

Quantifying Snow Cover Distribution with Satellite Images and Investigating the Impact of Land Features (Case Study of North Karun Watershed)

Sedigheh Emami¹, Mostafa Kabolizadeh² , Kazem Rangzan³ , Sajad Zareie⁴ 

1. PhD Student, Department of RS and GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2. Associate. Prof., Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (Corresponding Authors) E: m.kabolizade@scu.ac.ir

3. Prof., Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E: kazemrangzan@scu.ac.ir

4. Assistant Prof., Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E: s.zareie@scu.ac.ir

ARTICLE INFO

Keywords

SCA
Topography
North Karun Akhis
Basin
SVM

Article History:

Received:

10 oc 2025

Received in revised form:

09 de 2025

Accepted:

24 de 2025

Available online:

20 fe 2026

ABSTRACT

Snow is a dynamic natural element whose distribution is largely controlled by latitude and altitude. The aim of this study is to quantify the spatial heterogeneity of snow cover (SCA) due to topographic effects in the North Karun watershed using Landsat8-imagery for a 5-year period (2019-2024). Here, the machine learning approach (SVM) was used to classify images. The interrelationship between SCA and topography was analyzed. The results of the SCA map accuracy assessment in the 5-year period using the SVM method are acceptable with an overall accuracy and kappa coefficient higher than 0.9. The estimated annual average SCA was 37/140597 hectares (13/25%) and 82/63957 hectares (6/3%) in 2019-2020 and 2020-2021, respectively. The seasonal changes of SCA showed that the maximum average (70%) was in winter and the minimum average (1/34%) was in summer. The results of SCA correlation with altitude showed that the average SCA% at altitudes below 2000 m was less than 2%, while above 2500 m it reached 70%. The lowest SCA was at altitudes below 2500 m in summer. The results of the slope effect assessment showed that the maximum and The minimum SCA% was found in the slope class 20-40 and 77.33-60, respectively. And the snow cover in the north-facing directions (33/75%) and east-facing directions (27/09%) has the highest SCA%, while the south-facing directions (19/98%) and west-facing directions (19/18%) have the lowest SCA%. This study provides useful insights for water resources management with different terrain characteristics .

Citation: Emami, S., Mostafa Kabolizadeh, M., Kazem Rangzan, K. & Zareie, S. (2026). Quantifying Snow Cover Distribution with Satellite Images and Investigating the Impact of Land Features (Case Study of North Karun Watershed), 23 (87), 103-122.

 <http://doi.org/10.22034/jiga.2026.2059090.1398>



© The Author (s). Publisher: Iranian Geographical Associati This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Extended Abstract

Introduction

At the local scale, snow cover is influenced by land features and affects water availability in some arid and semi-arid regions such as Iran. Since snowmelt plays an important role in total runoff (Azizi & Akhtar, 2022), understanding the extent and pattern of SCA melt in mountainous regions, including the Zagros highlands (the source of the Karun River), is of great importance. At the regional scale, snow accumulation and melt processes are mainly dominated by latitude and air temperature (Lopez-Moreno et al., 2014) and local topography factors (Schmidt et al, 2009). Therefore, a more comprehensive study is necessary to clarify the relationship between SCA and land features. Monitoring snow cover characteristics based on ground observations is a difficult and costly task that is limited in area (Liu et al., 2-17). Recent advances in remote sensing techniques and satellite capabilities make it possible to monitor snow in data-sparse areas, such as complex mountainous areas and cold regions (Frei et al., 2012). Traditional methods using satellite images to determine snow cover used snow indices such as NDSI and S3. it is difficult to determine the correct threshold value. Therefore, it is sometimes easier to let the classifier decide this problem (Nurzyńska et al, 2013). Therefore, the aim was to investigate the performance of the system with more complex classifiers. Since the distribution of snow particle features is unknown, classifiers that do not require this information, such as the support vector machine (SVM) algorithm, are suitable (Nurzyńska et al, 2013). This paper presents an analysis of the distribution and duration of snow cover in the North Karun River watershed using a topographic effect approach. The innovation of this research lies in combining advanced remote sensing methods with multiparameter topographic analysis in one of the most important snow basins of the Zagros.

Methodology

The present study used Landsat-8 images for a 5-year period (2019 to 2024) to quantify the spatial heterogeneity of snow cover due to topographic effects in the North Karun watershed. Here, the SVM machine learning approach was used to classify the images. Two performance metrics, including kappa coefficient and overall classification accuracy, were used to evaluate the performance of the SVM model.

Results and Discussion

The results of the assessment of the accuracy of snow cover mapping in the 5-year period using the SVM method are acceptable with an overall accuracy and kappa coefficient higher than 0.9. The estimated average annual SCA was calculated with a maximum area of 140,597.37 hectares (13.25%) and a minimum area of 63,957.82 hectares (6.03%) in the years 1398-1399 and 1399-1400, respectively. The seasonal variation analysis showed that the maximum average SCA was (70.44%) in winter and the minimum (1.34%) in summer. The results of snow cover in relation to altitude above sea level showed that the average SCA% below 2000 m above sea level was less than 2%, while above 2500 m it reached 70%. The lowest SCA was below 2500 m above sea level in summer. The results of the slope effect analysis showed that the maximum and minimum SCA% were found in the slope classes 20-40 and 77.33-60, respectively. Also, the snow cover analysis showed that the north-facing (33.75%) and east-facing (27.09%) directions had the largest snow cover extent, and the south-facing (19.98%) and west-facing (19.18%) directions had the lowest snow cover extent.

Conclusion

The results of the snow cover survey in the North Karun watershed located in Chaharmahal Bakhtiari province showed The average monthly SCA was maximum in Bahman (34.28%) and minimum in Mehr (0.05%). From Mehr to Bahman, positive changes were observed in the region. From Esfand to Shahrivar, the change in snow cover was negative, which means that the melting of snow cover accelerates in Farvardin and Ordibehesht, especially at low altitudes, and continues throughout the summer season. Factors such as elevation differences from sea level have a significant impact on the temperature distribution and snow accumulation/melt in the region, and the higher SCA corresponds well with the high Zardkough mountain range. The slope and direction of the mountain also affect the distribution of snow cover through changes in radiation and energy balance in mountainous areas. The dataset and results of this study can be used in developing a model for runoff prediction and in assessing the impacts of climate change, and also provide useful insights into regional snow cover variance and can be a guide for managing snowmelt water resources with different terrain characteristics.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

References

- 1) Azizi, A. H. & Akhtar, F. (2022). Analysis of spatiotemporal variation in the snow cover in Western Hindukush-Himalaya region, *Geocarto International*, 37(22), 6602–6624, <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1939442>
- 2) Atchley, A. L., Painter, S. L., Harp, D. R., Coon, E. T., Wilson, C. J., Liljedahl, A. K., & Romanovsky, V. E. (2015). Using field observations to inform thermal hydrology models of permafrost dynamics with ATS (v0. 83). *Geoscientific Model Development*, 8(9), 2701–2722. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2701-2015>
- 3) Blau, M.T., Kad, P., Turton, J.V. et al.. (2024). Uneven global retreat of persistent mountain snow cover alongside mountain warming from ERA5-Land. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, Article 278. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00829-5>
- 4) Dixit A, Ajanta G, and Sanjay J (2019). Development and Evaluation of a New “Snow Water Index (SWI)” for Accurate Snow Cover Delineation” *Remote Sensing* 11(23), 2774. <https://doi.org/10.3390/rs11232774>
- 5) Frei, A., et al. A review of global satellite-derived snow products. *J. Adv. Space Res.* (2012), *Advances in Space Research*, 50(8), 1007–1029. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.12.021>
- 6) Jain, S. K., Goswami, A., & Saraf, A. K. (2009). Role of elevation and aspect in snow distribution in the Western Himalaya. *Water Resources Management*, 23(1), 71–83 <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9265-5>
- 7) Li, K.M., Li, H.L., Wang, L., Gao, W.Y., 2011. On the relationship between local topography and small glacier change under climatic warming on Mt. Bogda, eastern Tian Shan, China. *J. Earth Sci.* 22(4), 515–527. <https://doi.org/10.1007/s12583-011-0204-7>
- 8) Liu, J. P., Zhang, W. C., & Liu, T. (2017). Monitoring recent changes in snow cover in Central Asia using improved MODIS snow-cover products. *Journal of Arid Land*, 9(5), 763–777. <https://doi.org/10.1007/s40333-017-0103-6>
- 9) Lopez-Moreno, J. I., Revuelto, J., Gilaberte, M., Moran-Tejeda, E., Pons, M., Jover, E., Esteban, P., García, C., & Pomeroy, J. W. (2014). The effect of slope aspect on the response of snowpack to climate warming in the Pyrenees. *Theoretical and Applied Climatology*, 117, 207–219. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0991-0>
- 10) Maskey, S., Uhlenbrook, S., & Ojha, S. (2011). An analysis of snow cover changes in the Himalayan region using MODIS snow products and in-situ temperature data. *Climatic Change*, 108(13), 391–400. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0181-y>
- 11) Nurzyńska, K., Kubo, M., & Muramoto, K. (2013). Shape parameters for automatic classification of snow particles into snowflake and graupel. *Meteorological Applications*, 20(3), 257–265. <https://doi.org/10.1002/met.299>
- 12) Pu, Z. X., & 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*, 97, 265–278. <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0074-9>
- 13) Saydi, M., & Ding, J.-I. (2020). Impacts of topographic factors on regional snow cover characteristics. *Water Science and Engineering*, 13(3), 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2020.09.002>
- 14) Schmidt, S., Weber, B., & Winiger, M. (2009). Analyses of seasonal snow disappearance in an alpine valley from micro- to meso-scale (Loetschental, Switzerland). *Hydrological Processes*, 23(7), 1041–1051. <https://doi.org/10.1002/hyp.7205>
- 15) Shimamura, Y., Izumi, T., Matsumaya, H. (2006). Evaluation of a useful method to identify snow-covered areas under vegetation—comparisons among a newly proposed snow index, normalized difference snow index and visible reflectance. *Int. J. Remote Sens.* 2006, 27, 4867–4884. <https://doi.org/10.1080/01431160600639693>
- 16) Sun, H., Fang, Y., Margulis, S. A., Mortimer, C., Mudryk, L., & Derksen, C. (2025). Evaluation of the Snow Climate Change Initiative (Snow CCI) snow-covered area product within a mountain snow water equivalent reanalysis. *The Cryosphere*, 19(6), 2017–2025. <https://doi.org/10.5194/tc-19-2017-2025>
- 17) Tahir, A. A., Adamowski, J. F., Chevallier, P., Haq, A. U., & Terzago, S. (2016). Comparative assessment of spatiotemporal snow cover changes and hydrological

- indukush-Karakoram-Himalaya region, Pakistan). *Meteorology and Atmospheric Physics*, 128(6), 793–811. <https://doi.org/10.1007/s00703-016-0440-6>
- 18) Winiger, M., Gumpert, M., & Yamout, H. (2005). Karakorum–Hindukush–Western Himalaya: Assessing high-altitude water resources. *Hydrological Processes*, 19(12), 2329–2338. <https://doi.org/10.1002/hyp.5887>
- 19) Zhang, Y. H., Cao, T., Kan, X., Wang, J. G., & Tian, W. (2017). Spatial and temporal variation analysis of snow cover using MODIS over Qinghai–Tibetan Plateau during 2003–20





کمی سازی توزیع پوشش برف با تصاویر ماهواره ای و بررسی تأثیر ویژگی های زمین مطالعه موردی: (حوضه آبریز کارون شمالی)

صدیقه امامی^۱، مصطفی کابلی زاد^۲، کاظم رنگزن^۳، سجاد زارعی^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. E: s.emami061@gmail.com

۲. دانشیار، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، (نویسنده مسئول): E: m.kabolizade@scu.ac.ir

۳. استاد، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. E: kazemrangzan@scu.ac.ir

