

Identifying Changes in the Beginning, End and Length of the Snow Season in Iran using MODIS Data

Mohammad Sadegh Keikhosravi-Kiany

Assistant Professor, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

✉ E-mail: ms.keikhosravikiany@geo.ui.ac.ir



How to Cite: Keikhosravi-Kiany, M.S. (2024). Identifying Changes in the Beginning, End and Length of the Snow Season in Iran using MODIS Data. *Geography and Development*, 22 (77), 187-206.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22111/gdij.2024.46280.3556>

Received:

29 July 2023

Received in revised form:

6 March 2024

Accepted:

8 April 2024

Published online:

1 January 2025

ABSTRACT

The purpose of this research is to analyze the beginning, end and length of the snow season in Iran. For this purpose, daily data from the MODIS, spanning from 20/03/2000 to 19/03/2020, was obtained from the NASA website at a spatial resolution of 500 meters. First, temporal and spatial filters were applied to eliminate the impact of cloudiness on the data. Furthermore, the first day when a cell was reported to have snow cover (based on the elapsed days since the start of Mehr) was determined for every water year. This process was conducted separately for each water year, ultimately yielding a matrix of dimensions 20×7541502 , where each row represented the first day that the MODIS detected snow on a given cell, and each column represented a spatial cell. Similarly, the same procedure was employed to calculate the end and length of snow season. The findings indicate that, in general, the beginning of snow season is shifting towards the winter season in the western parts of the country. Conversely, in the northwestern regions, including the northern slopes of Alborz and certain areas of the southern Zagros, the beginning of snow season is transitioning towards the autumn season. Moreover, in many highland areas in the west and northwest, as well as on the Alborz mountain range, the end of the snow season is progressively occurring towards late winter and spring.

Keywords:

Snow cover,
Beginning of snow season,
End of snow season,
MODIS,
Iran.



© the Author(s).

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

1. Introduction

The accumulation of snow cover during the cold seasons in the mountainous areas and its gradual melting during the spring and summer supply a permanent flow of water and life of many communities and settlements depends on the snow cover in the highlands, so any changes in the snow cover or its timing can create a chain of changes. During the past two decades, with the growth and development of remote sensing technologies and the launch of meteorological satellites, it has been possible to monitor environmental changes both temporally and spatially, and satellite data have been utilized extensively in climate studies by providing continuous temporal and spatial data. Many studies have also been conducted with the help of remote sensing data in order to investigate the changes in the number of snow-covered days, the changes in the area of snow cover, as well as the changes in the beginning and end of the snow cover season in different parts of the world.

2. Methods and Material

In order to investigate the changes of the beginning and end of the snow cover in the country, the data of the Version 6 of the MODIS Terra (MOD10A1) and MODIS Aqua (MYD10A1) were downloaded for each day from 20/03/2000 to 19/03/2020 via the NASA website (<https://search.earthdata.nasa.gov>). The significant cloud cover over the snow-covered region is a serious problem that severely restricts the use of the MODIS snow cover product to monitor the snow cover. Various cloud removal methods were used to eliminate the cloud-contaminated pixels and filled the gaps under the cloud contaminated pixels including merging Terra and Aqua, applying spatial windows and temporal filtering which uses the value of the day-1 and day+1 for the cloud-cover pixels. Using the cloud-free snow cover dataset, the snow cover onset date (SCOD), and snow cover end date (SCED) were computed for each year and the regression equation was fitted on the data to reveal the spatial trend over the country.

3. Results and Discussion

The results suggest that generally in the western and northeastern parts of the country, a positive trend of SCOD can be seen, in other words, SCOD in these areas is moving towards winter and it starts with a greater delay. In some regions of northwestern Iran, the northern slopes of the Alborz mountain range, the western heights of Isfahan province, and some of the heights of Kerman, the SCOD is advancing towards the early autumn. The findings also showed that from the altitude belt of 1700 to 2400 meters in Iran, the positive trend of the beginning of the snow season can be seen. In clearer words, it means that in this altitude range, the SCOD in the country is progressing towards winter, while from the altitude of 2400 meters and above, the SCOD is retreating towards the beginning of the autumn. But the analysis of the changes for SCED shows that the highest rate of decrease can be seen in the northwestern parts of Iran. The results suggest that many parts of the country have a positive trend for SCED, which means that the SCED is advancing towards the end of the water year. The positive trend can be seen on many heights of the Zagros and Alborz mountain ranges and the heights of Kerman province. However, the negative trend for SCED can be seen sporadically on the Zagros highlands, parts of the northwest and the northeast highlands of Iran.

4. Conclusion

The purpose of this research is to investigate the changes in the beginning, end and length of the snow season in Iran. For this purpose, the snow cover data for the period of 20/03/2000 to 19/03/2020 was obtained on a daily scale and at a spatial resolution of 500 meters via the NASA website. Various cloud removal methods were applied on the data to reduce cloud contamination. The results suggest that SCOD shows a combination of increasing and decreasing trends throughout the country. In the western and northeastern parts of the country, the positive trend of the SCOD can be seen, in other words, the SCOD in these regions are progressing towards winter and the rate of the trend in some of these areas even reaches 2 days a year. In parts of northwestern Iran, the northern slopes of the Alborz mountain range, the western highlands of Isfahan province, and some highlands of Kerman, the SCOD is retreating towards the early autumn. The findings also revealed that the SCED have a positive trend which means that the melting of snow cover is delayed and is progressing towards the end of the water year.

Keywords: MODIS Terra, MODIS Aqua, Snow cover onset date (SCOD), and snow cover end date (SCED), Trend.

5. References

- Adler, C., Huggel, C., Orlove, B., & Nolin, A (2019). Climate change in the mountain cryosphere: Regional Environmental Change, 19,1225-1228.
<https://doi.org/10.1007/s10113-019-01507-6>
- Ahluwalia, R. S., Rai, S., Meetei, P. N., Kumar, S., Sarangi, S., Chauhan, P., & Karakoti, I (2021). Spatial-diurnal variability of snow/glacier melt runoff in glacier regime river valley: Central Himalaya, India. Quaternary international, 585, 183-194.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.01.003>
- Ahmadi, M; Seyedmirzaei, Zahrasadat (2022). Snow Cover Variability in the Cold Period of the Year in Iran Based on MODIS Measurements. Iranian Journal of Remote Sensing & GIS. Volume 14, Number 53. 59-72 (in Persian).
<https://doi.org/10.52547/gisj.14.1.59>

- 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*, 28(16), 4626-4639.
<https://doi.org/10.1002/hyp.10123>
- Bibi, L., Khan, A. A., Khan, G., Ali, K., Qureshi, J., & Jan, I. U (2019). Snow cover trend analysis using modis snow products: A case of Shayok River Basin in Northern Pakistan. *Journal of Himalayan Earth Science*, 52(2).
[http://nceg.uop.edu.pk/gb-52\(2\)-2019.html](http://nceg.uop.edu.pk/gb-52(2)-2019.html)
- Chen, S., Wang, X., Guo, H., Xie, P., & Sirelkhatim, A. M (2020). Spatial and temporal adaptive gap-filling method producing daily cloud-free NDSI time series. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 2251-2263.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2993037>
- Desinayak, N., Prasad, A. K., El-Askary, H., Kafatos, M., & Asrar, G. R (2022). Snow cover variability and trend over the Hindu Kush Himalayan region using MODIS and SRTM data. Paper presented at the *Annales Geophysicae*.
<https://doi.org/10.5194/angeo-40-67-2022>
- 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*, 6(12), 12752-12775.
<https://doi.org/10.3390/rs61212752>
- Dong, C., & Menzel, L (2016). Producing cloud-free MODIS snow cover products with conditional probability interpolation and meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, 186, 439-451.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.09.019>
- Guo, S., Du, P., Xia, J., Tang, P., Wang, X., Meng, Y., & Wang, H (2021). Spatiotemporal changes of glacier and seasonal snow fluctuations over the Namcha Barwa–Gyala Peri massif using object-based classification from Landsat time series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 177, 21-37.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.04.018>
- Hou, J., Huang, C., Zhang, Y., Guo, J., & Gu, J (2019). Gap-filling of MODIS fractional snow cover products via non-local spatio-temporal filtering based on machine learning techniques. *Remote Sensing*, 11(1), 90.
<https://doi.org/10.3390/rs11010090>
- Hussainzada, W., Lee, H. S., Vinayak, B., & Khpalwak, G. F (2021). Sensitivity of snowmelt runoff modelling to the level of cloud coverage for snow cover extent from daily MODIS product collection 6. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36, 100835.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100835>
- Jin, H., Chen, X., Zhong, R., Wu, P., Ju, Q., Zeng, J., & Yao, T (2022). Extraction of snow melting duration and its spatiotemporal variations in the Tibetan Plateau based on MODIS product. *Advances in Space Research*, 70(1), 15-34.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.04.018>
- Ke, C.-Q., Li, X.-C., Xie, H., Ma, D.-H., Liu, X., & Kou, C (2016). Variability in snow cover phenology in China from 1952 to 2010. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(2), 755-770.
<https://doi.org/10.5194/hess-20-755-2016>
- Keikhosravi-Kiany, MS; Masoodian, SA (2016). Identification of Spatial Variations of Snow-covered days over Iran based on Remote Sensing Data. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, Volume 5, Number 17. 69-86 (in Persian).
<https://doi.org/10.22067/geo.v5i1.49715>
- Keikhosravi-Kiany, MS; Masoodian, SA (2020). Trend analysis of snow accumulation season start in Iran using remote sensing data. *Geography and Environmental Planning*, Volume 31, Number 77. 1-14 (in Persian).
<https://doi.org/10.22108/gep.2020.120775.1249>
- Li, C., Yan, F., Zhang, C., Kang, S., Rai, M., Zhang, H., . . . He, C (2022). Coupling of decreased snow accumulation and increased light-absorbing particles accelerates glacier retreat in the Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 809, 151095.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151095>
- Li, H., Ke, C.-Q., Zhu, Q., Li, M., & Shen, X (2022). A deep learning approach to retrieve cold-season snow depth over Arctic sea ice from AMSR2 measurements. *Remote Sensing of Environment*, 269, 112840.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112840>
- Lu, X., Zhang, W., Wang, S., Zhang, B., Niu, Q., Liu, J., . . . Gao, H (2021). Spatial-temporal variability of snow cover over the Amur River Basin inferred from MODIS daily snow products in recent decades. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 12(6), 418-429.
<http://www.scar.ac.cn/EN/10.3724/SP.J.1226.2020.00418>

