



Ecohydrological analysis of black carbon effects on accelerated snowmelt in the Alborz highlands using remote sensing and statistical modeling

Reza Norooz-Valashedi¹ | Mohammadreza Noroozian-Rostami²

1. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. E-mail: r.norooz@sanru.ac.ir
2. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. E-mail: m.noroozian@sanru.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Mountain snow, as a key component of the hydrological cycle, plays a crucial role in supplying both surface and subsurface water resources. This study employed an ecohydrological approach and remote sensing data to investigate the impact of black carbon (BC) pollution on snow surface albedo in the Alborz Mountains at elevations above 2000 meters during 2000–2024. Albedo data were obtained from the MOD10A1 V6.1 product, and BC data from the MERRA-2 reanalysis. Statistical analyses, including linear regression and the Generalized Additive Model (GAM), were conducted to examine negative temporal and monthly relationships between these variables. Results revealed a significant correlation between BC concentration and snow albedo during winter and early spring, highlighting the direct role of pollutants in reducing reflectivity and accelerating snowmelt. GAM results showed a nonlinear relationship between BC concentration and albedo sensitivity: sensitivity increased when BC exceeded $0.38 \mu\text{g}/\text{m}^2$ but declined after reaching a saturation point of $0.45 \mu\text{g}/\text{m}^2$. This identifies a critical BC concentration range of $0.40\text{--}0.50 \mu\text{g}/\text{m}^2$, where snow albedo experiences the greatest reduction. Additionally, temporal trends indicated a significant increase in BC for most months and a continuous decline in albedo during cold periods. Factor analysis further demonstrated that, although the temperature–moisture factor remained stable over many years, increasing fluctuations in the pollution–radiation factor over the past decade have been the main driver of early snowmelt.
Article history: Received 01 August 2025 Received in revised form 20 September 2025 Accepted 30 September 2025 Published online 21 September 2025	
Keywords: <i>Albedo,</i> <i>Black carbon,</i> <i>Factor analysis,</i> <i>Generalized additive model,</i> <i>Remote sensing,</i> <i>Snow reserves</i>	

Cite this article: Norooz-Valashedi, M., & Noroozian-Rostami, M. (2025). Ecohydrological analysis of black carbon effects on accelerated snowmelt in the Alborz highlands using remote sensing and statistical modeling. *Journal of Natural Environment*, 78 (2), 253-266. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.401222.2835>



تحلیل اکوهیدرولوژیک اثر کربن سیاه بر تسریع ذوب برف در ارتفاعات البرز با بهره‌گیری از سنجش‌ازدور و مدل‌سازی آماری

رضا نوروز ولاشدی^۱ | محمد رضا نوروزیان رستمی^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری ایران. رایانامه: r.norooz@sanru.ac.ir

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری ایران. رایانامه: m.noroozian@sanru.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰ کلیدواژه‌ها: آلبدیو، تحلیل عاملی، ذخایر برفی، سنجش‌ازدور، کربن سیاه، مدل جمعی تعمیم‌یافته.	برف کوهستانی به‌عنوان یکی از عناصر کلیدی چرخه هیدرولوژیک، نقشی اساسی در ذخیره و رهاسازی منابع آب سطحی و زیرسطحی ایفا می‌کند. با این حال، آلودگی ناشی از کربن سیاه می‌تواند بازتابندگی سطح برف را کاهش داده و موجب تسریع در فرآیند ذوب شود. هدف این پژوهش، بررسی رابطه میان غلظت کربن سیاه و تغییرات آلبدیو برف در رشته‌کوه البرز در محدوده ارتفاعی بالاتر از ۲۰۰۰ متر از سطح دریا در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ با رویکرد اکوهیدرولوژیک بوده است. برای این منظور، داده‌های آلبدیو از محصول MOD10A1 V6.1 و داده‌های کربن سیاه از بازتاب‌دهنده MERRA-2 استخراج شد. روابط تحلیل آماری به روش رگرسیون خطی و مدل جمعی تعمیم‌یافته (GAM) انجام شد. نتایج نشان داد همبستگی منفی معنی‌داری بین غلظت کربن سیاه و آلبدیو برف در ماه‌های زمستان و اوایل بهار وجود دارد. بنابراین آلاینده‌ها در کاهش بازتابندگی و افزایش سرعت ذوب برف نقش دارند. خروجی مدل GAM رابطه غیرخطی بین غلظت کربن سیاه و حساسیت آلبدیو را نشان داد. حساسیت آلبدیو پس از عبور غلظت کربن سیاه از آستانه ۰/۳۸ میکروگرم بر مترمربع افزایش یافته و با رسیدن به سطح اشباع ۰/۴۵ میکروگرم بر مترمربع کاهش یافت. در بازه بحرانی ۰/۴۰ تا ۰/۵۰ بیشترین افت آلبدیو مشاهده شد. بررسی روند داده‌ها نیز حاکی از افزایش معنی‌دار کربن سیاه در اغلب ماه‌ها و کاهش پیوسته آلبدیو در دوره سرد سال است. تحلیل عاملی نیز نشان داد که اگرچه عامل دما-رطوبت در بسیاری از سال‌ها روند پایداری داشته است، اما روند افزایشی نوسانات عامل آلودگی-تابشی از حدود یک دهه اخیر به‌عنوان عامل محرک اصلی ذوب زودرس برف است.

استناد: نوروز ولاشدی، رضا؛ و نوروزیان رستمی، محمد رضا (۱۴۰۴). تحلیل اکوهیدرولوژیک اثر کربن سیاه بر تسریع ذوب برف در ارتفاعات البرز با بهره‌گیری از سنجش‌ازدور و مدل‌سازی آماری. محیط زیست طبیعی، ۷۸ (۲)، ۲۴۶-۲۵۳.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.401222.2835>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

