



Hakim Sabzevari University

Arid Regions Geographic Studies

Homepage: jargs.hsu.ac.ir

P- ISSN: 2228-7167

E- ISSN: 2981-1910



Analysis of Two Decades of Snow Cover Changes in the Alborz Mountain Range

Bayan Khaledi¹ | Manuchehr Farajzadeh² | Yousef Ghoveydel Rahimi³

1. Department of Natural Geography, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. b.khaledi@modares.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Natural Geography, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. farajzam@modares.ac.ir

3. Department of Natural Geography, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. ghavidel@modares.ac.ir

Article Information

Research Paper

Vol: 17
No: 63
P: 221-245
Received: 2025-04-22
Revised: 2025-07-01
Accepted: 2025-07-02
Published: 2026-05-01

Keywords:

- Snow cover
- MODIS sensor
- NDSI index
- Alborz Mountains
- Mann-Kendall test
- Climate change

Cite this Article:

Khaledi, Bayan, Farajzadeh, Manuchehr., Ghavidel Rahimi, Yousef. (2026). Analysis of Two Decades of Snow Cover Changes in the Alborz Mountain Range. *Journal of Arid Regions Geographic Studies* 17(63): 221-245

Publisher: Hakim Sabzevari University

The Author(s) retain the copyright and full publishing rights.



Abstract

Aim: This study aims to investigate the trend of snow cover changes as a climatic factor in the Alborz Mountain Range during the period 2001 to 2023 and analyze the role of spatial and temporal components in these changes.

Materials and Methods: To conduct this study, daily data from the MODIS sensor were used. The Normalized Difference Snow Index (NDSI) was calculated to extract and zone snow-covered areas. The trend changes were analyzed using the nonparametric Mann-Kendall test and Sen's Slope method. The relationship between the NDSI index and snow cover area was also evaluated through linear regression.

Findings: Snow cover in the Alborz Mountains showed a decreasing trend across most seasons between 2001 and 2023, particularly in winter and spring. This decline was statistically significant for both the mean and the minimum snow cover extent during winter, whereas in summer and autumn the trend was more variable. Furthermore, comparison of snow cover trends with seasonal temperature and precipitation patterns indicated that increased winter temperatures and reduced precipitation—especially at lower elevations—had a noticeable impact on the reduction in snow persistence and spatial extent. These patterns were also reflected in the time series analyses and elevation profiles.

Conclusion: Spatial distribution of snow cover was directly related to elevation and geographic location, with the highest NDSI values observed in the western and central highlands. Although climatic variables were not directly analyzed in this study, the concurrent decline in snow cover with documented increases in seasonal temperatures reported in previous research suggests potential indirect impacts of climate conditions on snow dynamics in the region.

Innovation: The use of daily and long-term MODIS data along with accurate statistical methods for analyzing trends and transition points is considered an innovation of this study.

Extended Abstract

1. Introduction

Snow cover is one of the most critical components in hydrological and climatic systems, particularly in mountainous regions. Acting as a natural reservoir, snow contributes significantly to surface runoff regulation, groundwater recharge, and long-term water resource management. In many semi-arid and mountainous regions, snowmelt constitutes a primary source of water during the spring and early summer seasons. However, in recent decades, global warming and climate change have disrupted traditional snow accumulation and melt patterns. Rising average temperatures and changes in precipitation regimes have led to a general decrease in the duration and extent of snow cover worldwide. The Alborz mountain range, located in northern Iran, is one of the most vital hydrological zones in the region. It plays a pivotal role in supplying freshwater to downstream areas, including urban, agricultural, and industrial zones. Given the importance of this region and the increasing threats posed by climate change, long-term monitoring of snow cover using robust methods is essential. Remote sensing, particularly the use of MODIS data, offers a valuable opportunity for observing snow patterns over time. This study aims to analyze the spatial and temporal changes in snow cover in the Alborz Mountains during the period 2001–2023, using satellite data and statistical techniques.

2. Materials and Methods

The study area spans the entire Alborz mountain system, extending from approximately 48° to 57° east longitude and 35.5° to 37.5° north latitude. The region includes a variety of topographical and climatic zones, from lowlands to high elevations exceeding 5,000 meters. Daily surface reflectance data (MOD09GA) from the MODIS Terra satellite were used for this research. To detect snow-covered areas, the Normalized Difference Snow Index (NDSI) was calculated using green and near-infrared spectral bands. A threshold value of 0.4 was used to classify snow pixels. Water bodies were masked using the MOD44W.005 product to reduce misclassification. The study focused on seasonal analysis (autumn, winter, spring, and summer) of maximum, minimum, and mean NDSI values across 23 years (2001–2023). The Mann–Kendall trend test was applied to detect monotonic trends in the time series, while Sen's slope estimator was used to quantify the magnitude of change. In addition to temporal analysis, spatial trends were evaluated using snow distribution maps and elevation profiles. A linear regression model was used to assess the correlation between NDSI values and total snow-covered area on an annual basis.

3. Results and Discussion

The analysis revealed that the highest snow cover values, based on NDSI, occurred in winter, followed by spring and autumn. In winter, a statistically significant decreasing trend was observed in both mean and minimum NDSI values. This suggests a reduction in both the extent and stability of snow cover during the coldest season. In contrast, the other seasons showed fluctuating patterns without statistically significant trends. The Mann–Kendall test confirmed a consistent downward trend in minimum NDSI across all seasons, with the most pronounced changes in winter and summer. Elevation profile analysis indicated that snow cover was primarily concentrated at elevations between 2,000 and 5,500 meters. Snow distribution maps showed a reduction in snow-covered area after 2008, with 2008 being the peak year (approximately 48,000 km²). Subsequent years displayed more spatial fragmentation and interannual variability, especially in autumn and spring. Western and central parts of the Alborz Mountains exhibited higher NDSI values, indicating denser and more persistent snow cover, whereas eastern regions had NDSI values typically below 0.4, reflecting limited snow presence. The regression analysis showed a strong positive correlation between NDSI and snow-covered area, highlighting the reliability of this index in monitoring snow extent over time. Moreover, lower elevations were found to lose snow earlier in the season, while higher elevations retained snow for longer durations, extending into early summer in some years.

4. Conclusion

This study confirms a significant reduction in snow cover in the Alborz Mountains over the period 2001–2023, especially during winter. The trend indicates a shift in snow behavior, likely influenced by regional warming and changing precipitation regimes. Although this research did not directly analyze meteorological data, the observed patterns align with previous studies reporting increasing winter temperatures and reduced snowfall in the region. The concentration of snow at higher elevations and retreat from lower altitudes serves as indirect evidence of climatic impacts. The use of MODIS data and the NDSI index has proven effective in detecting and quantifying these changes. The demonstrated correlation between snow index values and snow-covered area supports the use of remote sensing as a robust tool for long-term environmental monitoring. These findings can inform future hydrological modeling, resource planning, and climate adaptation strategies, particularly in areas that depend heavily on snowmelt for water supply. The study emphasizes the necessity of integrating satellite observations with climate models to better anticipate future changes in snow dynamics under continued global warming.

5. Acknowledgments & Funding

- The authors are grateful to the Iranian Meteorological Organization for providing some weather station data for this research.
- The manuscript did not receive a grant from any organization.

6. Conflict of Interest

- The authors declare no conflict of interest.

بررسی دو دهه تغییرات پهنه‌های برفی رشته کوه البرز

بیان خالدی^۱، منوچهر فرج‌زاده^۲، یوسف قویدل رحیمی^۳

- ۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. b.khaledi@modares.ac.ir
۲- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. farajzam@modares.ac.ir
۳- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. ghavidel@modares.ac.ir

چکیده

هدف: پوشش برف به عنوان یکی از مؤلفه‌های مهم چرخه هیدرولوژیکی، نقش کلیدی در تغذیه منابع آب سطحی و زیرزمینی در مناطق کوهستانی ایفا می‌کند. هدف این پژوهش، بررسی روند تغییرات پوشش برف در رشته کوه البرز طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ و تحلیل نقش مؤلفه‌های مکانی و زمانی در این تغییرات است.

روش و داده: برای انجام این پژوهش، از داده‌های روزانه سنجنده MODIS استفاده شد. شاخص تفاضل نرمال شده برف (NDSI) به منظور استخراج و پهنه‌بندی مناطق پوشیده از برف محاسبه گردید. روند تغییرات با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال و روش شیب سن (Sen's Slope) شناسایی گردید. همچنین رابطه بین شاخص NDSI و مساحت پوشش برف از طریق رگرسیون خطی مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که پوشش برف در رشته کوه البرز طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ در اغلب فصول، به ویژه در زمستان و بهار، دارای روندی کاهشی بوده است. این کاهش در زمستان به صورت معنادار در میانگین و کمینه پوشش برف مشاهده شده و در تابستان و پاییز نیز با نوسانات همراه بوده است. همچنین، مقایسه تغییرات دما و بارش با روند کاهش مساحت برف نشان داد که افزایش دمای زمستان و کاهش بارش‌های فصلی به ویژه در ارتفاعات پایین‌تر، تأثیر مستقیمی بر کاهش پایداری و گستره پوشش برف داشته‌اند، موضوعی که در تحلیل‌های سری زمانی و نیمرخ‌های ارتفاعی نیز مشهود بود.

نتیجه‌گیری: الگوی مکانی پوشش برف نیز با ارتفاع و موقعیت جغرافیایی منطقه رابطه مستقیم داشته و در نواحی غربی و ارتفاعات مرکزی بیشترین مقدار شاخص ثبت شده است. در حالی که متغیرهای اقلیمی به طور مستقیم در این پژوهش تحلیل نشده‌اند، هم‌زمانی روندهای کاهشی برف با یافته‌های پژوهش‌های مرتبط با افزایش دمای فصلی می‌تواند نشانگر تأثیرات غیرمستقیم شرایط اقلیمی بر کاهش پوشش برف در این منطقه باشد.

نوآوری، کاربرد نتایج: استفاده از داده‌های روزانه و بلندمدت MODIS در کنار روش‌های آماری دقیق برای تحلیل روند و نقاط جهش، نوآوری این پژوهش محسوب می‌شود.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

شماره: ۱۷

دوره: ۶۳

صفحه: ۲۲۱-۲۴۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۱

کلیدواژه‌ها:

- پوشش برف
- سنجنده MODIS
- شاخص NDSI
- رشته کوه البرز
- آزمون من-کندال
- تغییر اقلیم

نحوه ارجاع به این مقاله:

خالدی، بیان، فرج‌زاده، منوچهر، قویدل رحیمی، یوسف. (۱۴۰۵). بررسی دو دهه تغییرات پهنه‌های برفی رشته کوه البرز. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۷ (۶۳): ۲۲۱-۲۴۵.

ناشر: دانشگاه حکیم سبزواری



نویسندگان حق نشر و حقوق انتشار کامل را حفظ می‌کنند.

۱. مقدمه

پوشش برف یکی از پارامترهای ورودی اساسی برای مدل‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی و همچنین شاخصی مهم برای ارزیابی مناطق آب منطقه‌ای و تغییرات آب و هوا است. پوشش برف فصلی در مناطق عرض جغرافیایی و ارتفاعی در نیم‌کره شمالی و جنوبی نسبت به تغییرات آب و هوا بسیار حساس است. افزایش دمای هوا به ناچار به تغییرات تجمع برف و فرایندهای ذوب تأثیر می‌گذارد و می‌تواند به تغییرات فنولوژی برف منجر شود (Blahušáková et al., 2020; Tang et al., 2022). در بسیاری از حوضه‌های مناطق نیمه‌خشک، فرایندهای هیدرولوژیکی به شدت تحت تأثیر توپوگرافی منطقه، به ویژه وجود کوه‌ها که به بارش اوروگرافی کمک می‌کند، قرار می‌گیرند. به همین ترتیب آن‌ها یک مخزن مهم را تشکیل می‌دهند که بخش قابل توجهی از تولید آب منطقه در آن متمرکز است. حضور برف به طور قابل توجهی در این مخزن آب نقش دارد و به عنوان یک جریان حائل عمل می‌کند و تا بهار رواناب قابل توجهی را به تأخیر می‌اندازد (Bousbaa et al., 2024; Grünwald et al., 2013). در چند دهه گذشته، اهمیت فزاینده موضوع تغییر آب و هوا، نیازهای جدیدی را برای اطلاعات پوشش برف در طیف گسترده‌ای از مقیاس‌های مکانی و زمانی برای تشخیص تغییرات آب و هوا برای توسعه مدل‌های فرایند برف و برای فعالیت‌های اعتبارسنجی برانگیخته است (Brown & Armstrong, 2008; Pulliainen et al., 2020). نقشه‌برداری و نظارت بر میزان تغییرات مکانی پوشش برف یکی از مهم‌ترین کاربردهای روش سنجش از دور برای بیش از نیم قرن بوده است. این تکنیک‌های نقشه‌برداری از داده‌های سنجش از دور نوری در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک برای تخمین میزان پوشش برف در سطح زمین استفاده می‌کنند (Azizi et al., 2024; Zheng et al., 2018). مطالعات گسترده‌ای در زمینه سنجش از دور و تغییرات پوشش برف انجام شده است که بررسی نتایج این پژوهش‌ها می‌تواند برای علاقمندان به این حوزه مفید باشد. در ادامه، مروری بر برخی از مطالعات مرتبط ارائه می‌شود: در پژوهشی، تغییرات اقلیم‌شناسی پوشش برفی و وابستگی آن به ارتفاع در حوضه رومانی بررسی شد، نتایج نشان داد که روند رفتاری متفاوتی بین نوارهای ارتفاعی و مناطق آب و هوایی رومانی وجود دارد و این روندها در ارتفاعات میانی و مناطق پست برجسته‌تر هستند. یافته‌ها منعکس‌کننده تأثیر افزایش دمای فصلی در دهه‌های اخیر است (Amihăeșei et al., 2024). در مطالعه‌ای دیگر، دینامیک پوشش برف وابسته به ارتفاع و تأثیرات آن بر شرایط آب و هوایی در حوضه رودخانه کابل، جلوم و ایندوس طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ بررسی شد. نتایج نشان داد که میزان پوشش برف (SCA)^۱ در مقیاس سالانه و فصلی در هر سه حوضه روند کاهشی دارد. همچنین، رابطه بین پوشش برف و متغیرهای آب و هوایی نشان داد که دما، به جای میزان بارش، عامل اصلی کاهش SCA در این مناطق است (Moazzam et al., 2024). همچنین، بررسی دینامیک آب و هوا و اثر توپوگرافی بر تغییرات پوشش برف در حوضه رودخانه سند- گنگ- براهماپوترا نشان داد که تغییرات قابل توجهی در بارش، دمای سطح زمین^۲ (LST) و پوشش برف در سراسر منطقه رخ داده است. بیشترین تغییرات در حوضه براهماپوترا مشاهده شد، به طوری که میانگین بارندگی سالانه ۱۳/۹ میلی‌متر در سال افزایش و سطح پوشش برف سالانه ۱۵۵/۴ کیلومتر مربع کاهش یافته است (Banerjee et al., 2024). در مطالعه‌ای دیگر، کرایوسفر هیمالیا طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ با استفاده از داده‌های Modis Terra و Landsat 8 در پلتفرم GEE تحلیل شد. نتایج نشان داد که میزان بارش سالانه، فصلی و ماهانه در ارتفاعات مختلف افزایش یافته است؛ اما پوشش برف (SCA) و دما روندهای متفاوتی را نشان داده‌اند؛ به طوری که در ارتفاعات بالا، با وجود افزایش بارش، دمای بالاتر منجر به کاهش SCA شده است (Banerjee et al., 2021). در پژوهشی که در اتریش انجام شد، حساسیت و دقت آستانه‌های مختلف NDSI برای نقشه‌برداری پوشش برف بررسی شد. نتایج نشان داد که دقت طبقه‌بندی کلی برای محصولات پوشش برف روزانه Aqua و Terra با استفاده از مشاهدات عمق برف در ۶۶۵ ایستگاه آب و هوایی طی دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۴، بیش از ۰/۹۷ بوده است (Tong et al., 2020). بررسی وضعیت پوشش برف و تغییرات آن در فلات تبت، آمریکای شمالی و اروپا نشان داد که در این مناطق، طول مدت پوشش برف، میزان معادل آب برف (SWE) و زمان تجمع و ذوب برف دچار تغییرات منفی قابل توجهی شده است. به ویژه، تأخیر در تجمع برف در زمستان و ذوب زودتر آن در بهار مشاهده شده است (Huang & Ma, 2024). تحلیل‌های جهانی نیز تغییرات قابل توجهی در پوشش برف مناطق کوهستانی مانند آلپ، هیمالیا و تبت گزارش کرده‌اند (Adler et al., 2023; Matiu & Hanzer, 2022; Wang et al., 2021). علاوه بر این، ارتباط تغییرات برف با منابع آبی و رواناب در حوضه‌های مهم مانند کلرادو یا اروپا، اهمیت این موضوع را در حوزه مدیریت منابع آبی دو چندان کرده است (Dong & Menzel, 2020; Kopytkovskiy et al., 2015). در منطقه البرز