- Ma, N., Yu, K., Zhang, Y., Zhai, J., Zhang, Y., & Zhang, H (2020). Ground observed climatology and trend in snow cover phenology across China with consideration of snow-free breaks. *Climate dynamics*, 55, 2867-2887.
<https://doi.org/10.1007/s00382-020-05422-z>
- Marchane, A., Boudhar, A., Baba, M. W., Hanich, L., & Chehbouni, A (2021). Snow lapse rate changes in the Atlas Mountain in morocco based on MODIS time series during the period 2000–2016. *Remote Sensing*, 13(17), 3370.
<https://doi.org/10.3390/rs13173370>
- Mohammadi, Payman; Khorani, Asadollah (2019). Snow Cover Changes of Zagros Range in 2001-2016 Using Daily Data of MODIS. *Journal of the Earth and Space Physics*. Volume 45, Issue 2. 355-371 (in Persian).
[doi:10.22059/jesphys.2019.256133.1006997](https://doi.org/10.22059/jesphys.2019.256133.1006997)
- Muhammad, S., & Thapa, A (2020). An improved Terra–Aqua MODIS snow cover and Randolph Glacier Inventory 6.0 combined product (MOYDGL06*) for high-mountain Asia between 2002 and 2018. *Earth System Science Data*, 12(1), 345-356.
doi.org/10.5194/essd-12-345-2020
- Peng, S., Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Zhou, L., & Wang, T (2013). Change in snow phenology and its potential feedback to temperature in the Northern Hemisphere over the last three decades. *Environmental Research Letters*, 8(1), 014008.
[DOI 10.1088/1748-9326/8/1/014008](https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014008)
- Pradhananga, D., & Pomeroy, J. W (2022). Diagnosing changes in glacier hydrology from physical principles using a hydrological model with snow redistribution, sublimation, firnification and energy balance ablation algorithms. *Journal of hydrology*, 608, 127545.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127545>
- Shukla, S., Jain, S. K., & Kansal, M. L (2021). Hydrological modelling of a snow/glacier-fed western Himalayan basin to simulate the current and future streamflows under changing climate scenarios. *Science of the Total Environment*, 795, 148871.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148871>
- Singh, D., Zhu, Y., Liu, S., Srivastava, P. K., Dharpure, J. K., Chatterjee, D, ... Gagnon, A. S (2022). Exploring the links between variations in snow cover area and climatic variables in a Himalayan catchment using earth observations and CMIP6 climate change scenarios. *Journal of hydrology*, 608, 127648.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127648>
- Tang, Z., Deng, G., Hu, G., Zhang, H., Pan, H., & Sang, G (2022). Satellite observed spatiotemporal variability of snow cover & snow phenology over high mountain Asia from 2002 to 2021. *Journal of hydrology*, 613, 128438.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128438>
- Wang, H., Zhang, X., Xiao, P., Zhang, K., & Wu, S (2022). Elevation-dependent response of snow phenology to climate change from a remote sensing perspective: A case survey in the central Tianshan mountains from 2000 to 2019. *International Journal of Climatology*, 42(3), 1706-1722.
<https://doi.org/10.1002/joc.7330>
- Xu, W., Ma, H., Wu, D., & Yuan, W (2017). Assessment of the daily cloud-free MODIS snow-cover product for monitoring the snow-cover phenology over the Qinghai-Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 9(6), 585.
<https://doi.org/10.3390/rs9060585>
- 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.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2496950>
- Zhang, Y., Cao, T., Kan, X., Wang, J., & Tian, W (2017). Spatial and temporal variation analysis of snow cover using MODIS over Qinghai-Tibetan Plateau during 2003-2014. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 45, 887-897.
<https://doi.org/10.1007/s12524-016-0617-y>
- Zhao, W., Zhang, Y., Li, L., Su, W., Li, B., & Fu, Z (2020). Snow melting on the road surface driven by a geothermal system in the severely cold region of China. *Sustainable energy technologies and assessments*, 40, 100781.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100781>



شناسایی تغییرات شروع، پایان و طول دوره فصل برف‌گیری در ایران به کمک داده‌های «سنجنده مودیس»

دکتر محمدصادق کیخسروی کیانی

مقاله پژوهشی

چکیده

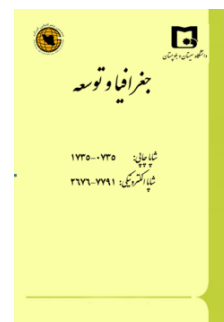
هدف از پژوهش حاضر واکاوی شروع، پایان و طول دوره فصل برف‌گیری در ایران است. برای این منظور، داده‌های روزانه «سنجنده مودیس» برای بازه زمانی ۱۳۷۹/۱/۱ تا ۱۳۹۹/۱۲/۲۹ در تفکیک مکانی ۵۰۰ متری، از تارنمای ناسا دریافت گردید. در گام اول، به کمک پلاپه‌های زمانی و مکانی اثر ابرناکی از داده‌های اولیه حذف گردید و در گام بعدی، چیدمان داده‌ها از مبدأ اول فروردین به سال آبی؛ یعنی اول ماه مهر تبدیل شد و برای هر سال آبی، ماتریسی در ابعاد ۳۶۵×۷۵۴۱۵۰۲ ساخته شد که سطرها نماینده هر روز سال و ستون‌ها نماینده یاخته‌های مکانی بود و در مرحله بعدی، اولین روزی که یک یاخته پوشیده از برف شده بود (بر پایه روزهای سپری شده از اول مهر) برای هر سال آبی استخراج شد. این فرآیند، به تفکیک هر سال آبی انجام گرفت و در نهایت، ماتریسی در ابعاد ۲۰×۷۵۴۱۵۰۲ ساخته شد که سطرها نماینده اولین روزی است که «سنجنده مودیس» بر روی یک یاخته، برف گزارش کرده است و ستون‌ها نیز نماینده یاخته‌های مکانی بود. همین فرآیند برای محاسبه پایان فصل برف‌گیری انجام گرفت با این تفاوت که به جای محاسبه اولین روزی که یک یاخته پوشیده از برف شده است، آخرین روزی که یک یاخته پوشش برف گزارش کرده و پس از آن دیگر برفی بر روی آن ثبت نشده است، محاسبه گردید. یافته‌ها نشان می‌دهد به‌طور کلی در بخش‌های غربی، شروع فصل برف‌گیری در حال کشیده شدن به سوی زمستان است اما در بخش‌های شمال غرب کشور، در دامنه‌های شمالی البرز و در بخش‌هایی از زاگرس جنوبی، شروع فصل برف‌گیری در حال پیشروی به سوی فصل پاییز است. در بسیاری از مناطق مرتفع غربی، شمال غربی و همچنین بر روی رشته‌کوه‌های البرز، پایان فصل برف‌گیری در حال پیشروی به سوی اواخر زمستان و فصل بهار است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۷

تاریخ بازنگری داوری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰

صفحات: ۱۸۷-۲۰۶



واژه‌های کلیدی:

شروع فصل برف‌گیری، پایان فصل برف‌گیری، پوشش برف، سنجنده مودیس، ایران.

مقدمه

یخچال‌ها و پوشش‌های برفی، مؤلفه‌های مهم یخ‌کره به حساب آمده و به سبب بازتابش بالا و هدایت گرمایی ضعیف، تأثیرات مهمی بر روی گردش‌های جوی، فرآیندهای آب‌شناختی سطحی و ترازمندی آب دارند (1: *Ahluwalia, 2021: 183; Guo, 2021: 21; Li et al, 2022: 1*). از آن‌جا که پوشش‌های برفی نسبت به تغییرات دما و گردش‌های جوی در مقیاس سیاره‌ای بسیار حساس هستند؛ بنابراین از جمله فراسنج‌های بسیار مهمی به‌شمار می‌آیند که تغییرات اقلیمی را بازتاب می‌دهند (2: *Shukla et al, 2021: 2; Singh et al, 2022: 2*). گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم نشان می‌دهد که دمای هوا در مقیاس جهانی، همچنان افزایش خواهد یافت. افزایش دما سبب ذوب و از میان رفتن پوشش‌های برفی در مناطق کوهستانی خواهد شد و چالش‌هایی را برای جوامع اجتماعی و زیستی ایجاد خواهد کرد (1: *Adler et al, 2019: 1225; Li et al, 2022: 1; Zhao et al, 2020: 1*). انباشت پوشش برف طی فصول سرد در مناطق کوهستانی و ذوب آرام‌آرام آن در طی بهار و تابستان، سبب ایجاد جریان دائمی آب