پوشش برفی یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های سطح زمین و اجزای تعریف‌شده اکوسیستم‌ها در نواحی کوهستانی و عرض‌های بالای جغرافیایی است که نقش مهمی در هیدرواقليم جهانی ایفا می‌کند (Zhou et al., 2024; UNEP, 2007). گذشته از آلودگی بالا و هدایت حرارتی اندک برف، که اثر درخور توجهی در ییلان انرژی، خنک‌کنندگی اتمسفر، و الگوهای گردش جو دارد (Lindsay et al., 2016; Dong and Menzel, 2015)، رفتار سامانه‌های هیدرولوژیک ارتباط نزدیکی با سرعت، تداوم و ذوب برف دارند (Zhang et al., 2025). برف همچون مخزن موقتی آب عمل می‌کند که برای تأمین آب بسیاری از نواحی حیاتی است (Shahroudi and Rossow, 2014). ذوب فصلی برف بسیار مهم بوده و حفظ روندهای هیدرولوژیک در حوضه‌های کوهستانی به تأمین آب منابع مصرف‌کننده پایین‌دست کمک می‌کند (Mir Yaghoubzadeh and Ghanbarpour, 2010). به‌همین دلیل، اطلاعات دقیق و به‌موقع در نواحی کوهستانی که پوشش برف برای مدتی طولانی باقی می‌ماند و ذوب آن عرصه‌ای آب برای جمعیت پایین‌دست فراهم می‌کند بسیار مهم است (Gafurov and Bardossy, 2009). پوشش برفی در مناطق کوهستانی به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی سامانه‌های هیدرولوژیک، نقش تعیین‌کننده‌ای در تأمین منابع آب دارد. آلبیدوی بالای برف، باعث بازتاب بخش عمده‌ای از تابش خورشیدی می‌شود و تعادل انرژی سطح زمین را حفظ می‌کند. با این حال، حضور آلاینده‌هایی مانند کربن سیاه که از احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی و زیست‌توده تولید می‌شوند، می‌تواند با رسوب بر سطح برف، موجب تیره شدن آن و کاهش آلبیدو شود. کاهش آلبیدو باعث افزایش جذب انرژی تابشی و در نتیجه ذوب سریع‌تر برف شده که می‌تواند تعادل اکوهیدرولوژیک حوزه‌های آبخیز پایین‌دست را با افزایش رواناب سطحی و تغییر در الگوی آبدی رودخانه‌ها بر هم زند (Kang et al., 2020). افزایش غلظت کربن سیاه می‌تواند بازتابندگی سطح برف را به‌میزان قابل توجهی کاهش دهد و فرآیند ذوب زود هنگام را تسریع بخشد (Hadley and Kirchstetter, 2012). در تحقیقی به‌طور خاص اثرات منطقه‌ای کربن سیاه در مناطق برفی شمالی و در نزدیکی قطب‌ها تحلیل شده و نقش آن در ایجاد گرمایش منطقه‌ای و تغییرات در سامانه‌های هیدرولوژیک مانند ذوب برف‌ها و بارش‌های زمستانی بررسی شده است (Flanner et al., 2007). این پژوهش با استفاده از SNICAR و ادغام داده‌های سنجش‌ازدور، اثرات کربن سیاه (BC) بر کاهش آلبیدوی برف و پیامدهای آن بر گرمایش منطقه‌ای و سامانه‌های هیدرولوژیک را بررسی نموده است. این مطالعه نشان می‌دهد که کربن سیاه نه تنها یک آلاینده موضعی، بلکه یک عامل کلیدی در تغییرات اقلیمی جهانی است. کاهش انتشار BC از منابع انسانی (مانند خودروهای دیزلی و احتراق زیست‌توده) می‌تواند راهکاری مؤثر برای کند کردن روند ذوب برف و حفظ تعادل هیدرولوژیک در مناطق حساس باشد. در این راستا، تحقیقات مدل‌محور مانند مدل SNICAR نیز اثرات مستقیم BC بر دمای سطح، ذوب برف و پاسخ‌های هیدرولوژیک را تأیید کرده‌اند. در پژوهشی دیگر Qian و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی حساسیت‌های آب و هوایی ناشی از آلودگی برف‌های فلات تبت می‌پردازند. نویسندگان مدل‌های اقلیمی برای شبیه‌سازی اثرات آلودگی (شامل کربن سیاه) بر برف‌ها و تأثیرات آن بر چرخه هیدرولوژیک و وضعیت موسمی آسیا به‌کار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که آلودگی برف‌ها می‌تواند تغییرات بزرگی در دوره‌های بارش و در نهایت تغییرات موسمی ایجاد کند. این مطالعه به‌ویژه بر اثرات بلندمدت آلودگی‌های انسانی در منطقه تبت تأکید دارد و پیامدهای آن را برای منابع آبی و کشاورزی در آسیا بررسی می‌کند. Doherty و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی آلودگی‌های نوری در برف‌های قطب شمال می‌پردازند. از جمله این آلودگی‌ها می‌توان به کربن سیاه و سایر ذرات نور-جذب اشاره کرد. این ذرات موجب کاهش آلبیدو برف‌های قطبی می‌شوند و در نتیجه باعث افزایش سرعت ذوب برف‌ها و تغییر در دمای منطقه می‌گردند. در پژوهشی Skiles و همکاران (۲۰۱۸) اثرات این ذرات بر تغییرات آب و هوایی در مناطق برفی مانند قطب شمال و مناطق کوهستانی دیگر را به تفصیل بررسی نمودند. این تحقیق نتیجه‌گیری می‌کند که کاهش این ذرات می‌تواند نقش مؤثری در کاهش سرعت تغییرات اقلیمی ایفا کند. در ایران نیز درباره تأثیر آلودگی بر خصوصیات سطحی برف انجام شده است. Ekrami و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی اثر پدیده گردوغبار بر کاهش آلبیدوی برف و تسریع فرآیند ذوب در ارتفاعات شیرکوه یزد پرداختند. یافته‌ها نشان داد که رسوب ذرات گردوغبار بر سطح برف باعث کاهش بازتابش نور خورشید و افزایش جذب انرژی می‌شود که به افزایش دمای سطح و تسریع در ذوب برف می‌انجامد. این پدیده علاوه بر تغییر در چرخه هیدرولوژیک منطقه، بر دسترسی به منابع آب فصلی تأثیر منفی دارد. این مقاله یکی از نخستین مطالعات داخلی در

مورد تأثیر آلاینده‌های جوی بر ذوب برف در ایران است. Azizi و همکاران (۲۰۱۷) تغییرات پوشش برف در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی طی چند دهه اخیر مورد بررسی قرار دادند. داده‌های ماهواره‌ای و روش‌های پردازش تصویر برای پایش تغییرات فضایی-زمانی برف مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاکی از کاهش تدریجی سطح پوشش برف به‌ویژه در ارتفاعات پایین‌تر و افزایش نرخ ذوب در سال‌های اخیر است. نویسندگان به تأثیر تغییرات اقلیم، افزایش دما و احتمالاً آلودگی‌های جوی به‌عنوان عوامل اصلی این تغییرات اشاره می‌کنند. Ghasemi و همکاران (۲۰۲۱) در شمال ایران نشان دادند میکروپلاستیک‌ها در نمونه‌های برف تازه یافت شده‌اند. این ذرات آلاینده به‌صورت ناهمگن در منطقه توزیع شده‌اند که نشان‌دهنده تأثیر منابع مختلف محلی و غیرمحلی (انتقال جوی) بر آلودگی برف است. این تحقیق اهمیت بررسی آلاینده‌های جدید مانند میکروپلاستیک در چرخه برف و تأثیرات بالقوه آنها بر خصوصیات سطحی برف، از جمله آلودگی و ذوب برف را برجسته می‌کند. از منظر اکوهیدرولوژیک، این تغییرات می‌تواند بر چرخه تغذیه آب‌های زیرزمینی، زمان‌بندی رواناب‌ها و دسترسی به منابع آبی تأثیرگذار باشد. در ایران، با وجود اهمیت بالای ذخایر برفی کوهستان‌های البرز و زاگرس، تحقیقات اندکی در زمینه تأثیر آلاینده‌های جوی بر ویژگی‌های سطحی برف صورت گرفته است. با این حال پژوهش‌های محدود انجام شده نشان‌دهنده حضور آلاینده‌هایی نظیر میکروپلاستیک‌ها و دوده در برف‌های شمال کشور است که می‌تواند پیامدهای مشابهی در پی داشته باشد.