مرکزی، تغییرپذیری فضایی و زمانی پوشش برف بررسی شد. نتایج نشان داد که روند کاهش پوشش برف در منطقه مشهود است، به طوری که ۶۱ درصد از نواحی بین ارتفاعات ۲۰۰۰ تا ۲۳۰۰ متر، کاهش مدت زمان پوشش برف سالانه را تجربه کرده‌اند (Dariane et al., 2017). همچنین، در مطالعه‌ای دیگر، تأثیر تغییرات اقلیمی بر پوشش برف و یخچال‌های طبیعی در مناطق یخبندان شمال ایران بررسی شد. نتایج نشان داد که پوشش برف تابستانی در مقایسه با دو دهه قبل، ۳۰ درصد کاهش یافته است. علاوه بر این، همبستگی معکوس قوی ($R=0.8$) بین پوشش برف و دمای میانگین سالانه مشاهده شد (Motiee et al., 2024). در پژوهشی که به بررسی عمق برف و رابطه آن با متغیرهای دمایی در حوضه آبریز لیقوان پرداخته، مشخص شد که فناروری سنجش از دور می‌تواند در مطالعه مناطق وسیع با دقت زمانی و مکانی بالا مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، استفاده از تکنیک تداخل سنجی و کدگذاری GEE^۱ به عنوان ابزاری کارآمد برای مدیریت منابع آب در منطقه پیشنهاد شد (Asghari et al., 2021). تحلیل تأثیر تغییرات آب و هوایی بر مناطق برفی حوضه آبخیز البرز شمالی نیز نشان داد که سطح پوشش برف دی‌ماه طی ۱۹ سال، با افزایش دمای ۰/۱۳ درجه سانتی‌گراد، به میزان ۲۲۰/۳۹ کیلومتر مربع کاهش یافته است. همچنین، مقایسه داده‌های بارش و دما با پوشش برف نشان داد که در اکثر سال‌ها، ناهنجاری‌های پوشش برف با افزایش دما و کاهش بارش همراه بوده است (NoroozValashedi & Bahrami Pichaghchi, 2023). در حوضه دریاچه ارومیه از ترکیبی از داده‌های ماهانه و روزانه MOD02H و MOD10A1 به همراه الگوریتم‌های مختلف طبقه‌بندی نظارت‌شده، بدون نظارت و شاخص برف نرمال شده (NDSI)^۲ به منظور استخراج نقشه‌های پوشش برف استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم حداکثر درست‌نمایی از دقت بالاتری در طبقه‌بندی نواحی برفی برخوردار بوده و ضرایب کاپای حاصل از روش‌های مختلف در بازه‌ای بین ۰/۹۴ تا ۰/۹۸ گزارش شده‌اند (Alizadeh, Hessari, Mir- Yaghoubzadeh, & Mohammadpour, 2025). همچنین در مطالعه‌ای دیگر تغییرات پوشش برف در غرب ایران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و شاخص NDSI مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحلیل نقاط داغ نشان داد که گسترش پوشش برف عمدتاً به سمت عرض‌های جغرافیایی بالاتر و مرزهای غربی کشور تمایل دارد (Faraji et al., 2024). در پژوهشی مرتبط، پیامدهای تغییرات اقلیمی بر ویژگی‌های پوشش برف در ناحیه زاگرس میانی بررسی شد. تحلیل روند پوشش برف در فصول مختلف با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS حاکی از کاهش معنادار در بیشتر نواحی منطقه، به ویژه در ارتفاعات بالاتر بود (Sidi Shahiyavand et al., 2024). افزون بر این، بررسی روند تغییرات زمانی-مکانی پوشش برف دامنه‌های جنوبی البرز نشان داد که اگرچه پوشش برف در اوایل پاییز و اواخر زمستان افزایش یافته است؛ اما در ماه ژانویه و به ویژه فصل بهار با کاهش چشم‌گیری همراه بوده که این امر بیانگر کوتاه شدن دوره پایداری پوشش برف و افزایش مدت زمان ذوب آن است (Azizi et al., 2017). توجه به اهمیت استراتژیک رشته‌کوه البرز در تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعتی در بسیاری از حوضه‌های زیردست و نقش اساسی برف در تأمین آبی مناطق کوهستانی، بررسی تغییرات پوشش برف و عوامل آبی-اقلیمی مؤثر بر این تغییرات امری ضروری است. در همین راستا، این پژوهش با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳، به تحلیل روند تغییرات پوشش برف در منطقه البرز خواهد پرداخت.

۲- مواد و روش

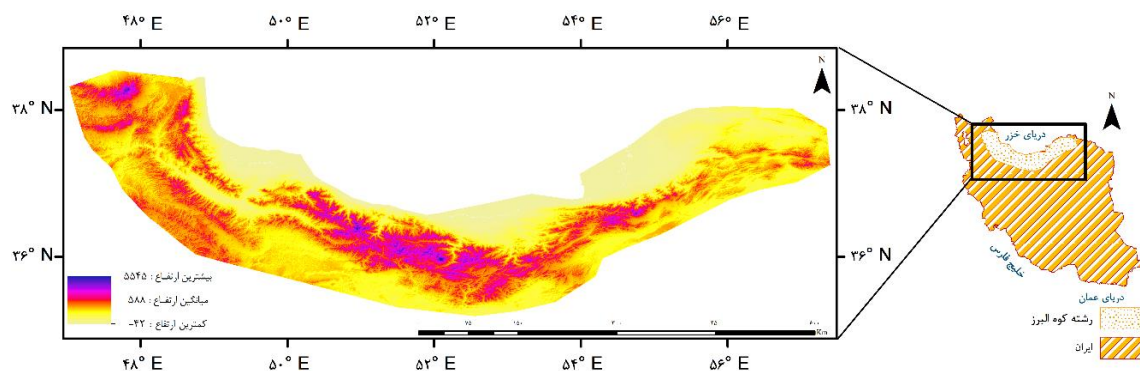
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

ایران کشوری پهناور با عوارض زمین شناختی مختلف است. از جمله مهم‌ترین عوارض زمین شناختی آن دو رشته کوه البرز و زاگرس هستند. رشته کوه البرز از شمال شرق تا شمال غربی ایران امتداد داشته که به ترتیب تمام یا بخشی از استان‌های، خراسان شمالی، گرگان، سمنان، تهران، مازندران و اردبیل را در خود جای داده است. به تعبیری می‌توان عنوان داشت که این رشته کوه همچون دیواری مرزی میان دریای خزر با سایر نواحی مرکزی ایران می‌تواند باشد که به نوبه خود توانسته است اقلیم و زیست بوم متمایزی را از سایر نواحی ایجاد کند. این رشته کوه دارای عوارض زمین‌شناسی بی‌نظیری همچون قله دماوند در شمال شرقی استان تهران و ارتفاعات سبلان در استان اردبیل است. همان‌گونه که در شکل ۱، مشخص است از حدود ۴۶ تا ۵۸ درجه طول جغرافیایی شرقی و از حدود ۳۵ تا ۳۹ درجه عرض جغرافیایی شمالی در نظر گرفته شده که مساحتی در حدود ۱۴۸۱۱۰ کیلومتر مربع را پوشش داده است. این نکته

1. Google Earth Engine (GEE)

2. Normalized Difference Snow Index (NDSI)

نیز دارای اهمیت است که لایه ارتفاعی با استفاده از داده‌های ارتفاعی SRTM^۱ و با قدرت تفکیک مکانی حدود ۳۰ متر نمایش داده شده است؛ بر این اساس، کمترین ارتفاع ۴۲- متر و بیشتر ارتفاع آن ۵۵۴۵ متر است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی رشته کوه البرز

۲-۲- روش پژوهش

در این پژوهش، به منظور تشخیص و پهنه‌بندی پوشش برف، از نسخه ششم داده‌های روزانه MOD09GA سنجنده مادیس نصب شده بر روی ماهواره تراس^۲ و شاخص تفاوت نرمال شده برف NDSI استفاده شد. بازه زمانی مورد بررسی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ میلادی را در بر می‌گیرد. این محصول دارای دو قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر و ۱ کیلومتر است که در این پژوهش از قدرت تفکیک ۵۰۰ متر استفاده شد. کلیه مراحل فراخوانی، پیش‌پردازش، محاسبه شاخص NDSI و استخراج نقشه‌های پوشش برف با استفاده از پلتفرم Google Earth Engine انجام گرفت. این سامانه به دلیل دسترسی سریع به آرشیو کامل داده‌های ماهواره‌ای، توان پردازشی بالا و ابزارهای تحلیلی متنوع، به عنوان محیط اصلی پردازش و تحلیل داده‌ها در این پژوهش انتخاب شد.

■ شاخص NDSI

شاخص NDSI، یکی از شاخص‌های مهم برای تشخیص پهنه‌های برفی از سایر سطوح زمینی است. برای محاسبه این شاخص از باندهای سبز و مادون قرمز نزدیک استفاده می‌شود که در جدول ۱، می‌توان اطلاعات مربوط به هر یک از باندهای مورد استفاده و طول موج آن‌ها را مشاهده نمود. مقدار آستانه در نظر گرفته شده برای پهنه‌های برفی در این آستانه ۰/۴ است؛ بدین معنا که مناطق دارای ارزش پیکسل برابر یا بیشتر از ۰/۴ باشند، تحت عنوان پیکسل برفی خواهند بود. بازه خروجی این شاخص نیز محدوده مقادیر ۱- تا ۱+ را شامل می‌شود که مقادیر خروجی هرچه به سمت ارقام مثبت متمایل باشد میزان برف با ثبات‌تری را بازگو کرده و ارقام منفی نیز طبیعتاً نمایانگر پوشش‌های غیر برفی مانند: خاک، سنگ پوشش گیاهی و سایر عوارض سطحی زمین هستند. نحوه محاسبه این شاخص به شرح زیر است:

$$NDSI = \frac{(R_{green} - R_{SWIR})}{(R_{green} + R_{SWIR})} \quad (1)$$

در معادله فوق R_{green} محدوده بازتاب سطحی سبز و R_{SWIR} محدوده مادون قرمز کوتاه که به ترتیب معادل طول موج (۰/۵۴ تا ۰/۵۷) و (۱/۶۲۸ تا ۱/۶۵۲) میکرون هستند؛ اما به دلیل آن که مقادیر باندهای یاد شده به شکل اعداد صحیح ثبت می‌شوند از عامل مقیاس (۰/۰۰۱)، برای محاسبات آن‌ها استفاده می‌شود. بنابراین مطابق معادله (۲) رقم هر باند در عامل مقیاس ضرب می‌شود و سپس محاسبه می‌گردد.

$$R_{green} = DN_{green} \times \alpha, R_{SWIR} = DN_{SWIR} \times \alpha \quad (2)$$

1. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

2. Terra

$$NDSI = \frac{(DN_{green} - DN_{SWIR})}{(DN_{green} + DN_{SWIR})}$$

در معادله فوق DN_{green} و DN_{SWIR} به ارقام مربوط به باند سبز و مادون قرمز کوتاه این محصول سنجنده مادیس اشاره دارند و α عامل مقیاس است. برای مصورسازی داده‌ها، تصاویر و همچنین نیمرخ‌های ارتفاعی شاخص NDSI، در مقیاس فصلی (پاییز، زمستان، بهار و تابستان) استخراج شدند. لازم به ذکر است که برای بهبود در شناسایی ارتفاعات دارای پوشش برفی در نمودارهای مربوط به نیمرخ‌های ارتفاعی (اشکال ۲، ۴، ۶ و ۸)، مقادیر با استفاده از مستطیل‌های خاکستری رنگ این محدوده‌ها مشخص شدند. همچنین مساحت‌های دارای پوشش برفی نیز با استفاده از آستانه‌گذاری مقادیر برحسب کیلومتر مربع در مقیاس فصلی محاسبه شدند و در نهایت از طریق محاسبه رگرسیون با مقایر این شاخص مورد ارزیابی قرار گرفتند. لازم به ذکر است برای افزایش دقت در محاسبات و حذف پهنه‌های آبی از محاسبات نهایی از محصول MOD44W.005 استفاده شد. قدرت تفکیک مکانی این محصول ۲۵۰ متر است که با مجموعه داده‌های عمق‌سنجی جهانی ETOPO1 ترکیب شده تا بین نمایش دو تایی (زمین/آب) و سه کلاس اقیانوس (کم عمق، متوسط و عمیق) تمایز قائل شود و همچنین آب‌های عمیق داخلی را شناسایی کند (Carroll et al., 2017).