می‌شود و حیات بسیاری از جوامع و سکونتگاه‌ها، وابسته به پوشش‌های برفی در ارتفاعات است؛ بنابراین هر تغییری در پوشش‌های برفی و یا در زمان‌بندی آن می‌تواند، زنجیره‌ای از تغییرات را به دنبال خود پدید آورد. در طی دو دهه گذشته با رشد و توسعه فناوری‌های دورسنجی و پرتاب ماهواره‌های هواشناسی، امکان رصد تغییرات محیطی به صورت زمانی و مکانی فراهم شده و داده‌های ماهواره‌ای با در اختیار گذاشتن داده‌های پیوسته به صورت زمانی و مکانی، پای خود را در مطالعات اقلیمی باز کرده‌اند. در طی سال‌های گذشته به کمک داده‌های ماهواره‌ای نیز در جای‌جای جهان، پژوهش‌های گسترده‌ای در ارتباط با: تغییرات پوشش‌های برفی، تغییرات رژیم برف‌گیری، تغییرات ارتفاع برف‌مرز، تغییرات آغاز فصل برف‌گیری و مواردی از این دست انجام شده‌است. برای نمونه در پژوهشی مارچین و همکاران (۲۰۲۱)، به تفکیک قلمروهای ارتفاعی، روند تغییرات زمان آغاز و پایان فصل برف‌گیری و همچنین طول دوره آن‌را، بر روی رشته‌کوه‌های اطلس در کشور مراکش به کمک داده‌های «سنجنده مودیس» و برای دوره زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ محاسبه نمودند. محاسبات گویای آن بود که پایان و طول دوره فصل برف‌گیری از سال ۲۰۰۷ در منطقه مورد مطالعه، روندی کاهشی را نشان می‌دهد. این در حالی است که شروع فصل برف‌گیری در منطقه، دارای روندی افزایشی است (Marchane et al, 2021: 1). در مطالعه‌ای جین و همکاران (۲۰۲۲)، به کمک داده‌های «سنجنده مودیس»، تغییرات زمان‌بندی آغاز و پایان فصل برف‌پوشان را در منطقه فلات تبت برای دوره زمانی ۲۰۱۴-۲۰۰۳ بررسی نمودند. یافته‌ها نشان داد، به طور میانگین زمان ذوب پوشش‌های برفی بر روی فلات تبت، روز ۱۰۳ سال بوده که منطبق بر اوایل ماه آوریل است و فرآیند ذوب پوشش‌های برفی در روز ۲۲۳ سال است که منطبق با اوایل ماه آگوست می‌باشد. همچنین محاسبات ایشان گویای آن است که میانگین طول دوره ذوب برف در منطقه مورد مطالعه، ۱۲۱ روز بوده که این زمان نیز میل به کوتاه‌تر شدن دارد (Jin et al, 2022: 33). وانگ و همکاران (۲۰۲۲) نیز به کمک داده‌های «سنجنده مودیس»، برای بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ روند تغییرات شمار روزهای برف‌پوشان، تاریخ آغاز و پایان فصل برف‌گیری را در دامنه‌های شمالی بخش‌های مرکزی «رشته‌کوه‌های تیانشان» برای هر یک از طبقات ارتفاعی ارزیابی کردند. محاسبات گویای آن بود که شمار روزهای برف‌پوشان یا به عبارت دیگر، تعداد روزهایی که زمین دارای پوشش برف است، در منطقه مورد بررسی با آهنگ ۰/۵۶ روز در سال در حال افزایش است که این نرخ افزایشی در طبقات ارتفاعی میان ۲۶۰۰ تا ۳۵۰۰ بیش‌تر و در حدود ۱/۲ روز در سال بود. همچنین تاریخ آغاز فصل برف‌گیری در منطقه در طبقات میانی (۱۹۰۰-۱۵۰۰ متر) دارای نرخ کاهشی ۰/۷- روز به‌ازای هر سال بود و تاریخ پایان فصل برف‌گیری نیز روند معناداری را نشان نمی‌داد (Wang et al, 2022: 1712). همچنین مطالعاتی که در گذشته بر پایه داده‌های ایستگاهی انجام شده‌است، نشان می‌دهد در نیمکره شمالی، شمار روزهای برف‌پوشان روندی کاهشی داشته و زمان آغاز فصل برف‌گیری یا همان فصل برف‌پوشان با تأخیر زمانی شروع می‌شود (Ke et al, 2016: 755; Peng et al, 2013: 1; Ma et al, 2020: 2867). مطالعات بسیاری نیز در ارتباط با روند تغییرات شمار روزهای برف‌پوشان و مساحت پوشش‌های برفی، به صورت کلی و بر روی هر یک از طبقات ارتفاعی انجام گرفته‌است. برای نمونه، در پژوهشی بی‌بی و همکاران (۲۰۱۹)، روند تغییرات گستره پوشش برف را در حوضه «شایوک» در شمال پاکستان، برای بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ به کمک داده‌های هشت روزانه «سنجنده مودیس» ارزیابی نمودند. پیش از به‌کارگیری داده‌ها، به منظور حذف اثر ابرناکی از داده‌های خام پوشش برف، داده‌های دو ماهواره «تررا» و «آکوا» در یک‌دیگر ادغام گردید. نتایج این

تحقیق نشان می‌دهد؛ در سال ۲۰۱۵ یک روند اندک‌افزایشی در گستره پوشش برف قابل مشاهده است و پس از آن، یک روند کاهشی در سری زمانی داده‌ها دیده می‌شود (Bibi et al, 2019: 157).

در پژوهشی نیز دسینایاک و همکاران (۲۰۲۲) روند تغییرات پوشش برف را بر روی منطقه «هندوکش» در هیمالیا به کمک داده‌های «سنجنده مودیس» برای دوره زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ ارزیابی کردند. یافته‌های این پژوهش گویای آن بود که به‌طور کلی روند کاهشی غیر معنادار در سری زمانی داده‌های پوشش برف در کل منطقه دیده می‌شود. همچنین بررسی تغییرات پوشش برف به‌صورت یاخته‌به‌یاخته در منطقه نشان داد، در بخش‌های مرکزی هیمالیا روند معنادار افزایشی و بر روی بخش‌های شرقی روند کاهشی پوشش برف قابل رؤیت است. همچنین بررسی تغییرات پوشش برف در هر یک از کمربندهای ارتفاعی با گام‌های ارتفاعی ۱۰۰ متری، گویای آن بود که در طبقات ارتفاعی ۴۵۰۰-۴۰۰۰ متر و ۶۰۰۰-۵۵۰۰ متر، روند کاهشی پوشش برف قابل مشاهده است (Desinayak et al, 2022: 1,8). مطالعات مختلفی نیز توسط پژوهشگران ایرانی به‌منظور بررسی روند تغییرات روزهای برفپوشان و گستره‌های پوشش برف در ایران انجام شده‌است، برای نمونه؛ در مطالعه‌ای کیخسروی کیانی و مسعودیان (۱۳۹۵)، روند تغییرات شمار روزهای برفپوشان در ایران را برای دوره زمانی ۱۳۸۲-۱۳۹۳ به کمک داده‌های «سنجنده مودیس ترا» و «مودیس آکو» محاسبه نمودند. یافته‌های این پژوهش نشان داد، در فصل زمستان بیش از ۲۲ درصد از گستره ایران دارای روند کاهشی است. بیش‌ترین نرخ کاهش شمار روزهای برفپوشان بر روی زاگرس در فصل زمستان و به‌میزان ۴ روز در سال قابل مشاهده‌است (کیخسروی کیانی و مسعودیان، ۱۳۹۵: ۷۰). محمدی و خورانی (۱۳۹۸) نیز به کمک داده‌های روزانه پوشش برف «سنجنده مودیس»، روند تغییرات پوشش برف بر روی رشته‌کوه‌های زاگرس را برای بازه زمانی ۲۰۱۶-۲۰۰۱ ارزیابی کردند. محاسبات ایشان نشان می‌دهد؛ در سطح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد روند معنادار تغییرات قابل مشاهده نیست اما از سال ۲۰۰۹ به بعد نقطه عطفی در تغییرات قابل مشاهده است و تا سال ۲۰۱۶ در همه ماه‌ها بجز ماه نوامبر، روند کاهشی تغییرات پوشش برف دیده می‌شود. همچنین بررسی تغییرات در بازه زمانی ۲۰۱۶-۲۰۰۹ نسبت به دوره ۲۰۰۸-۲۰۰۱ گویای آن است که بیش‌ترین نرخ کاهش تغییرات پوشش برف در ماه ژانویه و برای کمربند ارتفاعی ۱۱۶۲ تا ۴۲۱۲ متر قابل رؤیت است (محمدی و خورانی، ۱۳۹۸: ۳۵۵). در مطالعه‌ای نیز احمدی و میرزایی (۱۴۰۱)، روند تغییرات پوشش برف در ایران را به کمک داده‌های «سنجنده مودیس ترا» برای دوره زمانی ۲۰۱۸-۲۰۰۳ ارزیابی نمودند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد؛ روند تغییرات پوشش برف در همه ماه‌ها منفی بوده و بیشینه شدت روند کاهشی در ماه ژانویه قابل مشاهده است. نقطه عطف تغییرات نیز از سال ۲۰۰۸ و برای ماه ژانویه به‌دست آمد (احمدی و میرزایی، ۱۴۰۱: ۵۹). بررسی تغییرات مکانی آغاز و پایان و همچنین طول دوره فصل برف‌گیری هنوز به‌طور جامع و کامل بر روی ایران انجام نگرفته‌است. در پژوهش حاضر به‌دنبال پاسخ به این پرسش هستیم که در چه مناطقی از ایران شروع و پایان فصل برف‌گیری، دارای روند تغییرات معنادار است؟ و این که توزیع این تغییرات چه رابطه‌ای را با ارتفاع از دریا نشان می‌دهد؟ همچنین پرسش مهم دیگری که تحقیق کنونی در پی پاسخ به آن است این است که طول دوره فصل برفپوشان در طی سال‌های مورد بررسی بلندتر یا کوتاه‌تر شده‌است؟ یافته‌های این پژوهش می‌تواند درک و شناخت ما را از تغییرات چنین فراسنج‌های مهمی در ایران بهبود بخشد. این مسأله از این جهت دارای اهمیت بیش‌ازپیش است که افزون بر اهمیت میزان پوشش برف و گستره آن یا هرگونه روندی در تغییرات مقادیر پوشش برف، زمان‌بندی شروع، پایان و طول دوره فصل برف‌گیری نیز اهمیت به‌سزایی دارد. درواقع؛

بررسی این مسأله بازتاب‌دهنده رژیم برف‌گیری نیز به‌شمار آمده و خود می‌تواند به‌نوعی بازتابی از تغییر شرایط دمایی و بارشی نیز باشد.