با توجه به نبود داده‌های زمینی گسترده، استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور و بازتحلیل می‌تواند راهکاری مناسب برای تحلیل این پدیده‌ها باشد. این پژوهش در راستای پر کردن این خلأ علمی، با تمرکز بر بخش مرتفع البرز مرکزی (در مجاورت استان مازندران) به بررسی رابطه بین آلودگی و غلظت سطحی کربن سیاه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و روش‌های تحلیل آماری پرداخته است. همچنین علاوه بر کشف همبستگی خطی و غیر خطی میان کربن سیاه و آلودگی، تحلیل روند و چند متغیره سایر پارامترهای اقلیمی به‌منظور شناسایی عوامل مؤثر بر ذوب برف در این منطقه انجام شد. هدف نهایی، شناسایی روندها و درک اثرات آلودگی جوی بر سامانه‌های اکوهیدرولوژیک کوهستانی با تأکید بر فرآیندهای ذوب زودرس برف است.

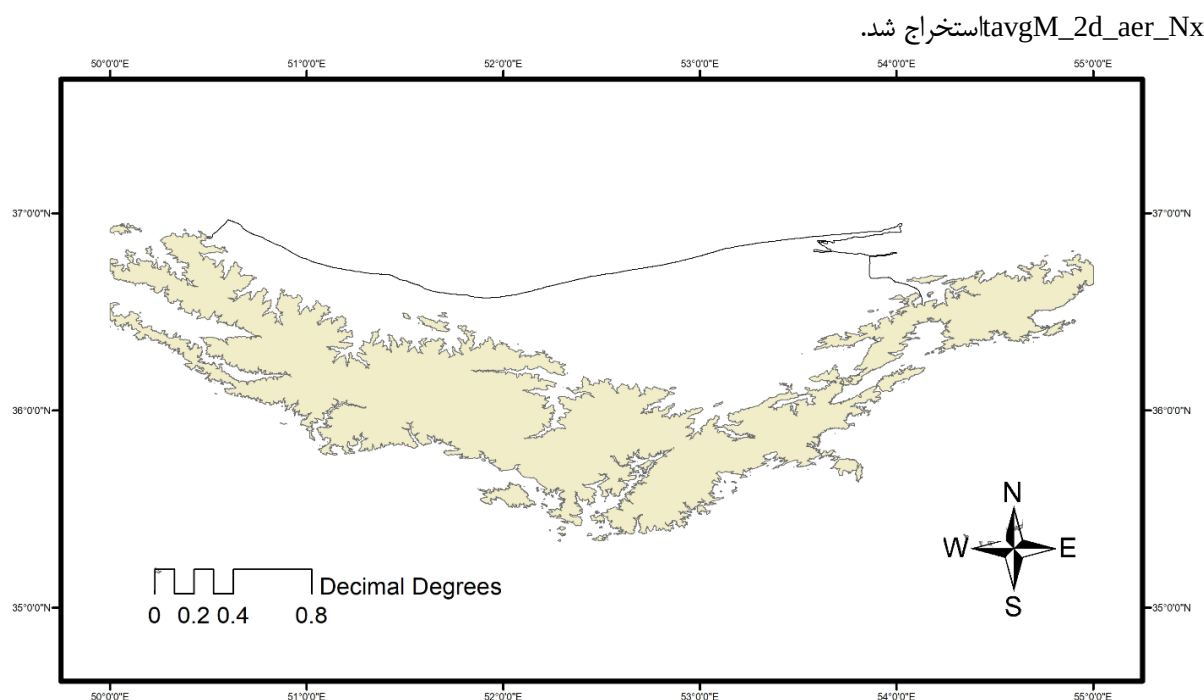
روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه (شکل ۱) شامل ارتفاعات رشته‌کوه البرز در مجاورت استان مازندران است که به‌دلیل ذخایر برفی گسترده، تأثیر زیادی بر رژیم هیدرولوژیک حوضه‌های پایین‌دست دارد. تحلیل صرفاً در نواحی با ارتفاع بالای ۲۰۰۰ متر و پوشش برف حداقل ۵۰ درصد در ماه‌های ابتدایی سال میلادی (ژانویه الی آوریل) انجام شد. به‌منظور بررسی رابطه بین غلظت کربن سیاه و آلودگی سطح برفی، از دو رویکرد آماری مکمل استفاده شد. رگرسیون خطی ساده و مدل جمعی تعمیم‌یافته^۱ (GAM) این مدل با استفاده از توابع پایه‌ای هموار کننده^۲، توانایی شناسایی روندهای پیچیده در داده‌ها را دارند (Wood, 2025; Wood et al., 2017). در این مطالعه، از بسته نرم‌افزاری mgcv در محیط R برای برازش مدل GAM میان کربن سیاه و آلودگی استفاده شد. تحلیل‌های انجام‌شده امکان شناسایی واکنش غیرخطی آلودگی به تغییرات فصلی و بین‌سالی کربن سیاه را فراهم نمود و از این طریق درک بهتری از بازخوردهای اکوهیدرولوژیک منطقه ارائه شد. همچنین برای درک ساختار پنهان و الگوهای مشترک میان متغیرهای اقلیمی و آلودگی در ناحیه مورد مطالعه، تغییرات آلودگی برف و عوامل مؤثر بر آن، از روش تحلیل عاملی استفاده شد. مجموعه‌ای از داده‌های سنجش‌ازدور و بازتحلیل با تفکیک‌های مکانی و زمانی متفاوت برای این منظور استفاده شد. داده‌های آلودگی برف از محصول روزانه MOD10A1 نسخه ۶،۱ متعلق به سنجنده MODIS روی ماهواره Terra تهیه شد. این داده‌ها شامل مقدار آلودگی نرمال‌شده با تفکیک مکانی ۵۰۰ متر هستند و از محیط (GEE^۳) برای بازخوانی و استخراج آنها استفاده شد. برای اندازه‌گیری میانگین سطحی کربن سیاه، از محصول بازتحلیل MERRA-2 متعلق به NASA-GMAO استفاده شد. متغیر مورد استفاده BCSMASS با واحد کیلوگرم بر مترمکعب بوده و از مجموعه داده‌های روزانه