جدول ۱. باندهای استفاده شده به همراه توضیحات آن‌ها

نام باند	شماره باند	طول موج μm	توضیحات	عامل مقیاس
sur_refl_b04	۴	۰/۵۴ تا ۰/۵۷	باند سبز	۰/۰۰۰۱
sur_refl_b06	۶	۱/۶۲۸ تا ۱/۶۵۲	باند مادون قرمز نزدیک	۰/۰۰۰۱

(مأخذ: lpdaac.usgs.gov)

در این پژوهش پس از انجام محاسبات مربوط به شاخص یاد شده، داده‌ها به مقیاس زمانی فصلی و با در نظر گرفتن مقادیر میانگین کمینه، بیشینه و در نهایت میانگین داده، تبدیل مقیاس شدند.

▪ آزمون روند و جهش من-کندال

آزمون روند من-کندال به دلیل ناپارامتریک بودن می‌تواند روشی ایده‌آل برای بررسی روندهای خطی و غیرخطی باشد از همین روی در مطالعات هواشناسی و آب‌شناسی به عنوان یک روش متداول شناخته می‌شود (Y. Huang, Xu, Chen, Fu, & Wan, 2021). از همین روی در این پژوهش تشخیص روند شاخص NDSI با استفاده از روش آزمون روند من-کندال^۱ انجام شد، سپس برای شناسایی نقاط شروع تغییرات روند از آزمون جهش من-کندال^۲ برای سری‌های زمانی فصلی این شاخص استفاده شد. در این روش یک سری زمانی بر اساس رتبه‌های سری اصلی بازآرایی می‌شود. خروجی محاسبات این روش شامل سری‌های پیش‌رونده^۳ و پس‌رونده^۴ هستند و نقطه‌ای که این دو سری (پیش‌رونده و پس‌رونده) در محدوده بحرانی، در بازه $\pm 1/96$ یکدیگر را قطع می‌کنند، می‌تواند نشان‌دهنده نقطه آغاز تغییر احتمالی در سری زمانی مدنظر باشد (Ding et al., 2022). در ادامه لازم به ذکر است که برای اطمینان از شناسایی دقیق‌تر روندها از شیب سن^۵ نیز استفاده شد.

▪ بررسی رگرسیون خطی ارتباط میان شاخص و مساحت NDSI

یکی از معمول‌ترین و ساده‌ترین روابط، رابطه خطی است. مدل رگرسیون خطی ساده یک روش ریاضی برای بیان رابطه آماری ساده بین این دو متغیر است. خط رگرسیون (یا خط بازگشت) خطی است که با بهترین برازش از میان مجموعه نقاط نمودار پراکنش می‌گذرد. این خط نوعی متوسط برای تغییر یک متغیر بر حسب تغییر متغیر دیگر است. به عبارت دیگر، خط در امتداد بیشترین تغییر مشاهدات ترسیم می‌شود.

به طور کلی می‌توان مدل رگرسیون خطی را بدین ترتیب محاسبه نمود:

$$NDSI \text{ Area} = \alpha + \beta \times NDSI_i + \epsilon_i \quad (3)$$

1. Mann-Kendall trend test
2. Mann-Kendall mutation test
3. Prograde

4. Retrograde
5. Sen's slope

در معادله فوق، α عرض از مبدأ، β شیب خط ϵ ، مقدار خطا و i ، نمایانگر هر یک از مشاهدات است. برای محاسبه β ، می‌توان از معادله (۲) استفاده کرد:

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n (NDSI_i - \overline{NDSI})(NDSI \text{ Area}_i - \overline{NDSI \text{ Area}})}{\sum_{i=1}^n (NDSI_i - \overline{NDSI})^2} \quad (۴)$$

پس از محاسبه β ، می‌توان به وسیله معادله زیر α را نیز محاسبه نمود:

$$\alpha = \overline{NDSI \text{ Area}} - \beta \times \overline{NDSI} \quad (۵)$$

مقدار ϵ_i نیز باتوجه به معادله (۴)، قابل محاسبه است:

$$\epsilon_i = y_i - \hat{y}_i \quad (۶)$$

در معادله فوق y_i ، مقدار متغیر وابسته برای هر یک از مشاهدات و $\hat{y}_i$ مقدار پیش‌بینی شده متغیر وابسته برای هر مشاهده است. برای استفاده معتبر از مدل رگرسیون خطی ساده، چهار فرض آماری اصلی باید بررسی شود: ۱. وجود رابطه خطی بین متغیرها ۲. استقلال مشاهدات ۳. نرمال بودن داده‌ها ۴. همگنی واریانس.

در این پژوهش، وجود رابطه خطی میان شاخص NDSI و مساحت پوشش برف از طریق نمودار پراکنش تأیید شد. همچنین، با توجه به ساختار فصلی داده‌ها و نحوه‌ی پردازش آن‌ها، فرض استقلال مشاهدات تا حد زیادی برقرار است. توزیع داده‌ها نیز فاقد الگوی مشخص و متمرکز بوده و از پراکندگی یکنواخت برخوردار است که می‌تواند نشانه‌ای از نرمال بودن واریانس و ثبات آن در طول دامنه داده‌ها باشد.

بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که مفروضات اساسی مدل رگرسیون خطی در این پژوهش تا حد قابل قبولی رعایت شده و نتایج به دست آمده از تحلیل مدل قابل استناد است.

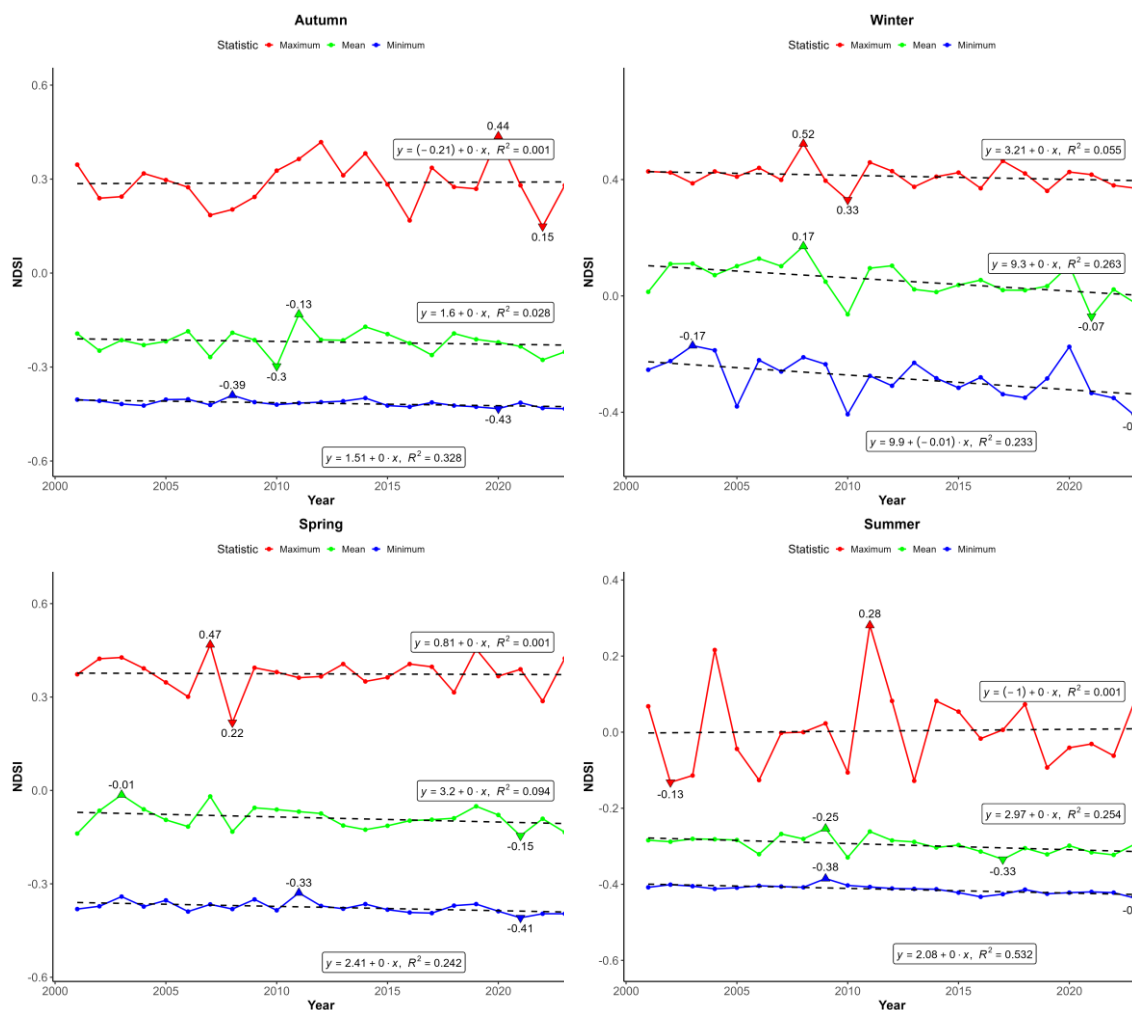
۳- یافته‌ها

▪ سری‌های زمانی فصلی

در این پژوهش تلاش شد تا داده‌های روزانه شاخص NDSI، با در نظر گرفتن بیشینه، کمینه و میانگین‌ها به مقیاس زمانی فصلی تبدیل شده و سپس ارزیابی شوند. در شکل (۲)، نمودارهای سری زمانی فصلی این شاخص ترسیم شده‌اند، با دقت در این نمودارها می‌توان این گونه عنوان کرد که بیشترین مقادیر این شاخص به ترتیب متعلق به فصل‌های زمستان، بهار و پاییز هستند در عین حال کمینه‌ها و میانگین‌های این شاخص در سری زمانی مربوط به فصل زمستان دارای روندی کاهشی بوده و این در حالی است که سایر فصول و آماره‌ها دارای روندی محسوس نیستند. همچنین به جز در روند بیشینه‌های شاخص NDSI در فصل پاییز بیشینه مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین اغلب در بازه سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۱، رخ داده‌اند. کمینه مقادیر میانگین و کمینه‌های فصل‌های زمستان و کمینه مقادیر فصل‌های تابستان و پاییز در محدوده سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳ قرار گرفته‌اند.

▪ آزمون روند و جهش من-کندال

با توجه به جدول (۲) که مقادیر محاسبه شده روند من-کندال و شیب سن مربوط به شاخص NDSI، در آن درج شده‌اند می‌توان این چنین بیان کرد که روند نزولی به ترتیب در مقادیر کمینه فصل‌های تابستان، پاییز، زمستان و بهار قابل مشاهده هستند. این در حالی است که اگرچه روندی در مقادیر بیشینه‌ها وجود ندارد؛ اما روند نزولی در مقادیر میانگین به ترتیب در فصل‌های تابستان و زمستان وجود دارند. دلیل بررسی روند پوشش برف به صورت فصلی، تفاوت الگوهای زمانی و اقلیمی مؤثر بر برف در فصول مختلف سال است. رفتار پوشش برف در زمستان (زمان وقوع بارش‌های برفی)، بهار (زمان ذوب)، تابستان (یاداری در ارتفاعات) و پاییز (آغاز بارش‌های جدید) کاملاً متمایز است. از این رو تحلیل تجمیعی سالانه می‌تواند نوسانات فصلی را پنهان کرده و منجر به تفسیر نادرست از روندها شود. بررسی جداگانه فصلی، امکان تحلیل دقیق‌تر دینامیک برف و ارتباط آن با عوامل اقلیمی را فراهم می‌کند و در مطالعات مشابه نیز رایج است.



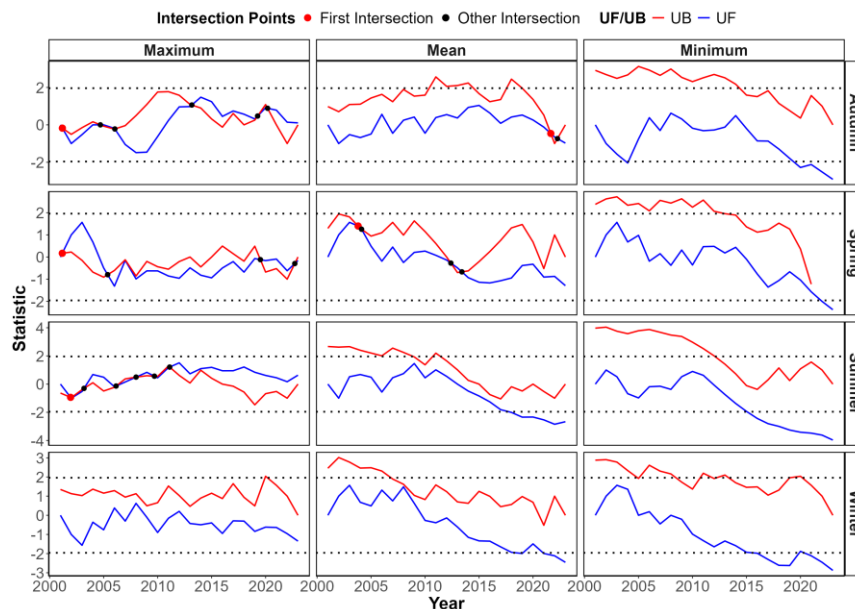
شکل ۲. نمودارهای تغییرات فصلی شاخص NDSI، رشته کوه البرز بر اساس مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین.

جدول ۲. آزمون روند من-کندال و شیب سن فصلی شاخص NDSI، رشته کوه البرز بر اساس مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین.