۴. استادیار، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. E: s.zareie@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
واژگان کلیدی: SCA توپوگرافی حوضه آخیز کارون شمالی SVM	برف یک عنصر طبیعی پویا است که توزیع آن تا حد زیادی توسط عرض جغرافیایی و ارتفاع کنترل می شود. هدف مطالعه حاضر تعیین کمیت ناهمگونی فضایی پوشش برف (SCA) ناشی از اثرات توپوگرافی در حوضه آبریز کارون شمالی با استفاده از تصاویر - Landsat 8 برای یک دوره ۵ ساله (۲۰۲۴ تا ۲۰۱۹) می باشد. در اینجا، از رویکرد یادگیری ماشین (SVM) برای طبقه بندی تصاویر استفاده شد. رابطه متقابل بین SCA، توپوگرافی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج ارزیابی دقت نقشه SCA در دوره ۵ ساله به روش SVM با دقت کلی و ضریب کاپا بالاتر از ۰/۹ قابل قبول می باشد. برآورد میانگین SCA سالانه محاسبه شده به ترتیب حداکثر 140597/37 هکتار (۱۳/۲۵٪) و حداقل 63957/82 هکتار (۶/۳٪) در سالهای ۱۳۹۸-۱۳۹۹ و ۱۳۹۹-۱۴۰۰ بوده است. بررسی تغییرات فصلی SCA نشان داد که حداکثر میانگین (۷۰٪) در زمستان و حداقل میانگین (۱/۳۴٪) در تابستان می باشد. نتایج SCA ارتباط با ارتفاع نشان داد که میانگین SCA% در ارتفاع زیر ۲۰۰۰ متر کمتر از ۲٪ بود، در حالی که بالاتر از ۲۵۰۰ متر به ۷۰٪ رسید. کمترین SCA ارتفاع زیر ۲۵۰۰ متر در تابستان است. نتایج ارزیابی اثر میزان شیب نشان داد که حداکثر و حداقل SCA% به ترتیب در کلاس شیب ۲۰-۴۰ و ۶۰-۷۷ یافت شد. و پوشش برف در جهت های رو به شمال (۳۳/۷۵) درصد و شرق (۲۷/۰۹ درصد) بیشترین SCA%، جهت رو به جنوب (۱۹/۹۸ درصد) و غرب (۱۹/۱۸ درصد) کمترین SCA% را دارد. این مطالعه دیدگاه مفیدی برای مدیریت منابع آب با ویژگی های مختلف زمین ارائه می دهد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۴	
تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱	

استناد: امامی، صدیقه؛ کابلی زاد، مصطفی؛ رنگزن، کاظم و زارعی، سجاد. (۱۴۰۴). کمی سازی توزیع پوشش برف با

تصاویر ماهواره ای و بررسی تأثیر ویژگی های زمین (مطالعه موردی حوضه آبریز کارون شمالی)، نشریه جغرافیا، (۸۷)، ۲۳-۱۲۲، ۱۰۳-۱۰۳.

doi: <https://doi.org/10.22034/jiga.2026.2059090.1398>



مقدمه و پیشینه

پوشش برف (Snow Cover Area; SCA) در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای، یکی از مؤلفه‌های کلیدی کرایوسفر است که تحت تأثیر مستقیم ویژگی‌های زمین قرار دارد (Schmidt et al., 2009:1). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که کاهش و تغییر در پوشش برف کوهستانی در مقیاس جهانی با گرمایش هوا ارتباط مستقیمی دارد و این مؤلفه نقش مهمی در تعادل انرژی سطح زمین و چرخه هیدرولوژیکی ایفا می‌کند (Sun et al., 2025:1; Blau et al., 2024:2). از آنجا که تغییرپذیری مکانی و زمانی SCA مستقیماً بر زمان‌بندی و میزان رواناب ناشی از ذوب برف اثر می‌گذارد (Azizi & Akhtar, 2022:3)، شناخت الگوهای توزیع و ذوب برف برای مطالعات هیدرولوژیکی در مناطق کوهستانی اهمیت ویژه‌ای دارد.

در ایران، رشته‌کوه زاگرس یکی از مهم‌ترین نواحی برف‌گیر کشور است و رودخانه کارون، به‌عنوان پرآب‌ترین رودخانه ایران، از این ارتفاعات سرچشمه می‌گیرد. معیشت و امنیت آبی جمعیت قابل توجهی از ساکنان استان چهارمحال و بختیاری و مناطق پایین‌دست، به میزان و زمان ذوب برف وابسته است. با این حال، علیرغم اهمیت راهبردی پوشش برف فصلی، داده‌های دقیق، پیوسته و بلندمدت از توزیع زمانی-مکانی برف در ارتفاعات زاگرس همچنان محدود است. مطالعات انجام‌شده در سایر سامانه‌های کوهستانی مرتفع جهان نشان داده‌اند که کمبود داده‌های مشاهداتی در ارتفاعات بالا یکی از چالش‌های اساسی در ارزیابی منابع آب ناشی از برف محسوب می‌شود (Winiger et al., 2005:1). این خلأ اطلاعاتی، ضرورت بهره‌گیری از روش‌های کارآمد پایش برف در مقیاس‌های مکانی و زمانی مناسب را برجسته می‌سازد. مطالعات پیشین نشان می‌دهند که فرآیندهای تجمع و ذوب برف در مقیاس منطقه‌ای عمده‌تاً تحت تأثیر عرض جغرافیایی و دمای هوا قرار دارند (Lopez-Moreno et al., 2014:2; Jain et al., 2009:1)، در حالی که در مقیاس محلی، عوامل توپوگرافی نقش غالب‌تری در کنترل توزیع پوشش برف ایفا می‌کنند (Schmidt et al., 2009:1). این عوامل از طریق تغییر در میزان و الگوی تابش خورشیدی دریافتی، موجب ناهمگنی مکانی قابل توجهی در SCA می‌شوند (Zhang et al., 2017:10).

در میان پارامترهای توپوگرافی، ارتفاع به‌عنوان عامل اولیه در مطالعات متعددی مورد توجه قرار گرفته است. افزایش ارتفاع معمولاً با کاهش دما و افزایش بارش همراه است و شرایط مساعدتری برای انباشت و ماندگاری برف فراهم می‌کند (Li et al., 2011:6). (Pu and Xu, 2009:1) نشان دادند که کسر پوشش برف (SCF) عمده‌تاً در نوارهای ارتفاعی بالا متمرکز شده و دوام زمانی بیشتری دارد. نتایج مشابهی توسط (Maskey et al., 2011) در منطقه هیمالیا و (Tahir et al., 2016) در حوضه‌های پاکستان گزارش شده است. لیو و همکاران در سال ۲۰۱۱ نیز تغییرات مکانی-زمانی پوشش برف را در ارتفاعات مختلف آسیای مرکزی بررسی کردند. علاوه بر ارتفاع، جهت و شیب دامنه‌ها از طریق کنترل شدت و مدت تابش خورشیدی و الگوهای باد، نقش مهمی در توزیع پوشش برف دارند (Li et al., 2011:11). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که دامنه‌های رو به شمال و سایه‌دار، به‌طور معمول ماندگاری برف بیشتری نسبت به دامنه‌های رو به جنوب دارند (Zhang et al., 2017:10; Jain et al., 2009:1). با این حال، نقش شیب در مقایسه با ارتفاع و جهت کمتر مورد توجه قرار گرفته و بررسی‌های انجام‌شده در این زمینه محدود است. از آنجا که ارتفاع، شیب و جهت به‌صورت همزمان و وابسته به یکدیگر عمل می‌کنند، نیاز به مطالعات جامع‌تری برای بررسی اثر ترکیبی این عوامل احساس می‌شود (Jain et al., 2009:1).

از نظر روش شناسی، پایش پوشش برف از طریق مشاهدات زمینی با محدودیت‌هایی نظیر هزینه بالا، خطرات میدانی و پوشش مکانی محدود همراه است. در مقابل، سنجش از دور به عنوان ابزاری کارآمد برای پایش برف در مناطق کوهستانی پیچیده مطرح شده است (Frei et al., 2012:2). تصاویر نوری ماهواره‌هایی مانند MODIS و Landsat به طور گسترده در استخراج پوشش برف مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Dixit et al., 2019; Mityok et al., 2018). روش‌های سنتی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای تعیین پوشش برف از شاخص‌های برف مانند شاخص تفاوت عادی شده برف، شاخص تفاوت عادی شده جنگل برف و شاخص S3 استفاده می‌کردند. طبقه بندی کننده آستانه زمانی به خوبی کار می‌کند که بتوان آستانه بین دو کلاس را به راحتی تعریف کرد، اگرچه در مواردی که دو کلاس با یکدیگر همپوشانی دارند، تعیین مقدار آستانه صحیح دشوار است. علاوه بر این، گاهی اوقات راحت‌تر است که این مشکل توسط طبقه‌بندی کننده تصمیم‌گیری شود (Nurzyńska et al, 2013:4). مطالعات اخیر بهبود عملکرد نقشه برداری برف را با استفاده از تکنیک‌های طبقه بندی نظارت شده مبتنی بر یادگیری ماشین نشان داده است. پاندا و همکاران در سال ۲۰۲۲ از روش درخت طبقه‌بندی و رگرسیون (CART)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، تقویت درخت گرادیان و جنگل تصادفی برای تولید نقشه‌های پوشش برفی استفاده کردند نتایج نشان داد که همه طبقه‌بندی کننده‌های یادگیری ماشینی بهتر از نقشه‌های پوشش برف مشتق شده از شاخص معمولی عمل کردند (Panda et al. 2022:1). بنابراین، هدف بررسی عملکرد سیستم با طبقه‌بندی کننده‌های پیچیده‌تر بود. از آنجایی که توزیع ویژگی‌های ذرات برف ناشناخته است، طبقه بندی کننده‌هایی که به این اطلاعات نیاز ندارند، مانند الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) مناسب است (Nurzyńska et al, 2013:4). با وجود مطالعات متعدد در زمینه پایش پوشش برف، اغلب پژوهش‌ها یا بر تحلیل تغییرات ارتفاعی تمرکز داشته‌اند یا نقش جهت و شیب را به صورت مجزا بررسی کرده‌اند. بررسی همزمان الگوهای مکانی-زمانی پوشش برف در ارتباط با ترکیب عوامل توپوگرافی، به ویژه در حوضه‌های کوهستانی ایران، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر بررسی توزیع مکانی و زمانی پوشش برف در حوضه آبریز کارون شمالی با تأکید بر اثر ترکیبی ارتفاع، شیب و جهت دامنه‌ها است. نوآوری این مطالعه در به کارگیری همزمان شاخص‌های سطحی منتخب به عنوان ورودی الگوریتم SVM و تحلیل یکپارچه اثر عوامل توپوگرافی بر الگوهای SCA با استفاده از تصاویر Landsat-8 در دوره زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ نهفته است. این رویکرد می‌تواند درک دقیق‌تری از رفتار پوشش برف در مناطق کوهستانی زاگرس فراهم کرده و مبنایی علمی برای مدیریت بهینه منابع آب ارائه دهد.

روش پژوهش

تصاویر مورد استفاده Landsat-8 (OLI) در این مطالعه برای یک دوره ۵ ساله (۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴) از طریق وب سایت اختصاصی سازمان زمین شناسی ایالات متحده (USGS) (USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov>) به دست آمد.