^۱Generalized Additive Model

^۲Smoothing Splines

^۳Google Earth Engine



شکل ۱- گستره جغرافیایی مورد مطالعه در ارتفاعات بالای ۲۰۰۰ متر در رشته کوه البرز

مدل^۴ MERRA-2، نسخه دوم پایگاه بازتحلیل جوی سازمان فضایی آمریکا ناسا^۵ است که توسط مرکز مدل سازی و داده‌گذاری^۶ Goddard توسعه یافته است (Molod et al., 2012; Gelaro et al., 2017). این پایگاه با هدف فراهم‌سازی مجموعه‌ای یکنواخت و با کیفیت از داده‌های جوی، مشاهدات متنوع ماهواره‌ای را با مدل‌های پیشرفته جوی ترکیب می‌کند و خروجی‌هایی با پوشش جهانی و تفکیک مکانی و زمانی مناسب ارائه می‌دهد. سایر داده‌ها (دمای میانگین ماهانه، میانگین حداکثر ماهانه، میانگین حداقل ماهانه، بارش، رطوبت نسبی و سرعت باد) هم مطابق جدول ۱ از منابع در دسترس تهیه شدند. به‌منظور تضمین سازگاری علمی و فنی داده‌های ورودی، یک فرآیند ساختارمند برای پیش‌پردازش و کنترل کیفیت داده‌ها طراحی و اجرا شد که شامل هم‌مکانی و هم‌زمان داده‌ها و همچنین مدیریت داده‌های پرت و مفقود بوده است.

تمام داده‌ها ابتدا به یک دستگاه مختصات جغرافیایی مشترک (WGS84) باز گردانده و همسان شدند و سپس به تفکیک مکانی هدف ۵۰۰ متر (مطابق با تفکیک محصول آلبیدوی برف MODIS-MOD10A1) تجمیع شدند. باز نمونه‌برداری داده‌های با تفکیک مکانی پایین‌تر MERRA-2 با تفکیک $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ ، به تفکیک ۵۰۰ متر با استفاده از درون‌یابی دوخطی^۷ انجام شد که یک روش پذیرفته‌شده در پردازش داده‌های رستری برای حفظ پیوستگی فضایی داده‌هاست (Gonzalez and Woods, 2002; Li and Heap, 2014). در نهایت در سطح پیکسل تجمیع شدند تا سازگاری مکانی میان متغیرها برقرار شود. در نهایت برای هم‌زمان‌سازی زمانی، تمام داده‌ها به مقیاس زمانی ماهانه تبدیل شدند. انتخاب مقیاس ماهانه به دلایل متعددی انجام شد. نخست، بسیاری از فرآیندهای اقلیمی و برهم‌کنش‌های بین مؤلفه‌های جوی و سطح زمین (مانند تغییرات آلبیدوی برف در پاسخ به کربن سیاه) در بازه‌های زمانی ماهانه رفتار منظم‌تر و قابل‌تحلیل‌تری دارند. دوم، استفاده از مقیاس ماهانه باعث کاهش نویز ناشی از نوسانات روزانه و اثرات کوتاه‌مدت، مانند پوشش ابری یا رخداد‌های موقت، می‌شود که می‌تواند نتایج تحلیل عاملی را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین هم‌زمان‌سازی^۸ داده‌های ماهواره‌ای مختلف، که دارای تفکیک‌های زمانی گوناگون (روزانه، ساعتی

^۴Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications version 2

^۵NASA

^۶Goddard Modeling and Data Assimilation Center (GMAO)

^۷Bilinear Interpolation

^۸Temporal Alignment

یا ترکیبی) هستند، در مقیاس ماهانه به‌نحو موثق‌تری امکان‌پذیر است. افزون بر این، تجمع ماهانه منجر به کاهش میزان داده‌های مفقود و فراهم شدن ماتریس داده‌ای پایدارتر برای انجام تحلیل‌های آماری چندمتغیره می‌شود (Zhang et al., 2022). بر این اساس، میانگین‌گیری ماهانه داده‌های MODIS، MERRA-2 و سایر متغیرهای کمکی انجام شده و در نهایت ماتریس نهایی برای تحلیل عاملی در مقیاس ماهانه تهیه شد. داده‌های پرت در هر متغیر با استفاده از روش فاصله بین چارکی^۹ (IQR) در نرم‌افزار R شناسایی شدند و مقادیری که از ۱/۵ برابر IQR فراتر بودند، به‌عنوان داده پرت مطابق با اصول پذیرفته‌شده در تحلیل داده‌های اقلیمی به نقل از (Wilks, 2011) حذف شدند.

جدول ۱- مشخصات داده‌های مورد استفاده

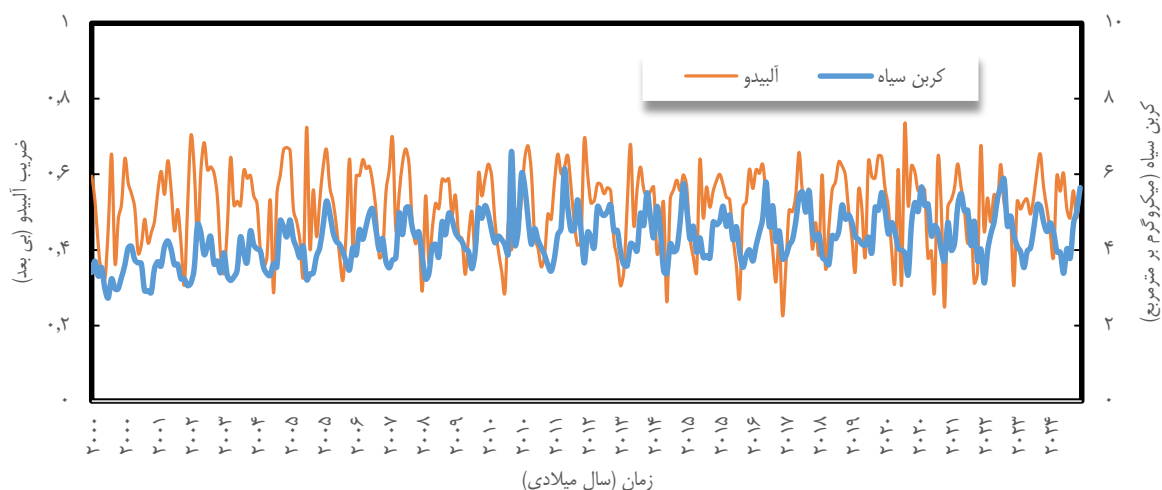
نام پارامتر	منبع داده	کد محصول در GEE	تفکیک مکانی	توضیحات
آلبیدوی برف	MODIS Terra	MODIS/061/MOD10A1	۵۰۰ متر	مقدار آلبیدوی نرمال شده روزانه؛ فقط پیکسل‌های برفی (snowalbedo) باکیفیت بالا استفاده شد.
کربن سیاه	MERRA-2	NASA/GEOS-5/MERRA2_400.inst1_2d_aer_Nx	۰/۵ × ۰/۶۲۵ درجه	مقدار جرم سطحی کربن سیاه (BCSMAS); به‌صورت ساعتی اما به‌صورت ماهانه میانگین‌گیری شد.
دما	ERA5-Land	ECMWF/ERA5_LAND/HOURLY	۰/۱ درجه (~9km)	داده‌های ساعتی دمای سطحی که به میانگین ماهانه تبدیل شدند.
تابش خورشیدی	ERA5-Land	ECMWF/ERA5_LAND/HOURLY	۰/۱ درجه	تابش سطحی دریافتی (surface net solar radiation) به‌صورت تجمعی روزانه و سپس ماهانه محاسبه شد.
رطوبت نسبی	ERA5-Land	ECMWF/ERA5_LAND/HOURLY	۰/۱ درجه	محاسبه‌شده از روی دمای نقطه شبنم و دمای هوا در ساعات مختلف روز.
بارش	CHIRPS	UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY	۰/۰۵ درجه (~5km)	بارش روزانه با دقت بالا برای مناطق کوهستانی؛ از سال ۲۰۰۰ به بعد در دسترس.
ارتفاع	SRTM	USGS/SRTMGL1_003	۳۰ متر	مدل رقومی ارتفاعی دقیق برای استخراج مناطق بالاتر از ۲۰۰۰ متر.