فصل	آماره	MK_tau	Sen_Slope	Sen_lower bound	Sen upper bound
پاییز	بیشینه	0.02	0.00	0.00	0.01
پاییز	میانگین	-0.15	0.00	0.00	0.00
پاییز	کمینه	-0.44*	0.00	0.00	0.00
بهار	بیشینه	-0.02	0.00	0.00	0.00
بهار	میانگین	-0.19	0.00	0.00	0.00
بهار	کمینه	-0.36*	0.00	0.00	0.00
تابستان	بیشینه	0.10	0.00	-0.01	0.01
تابستان	میانگین	-0.40*	0.00	0.00	0.00
تابستان	کمینه	-0.60*	0.00	0.00	0.00
زمستان	بیشینه	-0.20	0.00	0.00	0.00
زمستان	میانگین	-0.37*	0.00	-0.01	0.00
زمستان	کمینه	-0.43*	-0.01	-0.01	0.00

در ادامه با بررسی شکل (۳) که بیانگر نقاط جهش در روند است، می‌توان این چنین اظهار داشت که هیچ گونه تلاقی میان خطوط پیش‌رونده و پس‌رونده در فصل زمستان رخ نداده است همچنین این عدم تلاقی خطوط در مقادیر کمینه تمامی فصول نیز قابل

مشاهده است. به جز مقادیر میانگین فصل‌های زمستان و تابستان، در مقادیر میانگین فصل‌های پاییز و بهار نقاط برخوردی وجود دارند؛ اما نتوانستند پس از این طاقی‌ها از محدوده معناداری $\pm 1/96$ عبور کنند. این مسأله در مقادیر کمینه فصل‌های پاییز، بهار و تابستان نیز قابل ملاحظه هستند.



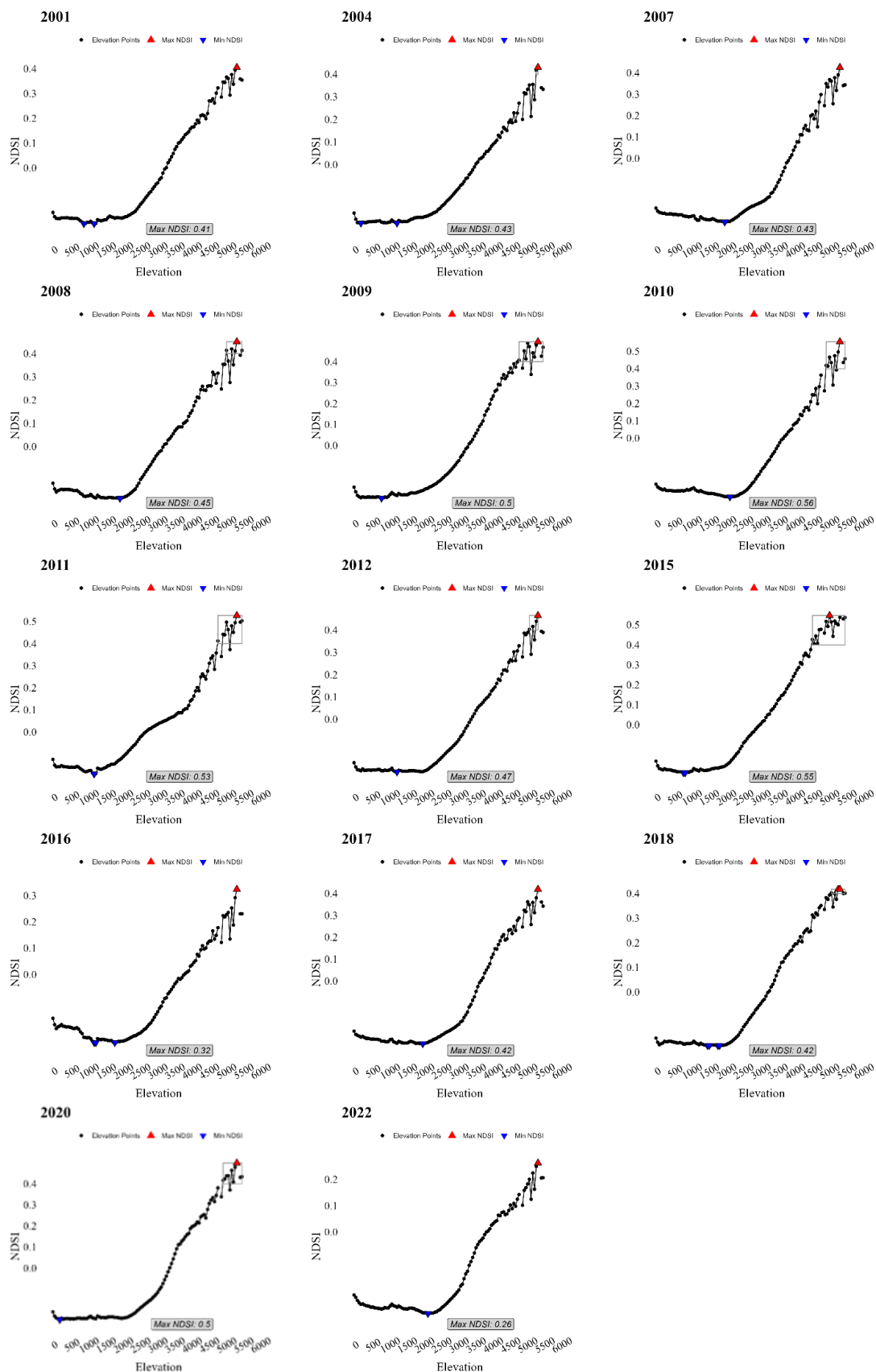
شکل ۳. نمودارهای آزمون جهش روند من-کندال فصلی شاخص NDSI، رشته کوه البرز بر اساس مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین.

▪ بررسی تغییرات نیمرخ‌های ارتفاعی NDSI

برای بررسی وضعیت فصلی شاخص NDSI در رشته کوه البرز، تغییرات این شاخص بر حسب نیمرخ‌های ارتفاعی و پهنه‌بندی محاسبه و به ترتیب هر فصل (پاییز، زمستان، بهار و تابستان) در اشکال (۴ تا ۷) به تفکیک سال‌های مورد مطالعه، قرار گرفتند. بنا به لزوم در نظر گرفتن موارد با اهمیت و خلاصه‌سازی بیشتر محتوا، صرفاً موارد قابل توجه از این بررسی‌ها در ادامه ذکر شدند.

▪ نیمرخ‌های ارتفاعی NDSI، در فصل پاییز

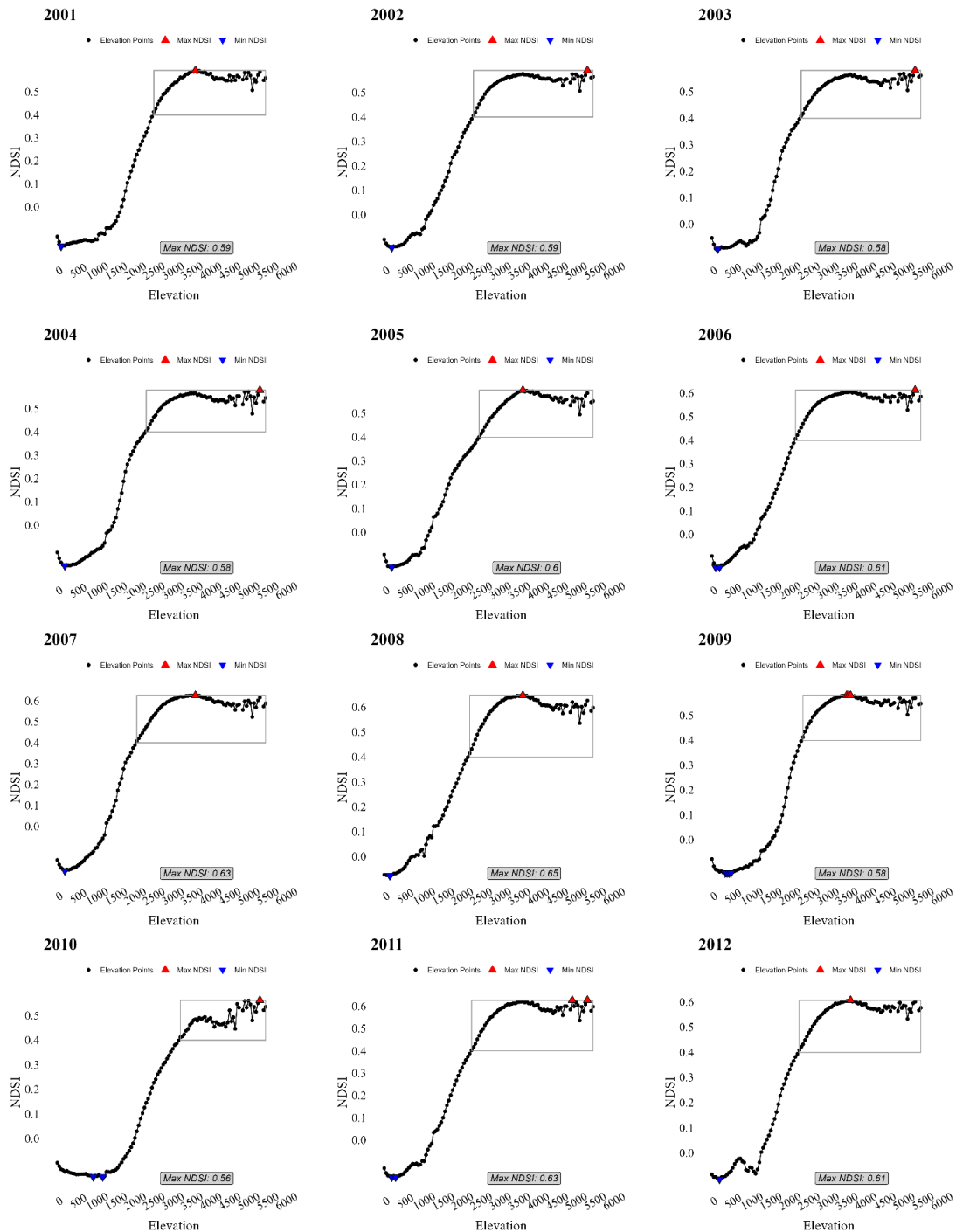
با توجه به نمودارهای مربوط به فصل پاییز نیمرخ‌های ارتفاعی شاخص NDSI، شکل (۴) می‌توان دریافت که به ترتیب در فصول پاییز سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۴، ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۲، ۲۰۱۵، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۰، پهنه‌های برفی گستردگی بیشتری را داشته‌اند که ارقام شاخص NDSI آن‌ها بیشتر از ۰/۴ را داشته است. این در حالی است که سایر سال‌ها مقادیر کمتر این مقدار را داشته که کمترین آن‌ها در سال ۲۰۲۲ وجود دارد. بیشترین مقادیر در سال ۲۰۱۰ رخ داده است. در مجموع در سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱ و ۲۰۲۰، محدوده‌های پوشش برف از حدود ارتفاعی ۴۵۰۰ تا ۵۵۰۰ متری گسترش داشته‌اند که این محدوده در سال ۲۰۱۵ از حدود ۴۰۰۰ متر تا ۵۵۰۰ متری گسترش یافته و به عبارت بهتر به نسبت سایر سال‌ها پهنه‌های برفی بیشتری را تجربه کرده است، این در حالی است که در سایر سال‌ها صرفاً پوشش برف در ارتفاعات بیش از ۵۰۰۰ متری وجود داشته است.

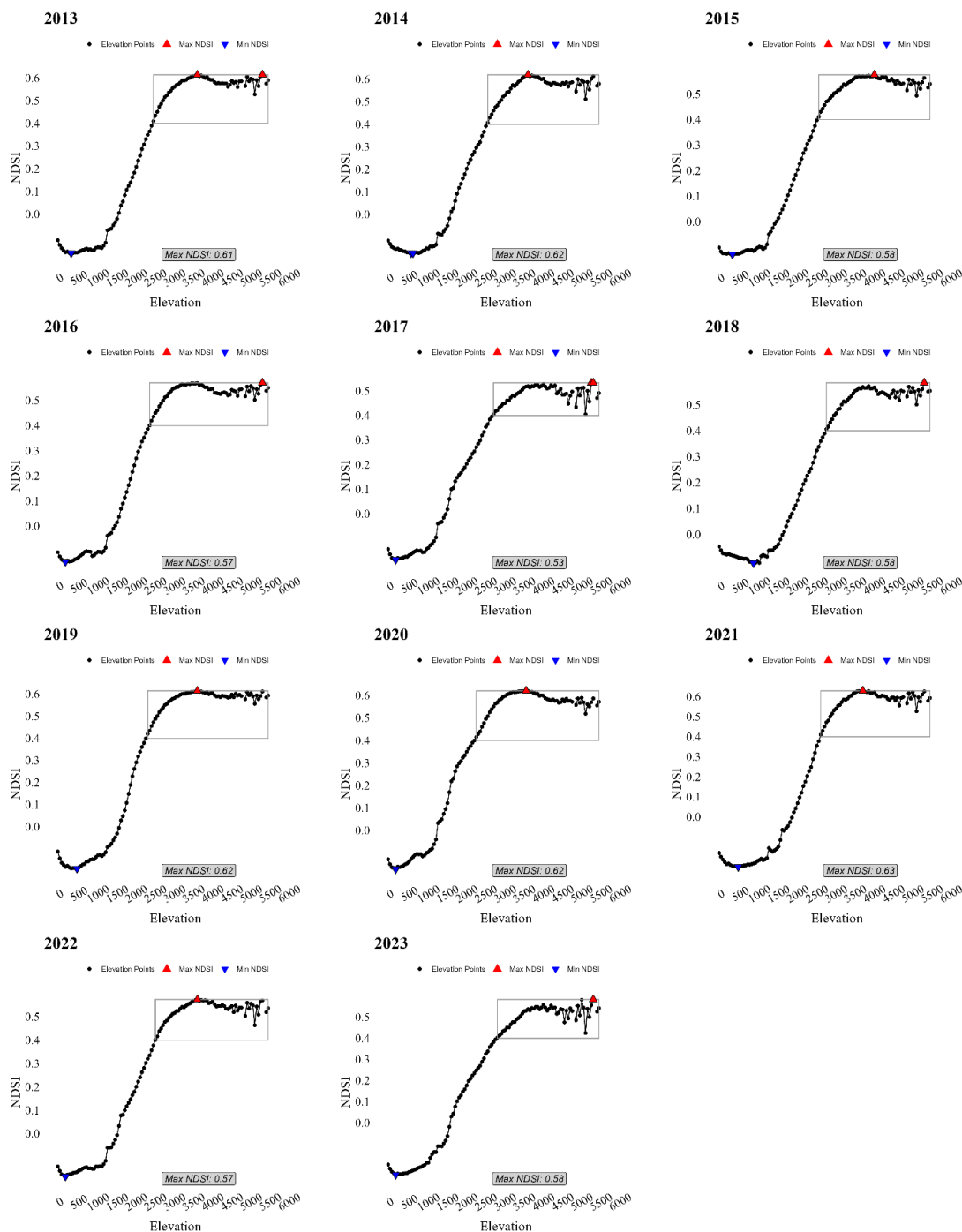


شکل ۴. تغییرات شاخص NDSI، نیمرخ ارتفاعی رشته کوه البرز در فصل پاییز

■ نیمرخ‌های ارتفاعی NDSI، در فصل زمستان

همان‌طور که در شکل (۵)، مشخص است مقادیر شاخص NDSI، مربوط به فصل زمستان در تمامی سال‌ها مقداری بیش‌تر از ۰/۵ را داشته و همچنین محدوده‌های ارتفاعی گسترده‌تری را شامل شده‌اند، به نحوی که گستره پوشش برفی از ارتفاع ۲۰۰۰ تا بیش از ۵۵۰۰ متر ادامه یافته است. این نکته قابل توجه است که در برخی از سال‌ها (۲۰۰۱، ۲۰۰۵، ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۹، ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۵ و ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۲)، بیشینه مقادیر در محدوده ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰ متری ثبت شده‌اند. البته در سال ۲۰۱۱ و ۲۰۱۳ بیشینه دیگری در محدوده بیش از ۵۵۰۰ متری نیز وجود داشته است. کمترین دامنه این شاخص نیز در سال ۲۰۱۰ رخ داده و محدوده ارتفاعی گسترش این شاخص نیز از حدود ارتفاع ۳۰۰۰ متر آغاز شده است.

