی روند تغییرات زمانی آغاز فصل انباشت پوشش برف در ایران روی هریک از کمرندهای ارتفاعی در گام‌های مکانی ۵۰ متر، میانگین روزی که برای نخستین بار آن کمرند ارتفاعی از برف پوشیده می‌شود برای هریک از سال‌های آبی بررسی شده (۱۳۷۹-۱۳۹۷) و به کمک عملیات‌های برنامه‌نویسی نمرات آزمون من‌کندل برای هریک از ۷۶ کمرند ارتفاعی محاسبه شد (شکل ۵). بررسی این نمودار نشان می‌دهد تا کمرند ارتفاعی تقریبی ۲۷۵۰ متر، آغاز فصل انباشت برف در ایران نمرات مثبت دارد؛ هرچند هیچ‌کدام از این کمرندهای ارتفاعی روند معنادار ندارند (خط سرخ‌رنگ با مقدار $\pm 1/96$ نشان‌دهنده حد معناداری است؛ یعنی مقادیر

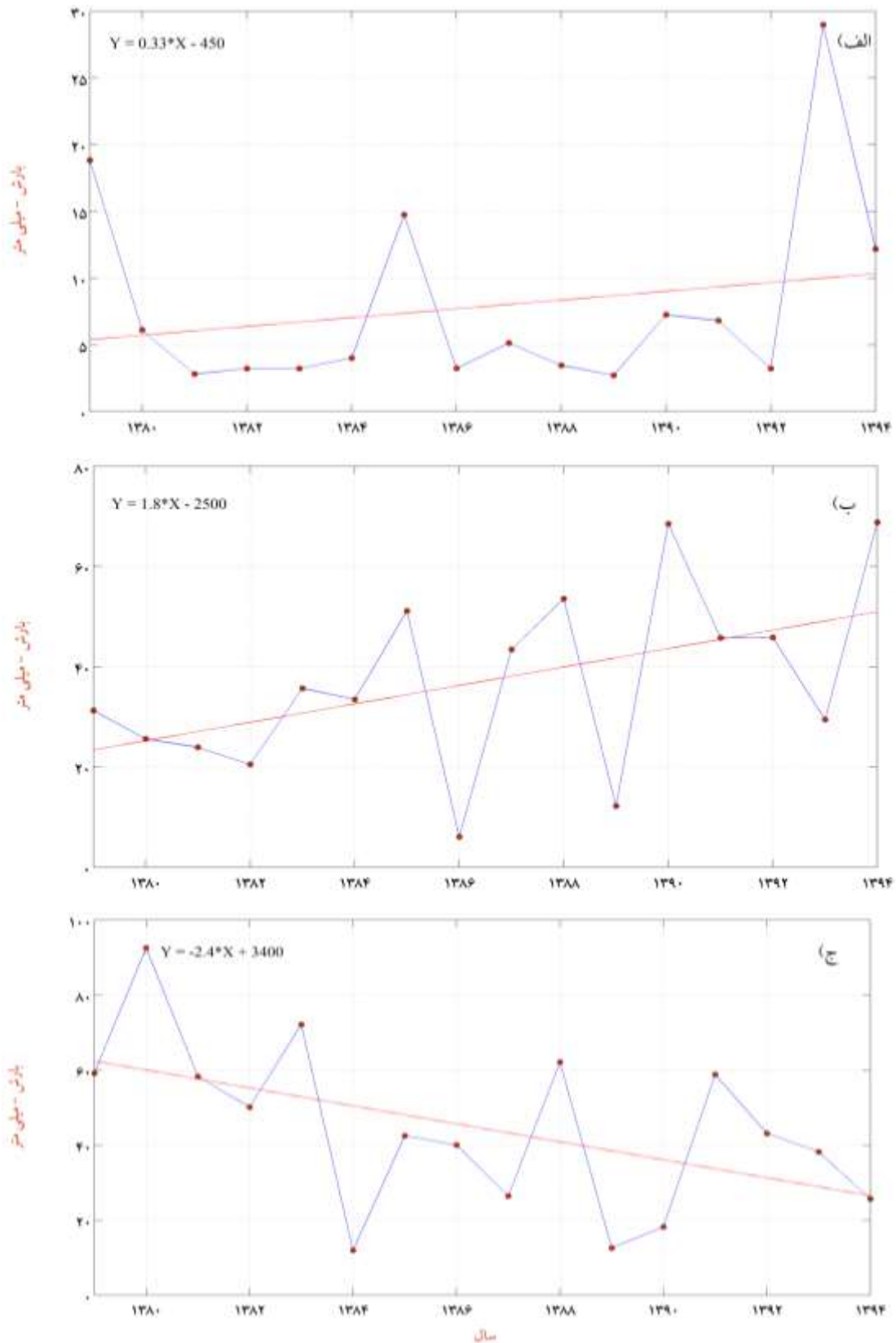