با توجه به چالش‌های زیربنایی داده‌های مفقود در سنجش‌ازدور اپتیکی (به‌دلیل پوشش ابر) و همچنین خلاءهای موجود در محصولات بازتحلیل، یک راهبرد تطبیقی اتخاذ شد، به این صورت که مقدار ماهانه برای هر سلول شبکه تنها زمانی محاسبه شود، که حداقل ۸۰ درصد از مشاهدات روزانه موجود باشد. در غیر این صورت، مقدار ماهانه برای آن سلول به‌عنوان داده مفقود در نظر گرفته می‌شد تا از بروز سوگیری (خطای اریبی) ناشی از نمونه‌برداری ناکافی جلوگیری شود. از آنجا که تحلیل عاملی نیازمند ماتریس داده‌ای کامل است، داده‌های مفقود با استفاده از الگوریتم امید ریاضی بیشینه‌سازی^{۱۰} (EM) برآورد شدند، که ساختار کوواریانس داده‌ها را حفظ می‌کند (Schafer and Graham, 2002). برآورد مقادیر مفقود به‌طور جداگانه برای هر متغیر در طول سری زمانی انجام شد، به‌گونه‌ای که روابط چندمتغیره میان داده‌ها همچنان حفظ شود و تحریف حداقلی در ویژگی‌های آماری داده‌ها ایجاد شود. پس از انجام هم‌مکانی، هم‌زمانی و برآورد داده‌های مفقود، میانگین‌گیری مکانی روی منطقه مورد مطالعه انجام شد تا برای هر متغیر یک سری زمانی ماهانه نماینده از میانگین منطقه‌ای به‌دست آید. این سری‌های زمانی سپس به‌صورت استاندارد نمرة Z نرمال‌سازی^{۱۱} شدند تا امکان مقایسه بین متغیرها و استخراج عوامل در تحلیل عاملی فراهم شود.

^۹Interquartile Range^{۱۰}Expectation-Maximization^{۱۱}Z-Score Normalization

یافته‌های پژوهش

پس از پالایش داده‌ها و انجام مراحل پژوهش، نمودار سری زمانی آلبیدو و کربن سیاه (شکل ۲) نشان می‌دهد که هر دو متغیر دارای نوسانات منظم سالانه هستند که نشان‌دهنده الگوی فصلی قوی است. کاهش تدریجی در دامنه آلبیدو به‌ویژه در سال‌های اخیر یعنی از حدود ۲۰۱۵ به بعد مشاهده می‌شود، همچنین کربن سیاه روندی افزایشی یا پایدار با نوسانات شدید به‌خصوص از حدود سال ۲۰۱۰ به بعد داشته است.

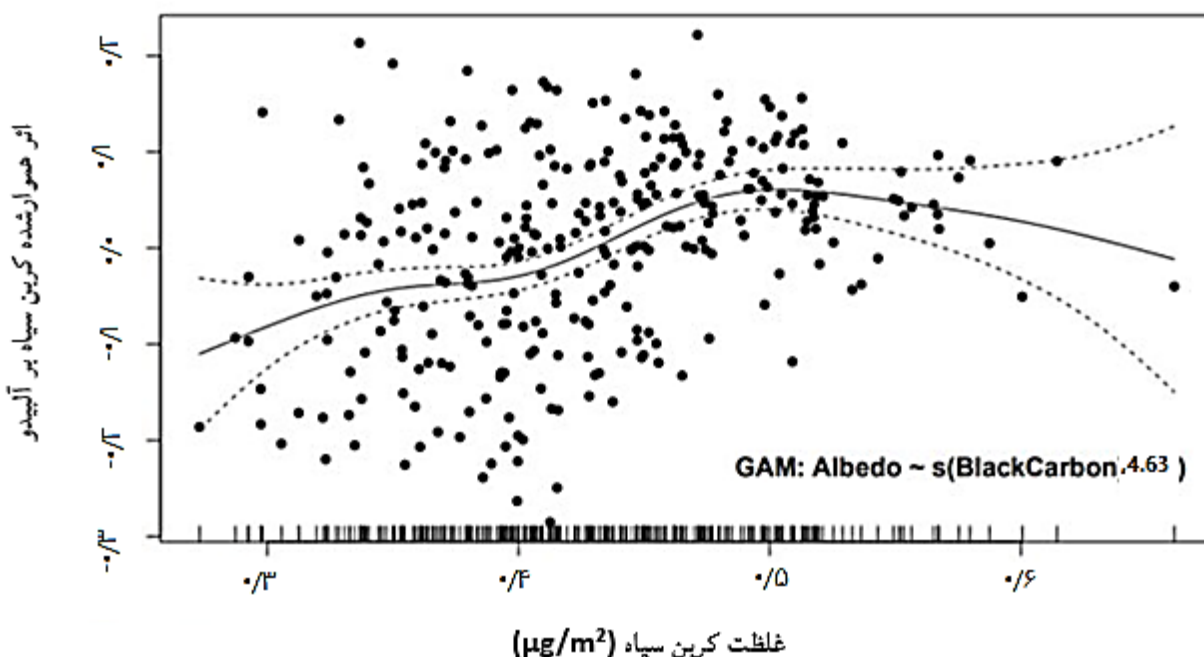


شکل ۲- نمودار سری زمانی تغییرات آلودگی و آلبیدو

مدل رگرسیون خطی نیز برای تحلیل ماهانه به‌کار گرفته شد تا جهت و شدت رابطه بین آلبیدو و کربن سیاه در بازه‌های زمانی مشخص (مانند ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس) که برابر با ماه‌های ذوب زودرس برف است بررسی شود. برای مدل‌سازی دقیق‌تر و بررسی ماهیت غیرخطی رابطه میان این دو متغیر، از مدل GAM با تابع نرم‌کننده استفاده شد. این مدل قادر است بدون نیاز به فرض خطی بودن، شکل واقعی و انعطاف‌پذیر رابطه بین آلبیدو و کربن سیاه را آشکار سازد. در بررسی رگرسیون میان آلبیدوی برف و غلظت کربن سیاه برای چهار ماه ابتدایی سال میلادی به‌دلیل وجود برف و اهداف پژوهش، نتایج مطابق جدول ۲ به‌دست آمد. رابطه منفی مشاهده‌شده در ژانویه و فوریه هرچند ضعیف است با نتایج مطالعات دیگر انجام شده هم‌راستا است و نشان می‌دهد که BC با تأثیرگذاری بر بازتابندگی برف، مستقیماً به تسریع فرآیند ذوب در اوایل سال کمک می‌کند (Hadley and Kirchstetter, 2012). اما مشاهده همبستگی مثبت در ماه مارس نشان‌دهنده پیچیدگی‌های اقلیمی محلی و نیاز به تحلیل دقیق‌تر با استفاده از مدل‌های غیرخطی مانند GAM برای آشکارسازی آستانه‌ها و رفتار اشباع‌روند و شناسایی عوامل محیطی مداخله‌گر است.