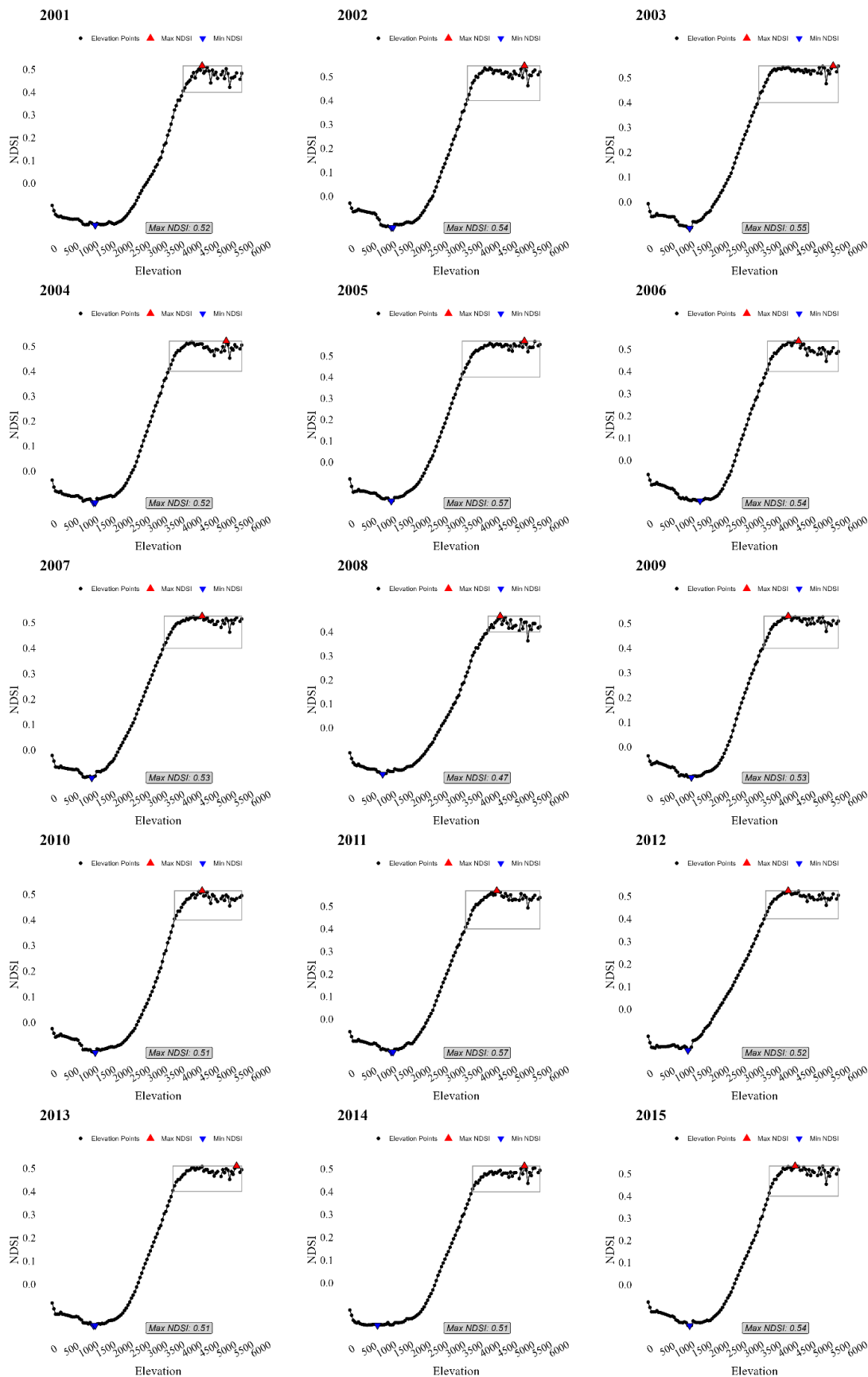


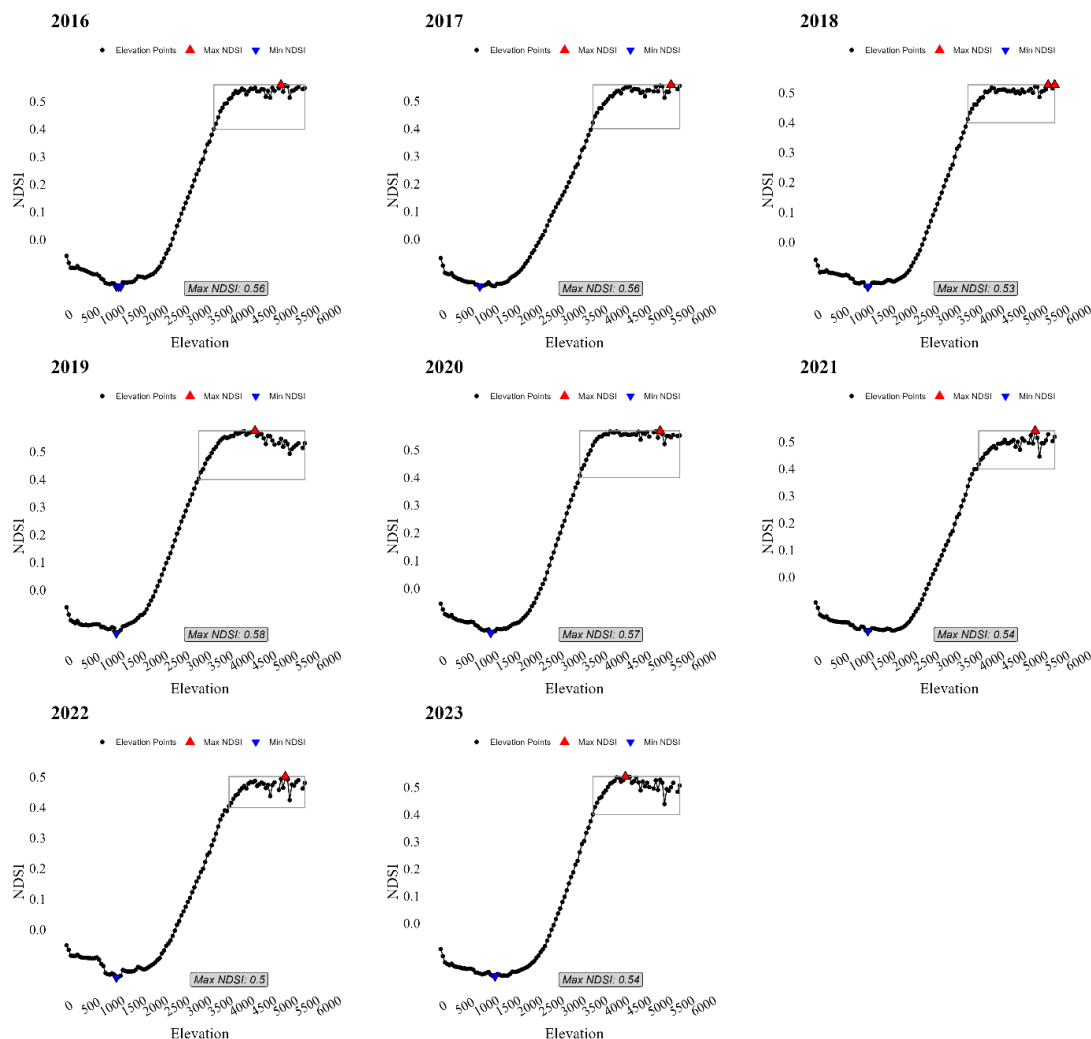


شکل ۵. تغییرات شاخص NDSI، نیمرخ ارتفاعی رشته کوه البرز در فصل زمستان

■ نیمرخ‌های ارتفاعی NDSI، در فصل بهار

با در نظر گرفتن نمودارهای مربوط به نیمرخ‌های ارتفاعی فصل بهار شکل (۶)، می‌توان این چنین عنوان کرد که گستره پوشش برفی در محدوده‌های ارتفاعی ۳۰۰۰ متر تا ۵۵۰۰ متری اغلب گسترش داشته و به جز سال ۲۰۰۸ که دامنه شاخص NDSI در محدوده ۰/۴ تا ۰/۵ بوده است، در سایر سال‌ها این شاخص توانسته است مقادیر بیشتر از ۰/۵ را داشته باشد. بیشینه مقادیر این شاخص اگرچه اغلب در محدوده ارتفاعی بیش از ۵۰۰۰ متر یافت می‌شود؛ اما در برخی از سال‌ها (۲۰۰۱، ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۲، ۲۰۱۵، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۳) تقریباً در محدود ارتفاعی ۳۵۰۰ تا ۴۰۰۰ متری قرار گرفته است. همچنین می‌توان گفت که در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۰، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ این محدوده ارتفاعی کوچک‌تر شده و از حدود ارتفاع ۳۵۰۰ تا ۵۵۰۰ متری گسترش یافته است.

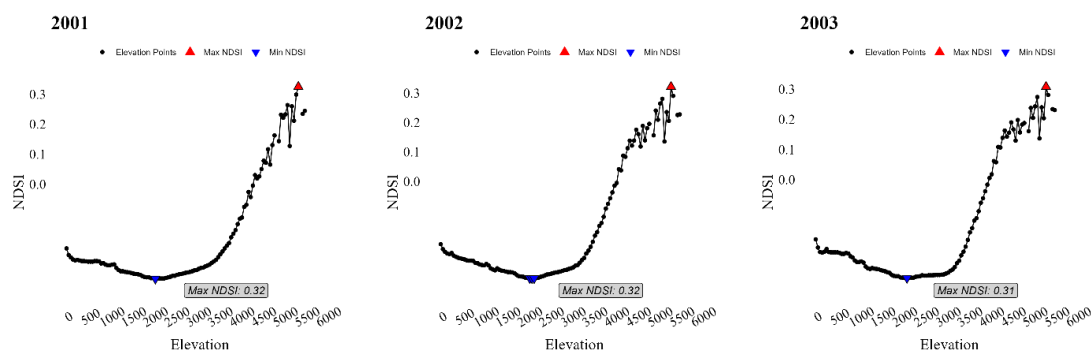


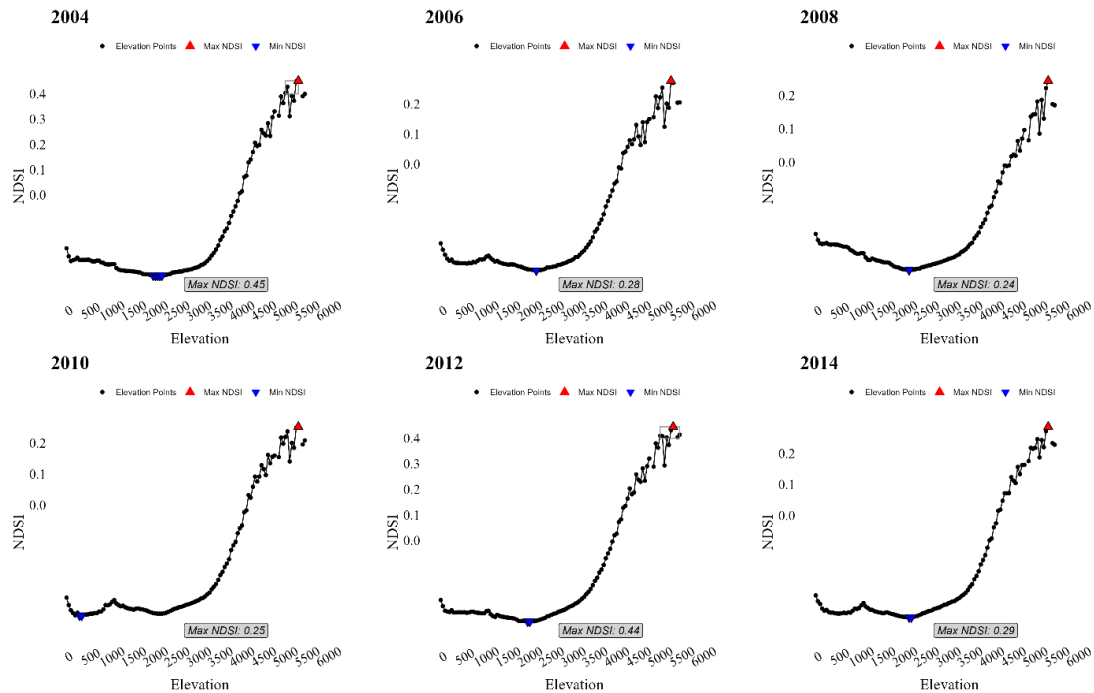


شکل ۶. تغییرات شاخص NDSI، نیمرخ ارتفاعی رشته کوه البرز در فصل بهار

■ نیمرخ‌های ارتفاعی NDSI، در فصل تابستان

همان گونه که در شکل ۷ مشخص است، فصل تابستان با توجه به کاهش ریزش نزولات جوی و افزایش دمای محیط شاخص NDSI در دامنه مقادیر کمتر از ۰/۴ که آستانه وجود پوشش برف است نوسان داشته؛ اما با این حال در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۱۲ این شاخص از محدوده بیشتر از این آستانه نیز توانسته عبور کند. اگرچه در اغلب این سال‌ها ارتفاع پوشش برف متمرکز در ارتفاعات بیش از ۵۵۰۰ متری بوده است؛ اما این نکته نیز قابل ذکر است که در سال ۲۰۱۲ این محدوده تا ارتفاع ۵۰۰۰ متری نیز گسترده شده است. از نظر کمینه مقادیر نیز با توجه به شکل (۷) می‌توان گفت که در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ این شاخص در کمینه خود قرار داشته است.