داده‌ها و روش‌شناسی

در تحقیق حاضر به‌منظور بررسی تغییرات آغاز و پایان پوشش برف در کشور، داده‌های نسخه ششم «سنجنده مودیس تررا» (MOD10A1) و «مودیس آکوا» (MYD10A1) برای دوره آماری ۱۳۷۹/۱/۱ تا ۱۳۹۹/۱۲/۲۹ به‌صورت روزانه از تارنمای ناسا به‌نشانی (<https://search.earthdata.nasa.gov>) دریافت شد. یکی از مشکلات مهمی که مانع بزرگی برای رصد و بررسی تغییرات پوشش برف است، مسأله ابرناکی و پوشش ابر است. پوشش ابر سبب می‌شود تا گستره‌های برفی از میدان دید ماهواره پنهان بماند. برای غلبه بر این مسأله و پایش پوشش‌های برفی، روش‌های مختلفی در متون علمی پیشنهاد شده‌است که بسته به هر قلمرو جغرافیایی، یک یا چند روش مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از راهکارها و تکنیک‌های اولیه، ادغام داده‌های دو ماهواره «تررا» و «آکوا» است. زمان گذر «ماهواره تررا» از روی هر منطقه ساعت ۳۰: ۱۰ دقیقه به‌وقت محلی است. این در حالی است که «ماهواره آکوا» با سه ساعت تأخیر، یعنی در ساعت ۳۰: ۱۳ دقیقه پس از نیمروز، از منطقه عبور می‌کند. این احتمال وجود دارد که «ماهواره تررا» هنگام عبور از روی منطقه یاخته‌ای را به‌عنوان یاخته ابری شناسایی کند اما هنگامی که «ماهواره آکوا» سه ساعت بعد از منطقه عبور می‌کند، ممکن است همان یاخته را به‌عنوان یاخته برفی شناسایی کند، در چنین حالتی می‌توان به‌طور کلی گفت وجود پوشش ابر در هنگام صبح موجب‌شده تا پوشش‌های برفی در زیر ابر از میدان دید ماهواره پنهان باشند؛ بنابراین می‌توانیم یاخته‌هایی که دارای چنین شرطی هستند را در «ماهواره تررا» تبدیل به یاخته‌های برفی نماییم. انجام این روش به‌منظور کاستن از اثر ابرناکی در داده‌های ماهواره‌ای، توسط پژوهشگران بسیاری پیشنهاد و توصیه شده است (*Dong & Menzel, 2016: 439; Xu et al, 2017: 3; Dietz et al, 2014: 6; Bergeron et al, 2014: 6; Yu et al, 2015: 2171; Muhammad & Thapa, 2020: 345; Hussainzada et al, 2021: 1; Tang et al, 2022: 1*). با انجام عملیات‌های برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار «متلب» به‌تفکیک هر روز در دوره زمانی مورد بررسی، داده‌های دو ماهواره «تررا» و «آکوا» در هم ادغام گردید. در گام بعدی یک پنجره ۲×۲ بر روی ماتریس داده‌های پوشش برف برای کاستن بیشتر ابرناکی اعمال گردید، به این‌صورت که هر یک از یاخته‌هایی که پدیده ابر را گزارش می‌کردند، با سه یاخته همسایه قیاس می‌شدند و اگر سه یاخته دیگر مورد بررسی، پدیده برف را گزارش می‌کردند، آن یاخته ابری تبدیل به یاخته پوشیده از برف می‌شد. در گام سوم نیز پالایه زمانی بر روی ماتریس داده‌ها اعمال گردید. به این‌صورت که یاخته‌هایی که «سنجنده مودیس» آن‌ها را به عنوان یاخته‌های ابری شناسایی می‌کرد، استخراج می‌شد و روز قبل و روز بعد دقیقاً همان یاخته بررسی می‌شد. اگر در روز قبل و بعد، آن یاخته پدیده برف را گزارش کند، آن یاخته ابری در روز مورد بررسی به یاخته برفی تبدیل می‌شود. برای کاهش مؤثر و بیش‌تر اثر ابرناکی، تکنیک و شگرد پالایه زمانی در پنجره‌های زمانی ۱ تا ۵ روزه بر روی داده‌ها به‌کار گرفته شد. استفاده از روش پالایه زمانی به‌منظور کاهش اثر ابرناکی در مطالعات و پژوهش‌های بسیاری استفاده شده‌است (*Zhang et al, 2017: 887; Hou et al, 2019: 1; Chen et al, 2020: 2251; Lu et al, 2021: 418; Wang et al, 2022: 1711*). از آن‌جا که پنج کاشی، کل گستره ایران را پوشش می‌داد و در درون هر کاشی ۵,۷۶۰,۰۰۰ یاخته وجود داشت و داده‌های دو ماهواره نیز مورد استفاده قرار گرفت، انجام عملیات‌های

برنامه‌نویسی و اجرای آن‌ها جزء بخش‌های بسیار طولانی و زمان‌بر در این پژوهش به حساب می‌آید؛ بنابراین کلیه گام‌های پردازش و محاسبات، با استفاده از کدنویسی در محیط نرم‌افزار «متلب» و در آزمایشگاه آب و هواشناسی دانشگاه اصفهان انجام گرفت. پس از پردازش داده‌های خام پوشش برف دو سنجنده «مودیس تررا» و «مودیس آکوا» و ساخت پایگاه پوشش برف، محاسبات مربوط به تغییرات آغاز و پایان فصل برف‌گیری انجام پذیرفت. در مرحله اول مبدأ داده‌های پوشش برف به سال آبی تغییر یافت. به این شکل که داده‌ها به صورت سال آبی از اول مهر تا روز پایان شهریور هر سال چیدمان گردید. در گام بعدی بر روی هر یک از یاخته‌ها، اولین روزی که یک یاخته پوشیده از برف شده بود (بر پایه روزهای سپری‌شده از اول مهر) استخراج و آن روز به عنوان شروع فصل برف‌گیری در سال آبی در نظر گرفته می‌شد و برای هر سال آبی ماتریسی در ابعاد 1×7541502 ساخته شد که بر روی هر یک از ستون‌ها روز مربوط به اولین بارش برف ثبت شده بود. برای هر سال آبی از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۹ همین فرآیند تکرار شد و در نهایت ماتریسی در ابعاد 20×7541502 ساخته شد که سطرها نماینده هر یک از سال‌های آبی و ستون‌ها نماینده یاخته‌های مکانی بودند. برای محاسبه زمان پایان فصل برف‌پوشان، عیناً همین فرآیند تکرار گردید، با این تفاوت که آخرین روزی (بر پایه روزهای سپری‌شده از اول مهر) که یک یاخته پوشیده از برف است و پس از آن در سال آبی مورد بررسی دیگر برفی بر روی آن مشاهده نمی‌شود، محاسبه گردید. این فرآیند به تفکیک هر سال آبی انجام گرفت و در نهایت ماتریسی در ابعاد 20×7541502 ساخته شد. در گام پایانی نیز شیب خط تغییرات بر روی هر یک از یاخته‌ها محاسبه و یاخته‌هایی که در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار بودند استخراج گردید. در شکل (۱) فلوجارت مراحل انجام تحقیق نمایش داده شده است.

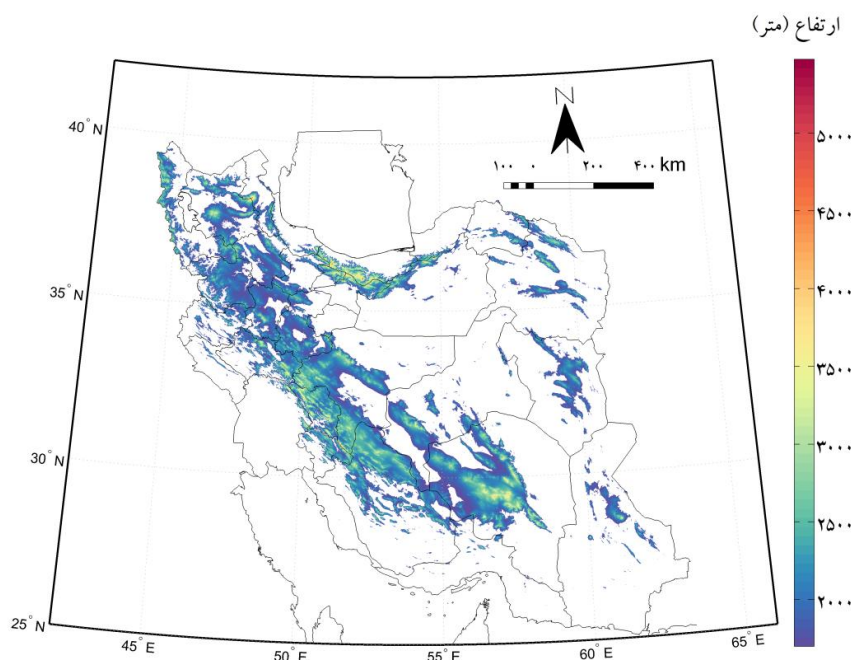


شکل ۱: فلوجارت انجام مراحل پژوهش

تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۳

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر، کل قلمرو ایران است اما از آنجا که یافته‌های کیخسروی کیانی و مسعودیان (۱۳۹۹) نشان می‌دهد شرایط مناسب انباشت پوشش برف در کشور به‌طور کلی از تراز ارتفاعی ۱۷۰۰ متر به بالا فراهم می‌شود. به‌کمک مدل رقومی، ارتفاع تنها یاخته‌هایی که در بالاتر از این آستانه ارتفاعی بودند، استخراج گردید و یاخته‌های زیر این آستانه در فرآیند محاسبات مشارکت داده نشدند. شکل ۲) گستره‌هایی از ایران که دارای ارتفاع بیش از ۱۷۰۰ متر هستند را نشان می‌دهد.