جدول ۲- برآورد مقادیر شیب و ضریب تعیین ماهانه بین آلبیدو برف و غلظت کربن سیاه

ماه	شیب خط رگرسیون ($\times 10^8$)	ضریب تعیین (R^2)	ضریب همبستگی
ژانویه	-۲/۸۶	۰/۰۹	-۰/۳
فوریه	-۱/۶۲	۰/۰۵	-۰/۲۲
مارس	۳/۱۰	۰/۱۱	۰/۳۳
آوریل	۶/۱۷	۰/۰۱	۰/۰۶



شکل ۳- رابطه آلبدو و کربن سیاه به روش مدل جمعی تعمیم یافته. محور افقی میزان کربن سیاه را بر حسب نانو کیلو گرم بر متر مربع و محور عمودی مقدار تابع هموار شده از کربن سیاه، یعنی اثر نسبی کربن سیاه بر آلبدو بعد از تنظیم مدل را نشان می دهد. $s(\text{BlackCarbon}, 4.63)$ به این معنی است که این تابع با $4/63$ درجه آزادی مؤثر برای کربن سیاه استفاده شده است. نقاط سیاه: داده های مشاهده شده بعد از آنکه اثرات دیگر حذف یا تنظیم شدند و خط پیوسته: اثر برآورد شده کربن سیاه بر آلبدو توسط مدل است. خط چین ها: حدود اطمینان ۹۵ درصد برای تخمین. خط های کوچک پایین نمودار: محل مقادیر مشاهده شده کربن سیاه را روی محور افقی نشان می دهد.

در بررسی رابطه غیرخطی بین غلظت کربن سیاه و آلبدوی سطح برفی در منطقه البرز، که از مدل جمعی تعمیم یافته (GAM) با تابع نرم کننده استفاده شد، مطابق شکل ۳ در سطوح پایین کربن سیاه کمتر از حدود $0/38$ نانوکیلوگرم بر متر مربع، تغییرات آلبدو بسیار محدود بوده و کاهش معنی داری مشاهده نشده است. با این حال، پس از عبور از آستانه حدودی مذکور، آلبدو شروع به کاهش می کند و در حدود $0/45$ نانوکیلوگرم بر متر مربع پایین ترین مقدار خود می رسد. در این ناحیه، مدل نشان می دهد که حساسیت آلبدو نسبت به افزایش کربن سیاه به بیشترین مقدار خود می رسد، به گونه ای که افزایش اندک در غلظت کربن سیاه با کاهش قابل توجهی در آلبدو همراه است. با افزایش بیشتر غلظت کربن سیاه ($0/52$ نانوکیلوگرم بر متر مربع)، شیب منحنی کاهش یافته و اثر افزایش کربن سیاه بر آلبدو کاهش می یابد. این پدیده احتمالاً به اشباع شدن اثرات نوری کربن سیاه بر سطح برف مربوط می شود، به طوری که پس از یک نقطه مشخص، افزودن کربن سیاه بیشتر تأثیر چندانی بر بازتابندگی سطح ندارد. بنابراین، براساس مدل جمعی تعمیم یافته می توان نتیجه گرفت که یک ناحیه بحرانی در حدود $0/4$ تا $0/5$ میکروگرم بر متر مربع برای غلظت کربن سیاه وجود دارد که در آن، آلبدو بیشترین کاهش را تجربه می کند. این یافته نشان دهنده اهمیت ویژه کنترل منابع انتشار کربن سیاه در فصل های برفی، به ویژه در مناطق کوهستانی حساس همچون البرز، جهت کاهش روند ذوب زود هنگام برف و حفظ منابع آبی ناشی از ذوب برف است. تحلیل توزیع ماهانه روزهای دارای غلظت بحرانی کربن سیاه ($0/4$ تا $0/5$ میکروگرم بر متر مربع) مطابق جدول ۳ نشان داد که بیشترین فراوانی این روزها در ماه های زمستان و اوایل بهار رخ داده است. به طور مشخص، ماه مارس (اسفند-فروردین) با ثبت ۲۰ روز بحرانی بیشترین فراوانی را به خود اختصاص داد. به نظر می رسد که در فصل زمستان، به ویژه اواخر آن، انتقال و تجمع کربن سیاه بر سطح برف به بیشترین میزان خود می رسد که می تواند منجر به کاهش قابل توجه آلبدو و در نتیجه تسریع فرآیند ذوب برف شود.

جدول ۳- تعداد روزهای بحرانی ماه‌های دوره آماری

ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
تعداد روزهای بحرانی	۱۳	۱۶	۲۰	۱۵	۱۴	۴	۲	۱۰	۱۱	۱۷	۱۴	۹

تحلیل عاملی: به منظور بررسی نقش نسبی عوامل مختلف اقلیمی و آلاینده‌ای بر فرآیندهای مرتبط با ذوب برف در نواحی کوهستانی، تحلیل عاملی به روش بیشینه درست‌نمایی (ML) با چرخش Varimax بر روی مجموعه‌ای از متغیرهای اقلیمی و محیطی شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، دمای میانگین، بارش، رطوبت نسبی، آلودگی، سرعت باد و غلظت کربن سیاه انجام شد (جدول ۴). براساس نتایج حاصل، سه عامل اصلی استخراج شد که در مجموع دو عامل بخش عمده‌ای از واریانس داده‌ها را مطابق جدول ۵ تبیین می‌کنند.