نمودار روند آغاز فصل انباشت پوشش برف بنگریم، درمی‌یابیم از ارتفاع ۲۸۰۰ متر نمرات آزمون من‌کندال منفی است؛ یعنی در این طبقات ارتفاعی، فصل انباشت میل به آغازی زودهنگام دارد. با همه این تفاسیر شاید بتوانیم بگوییم در طبقات ارتفاعی ۲۸۰۰ متر به بالا طی فصل انباشت برف اینکه پوشش برف روی زمین داشته باشیم یا خیر، به بارش بستگی دارد نه به دما؛ زیرا در این طبقات شرایط سرمایش کافی برای پوشش برف وجود دارد؛ این در حالی است که در طبقات ارتفاعی ۲۸۰۰ متر به پایین برای داشتن پوشش برف، هم به بارش و هم به سرمایش کافی نیاز است و شاید بتوانیم بگوییم تراز ارتفاعی ۲۸۰۰ متر در فصل انباشت پوشش برف، یک تراز گذار به حساب می‌آید و به نظر می‌رسد ارتفاعات ۲۸۰۰ متر به پایین به گرمایش جهانی حساس باشند. همه این تفاسیر و برداشت‌ها از روی این محاسبات به دست آمده است؛ اما به هر حال برای اثبات آنها به داده‌ها و واکاوی‌های بیشتری نیازمندیم.