شکل ۲: گستره مناطق ایران با ارتفاع بیش از ۱۷۰۰ متر

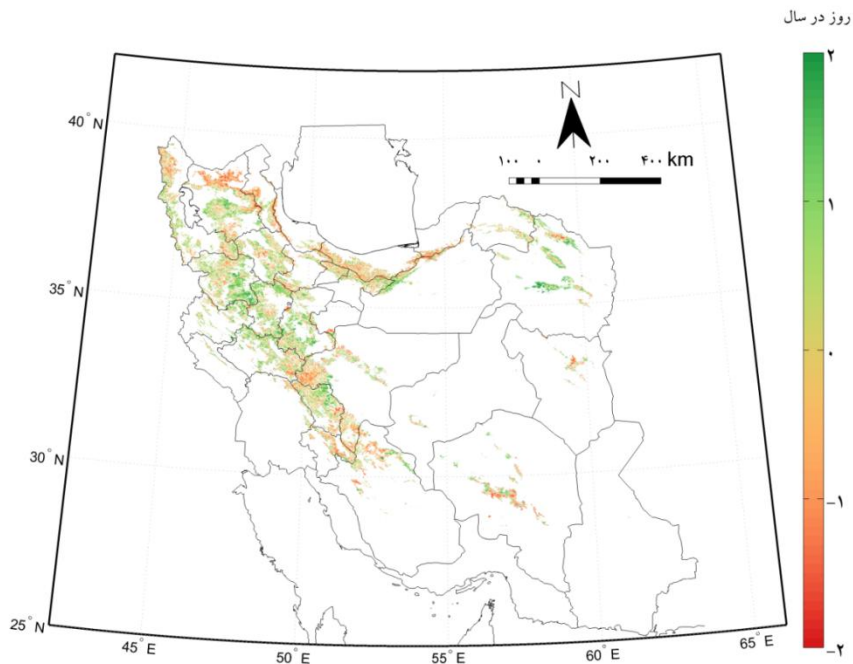
تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۳

بحث و نتیجه

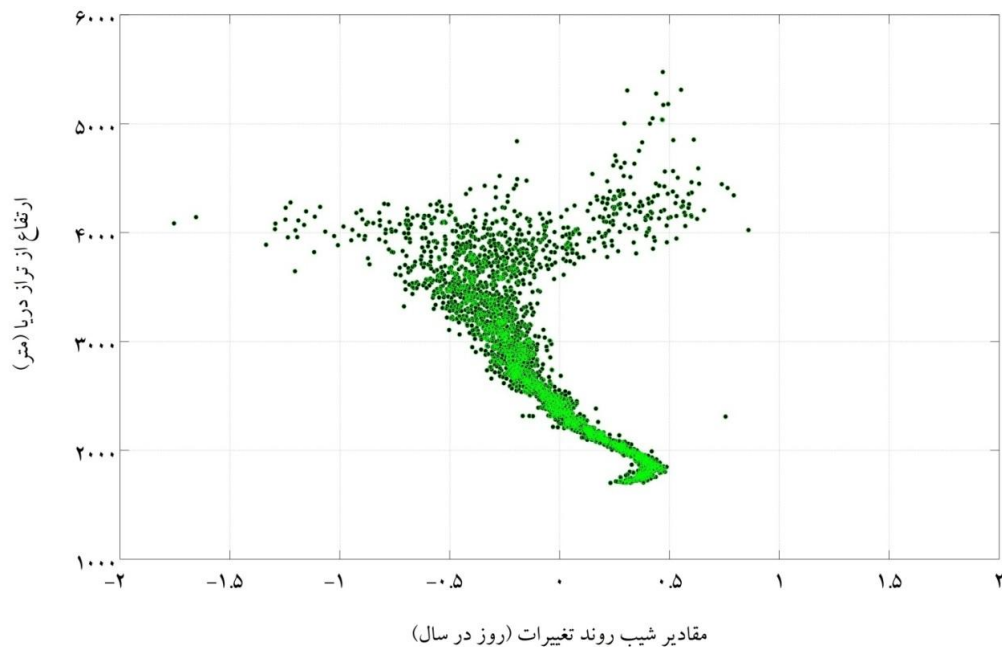
- روند مکانی تغییرات آغاز فصل برف‌گیری در ایران

محاسبات نشان می‌دهد به‌طور کلی در بخش‌های غربی و شمال شرقی کشور، روند مثبت شروع فصل برف‌گیری دیده می‌شود. به‌عبارت دیگر؛ شروع فصل برف‌گیری در بخش‌های یادشده در حال پیشروی به‌سوی زمستان است و با تأخیر بیش‌تری آغاز می‌شود که میزان نرخ روند در برخی از این مناطق حتی به ۲ روز در سال هم می‌رسد. به عبارت روشن‌تر؛ اگر بر روی یاخته‌ای شروع فصل برف‌گیری به‌طور میانگین در روز ۱ آذر باشد، انتظار می‌رود به‌ازای هر سال، شروع فصل برف‌گیری دو روز به‌تعویق بیفتد. پیشروی و یا پسروی شروع فصل برف‌گیری می‌تواند ناشی از تغییرات دمایی و بارشی باشد. در بخش‌هایی از شمال غرب ایران، دامنه‌های شمالی رشته‌کوه‌های البرز، ارتفاعات غربی استان اصفهان و برخی از ارتفاعات کرمان، شروع فصل برف‌گیری در حال پسروی به‌سوی اوایل پاییز است. بالاترین نرخ روند کاهش در بخش‌های شمال غربی ایران قابل رؤیت است (شکل ۳). محاسبات وانگ و همکاران

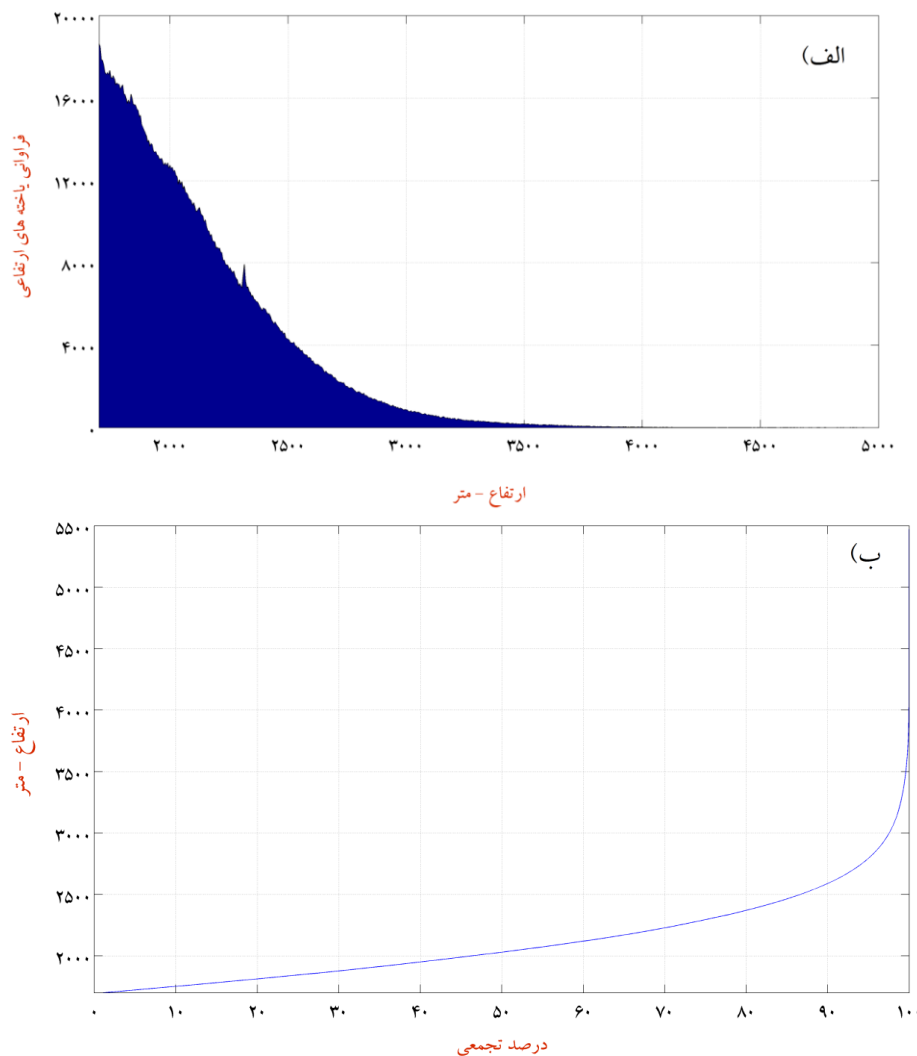
(۲۰۲۲) نیز به کمک داده‌های «سنجندۀ مودیس» برای بازۀ زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ در بخش‌های مرکزی کوه‌های «تینشان» نشان می‌دهد طی دورۀ آماری مورد مطالعه، تاریخ آغاز فصل برف‌گیری در منطقه در طبقات میانی (۱۹۰۰-۱۵۰۰ متر) دارای نرخ کاهشی ۰/۷- روز به‌ازای هر سال است (Wang et al, 2022: 1712). همچنین برای درک بهتر ارتباط میان آهنگ روند تغییرات شروع فصل برف‌گیری و ارتفاع از تراز دریا، برای هر یک از طبقات ارتفاعی از ۱۷۰۰ متر تا ۵۵۰۰ متر میانگین شیب روند محاسبه‌گردید (شکل ۴). مثلاً برای محاسبۀ میانگین آغاز فصل برف‌گیری در بازۀ ارتفاعی اول یعنی ارتفاع ۱۷۰۰ تا ۱۷۱۰ متر، همهٔ یاخته‌هایی که در ماتریس آغاز فصل برف‌گیری در این بازۀ ارتفاعی قرار داشتند، استخراج و مقادیر هر یک از یاخته‌ها محاسبه‌شد. همین فرآیند به‌کمک عملیات‌های برنامه‌نویسی برای سایر طبقات ارتفاعی انجام گرفت و خروجی محاسبات به‌صورت نمودار در شکل ۴) ترسیم گردید. محاسبات نشان می‌دهد به‌طور کلی از ارتفاع ۱۷۰۰ متر تا ۱۹۰۰ متری با افزایش ارتفاع شیب، روند تغییرات شروع فصل برف‌گیری افزایش می‌یابد اما از ارتفاع ۱۹۰۰ متری به بالا آهنگ روند تغییرات کاهش می‌یابد. نکتهٔ مهم دیگری که در نمودار شکل ۴ دیده می‌شود این است که از ارتفاع ۱۷۰۰ تا ۲۴۰۰ متر در ایران روند مثبت آغاز فصل برف‌گیری دیده می‌شود. به‌عبارت روشن‌تر یعنی این که در این بازۀ ارتفاعی، شروع فصل برف‌گیری در کشور در حال پیشروی به‌سوی زمستان است. این در حالی است که از ارتفاعات ۲۴۰۰ متر به بالا، شروع فصل برف‌پوشان در حال پسروی به‌سوی آغاز سال آبی یعنی اوایل پاییز است. نکتهٔ بسیار مهمی که از مقایسۀ درصد تجمعی توزیع طبقات ارتفاعی با نمودار شکل ۴ به‌دست می‌آید این است که در حدود ۸۰ درصد از گسترۀ ایران دارای ارتفاعی کم‌تر از ۲۴۰۰ متر است (شکل ۵ب)؛ بنابراین این که چند درصد از گستره و مساحت کشور در کدام گروه ارتفاعی جای می‌گیرد و رفتار فصل برف‌گیری در هر یک از طبقات چگونه است؟ مسأله‌ای است که نباید به سادگی از کنار آن عبور کرد. تغییرات شروع و پایان فصل برف‌گیری در طبقات پایین‌تر، تأثیر بسیار بسیار پررنگ‌تری بر روی منابع آبی کشور دارد تا طبقات بلندتر ارتفاعی، چراکه طبقات پایین‌تر گستره‌های بسیار وسیع‌تری را در کشور دربر می‌گیرند. همچنین چرایبی و دلیل پراکندگی نقاط و برهم‌خوردن نظم آن‌ها از تراز ارتفاعی ۳۵۰۰ متر به بالا، کم‌تربودن تعداد یاخته‌هایی است که در این طبقات هستند. برای نمونه؛ در طبقۀ ارتفاعی ۳۵۰۵-۳۵۰۰ متر، تنها ۱۷۶ یاخته جای می‌گیرند و میانگین نرخ روند بر پایه این تعداد یاخته حساب شده است. این در حالی است که میانگین نرخ روند برای طبقۀ ارتفاعی ۲۰۰۵-۲۰۰۰ متر بر پایهٔ تعداد ۱۲۷۴۶ یاخته محاسبه شده است؛ بنابراین نقاط بسیار بیشتری در فرآیند میانگین‌گیری مشارکت داشته‌اند و هر چه تعداد یاخته‌های بیشتری در فرآیند محاسبه میانگین حضور داشته باشند، مقادیر تغییرپذیری میان طبقات نیز کم‌تر خواهد بود (شکل ۵الف).