جدول ۴- عامل‌های اصلی و بارهای عاملی آن‌ها

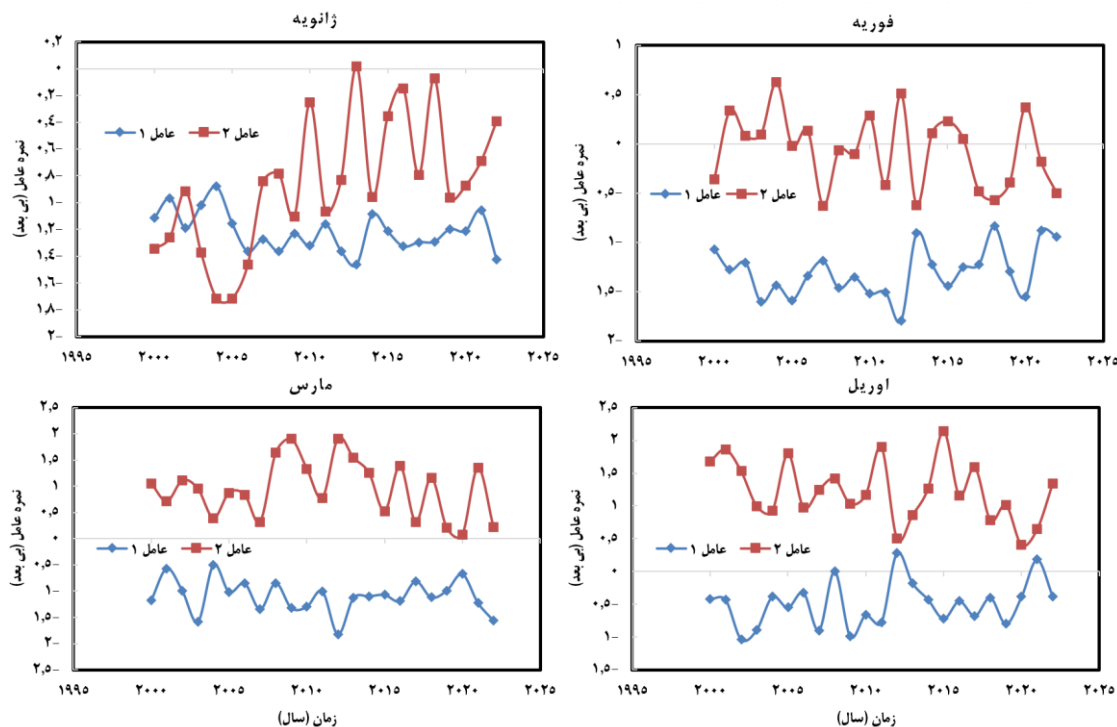
عامل اصلی	قدر مطلق بار عاملی ماکزیمم	عامل ۳	عامل ۲	عامل ۱	متغیر
عامل اول	۰/۹۶	۰/۱۵	۰/۲۴	۰/۹۶	دمای کمینه
عامل اول	۰/۸۹	-۰/۰۲	۰/۴۵	۰/۸۹	دمای بیشینه
عامل اول	۰/۹۳	۰/۰۶	۰/۳۶	۰/۹۳	دمای میانگین
عامل اول	۰/۷۴	-۰/۱۵	-۰/۱۴	-۰/۷۴	بارش
عامل اول	۰/۷۷	-۰/۰۶	-۰/۴۲	-۰/۷۷	رطوبت
عامل دوم	۰/۵۵	۰/۰۳	-۰/۵۵	-۰/۰۹	آلودگی
عامل دوم	۰/۷۶	۰/۲۶	-۰/۷۶	۰/۵۹	سرعت باد
عامل دوم	۰/۵۰	-۰/۲۴	-۰/۵۰	-۰/۴۰	کربن سیاه

عامل اول به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای به مقدار ۵۲/۹۴ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین کرده است. این عامل بارگذاری‌های بالایی از متغیرهای دمای حداقل، دمای حداکثر و متوسط دما، و بارگذاری‌های منفی بارش و رطوبت نسبی دارد. این ترکیب بیانگر یک گردان گرم-خشکی است و می‌تواند به‌عنوان «عامل دما-رطوبتی» تفسیر شود که شرایط حرارتی و میزان رطوبت منطقه را کنترل می‌کند. این متغیرها به‌وضوح نمایانگر تأثیرات اقلیمی و جوی بر شرایط محیطی هستند که در تحلیل‌ها بیشتر به‌عنوان عواملی برای تعیین شرایط هوایی و اقلیمی در نظر گرفته می‌شوند. از این‌رو، این عامل می‌تواند نمایانگر شرایط جوی اصلی حاکم بر منطقه باشد که در نتایج تحلیل‌های اقلیمی اهمیت فراوانی دارد. این عامل نقش محوری در فرآیند ذوب یا پایداری پوشش برفی ایفا می‌کند. عامل دوم با تبیین ۲۱/۴۰ درصد از واریانس داده‌ها، با بارگذاری مثبت بالا از سرعت باد و بارگذاری‌های منفی قابل توجه از آلودگی و کربن سیاه، نشان‌دهنده ترکیبی از شرایط تابشی، آلودگی و انتقال انرژی از طریق باد است. این عامل را می‌توان به‌عنوان «عامل تابشی-آلودگی» معرفی کرد که نقش آن در کاهش آلودگی برف از طریق افزایش غلظت آلاینده‌های جوی (به‌ویژه کربن سیاه) و افزایش جذب انرژی خورشیدی در سطح برف مشهود است. این متغیرها به‌وضوح بر فرآیندهای مرتبط با ذوب برف و تغییرات الگوهای برفی تأثیرگذار هستند. ترکیب واریانس تبیین‌شده توسط هر یک از عوامل نشان می‌دهد که دو عامل اول به‌طورکلی ۷۴/۳۴ درصد از واریانس کل داده‌ها را توضیح می‌دهند. این مقدار قابل توجه نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن فقط دو عامل اول، می‌توان به‌طور مؤثر ساختار اصلی داده‌ها را توصیف کرد. بنابراین، نتایج تحلیل عاملی این تحقیق نشان می‌دهند که بیشتر تغییرات داده‌ها می‌تواند توسط دو عامل اول که به شرایط جوی و آلودگی محیطی مربوط هستند، تبیین شود.