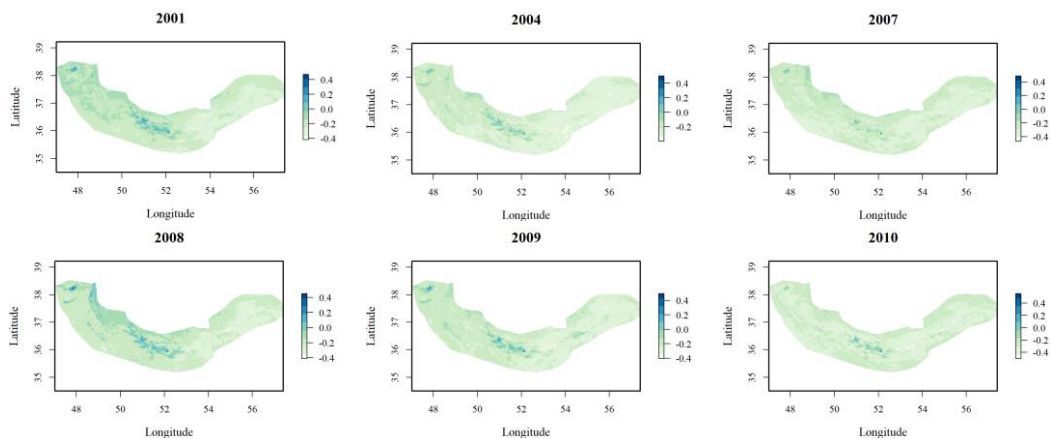
شکل ۷. تغییرات شاخص NDSI، نیمرخ ارتفاعی رشته کوه البرز در فصل تابستان

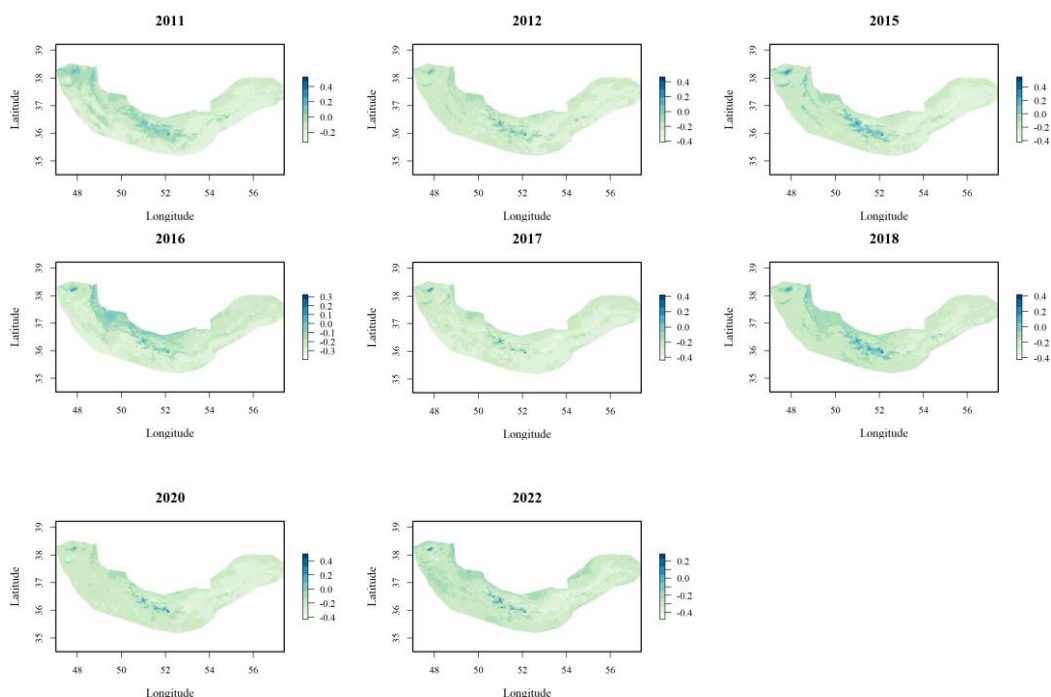
■ پهنه‌بندی NDSI

در ادامه، با توجه به نتایج حاصل از بررسی نیمرخ‌های ارتفاعی، تصاویر مرتبط با شاخص NDSI، با توجه به اهمیت و گستره ارتفاعی‌شان انتخاب شدند و به تفکیک فصل‌های (پاییز، زمستان، بهار و تابستان) مورد تحلیل قرار گرفتند. در ادامه به بررسی این تصاویر پرداخته خواهد شد.

■ پهنه‌بندی NDSI، در فصل پاییز

باتوجه به موارد یاد شده در بخش نیمرخ‌های ارتفاعی و با دقت در شکل ۸، که بیانگر مجموعه تصاویر پهنه‌بندی شاخص NDSI، در فصل پاییز است، می‌توان این گونه بیان نمود که گسترش این شاخص در سال ۲۰۰۷ پهنه‌های برفی به کمترین حد رسیده به نحوی که صرفاً نقاط مرتفع شاخصی نظیر قله دماوند و ارتفاعات سبلان عقب‌نشینی کرده است. همچنین همان گونه که نیمرخ‌های ارتفاعی گویای این مطلب بودند، قابل ذکر است که پاییز سال ۲۰۱۵ میلادی، را از نظر گستردگی پهنه‌های برفی می‌توان بیش از سایر سال‌ها دانست. به طور کلی نیز می‌توان عنوان کرد که اغلب گستره پوشش برفی در این فصل در محدوده طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۰ تا ۵۲ درجه در نوسان بوده به نحوی که صرفاً در نقاط ارتفاعی شاخصی نظیر قله دماوند توچال و ارتفاعات سبلان قابل مشاهده است.

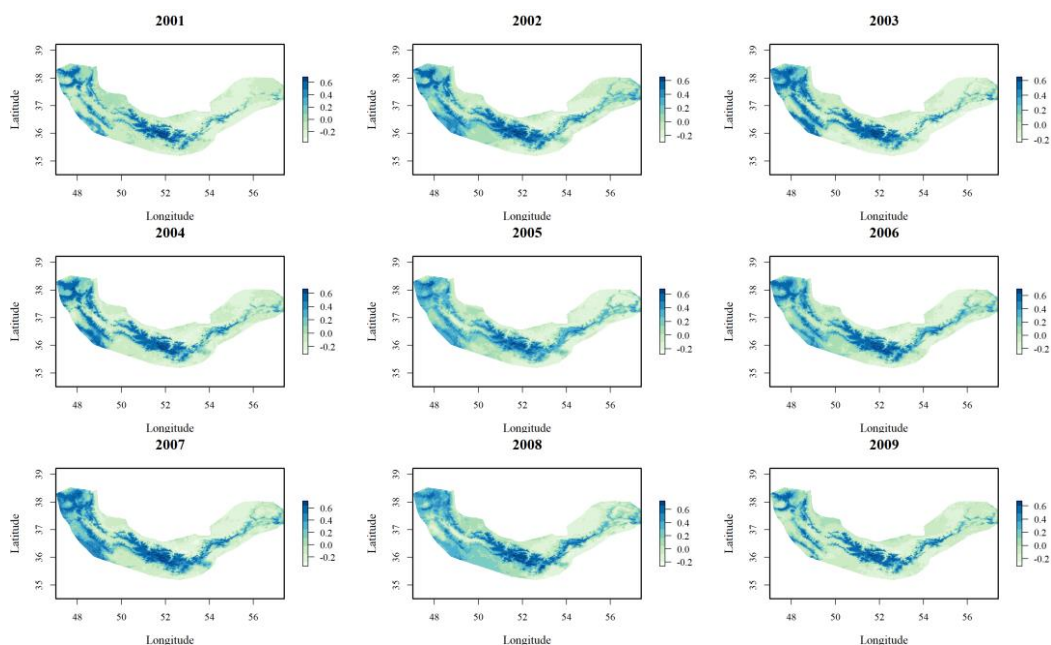


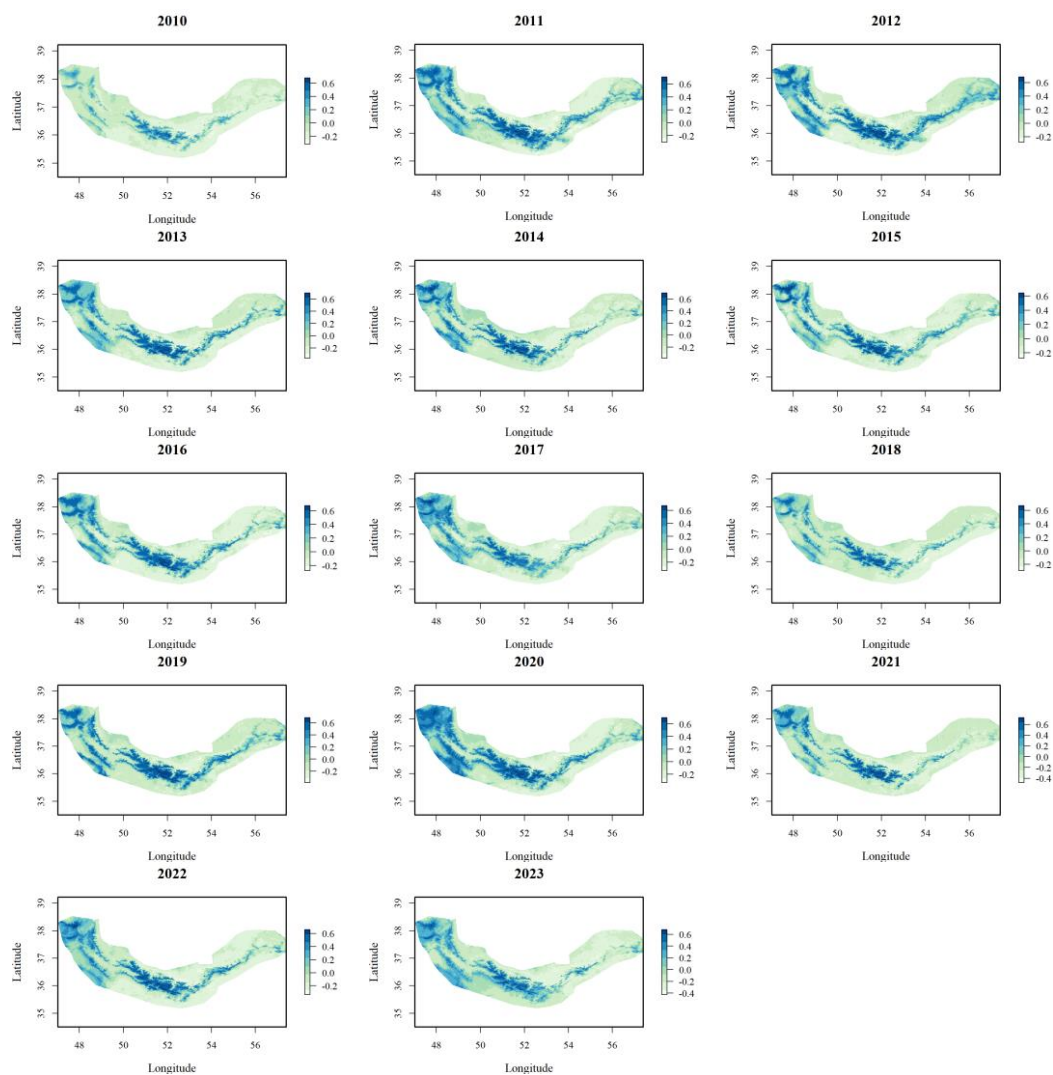


شکل ۸. تصاویر خروجی محاسبات شاخص NDSI، فصل پاییز به تفکیک سال‌ها

■ پهنه‌بندی NDSI، در فصل زمستان

با توجه به تصاویر شکل ۹، می‌توان این گونه اظهار داشت که اگرچه اوج تمرکز پوشش برف در این فصل نیز مشابه با فصل پاییز معطوف به ارتفاعات شاخص در محدوده مورد مطالعه بوده است؛ اما گستره پوشش برفی به موازات ارتفاعات پیشرفته است، به نحوی که به غالب منطقه مسلط شده است. البته در سال ۲۰۱۰ از گستره این شاخص کاسته شده که به وضوح در تصویر مربوط به آن این نکته قابل مشاهده است که این امر به نوعی می‌تواند با نمودار نیمرخ ارتفاعی نیز همخوانی داشته باشد.