شکل ۳: روند تغییرات شروع فصل برف‌گیری در ایران طی دوره زمانی ۱۳۷۹-۱۳۹۹
تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۳



شکل ۴: توزیع روند تغییرات آغاز فصل برف‌گیری در هر یک از گروه‌های ارتفاعی در ایران (۱۷۰۰ تا ۵۵۰۰ متر)
تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۳

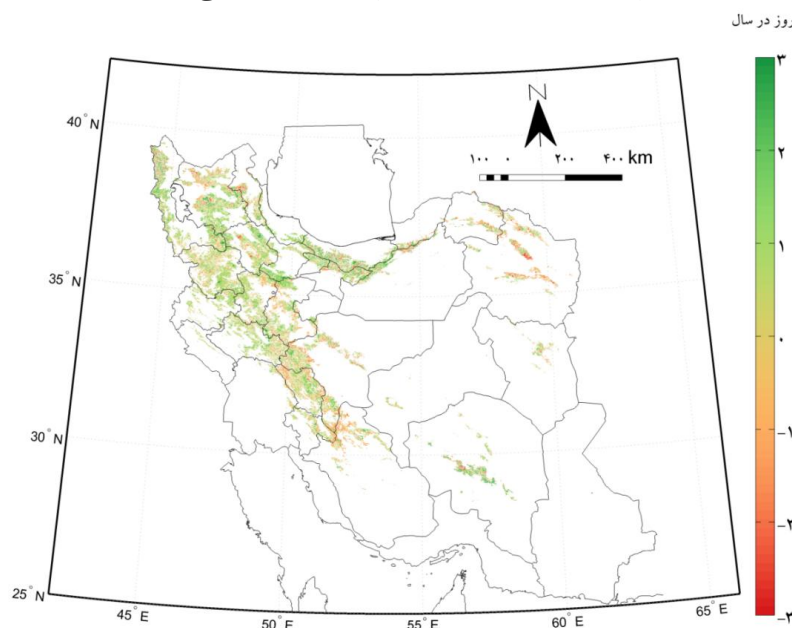


شکل ۵: پراکنش تعداد نقاط ارتفاعی (الف) و درصد تجمعی ارتفاعات در هر یک از طبقات ارتفاعی (ب) در ایران با گام‌های ارتفاعی ۵ متری
تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۳

– روند مکانی تغییرات پایان فصل برف‌گیری در ایران

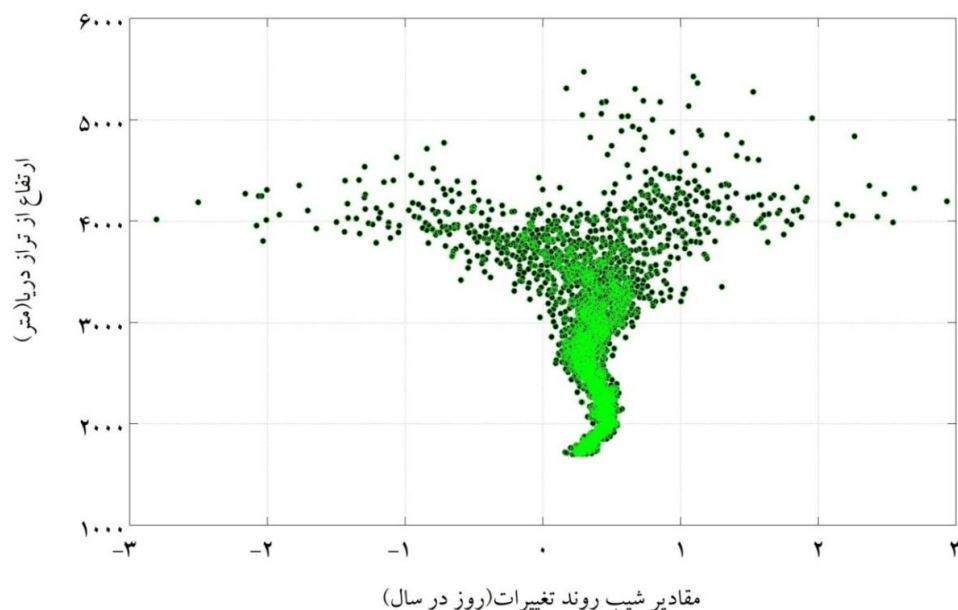
به‌منظور محاسبه روند تغییرات پایان فصل برف‌گیری در ایران، همان فرآیندی که برای محاسبه روند تغییرات آغاز فصل برف‌گیری در کشور انجام گرفت، عیناً انجام‌شد اما به‌جای محاسبه اولین روزی که یک یاخته پوشیده از برف می‌شود، آخرین روزی که یک یاخته پوشیده از برف است و سپس پوشش برف خود را برای همیشه در سال آبی از دست می‌دهد محاسبه‌گردید. این فرآیند بر روی ۷۵۴۱۵۰۲ یاخته «سنجنده مودیس» و برای ۲۰ سال آبی از ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۹ انجام‌گرفت و به‌کمک عملیات‌های برنامه‌نویسی شیب خط تغییرات بر روی هر یک از یاخته‌ها محاسبه‌شد. یادآوری می‌شود با توجه به تفکیک مکانی ۵۰۰ × ۵۰۰ متر «سنجنده مودیس» ممکن است یخچال‌های کوچکی که وسعت محدودی دارند توسط ماهواره شناسایی نشوند، همچنین این احتمال وجود دارد که یخچال‌های کوچکی که در ارتفاعات قرار دارند، با گذر زمان و با دورشدن از فصل پوشش برف، وسعتشان کاهش یابد و تشخیص آن‌ها توسط ماهواره نیز

دشوارتر باشد. به‌طور کلی برای بررسی این‌دست یخچال‌های کوچک، نیاز به بررسی‌های میدانی است. محاسبات نشان می‌دهد طی دوره آماری مورد بررسی، بخش‌های زیادی از گستره کشور دارای روند مثبت پایان فصل برف‌گیری هستند. به این معنی که پایان فصل برفپوشان (آخرین تاریخی که یک یاخته پوشیده از برف است) در حال پیشروی به‌سوی پایان سال آبی است. روند مثبت پایان فصل برف‌گیری بر روی بسیاری از ارتفاعات رشته‌کوه‌های زاگرس و البرز و بلندی‌های استان کرمان قابل رؤیت است (شکل ۶). اما روند منفی پایان فصل برف‌گیری یا به بیان روشن‌تر، روند تغییرات پایان فصل برفپوشان به‌سوی آغاز سال آبی، به‌طور پراکنده بر روی ارتفاعات زاگرس، بخش‌هایی از شمال غرب و بلندی‌های شمال شرق ایران دیده می‌شود (شکل ۶). برای درک بهتر ارتباط میان آهنگ روند و ارتفاع از تراز دریا برای هر یک از طبقات ارتفاعی از ۱۷۰۰ متر تا ۵۵۰۰ متر میانگین آهنگ روند محاسبه شد. واکاو‌ها نشان می‌دهد به‌طور کلی تا تراز ارتفاعی ۳۰۰۰ متر هیچ‌گونه روند منفی پایان فصل برف‌گیری یا به‌عبارت بهتر پسروی پایان فصل برفپوشان به‌سوی اوایل سال آبی دیده نمی‌شود اما از حدود تراز ارتفاعی ۳۳۰۰ متر در کشور به‌طور پراکنده بر روی برخی از یاخته‌ها، روند پسروی پایان فصل برفپوشان به‌سوی اوایل سال آبی قابل رؤیت است اما غلبه و چیرگی با روندهای مثبت است. به‌عبارت دیگر؛ پوشش‌های برف در بیش‌تر قلمروهای ارتفاعی در ایران ذوبی دیرهنگ‌تر را نشان می‌دهند. این مسأله در واقع بازتابی از شرایط تغییر رژیم بارش را می‌تواند نشان‌دهد چراکه بارش‌های بهاره در ارتفاعات ممکن است به شکل برف ظاهر شوند و دلیل روندهای مثبت فصل برفپوشان نیز می‌تواند همین موضوع باشد و این مسأله نیز الزاماً افزایش مقادیر پوشش برف را نشان نمی‌دهد بلکه بازتابی از شرایط تغییر رژیم بارش است که به‌طور مستقیم بر روی فصل برف‌گیری در ارتفاعات خود را نشان داده‌است. این یافته‌ها با نتایج کار تانگ و همکاران (۲۰۲۲) دارای هماهنگی و انطباق است. محاسبات ایشان برای دوره زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ بر روی ارتفاعات بلند آسیای شرقی گویای آن‌است که در مناطق بلند ارتفاعی، پایان فصل برف‌گیری دارای روندی مثبت است. در واقع پوشش‌های برفی میل به ذوبی دیرهنگ‌تر دارند یا به‌عبارت دیگر، آخرین تاریخی که یک یاخته دارای پوشش برف است در حال پیشروی به‌جلو می‌باشد (Tang et al, 2022: 1).