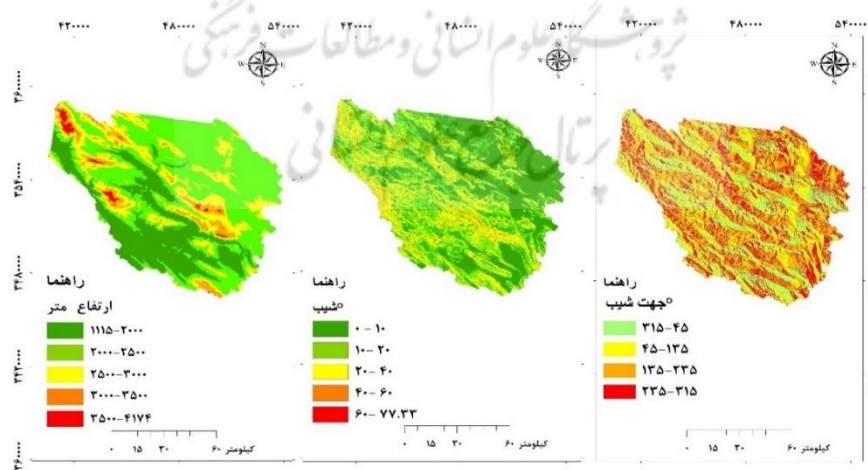
جدول ۱. مشخصات تصاویر مورد استفاده در پژوهش

نوع سنسور	Path/Row	قدرت تفکیک مکانی(متر)	تاریخ تصویربرداری (۲۰۱۹)	تاریخ تصویربرداری (۲۰۲۰)	تاریخ تصویربرداری (۲۰۲۱)	تاریخ تصویربرداری (۲۰۲۲)	تاریخ تصویربرداری (۲۰۲۳)	تاریخ تصویربرداری (۲۰۲۴)
لندست ۸	۱۶۴۰۳۸	۳۰	۲۰۲۰۰۱۲۳	۲۰۲۱۰۱۰۹	۲۰۲۲۰۱۲۸	۲۰۲۳۰۱۰۷	۲۰۲۴۰۱۱۰	
			۲۰۲۰۰۲۰۸	۲۰۲۱۰۲۱۰	۲۰۲۲۰۲۱۳	۲۰۲۳۰۲۰۸	۲۰۲۴۰۲۰۳	
			۲۰۲۰۰۳۲۷	۲۰۲۱۰۳۱۴	۲۰۲۲۰۳۱۷	۲۰۲۳۰۳۲۰	۲۰۲۴۰۳۰۶	
			۲۰۲۰۰۴۲۵	۲۰۲۱۰۴۱۵	۲۰۲۲۰۴۰۲	۲۰۲۳۰۴۰۵	۲۰۲۴۰۴۰۷	
			۲۰۲۲۰۵۳۰	۲۰۲۱۰۵۰۱	۲۰۲۲۰۵۲۰	۲۰۲۳۰۵۲۳	۲۰۲۴۰۵۰۹	
			۲۰۲۰۰۷۰۱	۲۰۲۱۰۶۱۸	۲۰۲۲۰۶۲۱	۲۰۲۳۰۶۰۸	۲۰۲۴۰۶۰۲	
			۲۰۲۰۰۷۱۷	۲۰۲۱۰۷۲۰	۲۰۲۲۰۷۰۷	۲۰۲۳۰۷۱۰	۲۰۲۴۰۷۰۴	
			۲۰۲۰۰۸۰۲	۲۰۲۱۰۸۰۵	۲۰۲۲۰۸۲۴	۲۰۲۳۰۸۲۴	۲۰۲۴۰۷۲۰	
			۲۰۱۹۰۸۱۶	۲۰۲۰۰۹۰۳	۲۰۲۱۰۹۱۰	۲۰۲۲۰۹۰۹	۲۰۲۳۱۰۱۴	
			۲۰۱۹۱۰۱۹	۲۰۲۰۱۱۰۵	۲۰۲۱۱۱۲۴	۲۰۲۲۱۰۲۷	۲۰۲۳۱۰۳۰	
			۲۰۱۹۱۱۲۰	۲۰۲۰۱۱۲۲	۲۰۲۱۱۱۰۹	۲۰۲۲۱۱۲۰	۲۰۲۳۱۲۰۱	
			۲۰۱۹۱۲۲۲	۲۰۲۲۱۲۰۸	۲۰۲۱۱۲۲۵	۲۰۲۲۱۲۳۰	۲۰۲۳۱۲۱۷	

داده های DEM

داده های مدل ارتفاع دیجیتال (DEM) مورد استفاده، داده های ماموریت توپوگرافی رادار شاتل (DEM SRTM) است که در مرکز مشاهدات و علوم منابع زمینی سازمان زمین شناسی ایالات متحده (USGS EROS) بایگانی شده اند، و وضوح فضایی ۹۰ متر است. سپس داده های DEM مجدداً به وضوح فضایی ۳۰ متر نمونه برداری می شوند تا با محصول Landsat8 سازگار باشد.

بر اساس داده ها DEM، داده های ارتفاع، شیب و جهت با توجه به ویژگی های توپوگرافی خاص و مفاهیم در حوضه آبریز کارون شمالی تولید شدند. جهت بررسی تأثیر اثرات توپوگرافی، هر یک از سه ویژگی توپوگرافی اصلی: ارتفاع، جهت و شیب، به چند گروه تقسیم شدند. نقشه طبقه بندی شده ارتفاع، شیب و جهت در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱. توپوگرافی منطقه مورد مطالعه

منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۴)

سطح پوشش برف SCA

منطقه پوشیده از برف برای یک دوره ۵ ساله (۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴) با تصاویر لندست ۸ برآورد شد در اینجا، رویکرد یادگیری ماشین SVM (ماشین بردار پشتیبان) برای طبقه بندی تصاویر استفاده شد. چارچوب مدل های برآورد SCA مورد استفاده در این تحقیق در (شکل ۳) نشان داده شده است. برای ارزیابی تاثیر ترکیب شاخص های طیفی بر عملکرد پیش بینی SVM، متغیرهای پیش بینی شامل: شاخص های طیفی مانند SWI، NDSI، NDSII-1، PCAM2 و S3 گنجانده شدند.

شاخص های طیفی سطح برف

شاخص NDSI باند های طیفی Green و SWIR به ترتیب به بازتاب در نوار سبز و موج کوتاه مادون قرمز اشاره دارند. NDSI ممکن است در تمایز بین برف و آب که اغلب برای مطالعه یک یخچال طبیعی در فصل ذوب اجتناب ناپذیر است، شکست بخورد. شاخص NDSII-1 از باند های طیفی Red و SWIR استفاده میکند که نتایج مشابه شاخص NDSI است. باند مادون قرمز موج کوتاه به ما اجازه می دهد بین برف و آب تفاوت قائل شویم. در طیف موج کوتاه بازتاب برف بسیار بیشتر از آب است. از این جهت می تواند برای ایجاد یک ماسک آب مورد استفاده قرار گیرد که سپس می تواند در نقشه تغییرات اولیه اعمال شود. ماسک را می توان بر اساس معیارهای زیر ایجاد کرد (Dixit et al., 2019:2). شناسایی پوشش برف در زیر تاج پوشش گیاهی نیز به دلیل ساختار مشابه منحنی های بازتاب طیفی برای برف و پوشش گیاهی در طیف مرئی و مادون قرمز نامشخص است. به منظور شناسایی برف در زیر سایه بان جنگل که اغلب در ارتفاعات زerkوه وجود دارد، می توان از شاخص S3 استفاده کرد (Shimamura et al., 2006:1). شاخص آب سطحی (SWI) توسط دیکزیت و همکارانش در سال ۲۰۱۹ معرفی شده است. این شاخص با استفاده از باند های طیفی Green-NIR and SWIR محاسبه می شود. این شاخص از روش های پیچیده ای برای حذف و کاهش اثرات پیکسل های آب استفاده می کند. آب بازتاب بالایی در محدوده طیفی طول موج سبز و در مقابل جذب بالاتری در محدوده طیفی مادون قرمز نزدیک دارد و خصوصیت جذب آب در محدوده طیفی مادون قرمز نزدیک (NIR) این امکان را فراهم می کند تا به سادگی برف و آب قابلیت تفکیک داشته باشد. شاخص برف PCAM2 برای دستیابی به کنتراست قابل توجه بین پیکسل های برف و بدنه های آبی از سایر پدیده ها توسعه یافته است. این شاخص برابر با مولفه دوم PCA حاصل از باند های NIR, Green, و Red و SWI می باشد. فرمول محاسبه شاخص های ذکر شده در (جدول ۲) ارائه شده است.

جدول ۲. شاخص های پوشش برفی

Threshold	Equation	Reference	Index
NDSI>0.4	$(\text{Green}-\text{SWIR})/(\text{Green}+\text{SWIR})$	Hall et al., 1995	NDSI
NDSII-1>0.4	$(\text{Red}-\text{SWIR})/(\text{Red}+\text{SWIR})$	Xiao et al., 2001	NDSII-1
S3>0.05	$\text{NIR}(\text{Red}-\text{SWIR})/(\text{NIR}+\text{Red}) * (\text{NIR}+\text{SWIR})$	Shimamura et al., 2006	S3
SWI>0.08-0.13	$\text{Green}(\text{NIR}-\text{SWIR})/(\text{Green}+\text{NIR}) * (\text{NIR}+\text{SWIR})$	Dixit et al., 2019	SWI
PCAM2> 0.12-0.15	PCA (Green, Red, NIR and SWIR)	The present study	PCAM2

الگوریتم های ماشین بردار پشتیبان (SVM)

طبقه بندی تصاویر یکی از مهمترین کاربردهای سنجش از دور است و بسیاری از الگوریتم ها بر ای این منظور توسعه یافته اند. ماشین های بردار پشتیبان یک گروه از الگوریتم های طبقه بندی نظارت شده یادگیری ماشینی هستند که در زمینه سنجش از دور مورد استفاده قرار گرفته اند. این مطالعه الگوریتم های ماشین بردار پشتیبان (SVM) را در طبقه

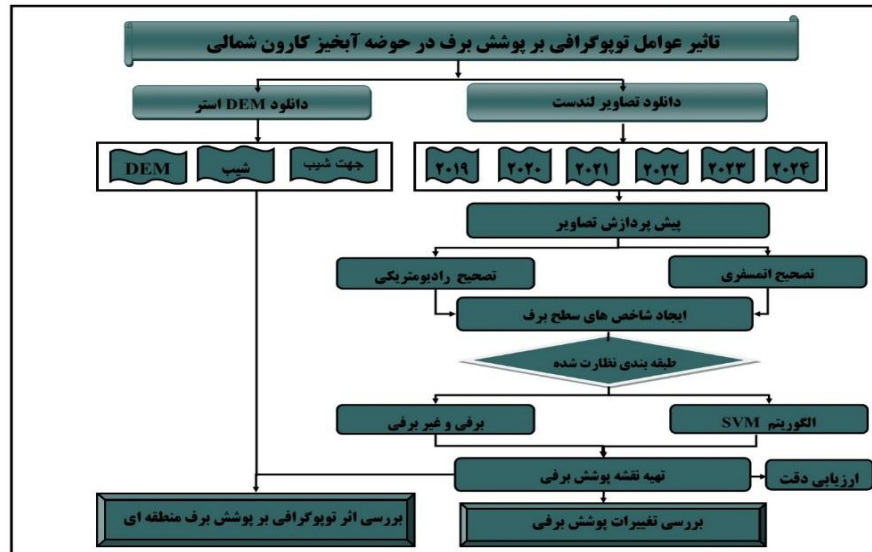
بندی شاخص های سطح برف مورد بررسی قرار می دهد. SVM یک مدل طبقه بندی خطی است که برای مجموعه های داده ای با ابعاد بالا مؤثر است، که داده ها را با برازش یک ابر صفحه بهینه که ابعاد آن توسط بردارهای ویژگی ورودی تعریف می شود، به کلاس ها جدا می کند. الگوریتم وسیع ترین حاشیه ممکن را برای جداسازی کلاس ها در فضای ویژگی تعریف می کند. SVM به یک پارامتر هسته تعریف شده نیاز دارد که برای نمایش بردارهای ورودی در فضای با ابعاد بالا استفاده می شود (Cortes & Vapnik, 1995:1). اگرچه هسته های زیادی برای SVM وجود دارد، در اینجا ما از یک هسته خطی استفاده می کنیم که امکان بازیابی اهمیت ویژگی یا نمایش ریاضی ویژگی های ورودی با بیشترین قدرت پیش بینی را فراهم می کند. مدل SVM که نقشه های باینری از گستره برف (حضور یا عدم وجود برف) را تولید می کنند.

ارزیابی عملکرد مدل SVM

این روش اعتبار سنجی از طریق مقایسه نمونه های طبقه بندی شده با نمونه های صحیح (مرجع) بدست آمده از ترکیب باندی تصاویر ماهواره ای لندست (۶۵۴) صورت گرفته است. پس از انجام فرایند نمونه برداری و مقایسه نمونه های تصویری با نمونه های مرجع بدست آمده، یک ماتریس خطا ایجاد می شود از مهم ترین فاکتورهایی که در گام اول در ماتریس خطا مورد توجه قرار میگیرد دقت کلی (overall accuracy) است، این فاکتور دقت را بر اساس تعداد پیکسل هایی که به درستی طبقه بندی شده اند محاسبه می کند. فاکتور دیگری که در زمینه اعتبار سنجی بسیار مورد توجه قرار می گیرد و اعتبار بالایی دارد پارامتر کاپاست. ضریب کاپا میزان دقت را بر عکس روش دقت کلی بر اساس تمامی پیکسل هایی که درست و غلط طبقه بندی شده اند محاسبه می نماید. این فاکتور از اعتبار بالاتری در مقایسه با دقت کلی برای ارزیابی دقت نقشه طبقه بندی برخوردار است. در این پژوهش برای ارزیابی کارایی مدل SVM از دو معیار عملکرد شامل ضریب کاپا و دقت کلی طبقه بندی استفاده شد.