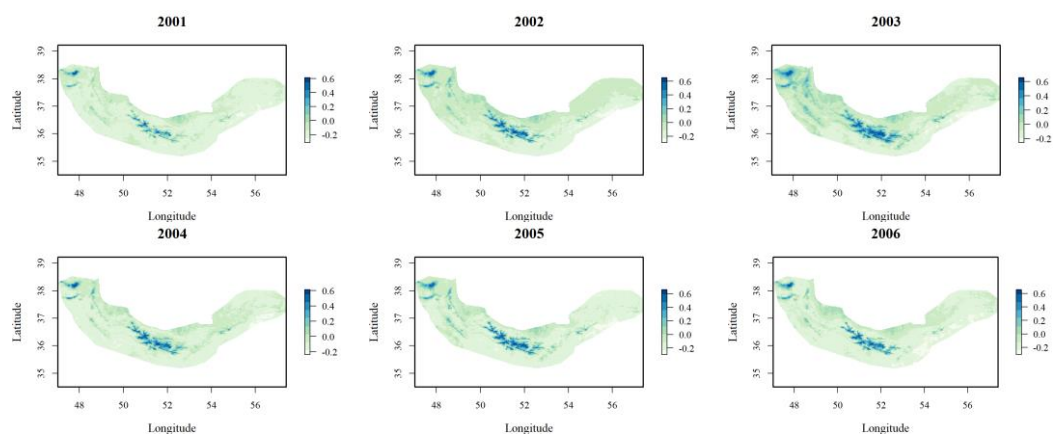


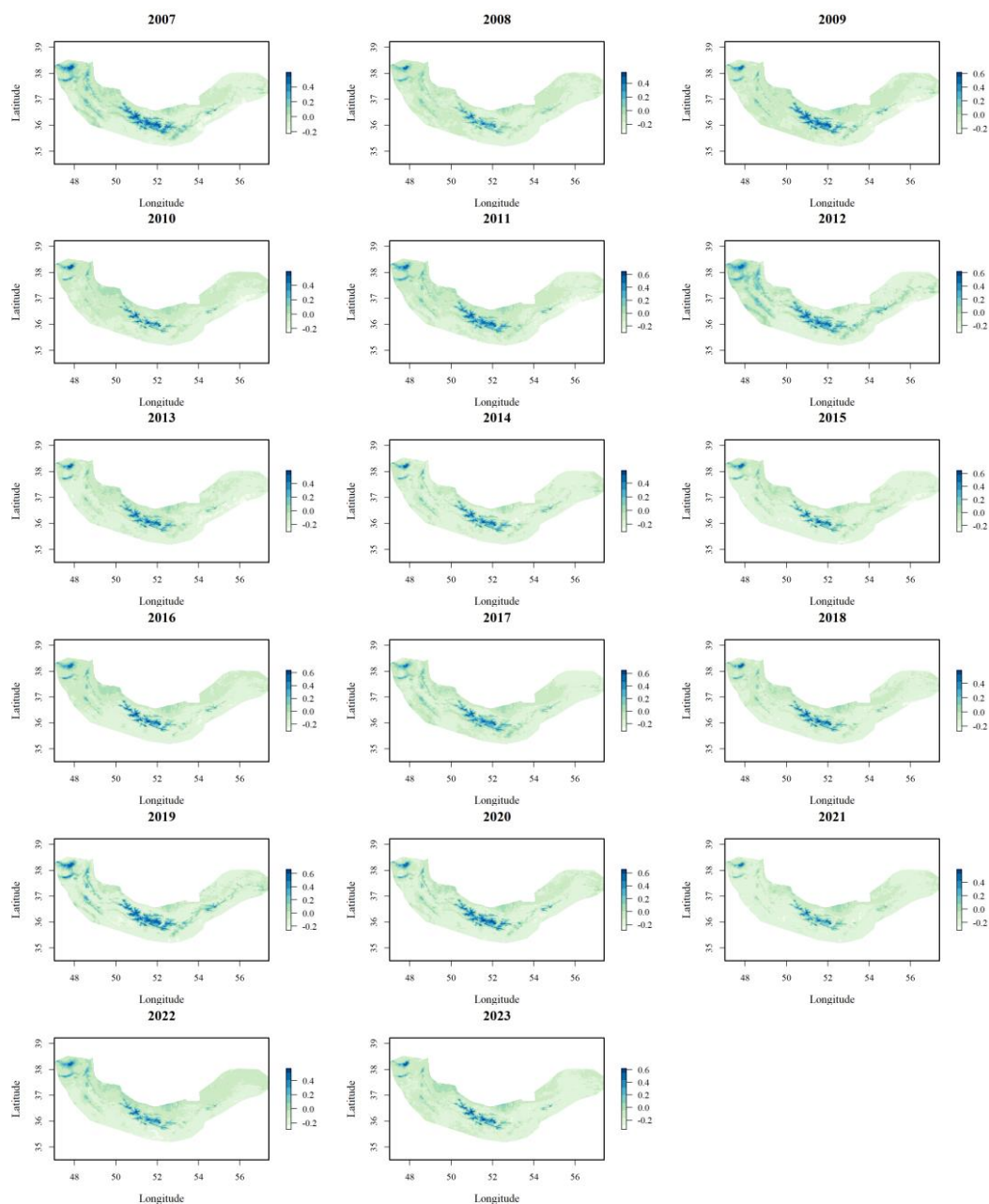


شکل ۹. تصاویر خروجی محاسبات شاخص NDSI، فصل زمستان به تفکیک سالها

▪ پهنه‌بندی NDSI، در فصل بهار

همان‌طور که از تصاویر شکل ۱۰ مشخص است گستره پوشش برف در فصل بهار، اغلب در محدوده تقریبی طول جغرافیایی ۴۷ تا ۴۸ درجه و ۵۰ تا حدود ۵۳ درجه گسترش داشته‌اند. همان‌طور که در بخش نیم‌رخ‌های ارتفاعی ذکر شد کاهش پهنه‌بندی پوشش برف در تصاویر مربوط به سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۰، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ نیز حائز توجه است.

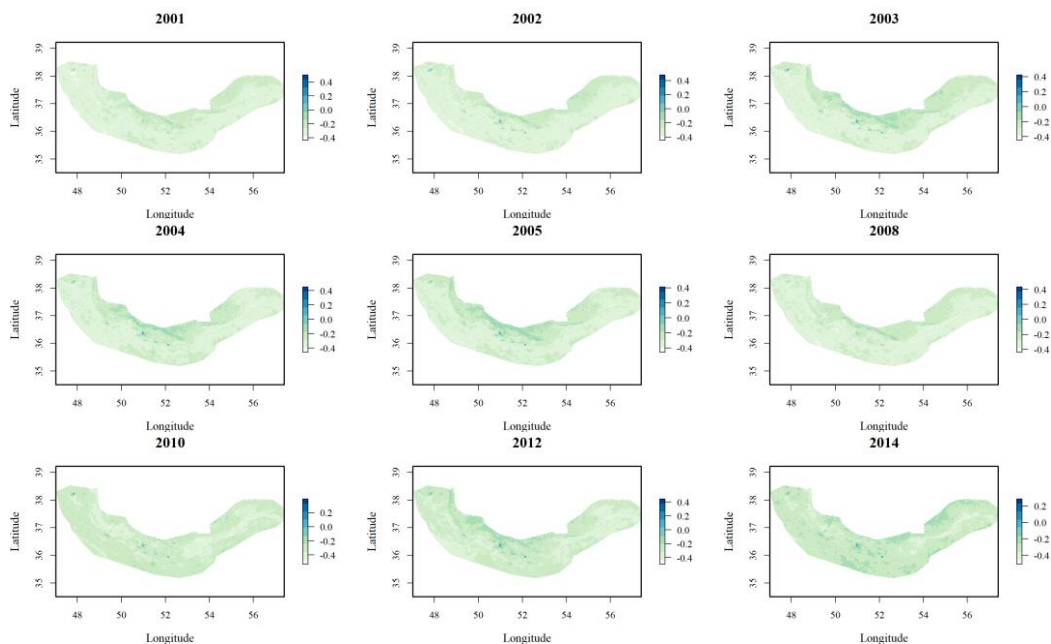




شکل ۱۰. تصاویر خروجی محاسبات شاخص NDSI، فصل بهار به تفکیک سالها

▪ پهنه‌بندی NDSI، در فصل تابستان

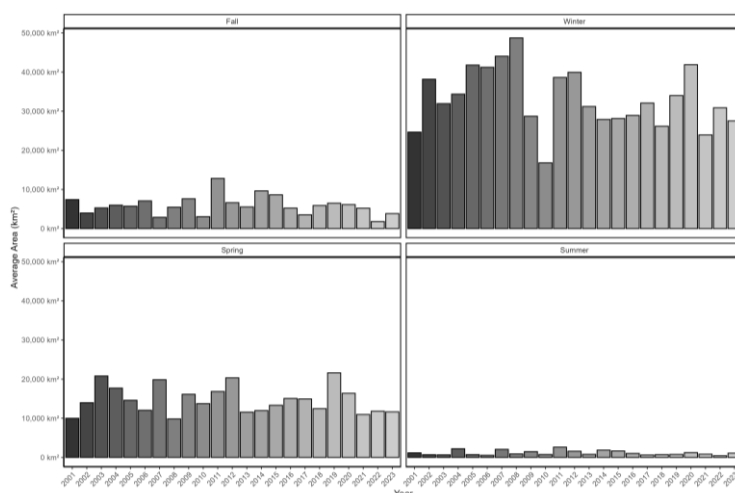
همان‌گونه که انتظار می‌رود در فصل تابستان به علت افزایش دریافت انرژی تابشی خورشید و کاهش نزولات جوی با توجه به تصاویر شکل ۱۱، می‌توان به وضوح شاهد عقب‌نشینی پهنه‌های برفی به خط‌الرأس نقاط شاخص ارتفاعی بود.



شکل ۱۱. تصاویر خروجی محاسبات شاخص NDSI، فصل تابستان به تفکیک سالها

▪ بررسی مساحت NDSI

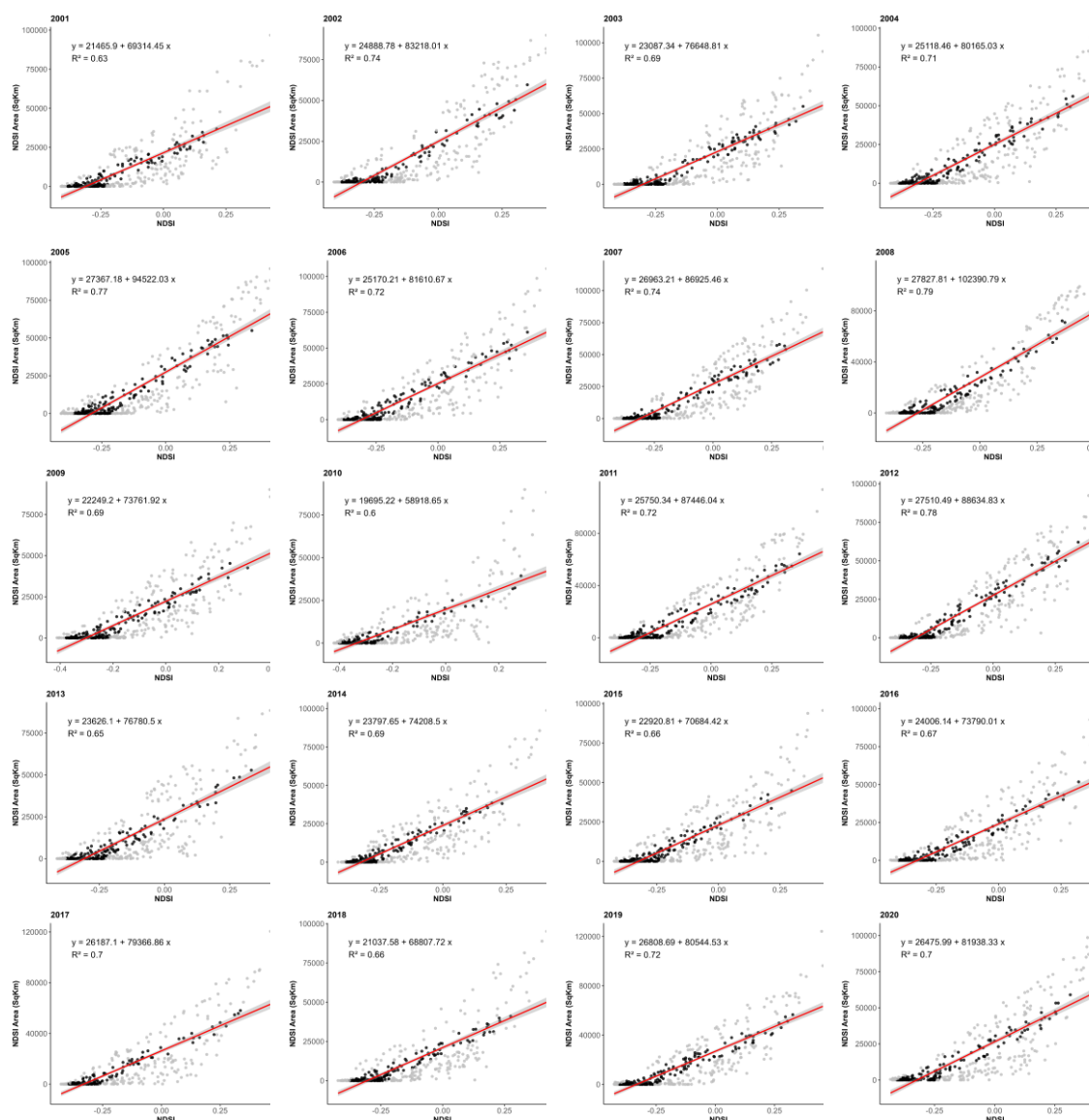
با توجه به آنچه در بخش‌های قبلی به آن‌ها اشاره شد، می‌توان در شکل ۱۲، نمودارهای تغییرات مساحت‌های دارای پوشش برفی را مشاهده نمود. از این نمودارها این گونه برآورد می‌شود که گستره مساحت‌های پوشش برفی در منطقه منتخب به ترتیب در فصول زمستان بهار و پاییز دارای اهمیت هستند؛ آنچنان که در فصل تابستان از تسلط پوشش برفی به وضوح کاسته می‌شود، به نحوی که اغلب گستره پوشش برفی به زیر ۵ کیلومتر مربع کاهش می‌یابد. اگرچه از نظر مساحتی این شاخص افت و خیزهای متعددی داشته است؛ اما ذکر این نکته حائز اهمیت است که با توجه به نمودار مربوط به فصل زمستان شکل ۱۲، می‌توان شاهد افت مساحت‌های پوشش برفی در بازه سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ و سپس رشد صعودی آن در این فصل بود. به طور کلی در این فصل به جز سال ۲۰۱۰ که مساحت پوشش برف زیر ۲۰۰۰ کیلومتر مربع است، در سایر سال‌ها مساحت‌های دارای پوشش برفی فراتر از مقدار یاد شده هستند. پس از فصل زمستان محدوده گسترش مساحت پوشش برفی در فصل بهار از گستردگی قابل توجهی بهره‌مند است؛ به نحوی در محدوده ۱۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ کیلومتر مربع در نوسان است. در انتها گستردگی مساحت‌های پوشش برفی در فصل پاییز به جز در سال ۲۰۱۲ که گسترشی بیش از ۱۰۰۰۰ کیلومتر مربعی را ثبت کرده است، در سایر سال‌ها مساحت‌های پوشش برفی در محدوده کمتر از مساحت یاد شده در نوسان هستند.