شکل ۶: روند تغییرات پایان فصل برف‌گیری در ایران طی دوره زمانی ۱۳۷۹-۱۳۹۹

تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۳

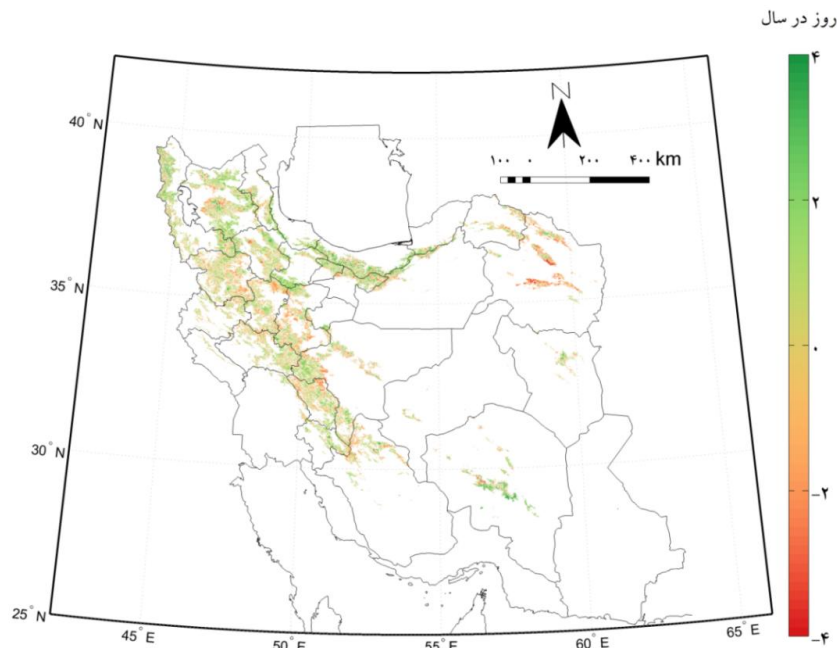


شکل ۷: توزیع روند تغییرات پایان فصل برف‌گیری در هر یک از گروه‌های ارتفاعی در ایران (۱۷۰۰ تا ۵۵۰۰ متر)
تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۳

– روند مکانی تغییرات طول فصل برف‌پوشان در ایران

برای واکاوی روند تغییرات مکانی طول فصل برف‌گیری در کشور، اختلاف تاریخ اولین روزی که یک یاخته پوشیده از برف می‌شود بر پایه روز ژولینی (اول مهر هر سال آبی) با آخرین تاریخی که یک یاخته در همان سال آبی پوشیده از برف است و پس از آن دیگر پوشیده از برف نمی‌باشد، بر پایه روز ژولینی (شمار روزهای سپری‌شده از اول مهر) محاسبه گردید. این فرآیند بر روی ۷۵۴۱۵۰۲ یاخته «سنجندۀ مودیس» محاسبه شد و به‌عنوان طول فصل برف‌گیری یا همان فصل برف‌پوشان در نظر گرفته شد. این فرآیند بر روی ۲۰ سال داده تکرار و به‌کمک عملیات‌های برنامه‌نویسی، شیب خط تغییرات بر روی هر یاخته محاسبه گردید. البته این نکته را نیز نباید فراموش کرد که نباید انتظار داشته باشیم در فصل برف‌گیری فاصله بین اولین تاریخی که بر روی یک یاخته پوشش برف دیده می‌شود تا آخرین تاریخی که بر روی همان یاخته پوشش برف ثبت شده است، پوشش برف به‌طور پیوسته وجود داشته باشد بلکه با احتمال بسیار بالا، در هر سال آبی ممکن است پوشش‌های برفی در چندین نوبت ذوب‌شده و دوباره پوشیده از برف شده باشند. یافته‌ها گویای آن است که طی دوره مورد مطالعه، غلبه و چیرگی با روند افزایشی طول فصل برف‌گیری در کشور است و در بیش‌تر پهنه‌های شمالی کشور بر روی رشته‌کوه‌های البرز و بخش‌های شمال غرب و همچنین بلندی‌های استان کرمان روند افزایشی طول فصل برف‌گیری دیده می‌شود. در پاره‌ای از مناطق شمالی، روند افزایشی طول فصل برف‌گیری به ۴ روز در سال نیز می‌رسد (شکل ۸). به‌عبارت دیگر یعنی این که اختلاف میان اولین روزی که یک یاخته پوشیده از برف می‌شود (آغاز فصل برف‌گیری) و آخرین روزی که یک یاخته پوشیده از برف است و پس از آن پوشش برف خود را از دست می‌دهد (پایان فصل برف‌گیری) در حال بیش‌تر شدن است. همچنین در پاره‌ای از بخش‌های غربی کشور و نیز بر روی ارتفاعات شمال شرقی ایران، روند کاهش معنادار طول فصل برف‌پوشان قابل رؤیت است (شکل ۸). برای درک پیوند و ارتباط میان آهنگ روند تغییرات با ارتفاع از تراز دریا، بر روی هر یک از کمربندها، ارتفاعی از تراز ارتفاعی ۱۷۰۰ متر تا ۵۵۰۰ متر میانگین آهنگ

روند محاسبه گردید. یافته‌ها نشان می‌دهد با افزایش ارتفاع از تراز دریا، آهنگ روند افزایشی طول فصل برف‌گیری نیز بیش‌تر می‌شود (شکل ۹). البته بر روی ارتفاعات پایین مشتمل بر ۱۷۰۰ متر تا حدود ۱۹۰۰ متر روند کاهش‌ی طول فصل برف‌گیری قابل‌رؤیت است. همچنین از تراز ارتفاعی حدود ۳۵۰۰ متر به بالا نیز به‌طور پراکنده روند کاهش‌ی طول فصل برف‌گیری دیده می‌شود اما در هر حال غلبه و چیرگی با روندهای افزایشی است (شکل ۹).



شکل ۸: روند تغییرات طول دوره فصل برف‌پوشان در ایران طی دوره زمانی ۱۳۷۹-۱۳۹۹

تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۳



شکل ۹: توزیع روند تغییرات طول فصل برف‌گیری در هر یک از گروه‌های ارتفاعی در ایران (۱۷۰۰ تا ۵۵۰۰ متر)

تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۳

نتیجه

انباشت پوشش برف طی فصول سرد در مناطق کوهستانی و ذوب آرام‌آرام آن در طی بهار و تابستان، سبب ایجاد جریان دائمی آب شده و حیات بسیاری از جوامع و سکونتگاه‌ها وابسته به پوشش‌های برفی در ارتفاعات است؛ بنابراین هر تغییری در پوشش‌های برفی و یا در زمان‌بندی آن می‌تواند زنجیره‌ای از تغییرات را به دنبال خود پدید آورد. هدف از تحقیق حاضر بررسی تغییرات آغاز، پایان و طول دوره فصل برف‌گیری در ایران است. برای این منظور، داده‌های پوشش برف برای دوره زمانی ۱۳۷۹/۱/۱ تا ۱۳۹۹/۱۲/۲۹ به صورت روزانه و در تفکیک مکانی ۵۰۰ متر از تارنمای ناسا دریافت و به کمک عملیات‌های برنامه‌نویسی تا حد امکان اثر ابرناکی از داده‌های خام اولیه حذف گردید. محاسبات آغاز فصل برف‌گیری در گستره ایران، به‌طور ترکیبی روندهای افزایشی و کاهش‌ی را نشان می‌دهد. در بخش‌های غربی و شمال شرقی کشور روند مثبت شروع فصل برف‌گیری دیده می‌شود. به عبارت دیگر، شروع فصل برف‌گیری در بخش‌های یادشده در حال پیشروی به سوی زمستان است و با تأخیری بیش‌تر آغاز می‌شود و میزان نرخ روند در برخی از این مناطق حتی به ۲ روز در سال هم می‌رسد. در بخش‌هایی از شمال غرب ایران، دامنه‌های شمالی رشته‌کوه‌های البرز، ارتفاعات غربی استان اصفهان و برخی از ارتفاعات کرمان، شروع فصل برف‌گیری در حال پسروی به سوی اوایل سال آبی یعنی اوایل پاییز است. همچنین محاسبات مربوط به پایان فصل برف‌گیری در کشور نشان می‌دهد، طی دوره آماری مورد بررسی، بخش‌های زیادی از گستره کشور دارای روند مثبت پایان فصل برف‌گیری هستند، به این معنی که پایان فصل برف‌پوشان (آخرین تاریخی که یک یاخته پوشیده از برف است) در حال پیشروی به سوی پایان سال آبی است. روند مثبت پایان فصل برف‌گیری بر روی بسیاری از ارتفاعات رشته‌کوه‌های زاگرس و البرز و بلندی‌های استان کرمان قابل رؤیت است اما روند منفی پایان فصل برف‌گیری یا به بیان روشن‌تر، روند تغییرات پایان فصل برف‌پوشان به سوی آغاز سال آبی، به‌طور پراکنده بر روی ارتفاعات زاگرس، بخش‌هایی از شمال غرب و بلندی‌های شمال شرق ایران دیده می‌شود. بررسی روند تغییرات مکانی طول فصل برف‌گیری در کشور یعنی اختلاف تاریخ اولین روز و آخرین روزی که یک یاخته پوشیده از برف است، نشان می‌دهد که طی دوره مورد مطالعه، غلبه و چیرگی با روند افزایشی طول فصل برف‌گیری در کشور است و در بیش‌تر پهنه‌های شمالی کشور بر روی رشته‌کوه‌های البرز و بخش‌های شمال غرب و همچنین بلندی‌های استان کرمان، روند افزایشی طول فصل برف‌پوشان دیده می‌شود. در پاره‌ای از مناطق شمالی روند افزایشی طول فصل برف‌پوشان به ۴ روز در سال نیز می‌رسد. به نظر می‌رسد افزایش طول دوره فصل برف‌گیری در کشور به سبب افزایش سهم بارش‌های بهاره باشد که به شکل بارش‌های برف در ارتفاعات ظاهر می‌شوند.