تغییر نسبتاً محسوسی را از خود نشان می‌دهد و رفتاری افزایشی داشته است (شکل ۶، ب). در ماه آذر نیز مقدار بارش شیب کاهشی دارد (شکل ۶، ج)؛ همچنین ارزیابی تغییرات مکانی بارش ماه مهر نشان می‌دهد جز بخش‌هایی از غرب و جنوب که مقدار بارش این ماه در آنها آهنگ کاهشی دارد، در سایر نقاط مقدار بارش، رفتاری افزایشی دارد (شکل ۷، الف).

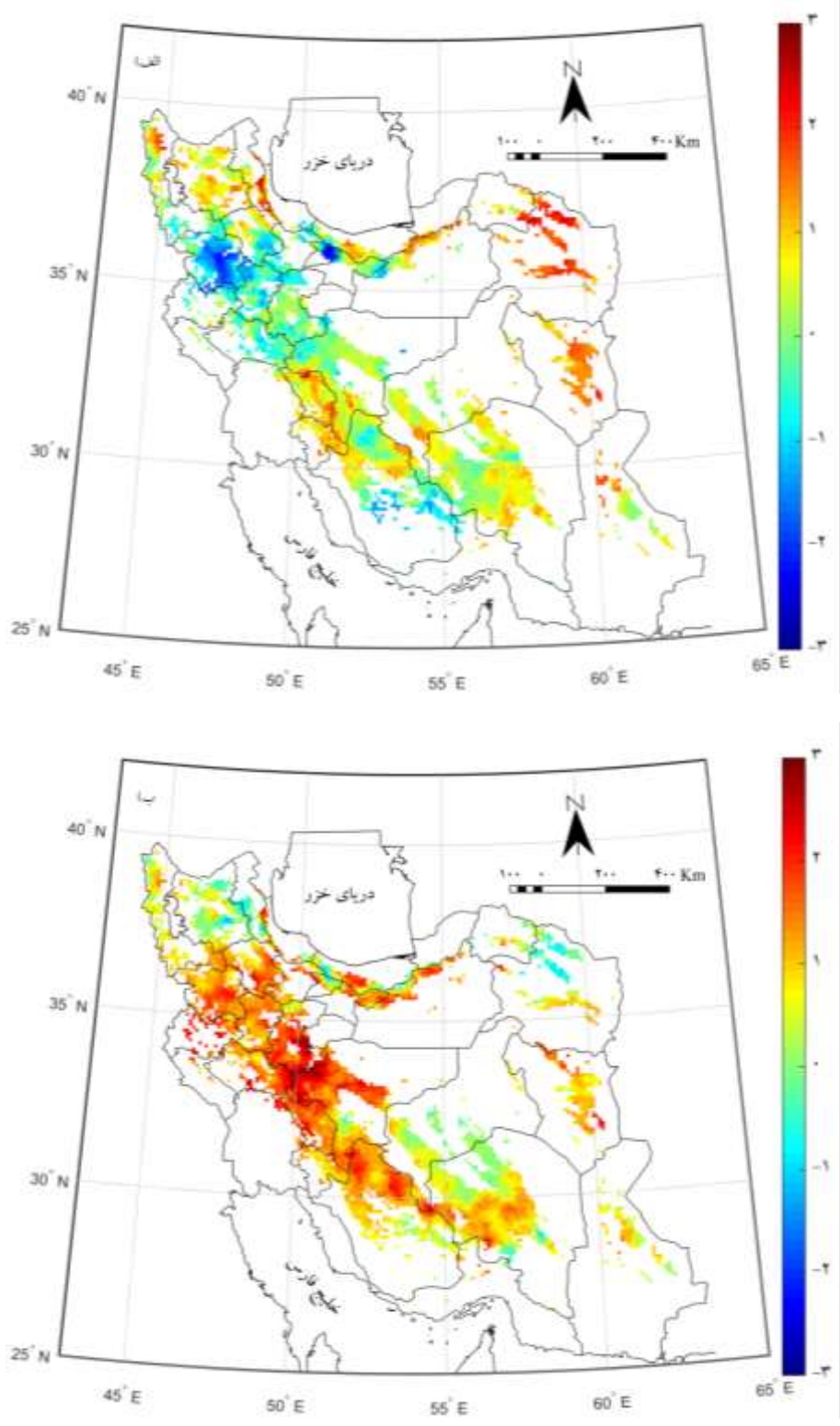
بررسی تغییرات بارش ماه آبان نشان می‌دهد در گستره‌های وسیعی از کشور مقدار بارش در این ماه رو به افزایش است (شکل ۷، ب). باز هم یادآوری می‌شود مقدار تغییرات بارش روی گستره‌هایی از کشور محاسبه شده است که ارتفاعی برابر و بیش از ۱۷۰۰ متر دارند. این‌گونه به نظر می‌رسد که افزایش مقدار بارش به‌ویژه در ماه آبان سبب شده در ارتفاعاتی که شرایط مناسب سرمایشی حاکم است، بارش‌ها به شکل برف نمایان و در واقع فصل انباشت پوشش برف به عقب کشیده شود یا به بیان دیگر، نمرات آزمون من‌کندال منفی شود. اگر به دقت به



شکل ۵. نمرات آزمون من‌کندال تغییرات فصل انباشت پوشش برف در ایران در کمریندهای ارتفاعی در بازه‌های ۵۰ متری



شکل ۶. سری زمانی تغییرات بارش ماه‌های مهر (الف)، آبان (ب) و آذر (ج)



شکل ۷. مقادیر نمرات آزمون من‌کنندال تغییرات بارش ماه مهر (الف) و ماه آبان (ب) در ایران

نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، بررسی تغییرات زمانی و مکانی آغاز فصل انباشت پوشش برف در ایران است. برای این منظور داده‌های پوشش برف سنجنده مودیس ترا و مودیس آکوا روزانه در تفکیک مکانی ۵۰۰×۵۰۰ متر برای بازه زمانی ۱۳۷۹/۷/۱ تا ۱۳۹۷/۶/۳۱ از تارنمای مربوط دریافت شد. پیش از انجام واکاوی‌ها، سه روش کاهش اثر ابرناکی شامل ادغام داده‌های دو سنجنده، پالایه مکانی و پالایه زمانی روی داده‌های خام اولیه اعمال شد تا آلودگی ناشی از ابر به کمینه ممکن برسد. پس از ساخت و آماده‌سازی پایگاه پوشش برف روی ایران، روند تغییرات آغاز فصل انباشت پوشش برف به صورت زمانی و مکانی محاسبه شد. منظور از آغاز فصل انباشت پوشش برف، نخستین روزی است که یاخته بررسی شده از برف پوشیده می‌شود (برپایه روز اول مهر). در همین زمینه به تفکیک هریک از سال‌های آبی بررسی شده روی ۷۵۴۱۵۰۲ یاخته سنجنده مودیس، آغاز فصل انباشت پوشش برف و درنهایت شیب تغییرات محاسبه شد.

یافته‌ها نشان می‌دهد روی ارتفاعات مناطق غربی و شمال شرقی کشور، آغاز فصل انباشت پوشش برف در حال پیشروی به سوی زمستان است؛ این در حالی است که روی ارتفاعات شمالی و شمال غرب کشور، شروع فصل انباشت پوشش برف در حال رفتن به عقب یعنی در حال پسروی به سوی فصل پاییز است؛ اما بررسی تغییرات زمانی روی هریک از کمرندهای ارتفاعی در گام‌های ۵۰ متری نشان می‌دهد در ارتفاعات زیر ۲۷۵۰ متر در ایران، آغاز فصل انباشت در حال کشیده شدن به سوی زمستان و در ارتفاعات ۲۸۰۰ متر به بالا در حال پسروی به سوی پاییز است.

بررسی تغییرات بارش نیز نشان داد اساساً بارش ماه آبان در حال تغییرات افزایشی است و همین مسئله سبب شده است در ارتفاعات بیش از ۲۸۰۰ متر به سبب وجود سرمایش مناسب، بارش‌ها به شکل برف نمایان و به آغاز زودهنگام فصل انباشت پوشش برف روی این ارتفاعات منجر شود؛ اما در ارتفاعات ۲۷۵۰ متر و کمتر، به طور کلی به سبب نبود سرمایش مناسب به ویژه در ماه آبان تغییرات افزایشی بارش به تغییری در فصل انباشت پوشش برف منجر نمی‌شود؛ بنابراین به نظر می‌رسد تراز ۲۸۰۰ متر در فصل انباشت پوشش برف، یک تراز گذار به حساب می‌آید که ارتفاعات بیشتر از این تراز چندان از تغییرات دمایی اثر نمی‌پذیرند؛ اما در هر حال باز هم برای اثبات این موضوع به داده‌ها و واکاوی‌های بیشتری نیاز است.

سپاسگزاری و قدردانی: این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی دوره پسادکتری است که با حمایت مالی دانشگاه اصفهان نوشته شده است.

منابع

- Akyurek, Z., Hall, D.K., Riggs, G.A., Sensoy, A., (2010). **Evaluating the utility of the ANSA blended snow cover product in the mountains of eastern Turkey**, International journal of remote sensing, Vol 31, No 14, Pp 3727- 3744.
- Bergeron, J., Royer, A., Turcotte, R., Roy, A., (2014). **Snow cover estimation using blended MODIS and AMSR-E data for improved watershed-scale spring streamflow simulation in Quebec, Canada**, Hydrological processes, Vol 28, No 16, Pp 4626- 4639.
- Bi, Y., Xie, H., Huang, C., Ke, C., (2015). **Snow cover variations and controlling factors at upper Heihe River Basin**,