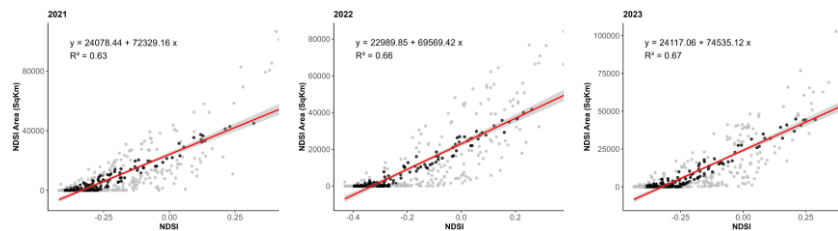


شکل ۱۲. نمودار میانگین فصلی مساحت پوشش شاخص NDSI نسبت به مساحت کل منطقه منتخب

■ بررسی معادله خطی ارتباط شاخص و مساحت NDSI

یکی از روش‌های رایج برای بررسی ارتباط بین شاخص‌های طیفی و متغیرهای سطح زمین، استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی ساده است. در این پژوهش، به منظور تحلیل رابطه بین شاخص NDSI و مساحت پوشش برف، از مدل رگرسیون خطی در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ استفاده شد. نتایج نشان داد که بین این دو متغیر رابطه‌ای مستقیم برقرار است؛ به گونه‌ای که با افزایش مقدار شاخص NDSI، مساحت پوشش برف نیز افزایش یافته و بالعکس، کاهش شاخص با کاهش وسعت پوشش برف همراه بوده است. برای ارزیابی قدرت و دقت این مدل، شاخص ضریب تعیین R^2 برای هر سال محاسبه شد. مقدار R^2 در سال‌های مورد بررسی در بازه ۰/۶۰ تا ۰/۷۹ قرار گرفت که بیانگر وجود رابطه نسبتاً قوی و پایدار میان متغیرهای مورد مطالعه است. میانگین مقدار R^2 در کل دوره برابر با ۰/۶۹ به دست آمد که نشان می‌دهد مدل توانسته است حدود ۶۹ درصد از تغییرات مساحت پوشش برف را با استفاده از شاخص NDSI توضیح دهد. بالاترین مقدار R^2 در سال ۲۰۰۸ (۰/۷۹) و پایین‌ترین مقدار آن در سال ۲۰۱۰ (۰/۶۰) مشاهده شد. با این وجود، در هیچ یک از سال‌ها این مقدار کمتر از ۶۰ درصد نشده است که این موضوع خود تأکیدی بر پایداری و کارایی NDSI ابزاری معتبر برای تخمین پوشش برف در منطقه مورد مطالعه است.





شکل ۱۳. رگرسیون شاخص NDSI و مساحت پوشش این شاخص در مقیاس سالانه

۴- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که پوشش برف در رشته‌کوه البرز در فاصله سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ دارای روندی کاهشی بوده است. بیشترین مقدار شاخص NDSI و مساحت پوشش برف در فصل زمستان مشاهده شد و پس از سال ۲۰۰۸ که حداکثر مساحت ثبت شد، در اغلب سال‌ها روند نزولی ادامه یافته است. در فصل زمستان کاهش میانگین و کمینه پوشش برف به طور مشخص مشاهده شد، در حالی که در فصول بهار و تابستان نیز روند کاهش با شدت کمتر دیده شده است. این نتایج با یافته‌های مطالعات پیشین همخوانی دارد؛ برای نمونه، مطیعی و همکاران نیز کاهش چشمگیر پوشش برف تابستانی را در شمال ایران در اثر افزایش دما گزارش کرده‌اند و رابطه معکوس میان دما و پوشش برف را با ضریب همبستگی بالا ($R = -0.8$) تأیید کرده‌اند (Motiee et al., 2024). همچنین پژوهش‌های داریان و همکاران نشان داده است که حدود ۶۱ درصد از نواحی بین ارتفاع ۲۰۰۰ تا ۲۳۰۰ متر در البرز مرکزی کاهش مدت پوشش برف را تجربه کرده‌اند، که با الگوی کاهش برف در ارتفاعات میانی این پژوهش مطابقت دارد (Dariane et al., 2017). یافته‌های این مطالعه از نظر زمانی نیز با مطالعات جهانی هم‌راستا است. بنرجی و همکاران، در بررسی تغییرات کرایوسفر هیمالیا نشان دادند که افزایش دما حتی در شرایط افزایش بارش می‌تواند باعث کاهش پوشش برف شود (Banerjee et al., 2021). نتایج مشابهی نیز در فلات تبت و مناطق آلپ گزارش شده است که همگی بر تأثیر غالب دما بر پویایی پوشش برف تأکید دارند. در پژوهش معظم و همکاران نیز روندهای کاهشی در پوشش برف در سه حوضه مهم رودخانه‌ای آسیا گزارش شده که به شدت با روندهای این پژوهش مشابه است (Moazzam et al., 2024). از نظر مکانی، تمرکز بیشتر مقدار شاخص NDSI در ارتفاعات مرکزی و غربی البرز و کاهش آن در مناطق شرقی، بیانگر الگوی فضایی ناسازگار پوشش برف در این منطقه است. پژوهش نوروز ولاشیدی و همکاران نیز به کاهش ۲۲۰ کیلومتر مربعی پوشش برف در دی‌ماه طی ۱۹ سال اخیر در البرز شمالی اشاره کرده و اثر گرمایش منطقه‌ای را مطرح نموده‌اند (NoroozValashedi & Bahrami Pichaghchi, 2023). در مجموع، نتایج این پژوهش هم‌راستا با مطالعات منطقه‌ای و جهانی نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی، به ویژه افزایش دمای فصلی، نقش کلیدی در کاهش پوشش برف در رشته‌کوه البرز دارد. این مسئله پیامدهای جدی برای منابع آب سطحی، اکوسیستم‌های کوهستانی و امنیت آبی مناطق پایین دست به همراه خواهد داشت. استفاده از داده‌های سنجش از دور با تفکیک بالاتر و تحلیل ترکیبی با مدل‌های اقلیمی می‌تواند در تحقیقات آتی برای پیش‌بینی دقیق‌تر روندها مورد استفاده قرار گیرد.

۵- سپاس‌گزاری

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه دکتری خانم بیان خالدی با عنوان «تحلیل اثر تغییرات آب و هوایی در ویژگی‌های برف مطالعه موردی: رشته‌کوه البرز» است که با حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است.

۶- منابع

اصغری سراسکانرود، صیاد، صفری، شیوا، و ملانوری، الهام. (۱۴۰۰). اندازه‌گیری عمق برف و ارزیابی ارتباط مؤلفه دما با ویژگی‌های برف در حوزه آبخیز لیقوان. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۸(۴)، ۱۸۷-۲۰۶.

صیدی شاهبوند، مسلم، امیدوار، کمال، مظفری، غلامعلی، مزیدی، احمد. (۱۴۰۴). واکاوی پیامد تغییرات اقلیمی بر ویژگی برف پوشان زاگرس میانی با استفاده از داده‌های سنجش از دور. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۵(۷۷)، ۴۳-۲۵.

عزیزی، قاسم، رحیمی، مجتبی، محمدی، حسین، خوش‌اخلاق، فرامرز. (۱۳۹۶). تغییرات زمانی-مکانی پوشش برف دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۹(۳)، ۳۸۱-۳۹۳.

نوروز ولاشدی، رضا و بهرامی پیچاقی، حدیقه. (۱۴۰۲). آشکارسازی اثر تغییر اقلیم بر پهنه‌های برفی آبخیز البرز شمالی به روش CPA. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۵(۳)، ۴۰۳-۳۸۶.

References

- Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G., Morecroft, M., Muccione, V., Prakash, A., Alcántara-Ayala, I., & Allen, S. K. (2023). Cross-chapter paper 5: mountains. *Climate change 2022: impacts, adaptation, and vulnerability*. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.022>
- Alizadeh, M., Hessari, B., Mir-Yaghoubzadeh, M.-H., & Mohammadpour, M. (2025). Evaluation of snow coverage detecting techniques utilising satellite imagery (A case study: Urmia Lake Basin, Iran). *Water and Environmental Challenges*, 20-35. <https://doi.org/10.30466/jwec.2025.121597>
- Amihăsesei, V.-A., Micu, D.-M., Cheval, S., Dumitrescu, A., Sfică, L., & Birsan, M.-V. (2024). Changes in snow cover climatology and its elevation dependency over Romania (1961–2020). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 51, 101637. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101637>
- Asghari, S. S., Safary, S., & Mollanouri, E. (2021). Measuring snow depth and evaluating the relationship between temperature component and snow characteristics in the Liqvan watershed. <https://sid.ir/paper/1138751/fa>. [In Persian]
- Azizi, Gh., Rahimi, M., Mohammadi, H., Khoshakhlaq, F. (2017). Temporal-spatial changes in snow cover on the southern slopes of Central Alborz. *Physcial Geography Research*, 49(3), 381-393. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2017.217393.1006943>. [In Persian]
- Azizi, A. H., Akhtar, F., Kusche, J., Tischbein, B., Borgemeister, C., & Oluoch, W. A. (2024). Machine learning-based estimation of fractional snow cover in the Hindukush Mountains using MODIS and Landsat data. *Journal of hydrology*, 638, 131579. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131579>
- Banerjee, A., Chen, R., Meadows, M. E., Sengupta, D., Pathak, S., Xia, Z., & Mal, S. (2021). Tracking 21st century climate dynamics of the Third Pole: An analysis of topo-climate impacts on snow cover in the central Himalaya using Google Earth Engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 103, 102490. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102490>
- Banerjee, A., Kang, S., Moazzam, M. F. U & Meadows, M. E. (2024). Climate dynamics and the effect of topography on snow cover variation in the Indus-Ganges-Brahmaputra river basins. *Atmospheric Research*, 309, 107571. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107571>
- Blahušíaková, A., Matoušková, M., Jeníček, M., Ledvinka, O., Kliment, Z., Podolinská, J., & Snopková, Z. (2020). Snow and climate trends and their impact on seasonal runoff and hydrological drought types in selected mountain catchments in Central Europe. *Hydrological Sciences Journal*, 65(12), 2083-2096. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1784900>
- Bousbaa, M., Boudhar, A., Kinnard, C., Elyoussfi, H., Karaoui, I., Eljabiri, Y., Bouamri, H., & Chehbouni, A. (2024). An accurate snow cover product for the Moroccan Atlas Mountains: Optimization of the MODIS NDSI index threshold and development of snow fraction estimation models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 129, 103851. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103851>
- Brown, R., & Armstrong, R. (2008). Snow-cover data: Measurement, products, and sources. In (pp. 181-216): Cambridge University Press Cambridge, UK.
- Carroll, M., DiMiceli, C., Townshend, J., Sohlberg, R., Hubbard, A., & Wooten, M. (2017). MOD44W: Global MODIS water maps user guide. *Int. J. Digit. Earth*, 10, 207-218. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD44W.061>
- Darlane, A. B., Khoramian, A., & Santi, E. (2017). Investigating spatiotemporal snow cover variability via cloud-free MODIS snow cover product in Central Alborz Region. *Remote sensing of environment*, 202, 152-165. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.042>
- Ding, C., Huang, W., Zhao, S., Zhang, B., Li, Y., Huang, F., & Meng, Y. (2022). Greenup dates change across a temperate forest-grassland ecotone in northeastern China driven by spring temperature and tree cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 3, 108780. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108780>
- Dong, C., & Menzel, L. (2020). Recent snow cover changes over central European low mountain ranges. *Hydrological Processes*, 34(2), 321-338. <https://doi.org/10.1002/hyp.13586>
- Faraji, A., Kamangar, M., & Ashrafi, S. (2024). Spatial Analysis of Snow Cover in Western Iran Using Satellite Imagery. *Water and Soil*, 38(1), 161-173. <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.83893.1323>
- Grünwald, T., Stötter, J., Pomeroy, J. W., Dadić, R., Moreno Baños, I., Marturià, J., Sproß, M., Hopkinson, C., Burlando, P., & Lehning, M. (2013). Statistical modelling of the snow depth distribution in open

- alpine terrain. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(8), 3005-3021. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3005-2013>
- Huang, X., & Ma, Y. (2024). Regional snow cover status and changes. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85242-5.00012-9>
- Huang, Y., Xu, Z., Chen, H., Fu, T., & Wan, D. (2021). Spatiotemporal variability of precipitation during flood seasons of Guangdong Province from 1960 to 2020. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 41(03), 70-82. <https://doi.org/10.11660/slfdx.20230605>
- Kopytkovskiy, M., Geza, M., & McCray, J. (2015). Climate-change impacts on water resources and hydropower potential in the Upper Colorado River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 473-493. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.02.014>
- Matiu, M., & Hanzer, F. (2022). Bias adjustment and downscaling of snow cover fraction projections from regional climate models using remote sensing for the European Alps. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(12), 3037-3054. <https://doi.org/10.5194/hess-26-3037-2022>
- Moazzam, M. F. U., Banerjee, A., Rahman, G., & Lee, B. G. (2024). Elevation-dependent snow cover dynamics and associated topo-climate impacts in upper Indus River basin. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 136, 103786. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103786>
- Motiee, S., Motiee, H., & Ahmadi, A. (2024). Analysis of rapid snow and ice cover loss in mountain glaciers of arid and semi-arid regions using remote sensing data. *Journal of Arid Environments*, 222, 10515. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.105153>
- NoroozValashedi, R., & Bahrani Pichaghchi, H. (2023). Detection of the effect of climate change on the snow areas of the Northern Alborz Watershed by CPA method. *Watershed Engineering and Management*, 15(3), 386-403. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.357000.1937>. [In Persian]
- Pulliainen, J., Luojus, K., Derksen, C., Mudryk, L., Lemmetyinen, J., Salminen, M., Ikonen, J., Takala, M., Cohen, J., & Smolander, T. (2020). Patterns and trends of Northern Hemisphere snow mass from 1980 to 2018. *Nature*, 581(7808), 294-298. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2416-4>
- Sidi Shahiyavand, M., Omidvar, K., Mozaffari, Gh., Mazidi, A. (2025). Exploring the impacts of climate change on the snow cover characteristics of the Central Zagros using remote sensing data. *Applied Research in Geographic Sciences*, 25(77), 25-43. [In Persian]
- Tang, Z., Deng, G., Hu, G., Zhang, H., Pan, H., & Sang, G. (2020). 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>
- Tong, R., Parajka, J., Komma, J., & Blöschl, G. (2020). Mapping snow cover from daily Collection 6 MODIS products over Austria. *Journal of hydrology*, 590, 125548. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125548>
- Wang, Z., Wu, R., Chen, Z., Zhu, L., Yang, K., Liu, K., & Yang, Y. (2021). Decreasing influence of summer snow cover over the Western Tibetan Plateau on East Asian precipitation under global warming. *Frontiers in Earth Science*, 9, 787971. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103043>
- Zheng, Z., Molotch, N. P., Oroza, C. A., Conklin, M. H., & Bales, R. C. (2018). Spatial snow water equivalent estimation for mountainous areas using wireless-sensor networks and remote-sensing products. *Remote sensing of environment*, 215, 44-56. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.029>