سپاس‌گزاری

این مقاله با حمایت مالی بنیاد ملی نخبگان و صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور به شماره طرح ۹۸۰۲۵۰۴۶ انجام شده است.

منابع

- احمدی، محمود؛ زهرا سادات سیدمیرزایی (۱۴۰۱). پایش تغییرات پوشش برف طی دوره سرد سال در ایران بر اساس داده‌های سنجنده مادیس، مجله سنجش از دور و GIS ایران. شماره ۱. صفحات ۷۲-۵۹.
<https://doi.org/10.52547/gisj.14.1.59>
- کیخسروی کیانی، محمدصادق؛ سیدابوالفضل مسعودیان (۱۳۹۵). شناسایی وردش‌های مکانی روزهای برفپوشان در ایران زمین به کمک داده‌های دورسنجی، جغرافیا و مخاطرات محیطی. شماره ۱۷. صفحات ۸۶-۶۹.
<https://doi.org/10.22067/geo.v5i1.49715>
- کیخسروی کیانی، محمدصادق؛ سیدابوالفضل مسعودیان (۱۳۹۹). واکاوی روند تغییرات آغاز فصل انباشت پوشش برف در ایران با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی. شماره ۱. صفحات ۱۴-۱.
<https://doi.org/10.22108/gep.2020.120775.1249>
- محمدی، پیمان؛ احمد محمودی؛ اسدالله خورانی (۱۳۹۸). تغییرات پوشش برف در رشته‌کوه زاگرس با استفاده از داده‌های روزانه سنجنده مودیس، مجله فیزیک زمین و فضا. شماره ۲. صفحات ۳۷۱-۳۵۵.
<https://doi.org/10.22059/jesphys.2019.256133.1006997>

References

- Adler, C., Huggel, C., Orlove, B., & Nolin, A (2019). Climate change in the mountain cryosphere: impacts and responses. *Regional Environmental Change*, 19, 1225-1228.
<https://doi.org/10.1007/s10113-019-01507-6>
- Ahluwalia, R. S., Rai, S., Meetei, P. N., Kumar, S., Sarangi, S., Chauhan, P., & Karakoti, I (2021). Spatial-diurnal variability of snow/glacier melt runoff in glacier regime river valley: Central Himalaya, India. *Quaternary international*, 585, 183-194.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.01.003>
- 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*, 28(16), 4626-4639.
<https://doi.org/10.1002/hyp.10123>
- Bibi, L., Khan, A. A., Khan, G., Ali, K., Qureshi, J., & Jan, I. U (2019). Snow cover trend analysis using modis snow products: A case of Shayok River Basin in Northern Pakistan. *Journal of Himalayan Earth Science*, 52(2).
[http://nceg.uop.edu.pk/gb-52\(2\)-2019.html](http://nceg.uop.edu.pk/gb-52(2)-2019.html)
- Chen, S., Wang, X., Guo, H., Xie, P., & Sirelkhatim, A. M (2020). Spatial and temporal adaptive gap-filling method producing daily cloud-free NDSI time series. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 2251-2263.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2993037>
- Desinayak, N., Prasad, A. K., El-Askary, H., Kafatos, M., & Asrar, G. R (2022). Snow cover variability and trend over the Hindu Kush Himalayan region using MODIS and SRTM data. Paper presented at the *Annales Geophysicae*.
<https://doi.org/10.5194/angeo-40-67-2022>
- 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*, 6(12), 12752-12775.
<https://doi.org/10.3390/rs61212752>
- Dong, C., & Menzel, L (2016). Producing cloud-free MODIS snow cover products with conditional probability interpolation and meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, 186, 439-451.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.09.019>

- Guo, S., Du, P., Xia, J., Tang, P., Wang, X., Meng, Y., & Wang, H (2021). Spatiotemporal changes of glacier and seasonal snow fluctuations over the Namcha Barwa–Gyala Peri massif using object-based classification from Landsat time series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 177, 21-37.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.04.018>
- Hou, J., Huang, C., Zhang, Y., Guo, J., & Gu, J (2019). Gap-filling of MODIS fractional snow cover products via non-local spatio-temporal filtering based on machine learning techniques. *Remote Sensing*, 11(1), 90.
<https://doi.org/10.3390/rs11010090>
- Hussainzada, W., Lee, H. S., Vinayak, B., & Khpalwak, G. F (2021). Sensitivity of snowmelt runoff modelling to the level of cloud coverage for snow cover extent from daily MODIS product collection 6. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36, 100835.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100835>
- Jin, H., Chen, X., Zhong, R., Wu, P., Ju, Q., Zeng, J., & Yao, T (2022). Extraction of snow melting duration and its spatiotemporal variations in the Tibetan Plateau based on MODIS product. *Advances in Space Research*, 70(1), 15-34.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.04.018>
- Ke, C.-Q., Li, X.-C., Xie, H., Ma, D.-H., Liu, X., & Kou, C (2016). Variability in snow cover phenology in China from 1952 to 2010. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(2), 755-770.
<https://doi.org/10.5194/hess-20-755-2016.2016>
- Li, C., Yan, F., Zhang, C., Kang, S., Rai, M., Zhang, H., . . . He, C (2022). Coupling of decreased snow accumulation and increased light-absorbing particles accelerates glacier retreat in the Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 809, 151095.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151095>
- Li, H., Ke, C.-Q., Zhu, Q., Li, M., & Shen, X (2022). A deep learning approach to retrieve cold-season snow depth over Arctic sea ice from AMSR2 measurements. *Remote Sensing of Environment*, 269, 112840.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112840>
- Lu, X., Zhang, W., Wang, S., Zhang, B., Niu, Q., Liu, J., ... Gao, H (2021). Spatial-temporal variability of snow cover over the Amur River Basin inferred from MODIS daily snow products in recent decades. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 12(6), 418-429.
<http://www.scar.ac.cn/EN/10.3724/SP.J.1226.2020.00418>
- Ma, N., Yu, K., Zhang, Y., Zhai, J., Zhang, Y., & Zhang, H (2020). Ground observed climatology and trend in snow cover phenology across China with consideration of snow-free breaks. *Climate dynamics*, 55, 2867-2887.
<https://doi.org/10.1007/s00382-020-05422-z>
- Marchane, A., Boudhar, A., Baba, M. W., Hanich, L., & Chehbouni, A (2021). Snow lapse rate changes in the Atlas Mountain in morocco based on MODIS time series during the period 2000–2016. *Remote Sensing*, 13(17), 3370.
<https://doi.org/10.3390/rs13173370>
- Muhammad, S., & Thapa, A (2020). An improved Terra–Aqua MODIS snow cover and Randolph Glacier Inventory 6.0 combined product (MOYDGL06*) for high-mountain Asia between 2002 and 2018. *Earth System Science Data*, 12(1), 345-356.
doi.org/10.5194/essd-12-345-2020
- Peng, S., Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Zhou, L., & Wang, T (2013). Change in snow phenology and its potential feedback to temperature in the Northern Hemisphere over the last three decades. *Environmental Research Letters*, 8(1), 014008.
[DOI 10.1088/1748-9326/8/1/014008](https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014008)
- Pradhananga, D., & Pomeroy, J. W (2022). Diagnosing changes in glacier hydrology from physical principles using a hydrological model with snow redistribution, sublimation, firnification and energy balance ablation algorithms. *Journal of hydrology*, 608, 127545.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127545>

- Shukla, S., Jain, S. K., & Kansal, M. L. (2021). Hydrological modelling of a snow/glacier-fed western Himalayan basin to simulate the current and future streamflows under changing climate scenarios. *Science of the Total Environment*, 795, 148871.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148871>
- Singh, D., Zhu, Y., Liu, S., Srivastava, P. K., Dharpure, J. K., Chatterjee, D., . . . Gagnon, A. S. (2022). Exploring the links between variations in snow cover area and climatic variables in a Himalayan catchment using earth observations and CMIP6 climate change scenarios. *Journal of hydrology*, 608, 127648.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127648>
- Tang, Z., Deng, G., Hu, G., Zhang, H., Pan, H., & Sang, G. (2022). Satellite observed spatiotemporal variability of snow cover and snow phenology over high mountain Asia from 2002 to 2021. *Journal of hydrology*, 613, 128438.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128438>
- Wang, H., Zhang, X., Xiao, P., Zhang, K., & Wu, S. (2022). Elevation-dependent response of snow phenology to climate change from a remote sensing perspective: A case survey in the central Tianshan mountains from 2000 to 2019. *International Journal of Climatology*, 42(3), 1706-1722.
<https://doi.org/10.1002/joc.7330>
- Xu, W., Ma, H., Wu, D., & Yuan, W. (2017). Assessment of the daily cloud-free MODIS snow-cover product for monitoring the snow-cover phenology over the Qinghai-Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 9(6), 585.
<https://doi.org/10.3390/rs9060585>
- 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.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2496950>
- Zhang, Y., Cao, T., Kan, X., Wang, J., & Tian, W. (2017). Spatial and temporal variation analysis of snow cover using MODIS over Qinghai-Tibetan Plateau during 2003–2014. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 45, 887-897.
<https://doi.org/10.1007/s12524-016-0617-y>
- Zhao, W., Zhang, Y., Li, L., Su, W., Li, B., & Fu, Z. (2020). Snow melting on the road surface driven by a geothermal system in the severely cold region of China. *Sustainable energy technologies and assessments*, 40, 100781.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100781>