بررسی اثر توپوگرافی بر میزان سطح برف

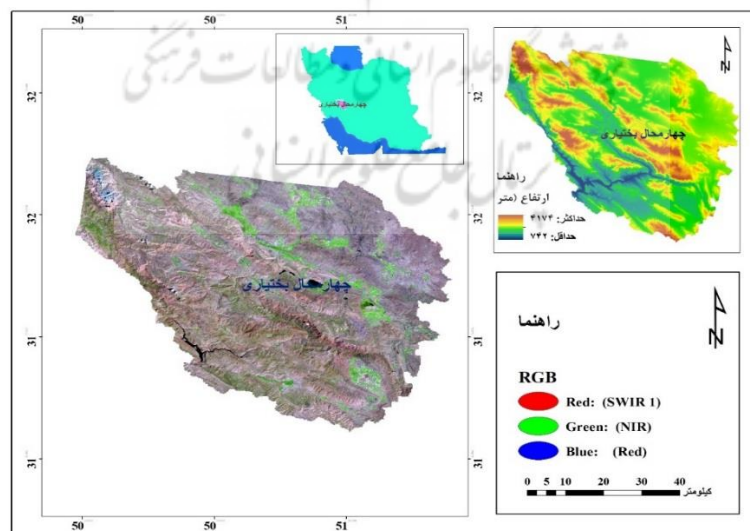
برای بررسی تأثیر اثرات توپوگرافی، هر یک از سه ویژگی توپوگرافی اصلی، ارتفاع، جهت و شیب، بر اساس ویژگی های توپوگرافی محلی به چند گروه تقسیم شدند. لازم به ذکر است که استخراج مشخصات توپوگرافی با استفاده از داده های DEM تکمیل شد سپس رابطه متقابل بین جهت شیب، جهت، ارتفاع و سطح پوشش برف در حوضه آبریز کارون شمالی تجزیه و تحلیل گردید. فلوچارت تحقیق در (شکل ۲) ارائه شده است.



شکل ۲. فلوچارت تحقیق
منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۴)

محدوده مورد مطالعه

استان چهارمحال بختیاری در جنوب غرب ایران با مساحت ۱۶۵۳۲ کیلومتر مربع بین ۴۹ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی و نیز ۳۱ درجه ۹ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. این استان در بخش مرکزی زاگرس واقع شده. از شمال شرق به استان اصفهان، از غرب به استان خوزستان، از جنوب به کهگلویه و بویر احمد و از شمال غرب به استان لرستان محدود است. رودخانه کارون پر آب‌ترین رودخانه ایران بوده که از سلسله جبال زاگرس سرچشمه می‌گیرد و در پایین دست سد کارون ۴ وارد دشت خوزستان می‌شود و نهایتاً به خلیج فارس می‌پیوندد. که نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۴)

بحث و یافته‌ها

توزیع فضایی پوشش برف در منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش برای استخراج پهنه‌های برفی از روی تصاویر ماهواره ای از روش طبقه بندی SVM استفاده شد. جهت ارزیابی کارایی مدل SVM از دو معیار عملکرد شامل ضریب کاپا و دقت کلی طبقه بندی استفاده شد. سپس مساحت پهنه‌ها در محیط پردازشی ArcGIS محاسبه گردید. تغییرات سطح برف در گستره ی شمالی حوضه آبخیز کارون برای ماه‌ها و سالهای مختلف، از سال هیدرولوژی (۱۳۹۸-۱۳۹۹) تا (۱۴۰۲-۱۴۰۳) در شکل (۸-۴) نشان داده شده است، داده‌های پوشش برف برای ماه‌های و سالهای مختلف برحسب هکتار، همچنین درصد تغییرات پوشش برف برای ماه‌های مختلف در جدول در جدول (۳) تا (۷) آورده شده است. که نتایج آن برای همراه به شرح زیر است:

۱) مهر (september): بیشترین مساحت برف مهر ماه، در سال (۱۴۰۰-۱۴۰۱) با مقدار ۱۵۴۷/۰۳۴ هکتار که ۰/۱۵٪ از کل منطقه را پوشش میدهد و کمترین آن در سالهای (۱۳۹۹-۱۴۰۱) که فاقد پوشش برف مشاهده شده است.

۲) آبان (October): بیشترین مساحت برف آبان ماه، در سال (۱۳۹۸-۱۳۹۹) با مقدار ۷۹۳۲۹/۹۵۶ هکتار که ۷/۴۷٪ از کل منطقه را پوشش میدهد و کمترین آن در سال (۱۳۹۹-۱۴۰۰) که فاقد پوشش برف مشاهده شده است.

۳) آذر (november): بیشترین مساحت برف آذر ماه، در سال (۱۳۹۸-۱۳۹۹) با مقدار ۱۶۶۳۹۶/۴۴۳ هکتار که ۱۵/۶۸٪ از کل منطقه را پوشش میدهد و کمترین آن در سال (۱۴۰۲-۱۴۰۳) با مقدار ۳۳۷/۰۴۷ هکتار؛ (۰/۰۳٪ از منطقه) مشاهده شده است.

۴) دی (december): بیشترین مساحت برف دی ماه، در سال (۱۴۰۱-۱۴۰۲) با مقدار ۵۴۶۵۱۹/۲۰۸ هکتار که ۵۱/۵۹٪ از کل منطقه را پوشش میدهد و کمترین آن در سال (۱۴۰۰-۱۴۰۱) با مقدار ۳۴۱۰۳۶۱۱ هکتار؛ (۳/۲۱٪ از کل منطقه) مشاهده شده است.

۵) بهمن (january): بیشترین مساحت برف بهمن ماه، در سال (۱۳۹۸-۱۳۹۹) با مقدار ۷۱۲۰۴۵۶۶ هکتار که ۶۷/۰۹٪ از کل منطقه را پوشش میدهد و کمترین آن در سال (۱۴۰۲-۱۴۰۳) با مقدار ۵۳۱۱۰/۱۸۴ هکتار؛ (۵٪ از کل منطقه) مشاهده شده است.

۶) اسفند (february): بیشترین مساحت برف اسفندماه، در سال (۱۴۰۲-۱۴۰۳) با مقدار ۴۸۹۰۴۴/۴۲۶ هکتار که ۴۶/۰۸٪ از کل منطقه را پوشش میدهد و کمترین آن در سال (۱۳۹۸-۱۳۹۹) با مقدار ۱۴۶۷۲۵/۵۱۵ هکتار؛ (۱۳/۸۳٪ از کل منطقه) مشاهده شده است.

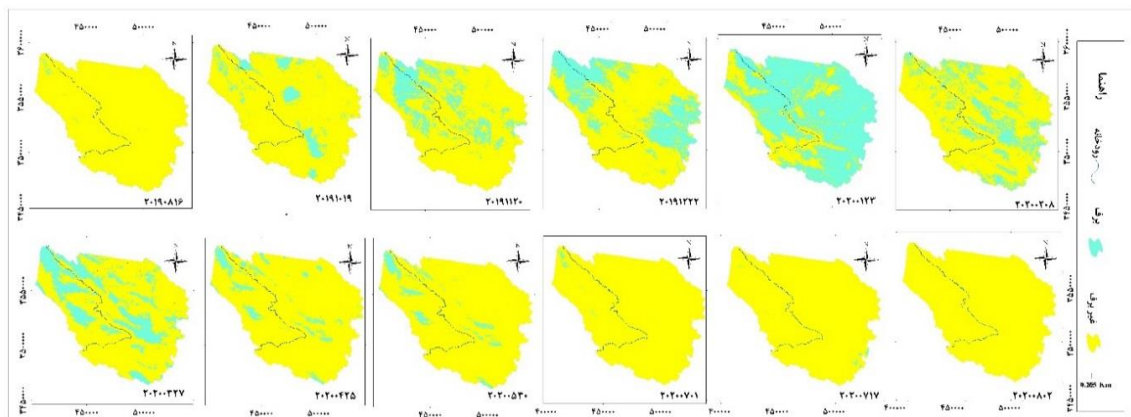
۷) فروردین (march): بیشترین مساحت برف فروردین ماه، در سال (۱۳۹۸-۱۳۹۹) با مقدار ۷۹۳۲۹/۹۵۶ هکتار که ۲۲/۱۵٪ از کل منطقه را پوشش میدهد و کمترین آن در سالهای (۱۳۹۹-۱۴۰۰) با مقدار ۱۴۱۶۰۴/۶۰۵ هکتار؛ (۱۳/۳۴٪ از کل منطقه) مشاهده شده است.

۸) اردیبهشت (april): بیشترین مساحت برف اردیبهشت ماه، در سال (۱۴۰۱-۱۴۰۲) با مقدار ۱۲۳۵۸۵/۲۷۵ هکتار که ۱۱/۶۷٪ از کل منطقه را پوشش میدهد و کمترین آن در سال (۱۳۹۹-۱۴۰۰) با مقدار ۲۷۲۶۰/۴۴۴ هکتار؛ (۲/۵۷٪ از کل منطقه) مشاهده شده است.

۹) خرداد (may): بیشترین مساحت برف خرداد ماه، در سال (۱۴۰۱-۱۴۰۲) با مقدار ۳۷۷۷۰/۵۹۲ هکتار که ۳/۵۷٪ از کل منطقه را پوشش میدهد و کمترین آن در سال (۱۳۹۹-۱۴۰۰) با مقدار ۷۶۷۷/۹۷۶ هکتار؛ (۰/۷۲٪ از کل منطقه) مشاهده شده است.

۱۰) تیر (june): بیشترین مساحت برف تیر ماه، در سال (۱۴۰۱-۱۴۰۲) با مقدار ۳۸۰۳۰/۱۴۶ هکتار که ۳/۵۸٪ از کل منطقه را پوشش میدهد و کمترین آن در سال (۱۳۹۹-۱۴۰۰) با مقدار ۴۶۲/۱۳ هکتار؛ (۰/۰۴٪ از کل منطقه) مشاهده شده است.

۱۱) مرداد (July): بیشترین مساحت برف مرداد ماه، در سال (۱۴۰۲-۱۴۰۱) با مقدار ۸۷۵۰/۳۷۹ هکتار که ۰/۸۳٪ از کل منطقه را پوشش میدهد و کمترین آن در سال (۱۴۰۰-۱۳۹۹) با مقدار ۲۳۷/۹۵ هکتار؛ (۰/۰۱٪ از کل منطقه) مشاهده شده است.



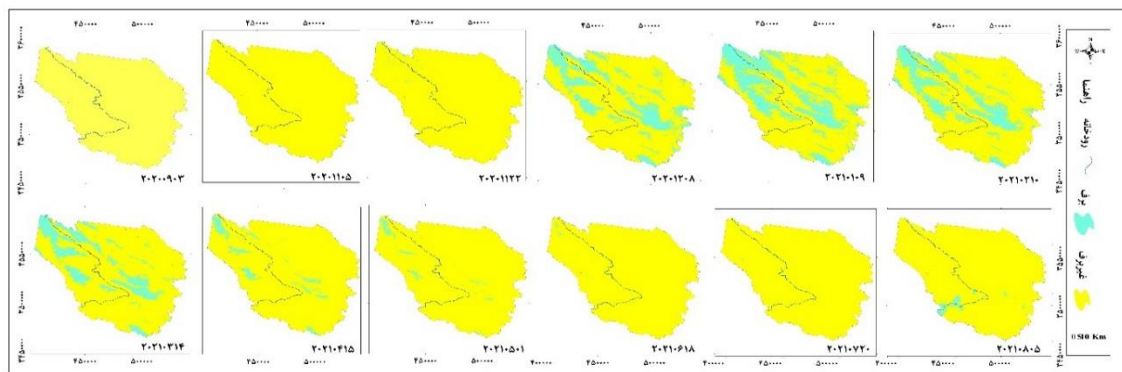
شکل ۴. تغییرات سطح پوشش برف به صورت زمانی و مکانی برای سال هیدرولوژی ۱۳۹۹-۱۳۹۸

جدول ۳. درصد مساحت سطوح برفی برای ماههای مختلف سال هیدرولوژی ۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹ در حوضه آبخیز کارون شمالی

تاریخ	میزان برف در حوضه آبخیز کارون		ارزیابی دقت	
	مساحت برف (هکتار)	درصد مساحت	ضریب کاپا	دقت کلی
20190816	1127/993	0/11	0/997	0/969
20191019	79329/956	7/47	0/983	0/964
20191120	166396/443	15/68	0/943	0/934
20191222	258552/519	2436	0/882	0/870
20200123	712045/660	67/09	0/958	0/963
20200208	146725/515	13/83	0/983	0/974
20200327	235074/394	22/15	0/963	0/954
20200428	48841/817	4/6	0/997	0/989
20200530	34870/986	3/29	0/979	0/953
20200701	1864/324	0/18	0/977	0/952
20200717	2286/041	0/22	0/992	0/983
20200802	52/833	0/001	0/999	0/986