- Tamakoshi basin in the Hindu Kush Himalayan (HKH) region**, Journal of hydrology, Vol 511, Pp 49- 60.
- Krajci, P., Holko, L., Parajka, J., (2015). **Variability of snow covered area and snow line elevation in the main Slovak river basins in winters 2001- 2014**, Paper presented at the EGU General Assembly Conference Abstracts.
- Leathers, D.J., Luff, B.L., (1997). **Characteristics of snow cover duration across the northeast United States of America**, International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, Vol 17, No 14, Pp 1535- 1547.
- Parajka, J., Blöschl, G., (2008). **Spatio-temporal combination of MODIS images-potential for snow cover mapping**, Water Resources Research, Vol 44, No 3.
- Pu, Z., Xu, L., (2009). **MODIS/Terra observed snow cover over the Tibet Plateau: distribution, variation and possible connection with the East Asian Summer Monsoon (EASM)**, Theoretical and applied climatology, Vol 97, No 3- 4, Pp 265- 278.
- She, J., Zhang, Y., Li, X., Chen, Y., (2014). **Changes in snow and glacier cover in an arid watershed of the western Kunlun Mountains using multisource remote-sensing data**, International journal of remote sensing, Vol 35, No 1, Pp 234- 252.
- Wang, X., Xie, H., (2009). **New methods for studying the spatiotemporal variation of snow cover based on combination products of MODIS Terra and Aqua**, Journal of hydrology, Vol 371, No 1-4, Pp 192-200.
- Wang, X., Xie, H., Liang, T., Huang, X., (2009). **Comparison and validation of MODIS standard and new combination of Terra and Aqua snow cover products in northern Xinjiang, China**, Hydrological Processes: An International Journal, Vol 23, No 3, Pp 419- 429.
- Yang, C., Zhao, Z., Ni, J., Ren, X., Wang, Q., (2012). **Temporal and spatial analysis of Northwestern China**, Remote Sensing, Vol 7, No 6, Pp 6741-6762.
- Dahri, Z.H., Ahmad, B., Leach, J.H., Ahmad, S., (2011). **Satellite-based snow cover distribution and associated snowmelt runoff modeling in Swat River Basin of Pakistan**, Proc. Pak. Acad. Sci, Vol 48, Pp 19- 32.
- Dietz, A., Conrad, C., Kuenzer, C., Gesell, G., Dech, S., (2014). **Identifying changing snow cover characteristics in central Asia between 1986 and 2014 from remote sensing data**, Remote Sensing, Vol 6, No 12, Pp 12752- 12775.
- Dietz, A.J., Kuenzer, C., Conrad, C., (2013). **Snow-cover variability in central Asia between 2000 and 2011 derived from improved MODIS daily snow-cover products**, International journal of remote sensing, Vol 34, No 11, Pp 3879- 3902.
- Gafurov, A., Bárdossy, A., (2009). **Cloud removal methodology from MODIS snow cover product**, Hydrology and Earth System Sciences, Vol 13, No 7, Pp 1361- 1373.
- Gurney, R.J., Foster, J.L., Gurney, R.J., Parkinson, C.L., (1993). **Atlas of satellite observations related to global change: Cambridge University Press.**
- Hall, D.K., Crawford, C.J., DiGirolamo, N.E., Riggs, G.A., Foster, J.L., (2015). **Detection of earlier snowmelt in the Wind River Range, Wyoming, using Landsat imagery, 1972– 2013**, Remote Sensing of Environment, Vol 162, Pp 45-54.
- Huang, X., Liang, T., Zhang, X., Guo, Z., (2011). **Validation of MODIS snow cover products using Landsat and ground measurements during the 2001–2005 snow seasons over northern Xinjiang, China**, International journal of remote sensing, Vol 32, No 1, Pp 133- 152.
- Ke, C.Q., Liu, X., (2014). **MODIS-observed spatial and temporal variation in snow cover in Xinjiang, China**, Climate Research, Vol 59, No 1, Pp 15-26.
- Khadka, D., Babel, M.S., Shrestha, S., Tripathi, N.K., (2014). **Climate change impact on glacier and snow melt and runoff in**

Zhang, G., Xie, H., Yao, T., Liang, T., Kang, S., (2012). **Snow cover dynamics of four lake basins over Tibetan Plateau using time series MODIS data (2001–2010)**, Water Resources Research, Vol 48, No 10.

changes in snow cover in western Sichuan based on MODIS images, Science China Earth Sciences, Vol 55, No 8, Pp 1329- 1335.