جدول ۴- درصد مساحت سطوح برفی برای ماههای مختلف سال هیدرولوژی ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۰ در حوضه آبخیز کارون شمالی

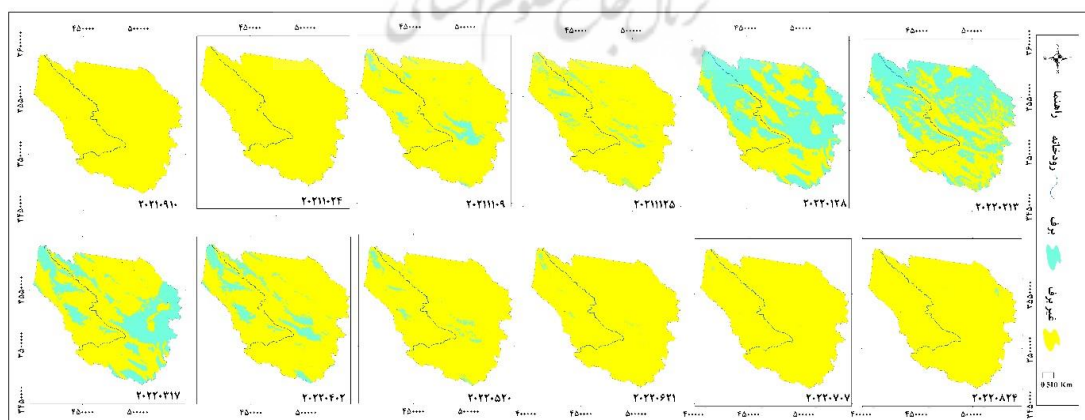
تاریخ	میزان برف در حوضه آبخیز کارون		ارزیابی دقت	
	مساحت برف (هکتار)	درصد مساحت	ضریب کاپا	دقت کلی
20200903	0/0	0/0	0/0	0/0
20201105	0/0	0/0	0/0	0/0
20201122	3314/748	0/31	0/982	0/986
20201208	181040/317	17/06	0/985	0/976
20210109	231133/973	21/78	0/973	0/952
20210210	172269/539	16/23	0/932	0/929
20210314	141604/605	13/34	0/952	0/946
20210415	27260/444	2/57	0/929	0/979
20210501	7677/976	0/72	0/973	0/978
20210618	462/130	0/04	0/986	0/980
20210720	95/237	0/01	0/986	0/970
20210805	2634/887	0/25	0/988	0/998



شکل ۵. تغییرات سطح پوشش برف به صورت زمانی و مکانی برای سال هیدرولوژی ۱۳۹۹-۱۴۰۰

جدول ۵. درصد مساحت سطوح برفی برای ماههای مختلف سال هیدرولوژی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱ در حوضه آبخیز کارون شمالی

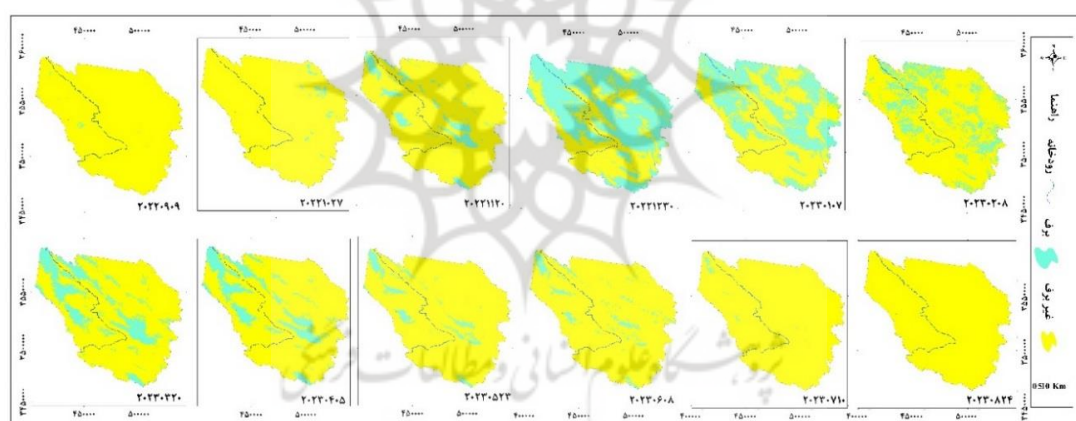
تاریخ	میزان برف در حوضه آبخیز کارون		ارزیابی دقت	
	مساحت برف (هکتار)		ضریب کاپا	دقت کلی
202109	0/0	0/0	0/0	0/0
20211024	119/243	0/01	0/991	0/998
20211109	47472/559	4/47	0/976	0/972
20211125	34103/611	3/21	0/954	0/94
20220128	492576/628	46/41	0/952	0/931
20220213	474557/775	44/72	0/892	0/922
20220317	282919/178	26/66	0/94	0/92
20220402	86565/145	8/16	0/931	0/937
20220520	12192/144	1/15	0/982	0/937
20220621	1609/381	0/15	0/988	0/98
20220707	227/008	0/02	0/983	0/978
20220824	1018/855	0/1	0/982	0/959



شکل ۶. تغییرات سطح پوشش برف به صورت زمانی و مکانی برای سال هیدرولوژی ۱۴۰۰-۱۴۰۱

جدول ۶. درصد مساحت سطوح برفی برای ماههای مختلف سال هیدرولوژی ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۲ در حوضه آبخیز کارون شمالی

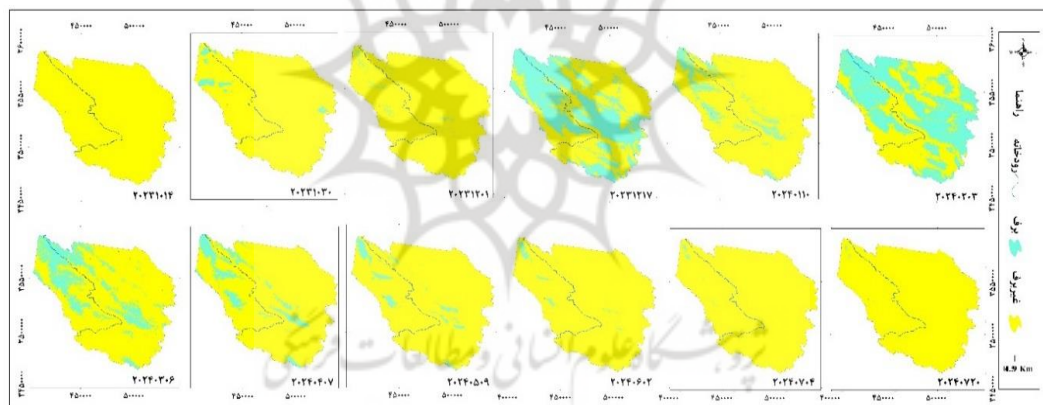
تاریخ	میزان برف در حوضه آبخیز کارون		ارزیابی دقت	
	مساحت برف (هکتار)	درصد مساحت	ضریب کاپا	دقت کلی
20220909	1547/034	0/15	0/952	0/94
20221027	9142/554	0/86	0/983	0/959
20221120	78117/064	7/37	0/975	0/952
20221230	546519/208	51/59	0/954	0/94
20230107	330217/264	31/17	0/952	0/931
20230213	475579/319	44/89	0/892	0/932
2023020	147700/873	13/94	0/94	0/920
20230405	123585/275	11/67	0/931	0/937
20230523	37770/593	3/57	0/982	0/972
20230608	38030/146	3/58	0/99	0/980
20230710	8750/379	0/83	0/983	0/997
20230824	0/0	0/0	0/0	0/0



شکل ۷. تغییرات سطح پوشش برف به صورت زمانی و مکانی برای سال هیدرولوژی ۱۴۰۱-۱۴۰۲

جدول ۷. درصد مساحت سطوح برفی برای ماههای مختلف سال هیدرولوژی 1402 تا 1403 در حوضه آبخیز کارون شمالی

تاریخ	میزان برف در حوضه آبخیز کارون			ارزیابی دقت
	مساحت برف (هکتار)	درصد مساحت	ضریب کاپا	
20231014	67/74	0/01	0/989	0/972
20231030	20632/17	1/94	0/952	0/929
20231201	337/047	0/03	0/977	0/969
20231217	441860/139	41/63	0/952	0/979
20240110	53110/184	5	0/929	0/922
20240203	489044/426	46/08	0/969	0/977
20240306	148357/284	13/98	0/963	0/952
20240407	70388/106	6/63	0/927	0/929
202405	27854/371	2/62	0/963	0/969
20240602	7214/264	0/68	0/974	0/948
20240704	1251/696	0/12	0/976	0/988
20240720	432/378	0/04	0/981	0/952



شکل ۸. تغییرات سطح پوشش برف به صورت زمانی و مکانی برای سال هیدرولوژی ۱۴۰۲-۱۴۰۳

میانگین سالانه SCA

پس از استخراج پهنه های برفی از روی تصاویر ماهواره های با روش طبقه بندی SVM، مساحت پهنه ها در محیط پردازشی ArcGIS محاسبه گردید و نتایج آن در جدول ۸ ارائه شده است. تغییرات درصد سطح برف در ماههای مختلف از مهر تا شهریور سال بعد با کم کردن میانگین درصد SCA ماه قبل از ماه حاضر در نظر گرفته شده است. در نتیجه، ماه های مهر تا بهمن در منطقه تغییرات مثبت مشاهده شد. از اسفند ماه تا مهر ماه تغییر منفی بود، این نشان می دهد که ذوب برف در این موارد متوالی رخ می دهد. همچنین مشاهده شد که تغییر مثبت در دی ماه حداکثر بوده و تغییر منفی از اسفند آغاز شده است. این بدان معنی است که ذوب پوشش برف در ماه فروردین و اردیبهشت، شتاب می گیرد و در طول فصل تابستان ادامه می یابد. میانگین پهنه های برفی طی ۵ سال محاسبه گردید نتایج نشان داد که بیشترین آن با

مساحت 140597/37 هکتار (13/25٪) در سال ۱۳۹۸-۱۳۹۹ و کمترین آن با 63957/82 هکتار (6/03٪) در سال ۱۳۹۹-۱۴۰۰ بوده است.

جدول ۸ روند تغییرات گستره برفی (SCA٪) حوضه آبخیز کارون شمالی در مقیاس ماهانه بین سالهای 1398 تا ۱۴۰۳

تغییرات نسبت به ماه قبل	میانگین ماهانه %	1402- 1403	1401- 1402	1400- 1401	1399- 1400	1398- 1399	
-0/03	0/05	0/01	0/15	0/0	0/0	0/11	مهر
2/01	2/06	1/94	0/86	0/01	0.00	7/47	آبان
3/51	5/57	0/03	7/35	4/47	0.31	15/68	آذر
21/98	27/55	41/63	51/5	3/21	17/06	24/36	دی
6/73	34/28	5.00	31/12	46/41	21/78	67/09	بهمن
-8/07	26/21	46/08	10/19	44/72	16/23	13/83	اسفند
-8/20	18/08	13/98	13/92	26/66	13/34	22/15	فروردین
-11/29	6/72	6/63	11/65	8/16	2/57	4/6	اردیبهشت
-4/45	2/27	2/62	3/56	1/15	0/72	3/29	خرداد
-1/34	0/92	0/68	3/57	0/15	0/04	0/18	تیر
-0/69	0/24	0/12	0/82	0/02	0/01	0/22	مرداد
-0/16	0/04	0/04	0.00	0/10	0/25	0.00	شهریور
		9/9	11/22	11/26	6/03	13/25	میانگین سالانه SCA٪
		105045/82	119107/8	119446/79	63957/82	140597/37	میانگین سالانه (هکتار) SCA

میانگین فصلی SCA

بررسی توزیع فصلی پوشش برف نشان می‌دهد که فصل زمستان بیشترین مقدار مساحت پهنه‌های برفی حوضه آبخیز کارون شمالی به خود اختصاص داده است، در حالی که فصل تابستان کمترین مقدار پوشش برف را داراست. متوسط مساحت پوشش برف در زمستان طی دوره مطالعه برابر با ۳۱۱۴۶۰/۶۴، برآورد شد. بیشترین مقدار زمستان در سال ۱۳۹۸-۱۳۹۹ با ۳۷۲۴۴۱/۲۳ زمین و کمترین آن در سال ۱۳۹۹-۱۴۰۰ با ۱۹۴۸۱۴/۹۱ مشاهده شد. با ورود به فصل بهار و هم‌زمان با افزایش هوا و کاهش فراوانی سامانه‌های بارش‌های برفی، مساحت پوشش برف را می‌توان کاهش داد. نتایج نشان می‌دهد که مساحت پوشش برف از ۳۱۱۴۶۰/۶۴ زمین در زمستان به ۹۵۵۱۰/۸۸ هکتار در بهار کاهش یافته است. در این فصل، بیشترین گستره برفی با ۱۲۷۲۲۵/۴۹ زمین در سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و کمترین آن با ۵۸۸۴۷/۶۸ زمین در سال ۱۳۹۹-۱۴۰۰ ثبت شده است. در بهار، پوشش برف در ارتفاعات بالای رشته‌کوه زردکوه است. فصل تابستان که

اوج گرم سالانه در منطقه می شود، کمترین میزان پوشش برف را داراست. حدود مساحت پوشش برف در این فصل تنها ۵۹۴۲/۰۵ تخمین زده می شود و برف ها ارزیابی می شود به قله ها و ارتفاعات بالاتر از ۳۵۰۰ متر محدود می شوند. بیشترین مساحت تابستانه در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲ با ۲۳۳۲۷/۲۲ زمین و کمترین آن در سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ با ۹۵۱/۷۵ زمین مشاهده شد. در فصل پاییز، همزمان با آغاز سرمایش هوا و نفوذ سامانه های بارشی به منطقه، پوشش برف مجدداً در ارتفاعات زردکوه شکل می گیرد. مساحت پوشش برف در پاییز طی سالهای ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۳ برابر با ۲۹۲۰۱/۹۹ زمین است که پس از زمستان و بهار، در رتبه سوم قرار دارد. این افزایش پایانی تا زمستان ادامه می یابد (جدول ۹).

جدول ۹. روند تغییرات گستره برفی حوضه آبخیز کارون شمالی در مقیاس فصلی بین سالهای ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۳

سال	پاییز	زمستان	بهار	تابستان
1398-1399	82284.80	372441/23	106262/40	1401/07
1399-1400	3314/75	194814/61	58847/68	۰۹/1064
1400-1401	23795/90	333746/01	127225/49	951/75
1401-1402	29602/21	328296/42	103018/91	23327/22
1402-1403	7012/32	328004/92	82199/92	2966/11
میانگین فصلی	29201/99	311460/64	95510/88	5942/05
% میانگین فصلی	6/61	70/45	21/6	1/34

توزیع پوشش برف با ارتفاع

ویژگی های توپوگرافی از ارتفاع، شیب و جهت شیب نقش مهمی در کنترل توزیع مکانی و زمانی پوشش برف، به ویژه در مناطق کوهستانی ناهموار، ایفا می کنند (Saydi et al., 2020:1). در این پژوهش، به منظور بررسی ارتباط پوشش برف با پارامترهای توپوگرافی از داده های ASTER GDEM استفاده کردیم.

میانگین ماهانه SCA با مناطق ارتفاعی در حوضه آبخیز کارون

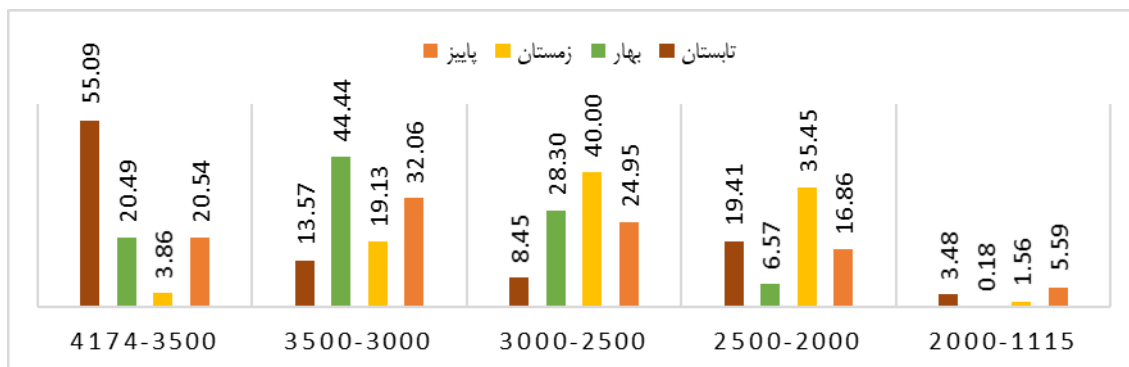
نتایج جدول (۱۰) نشان می دهد که با افزایش ارتفاع، فراوانی و دوام پوشش برف افزایش می یابد. در ارتفاعات پایین تر از ۲۰۰۰ متر، پوشش برف محدود و ناپایدار است، در حالی که در ارتفاعات بالاتر از ۳۰۰ متر، پوشش برف برای مدت طولانی تری در طول سال حفظ می شود. اوج مقدار SCA در فصل زمستان رخ می دهد، اما زمانبندی پوشش برف با افزایش ارتفاع تغییر می کند. به گونه ای که در ارتفاعات پایین تر، بیشینه SCA در ماه های دی و بهمن مشاهده می شود، در حالی که در ارتفاعات بالاتر، این بیشینه به ماه های پایانی زمستان و حتی اوایل بهار منتقل می شود. این موضوع نشان دهنده نقش کلیدی دمای هوا و بررسی در ارتفاعات بالاتر است.

جدول ۱۰. میانگین ماهانه پوشش برف با توجه به تغییر ارتفاع

ارتفاع	%SCA				
	۲۰۰۰-۱۱۱۵	۲۵۰۰-۲۰۰۰	۳۰۰۰-۲۵۰۰	۳۵۰۰-۳۰۰۰	۴۱۷۴-۳۵۰۰
مهر	10/37	18/45	16/90	26/63	27/65
آبان	7/52	37/64	15/77	17/12	21/96
آذر	4/53	8/85	29/73	39/01	17/88
دی	1/25	29/76	39/94	24/40	4/64
بهمن	2/61	35/44	39/12	18/44	4/39
اسفند	0/82	41/15	40/93	14/55	2/54
فروردین	0/42	15/92	50/05	28/12	5/48
اردیبهشت	0/01	3/58	29/18	50/12	17/11
خرداد	0/1	0/22	5/07	49/07	45/54
تیر	0/03	2/61	6/21	17/87	73/28
مرداد	11/98	31/52	13/57	5/48	37/44
شهریور	0/04	34/45	8/09	11/17	46/25

میانگین فصلی SCA با مناطق ارتفاعی

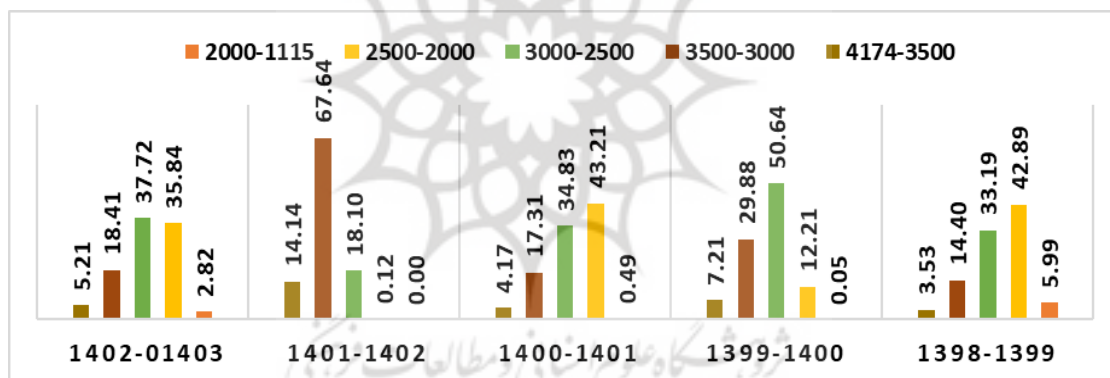
بررسی فصلی SCA نشان می‌دهد که به‌جز فصل زمستان، در ارتفاعات کمتر از ۲۵۰۰ متر، مقدار SCA معمولاً کمتر از ۲۰ درصد است. در ارتفاعات ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متر، افزایش SCA با ارتفاع به‌طور محسوسی نمایان می‌شود. در فصل‌های انتقالی بهار و پاییز، ارتفاع پوشش برف متفاوت است. به‌طوری‌که در ارتفاعات پایین‌تر، پاییز دارای SCA بیشتر نسبت به بهار است، در حالی که در ارتفاعات بالاتر از ۲۵۰۰ متر، کمتر SCA در بهار بیشتر از پاییز می‌باشد. در فصل زمستان، متوسط میانگین SCA در ارتفاعات ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر مشاهده می‌شود که به‌طوری‌که با پایین‌ترین و دمای پایین‌ترین دمای هوا برفی مرتبط است، مشاهده می‌شود. با این حال، در ارتفاعات بالاتر از ۳۵۰۰ متر، میانگین SCA زمستانه نسبت به سایر فصول کمتر است که می‌تواند به محدودیت مساحت این طبقه ارتفاعی و توزیع خاص برف در قله‌ها نسبت داده شود. به‌طور کلی، بیشترین میانگین سالانه SCA در ارتفاعات حدود ۳۰۰۰ متر رخ می‌دهد و این ارتفاع نقش کلیدی در پویایی سالانه پوشش برف حوضه آبخیز کارون شمالی ایفا می‌کند (شکل ۹).



شکل ۹. میانگین فصلی SCA% با ارتفاع در حوضه ابخیز کارون شمالی.

رابطه بین ارتفاع و SCA سالانه در حوضه ابخیز کارون شمالی

تغییرات SCA در مناطق مختلف ارتفاعی از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ تجزیه و تحلیل شد. شکل (۱۰) اطلاعاتی را در مورد بالاترین، کمترین و میانگین مقادیر SCA ثبت شده در ارتفاعات مختلف ارائه می دهد. محدوده های ارتفاعی کمتر از ۲۰۰۰ متر کمترین میانگین SCA% را با میانگین ۱/۸۷٪ و محدوده بیشتر از ۳۵۰۰ متر ۶/۸۵٪ نشان می دهد. منطقه ارتفاعی ۲۵۰۰-۳۰۰۰ بالاترین میانگین SCA% را با میانگین ۳۴/۹٪ را نشان می دهد و پس از آن ناحیه ۳۵۰۰-۳۰۰۰ و ۲۵۰۰-۲۰۰۰ ارتفاعی قرار دارند.



شکل ۱۰. میانگین سالانه SCA% با مناطق ارتفاعی در حوضه آخیز کارون شمالی..

توزیع پوشش برف با Aspect

تحلیل میانگین ماهانه SCA با توجه به جهت شیب (Aspect)

توزیع پوشش برف بر اساس چهار کلاس اصلی جهت شیب: شمال (۳۱۵-۴۵°)، جنوب (۴۵-۱۳۵°)، غرب (۲۲۵-۳۱۵°)، و شرق (۲۱۵-۲۲۵°) تحلیل شد. وسعت هر به ترتیب برابر با ۲۸۱۹۱۲/۴ سطح (۲۶/۵۶٪) برای شمال، ۲۳۲۶۳۷/۷ درصد (۲۱/۹۲٪) برای شرق، ۲۸۷۳۹۷/۷ زمین (۲۷/۰۸٪) برای جنوب و ۲۵۹۳۶۳/۶ زمین (۲۴/۴٪) برای غرب است. نتایج نشان می دهد بیشترین میانگین SCA در جهت های شمال شرق و رخ می دهد، که با سایه دار بودن این جهات و کاهش تابش مستقیم خورشید در نیمکره شمالی مرتبط است. در مقابل، جهت های جنوب و غرب با دریافت تابش بیشتر، روند ذوب برف سریع تری دارند و پوشش برف در آن ها کمتر است. به طور نمونه، در ماه های آذر تا تیر، شمال دارای بیشترین درصد پوشش برف است، در حالی که به جهت بالاتر در ارتفاعات بالا و در ماه های مرداد تا آبان SCA را می دهد. جهت جنوب، به دلیل تابش مستقیم و گرمای بیشتر، کمترین درصد برف را در طول فصل ذوب (اردیبهشت تا

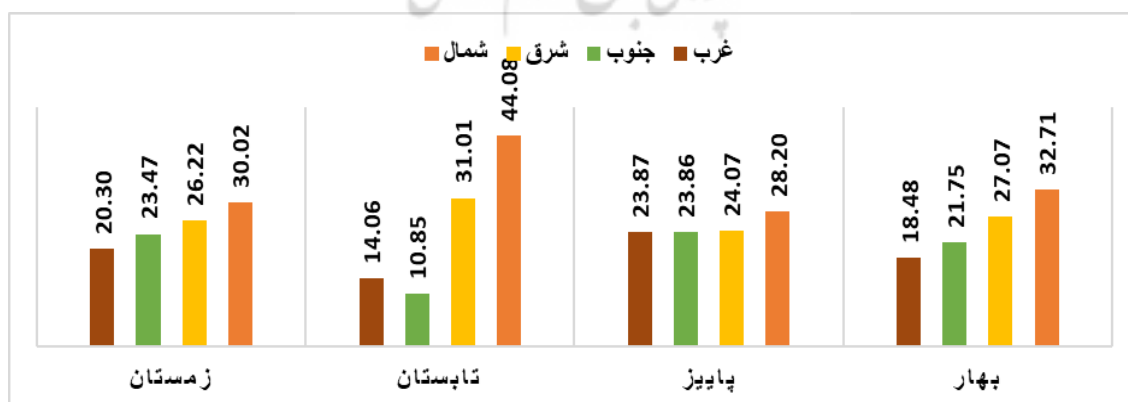
آبان) دارد، و جهت غرب شیب نیمه سایه مناطق کوهستانی از آذر ماه تا فروردین ماه که دوره انباشت برف است کمترین % سطح برف را دارا می باشد. جزئیات بیشتر SCA% برای هر کلاس جهت به صورت میانگین ماهانه در جدول (۱۱) نشان داده شده است.

جدول ۱۱. میانگین ماهانه پوشش برف با توجه به تغییر جهت شیب

ماه	طبقات جهت شیب			
	شمال	شرق	جنوب	غرب
فروردین	31/99	28/56	22/01	17/44
اردیبهشت	43/12	29/22	12/90	14/88
خرداد	45/87	23/17	9/66	11/30
تیر	42/79	38/35	8/94	9/92
مرداد	31/93	33/65	13/73	20/68
شهریور	26/82	36/72	14/16	22/29
مهر	34/35	35/15	12/56	17/95
آبان	23/45	32/86	20/12	23/57
آذر	28/61	23/80	30/97	16/62
دی	44/85	22/17	16/98	16
بهمن	32/58	27/50	21/18	18/74
اسفند	28/40	27/87	25/91	17/81

میانگین تغییرات فصلی درصد SCA با تغییر جهت شیب

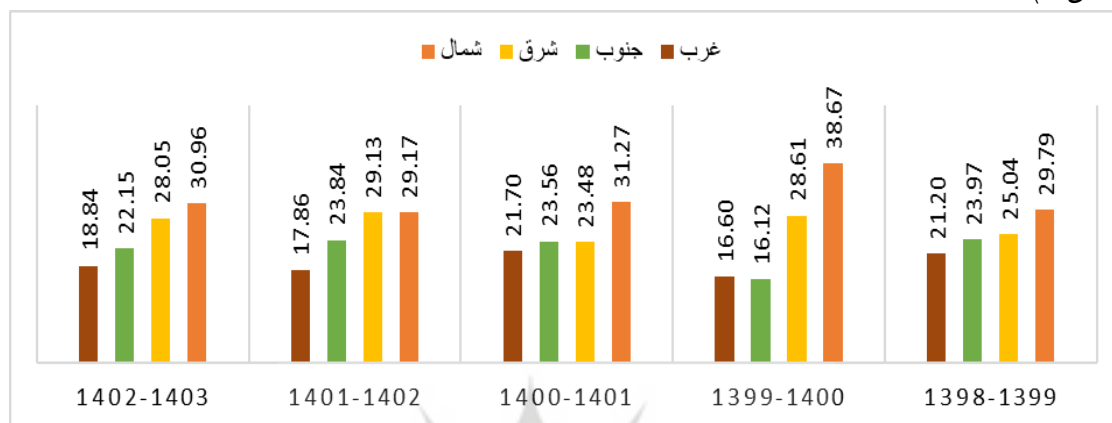
تحلیل فصلی نشان می دهد که جهت شیب تأثیرات قابل توجه بر الگوی تجمع و ذوب برف است. در کل سال، بیشترین SCA در جهت شمال (۱۳/۷۵٪) و شرق (۲۷/۰۹٪) ثبت شده و کمترین میانگین در غرب (۱۹/۱۸٪) و جنوب (۱۹/۹۸٪) مشاهده شده است. این الگو با استفاده از تابش خورشیدی و سایه دار بودن شیبها سازگار است جهت های رو به شمال اغلب در نیمکره شمالی سایه دارند و برف در آنها دیرتر ذوب می شود، در حالی که ضلع جنوبی جهت های تابش بیشتر می شود و سرعت ذوب برف در آنها بیشتر است. (شکل ۱۱) میانگین تغییرات درصد SCA فصلی را با کلاس های جهت مختلف نشان می دهد.



شکل ۱۱. میانگین فصلی SCA% با مناطق جهت شیب در حوضه آخیز کارون شمالی

میانگین تغییرات درصد SCA سالانه با تغییر جهت شیب

(شکل ۱۲) میانگین تغییرات درصد SCA سالانه را با کلاس های جهت مختلف نشان می دهد. بخش شمالی دارای بیشترین درصد SCA است، در حالی که غرب و جنوب کمترین درصد SCA را به خود اختصاص داده است. وسعت پوشش فضایی برف حداکثر در جهت شمال (SCA $\% 31/27$) در سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و شرقی (SCA $\% 29/13$) در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲ و حداقل در جهت غرب (SCA $\% 16/60$) و جنوب (SCA $\% 16/12$) در سال ۱۳۹۹-۱۴۰۰ است (شکل ۱۲).



شکل ۱۲. میانگین سالانه SCA% با مناطق جهت شیب در حوضه آخیز کارون شما

ارتباط توزیع پوشش برف با تغییرات شیب

تجزیه و تحلیل تغییرات فضایی و زمانی میانگین ماهانه SCA% با توجه به تغییر در شیب

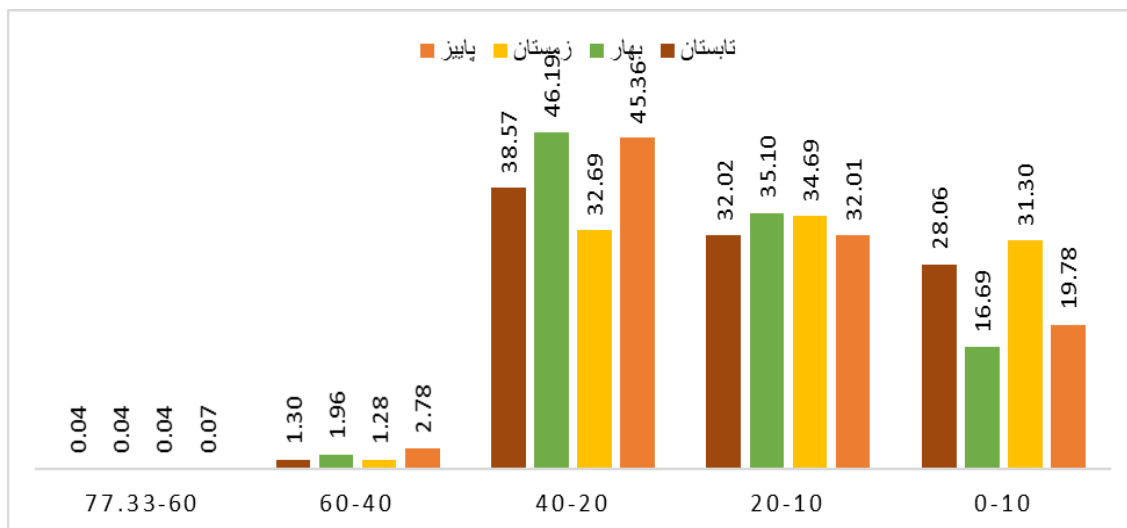
شیب زمین در محدوده ۰ تا $77/33^\circ$ درجه است و برای تحلیل، به پنج کلاس: $0-10^\circ$ ، $10-20^\circ$ ، $20-40^\circ$ ، $40-60^\circ$ و $>60^\circ$ تقسیم شد. وسعت عمده حوضه ($4827/51$ هکتار) در کلاس شیب $0-10^\circ$ واقع شده و تنها 0.1 زمین در کلاس $>60^\circ$ قرار دارد. نتایج نتایج ماهانه CA نشان می دهد که بیشترین درصد پوشش برف در کلاس $20-40^\circ$ ($\approx 40\%$) است، هرچند این محدوده کمتر از کلاس $0-10^\circ$ است. کلاس های $10-20^\circ$ و $0-10^\circ$ به ترتیب دارای میانگین SCA $34\%/65$ و $23\%/52$ هستند. کلاس های شیب بالای 40° درجه بسیار کمی از پوشش برف را شامل می شود، زیرا این محدوده محدود است و شیب زیاد مانع انباشت برف می شود (جدول ۱۲).

جدول ۱۲. میانگین ماهانه SCA% با مناطق شیب در حوضه آخیز کارون شمالی

شیب (درجه)	SCA%				
	0-10	20-10	40-20	60-40	77.33-60
فروردین	23/1	35/54	39/61	1/73	0/03
اردیبهشت	14/73	34/02	49/29	1/93	0/03
خرداد	1 1/8	34/57	51/63	1/98	0/03
تیر	13/77	37/32	46/99	1/85	0/07
مرداد	21/73	38/39	38/02	1/75	0/01
شهریور	35/05	31/34	32/44	1/15	0/03
مهر	16/05	39/65	42/25	1/3	0/01
آبان	35/03	27/94	34/3	2/67	0/09
آذر	16/34	32/99	47/46	3/11	0/09
دی	30/03	34/19	34/44	1/34	0/03
بهمن	31/99	33/97	32/65	1/35	0/04
اسفند	31/9	35/95	30/97	1/16	0/03
میانگین	23/52	34/65	40	1/78	0/05

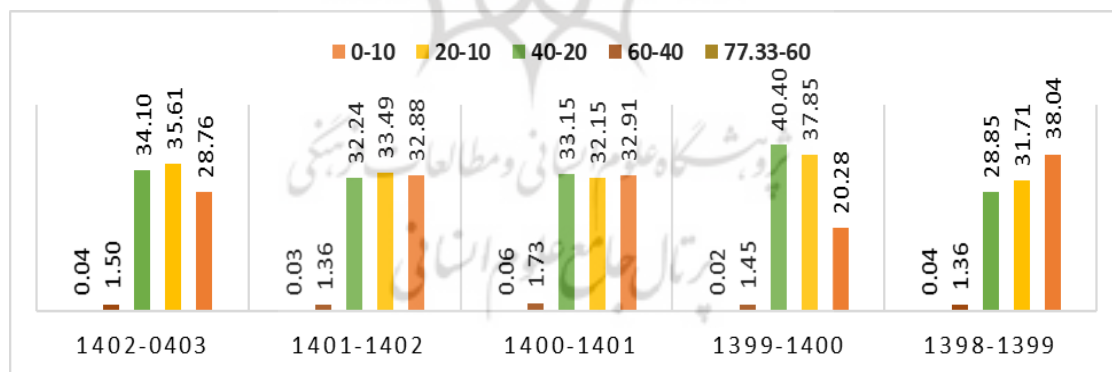
میانگین فصلی SCA% با تغییرات میزان شیب

تجزیه و تحلیل دقیق رابطه SCA-شیب نشان می دهد که محدوده شیب ۲۰-۴۰ درجه که حداکثر بارش برف را دریافت می کند نوسان فصلی درصد SCA از ۳۲/۶۹٪ تا ۴۶/۱۹٪ متغیر است. در فصل زمستان به دلیل بارش برف زمستانه در ارتفاعات پایین و بالا هم برای کلاس شیب دیگر مانند ۱۰-۰ و ۲۰-۱۰ درجه، درصد SCA تقریباً برابر با کلاس ۲۰-۶۰ می باشد. کمترین میزان درصد SCA در طول تمام فصول در منطقه با شیب بالای ۶۰ درجه بوده است. نوسان فصلی درصد SCA از ۰/۰۴٪ تا ۰/۰۷٪ متغیر است. این کلاس شیب حدود ۰/۱ هکتار از منطقه مورد مطالعه را پوشش می دهد و در مناطق مرتفع وجود دارد. محدوده ۴۰-۶۰ درجه که ۲/۸ هکتار از منطقه را در برمیگیرد نیز بعد از محدوده شیب بالای ۶۰ درجه کمترین میزان درصد SCA را دارا می باشد. نوسان فصلی درصد SCA از ۱/۲۸٪ تا ۲/۷۸٪ متغیر است (شکل ۱۳).



شکل ۱۳. میانگین فصلی SCA% با مناطق شیب در حوضه آخیز کارون شمتغیر سالانه سطح پوشش برف با توجه به تغییرات شیب

شیب نقش عمده ای در توزیع برف ایفا می کند. در این مطالعه حداکثر SCA در سالهای (۱۳۹۹-۱۴۰۰)، (۱۴۰۰-۱۴۰۱) و (۱۴۰۲-۱۴۰۳) در کلاس شیب ۲۰-۴۰ یافت شد. حداکثر وسعت منطقه ای (۴۰٪) در محدوده شیب ۰ تا ۱۰ است که در سال (۱۳۹۸-۱۳۹۹) بیشترین درصد برف را به خود اختصاص داد که برابر با (۳۸/۰۴٪) از سطح برف سالیانه بود. سال (۱۴۰۱-۱۴۰۲) بیشترین درصد برف را در کلاس (۱۰-۲۰) درجه برابر با ۳۳/۴۹٪ می باشد. کمترین درصد برف در کل سالها به کلاس شیب بالای ۶۰ درجه بود. به دلیل نیروی ثقل نمیتواند برف را نگهدارد، همچنین وسعت کمی از منطقه در این محدوده شیب قرار دارد (شکل ۱۴).



شکل ۱۴. میانگین سالانه SCA% با مناطق شیب در حوضه آخیز کارون شمالی

نتیجه گیری

حوضه آخیز کارون شمالی، واقع در بخش مرکزی رشته کوه زاگرس، یکی از پیچیده ترین حوضه های کوهستانی کشور از نظر ناهمواری دامنه، ارتفاع و روندهای برفی-هیدرولوژیکی است. با توجه به نقش کلیدی ذوب برف در جریان رودخانه کارون و تغذیه منابع آب سطحی و زیرزمینی، پایش و تحلیل پوشش برف این حوضه از ویژه ای است. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از تصاویر Landsat8 و الگوریتم طبقه بندی SVM، امکان انتخاب پوشش برف با دقت بالا را فراهم کرده است. به طوری که دقت کلی و ضریب کاپا در تمام فصول بیش از ۰/۹ به دست آمد که بیانگر کارایی مناسب روش پیشنهادی در کلاس های برف و غیر برف است. مقایسه نتایج نشان داد که الگوریتم طبقه بندی کننده SVM توانسته

است آستانه بین دو کلاس برف و غیر برف در شاخص ها را به خوبی مشخص کند، در صورت استفاده از روش آستانه گذاری شاخص های پوش برف، تعیین مقدار آستانه صحیح دشوار بود.

تحلیل تغییرات پوشش برف حاکی از آن است که میزان سالانه سطح پوشش برف (SCA) در دوره مورد مطالعه، به ترتیب حداکثر با مساحت 140597/37 هکتار (۱۳/۲۵٪) و حداقل با مساحت 63957/82 هکتار (6/03٪) در سال های ۱۳۹۸-۱۳۹۹ و ۱۳۹۹-۱۴۰۰ بوده است. ارزیابی تغییرات فصلی منجر به حداکثر میانگین (SCA 70/44٪) در زمستان و حداقل (۱/۳۴٪) در تابستان شد. میانگین SCA ماهانه حداکثر در بهمن ماه (۳۴/۲۸٪) و حداقل یعنی در ماه مهر (۰/۰۵٪) بود. از ماه مهر تا بهمن در منطقه تغییرات مثبت مشاهده شد. از اسفند ماه تا شهریور ماه تغییر سطح برف منفی بود، این بدان معنی است که ذوب پوشش برف در ماه فروردین و اردیبهشت، به ویژه در ارتفاعات کم، شتاب می گیرد و در طول فصل تابستان ادامه می یابد. روند کاهشی SCA در آینده تا تابستان بیانگر تسریع روند ذوب برف، به ویژه در ارتفاعات پایین تر، و تداوم آن در فصل گرم سال است که پیام های مهم برای مدیریت منابع آب دارد.

استان چهارمحال بختیاری از نظر فضایی بسیار ناهموار است و عواملی مانند تفاوت های ارتفاعی از سطح دریا تأثیر قابل توجهی بر توزیع دما و تجمع / ذوب برف در منطقه می گذارند.

پوشش برف در چهارمحال بختیاری وابستگی شدید به ارتفاع دارد و SCA بالاتر به خوبی با رشته کوه های مرتفع زردکوه مطابقت دارد. مناطق با SCA کمتر در دره جنوبی و بخش مرکزی چهارمحال بختیاری یافت می شود. نتایج تحلیل توپوگرافی نشان داد که ارتفاع مهم ترین عامل کنترل کننده توزیع پوشش برف در حوضه آبخیز کارون شمالی است. به طوری که میانگین SCA در ارتفاعات کمتر از ۲۰۰۰ متر کمتر از ۲ درصد و در ارتفاعات بالاتر از ۲۵۰۰ متر به حدود ۷۰ درصد می رسد. این یافته ها با نتایج مطالعات پیشین در مناطق کوهستانی مانند فلات تبت (Pu & Xu, 2009)، هیمالیا (Maskey et al., 2011; Tahir et al., 2016) و آسیای مرکزی (Liu et al., 2017) همخوانی دارند که ارتفاعات بالا دارای تجمع و ماندگاری بیشتر برف هستند.

علاوه بر ارتفاع، جهت و شیب دامنه ها نیز نقش معناداری در الگوی مکانی پوشش برف ایفا می کنند. نتایج این مطالعه نشان داد که بیشترین وسعت پوشش برف در دامنه های رو به به شمال (۳۳/۷۵ درصد) و شرق (۲۷/۰۹ درصد) و کمترین مقدار آن در دامنه های رو به جنوب (۱۹/۹۸ درصد) و غرب (۱۹/۱۸ درصد) مشاهده می شود که با یافته های Jain et al. (2009)، Lopez-Moreno et al. (2014) و Zhang et al. (2017) مبنی بر تأثیر تابش خورشیدی و انرژی بر تجمع و ذوب برف سازگار است. همچنین مشخص می شود که SCA با افزایش شیب تا یک حد مشخص افزایش یافته و در شیب های بسیار تند کاهش می یابد حداکثر و حداقل SCA% به ترتیب در کلاس شیب ۲۰-۴۰ و ۶۰-۷۷/۳۳ یافت شد. که نشان دهنده نقش هم زمان شیب، جهت و ارتفاع در کنترل میزان پوشش برف است. نتایج این پژوهش نشان می دهد که داده های سنجش از دور با تحلیل هم زمان توپوگرافی، ابزار کارآمدی برای درک تغییرات مکانی-زمانی پوشش برف در حوضه آبخیز کارون شمالی کمک می کند. یافته های این مطالعه می تواند به عنوان پایه ای برای توسعه مدل های پیش بینی رواناب، ارزیابی نتایج تغییر اقلیم و بهبود برنامه ریزی و مدیریت پایدار منابع آب در مناطق کوهستانی زاگرس استفاده شود.

حامی مالی

بنابه اظهار نویسنده مسئول، این مقاله مستخرج از رساله دکتری حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان

نویسندگان در انجام این پژوهش سهم برابر دارند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می دارند، هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از افرادی که در نشر این مقاله همکاری داشته اند، تشکر می کنند.

منابع

- 1) Atchley, A. L., Painter, S. L., Harp, D. R., Coon, E. T., Wilson, C. J., Liljedahl, A. K., & Romanovsky, V. E. (2015). Using field observations to inform thermal hydrology models of permafrost dynamics with ATS (v0. 83). *Geoscientific Model Development*, 8(9), 2701–2722. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2701-2015>
- 2) Azizi, A. H. & Akhtar, F. (2022). Analysis of spatiotemporal variation in the snow cover in Western Hindukush-Himalaya region, *Geocarto International*, 37(22), 6602-6624, DOI: 10.1080/10106049.2021.1939442
- 3) Blau, M.T., Kad, P., Turton, J.V. et al.. (2024). Uneven global retreat of persistent mountain snow cover alongside mountain warming from ERA5-Land. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, Article 278. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00829-5>
- 4) Dixit A, Ajanta G, and Sanjay J (2019). Development and Evaluation of a New “Snow Water Index (SWI)” for Accurate Snow Cover Delineation” *Remote Sensing* 11(23), 2774. <https://doi.org/10.3390/rs11232774>
- 5) Frei, A., et al. A review of global satellite-derived snow products. *J. Adv. Space Res.* (2012), *Advances in Space Research*, 50(8), 1007-1029. doi:10.1016/j.asr.2011.12.021
- 6) Jain, S. K., Goswami, A., & Saraf, A. K. (2009). Role of elevation and aspect in snow distribution in the Western Himalaya. *Water Resources Management*, 23(1), 71–83. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9265-5>
- 7) Li, K.M., Li, H.L., Wang, L., Gao, W.Y., 2011. On the relationship between local topography and small glacier change under climatic warming on Mt. Bogda, eastern Tian Shan, China. *J. Earth Sci.* 22(4), 515-527. <https://doi.org/10.1007/s12583-011-0204-7>.
- 8) Liu, J. P., Zhang, W. C., & Liu, T. (2017). Monitoring recent changes in snow cover in Central Asia using improved MODIS snow-cover products. *Journal of Arid Land*, 9(5), 763–777. <https://doi.org/10.1007/s40333-017-0103-6>
- 9) Lopez-Moreno, J. I., Revuelto, J., Gilaberte, M., Moran-Tejeda, E., Pons, M., Jover, E., Esteban, P., García, C., & Pomeroy, J. W. (2014). The effect of slope aspect on the response of snowpack to climate warming in the Pyrenees. *Theoretical and Applied Climatology*, 117, 207–219. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0991-0>
- 10) Maskey, S., Uhlenbrook, S., & Ojha, S. (2011). An analysis of snow cover changes in the Himalayan region using MODIS snow products and in-situ temperature data. *Climatic Change*, 108(13), 391–400. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0181-y>
- 11) Nurzyńska, K., Kubo, M., & Muramoto, K. (2013). Shape parameters for automatic classification of snow particles into snowflake and graupel. *Meteorological Applications*, 20(3), 257–265. <https://doi.org/10.1002/met.299>
- 12) Pu, Z. X., & 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*, 97, 265–278. <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0074-9>
- 13) Saydi, M., & Ding, J.-l. (2020). Impacts of topographic factors on regional snow cover characteristics. *Water Science and Engineering*, 13(3), 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2020.09.002>

- 14) Schmidt, S., Weber, B., & Winiger, M. (2009). Analyses of seasonal snow disappearance in an alpine valley from micro- to meso-scale (Loetschental, Switzerland). *Hydrological Processes*, 23(7), 1041–1051. <https://doi.org/10.1002/hyp.7205>Digital Object Identifier (DOI)
- 15) Shimamura, Y.; Izumi, T.; Matsumaya, H. (2006). Evaluation of a useful method to identify snow-covered areas under vegetation–comparisons among a newly proposed snow index, normalized difference snow index and visible reflectance. *Int. J. Remote Sens.* 2006, 27, 4867–4884. DOI: 10.1080/01431160600639693
- 16) Sun, H., Fang, Y., Margulis, S. A., Mortimer, C., Mudryk, L., & Derksen, C. (2025). Evaluation of the Snow Climate Change Initiative (Snow CCI) snow-covered area product within a mountain snow water equivalent reanalysis. *The Cryosphere*, 19(6), 2017–2025. <https://doi.org/10.5194/tc-19-2017-2025>
- 17) Tahir, A. A., Adamowski, J. F., Chevallier, P., Haq, A. U., & Terzago, S. (2016). Comparative assessment of spatiotemporal snow cover changes and hydrological behavior of the Gilgit, Astore and Hunza river basins (Hindukush-Karakoram-Himalaya region, Pakistan). *Meteorology and Atmospheric Physics*, 128(6), 793–811. <https://doi.org/10.1007/s00703-016-0440-6>.
- 18) Winiger, M., Gumpert, M., & Yamout, H. (2005). Karakorum–Hindukush–Western Himalaya: Assessing high-altitude water resources. *Hydrological Processes*, 19(12), 2329–2338. <https://doi.org/10.1002/hyp.5887>
- 19) Zhang, Y. H., Cao, T., Kan, X., Wang, J. G., & 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(5), 887–897. <https://doi.org/10.1007/s12524-016-0617-y>