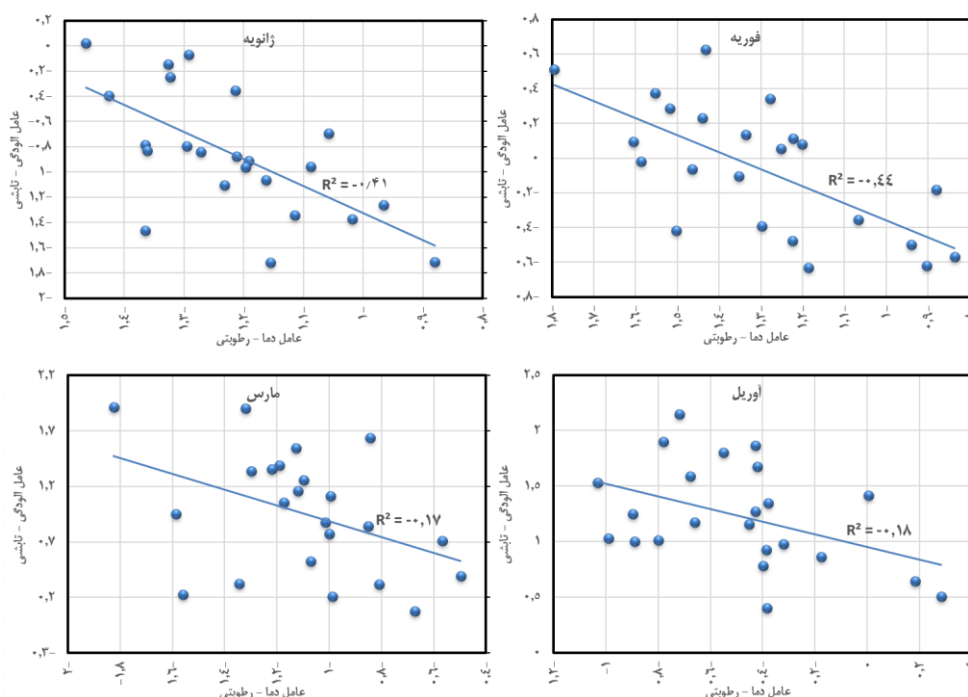
جدول ۵- واریانس عامل‌های اصلی

درصد واریانس تجمعی	درصد واریانس	نام عامل	عامل اصلی
۵۲/۹۴	۵۲/۹۴	دما-رطوبتی	عامل اول
۷۴/۳۴	۲۱/۴۰	تابشی-آلودگی	عامل دوم

سری زمانی امتیازهای عاملی دو عامل اصلی (عامل اول: مؤلفه‌های دما-رطوبت، عامل دوم: مؤلفه‌های آلودگی-تابشی) مطابق شکل ۴ الگوهای تغییراتی را آشکار ساختند. مطابق نمودارهای سری زمانی، عامل دما-رطوبت در اغلب ماه‌های زمستان و اوایل بهار مقادیر منفی یا نزدیک به صفر داشت و دامنه نوسان آن نسبتاً محدود بود که نشان‌دهنده پایداری نسبی الگوهای حرارتی و رطوبتی فصل سرد مطابق مشاهدات مشابه در مطالعات (Deems et al., 2013) است. در مقابل، عامل آلودگی-تابشی روندی افزایشی و نوسان‌های بارزتری را نشان داد؛ به‌طوری‌که از حدود سال ۲۰۱۰ میلادی اوج‌های مثبت قابل توجهی به‌ویژه در ماه‌های مارس و آوریل مشاهده شد.



شکل ۴- تغییرات زمانی نمره عامل‌های ۱ و ۲ در چهار ماه نخست سال میلادی



شکل ۵- نمودار نقاط پراکنش رابطه بین عامل‌های ۱ و ۲ در چهار ماه نخست سال میلادی

این روند مؤید افزایش سهم آلاینده‌های جوی و تابش دریافتی سطحی در کاهش آلبیدو و تسریع ذوب برف است (Painter et al., 2013; Skiles and Painter, 2017). نمودارهای پراکندگی (شکل ۵) مقادیر دو عامل شواهد مکملی از همزمان تغییرپذیری آنها فراهم کردند. در ماه‌های ژانویه و فوریه، داده‌ها عمدتاً در محدوده مقادیر منفی و پراکندگی محدود متمرکز بودند؛ این الگو بیانگر غلبه شرایط سرمای پایدار و کاهش اثرگذاری تابش و آلودگی سطحی در میانه زمستان است. اما در مارس و آوریل پراکندگی سالانه به‌وضوح افزایش یافت و نقاط متعددی در محدوده مثبت عامل دوم قرار گرفتند که هم‌افزایی محتمل تابش و بار آلاینده‌های جوی (نظیر کربن سیاه) با روندهای دمایی را برجسته می‌کند (Hadley and Kirchstetter, 2012). همچنین این تغییرات ممکن است ناشی از تغییرپذیری فصلی نیز باشد. از طرفی پراکندگی نسبتاً محدود در آن می‌تواند نشان‌دهنده شرایط آب‌وهوایی پایدار و سرمای زمستانی باشد.

بحث و نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش بررسی ذوب زودرس برف به‌علت آلودگی کربن سیاه در ارتفاعات بالای ۲۰۰۰ متر رشته‌کوه البرز طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ به‌علت کاهش آلبیدوی برف در ماه‌های ابتدایی سال میلادی بود. در نتیجه با رویکردی اکوهیدرولوژیک، رابطه بین آلبیدوی سطح برف و غلظت کربن سیاه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های جوی مؤثر بر چرخه ذوب برف، مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا با تحلیل سری زمانی نشان داده شد که کاهش تدریجی در دامنه آلبیدو به‌ویژه در سال‌های اخیر (از حدود ۲۰۱۵ به بعد) مشاهده می‌شود، همچنین کربن سیاه روندی افزایشی یا پایدار با نوسانات شدید به‌خصوص از حدود سال ۲۰۱۰ به بعد در محدوده مورد مطالعه داشته است. این یافته با نتایج پژوهش‌های Kefayat Motlagh و همکاران (۲۰۲۴) همسو است که نشان دادند در نواحی مرتفع آلبیدو به‌صورت تدریجی کاهش یافته است ولی این روند به‌ویژه پس از حدود سال ۲۰۱۵ گزارش نشده، در مورد شاخص‌های مرتبط با آئروسول‌ها و کربن سیاه یافته‌های Yousefi و همکاران (۲۰۲۳)، الگوهای متغیری را نشان می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که برخی مطالعات افزایش معنی‌دار آنها را در اوایل دهه ۲۰۰۰ گزارش کرده‌اند، اما کاهش‌هایی نیز در دهه ۲۰۱۰ مشاهده شده است. همچنین Raispour و Khosravi (۲۰۲۱) با تحلیل‌های مبتنی بر داده‌های بازتحلیل (MERRA-2) تغییرات بلندمدت و ناپایدار غلظت کربن سیاه را در ایران نشان دادند. بنابراین آشکارسازی روند کلی منطقه‌ای نیازمند تحلیل دقیق‌تر و تلفیق منابع میدانی و بازتحلیل است. در مرحله بعد به‌منظور تحلیل دقیق رابطه بین آلبیدو و کربن سیاه در بازه‌های زمانی مشخص (مانند ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و آوریل) که برابر با ماه‌های ذوب زودرس است از دو رویکرد آماری مکمل شامل رگرسیون خطی ساده و مدل جمعی تعمیم‌یافته استفاده شد. مدل رگرسیون خطی نشان داد که رابطه منفی هر چند ضعیف در ژانویه و فوریه و همبستگی مثبت در مارس و آوریل وجود دارد، اما همبستگی منفی کربن سیاه در این دو ماه مستقیماً به تسریع فرآیند ذوب در اوایل سال کمک می‌کند. لذا مشاهده همبستگی مثبت نیاز به تحلیل دقیق‌تری است. یافته‌های Réveillet و همکاران (۲۰۲۲) و Jacobi و همکاران (۲۰۱۵) رابطه بین آلبیدوی برف و غلظت کربن سیاه را فصلی و منطقه‌ای نشان دادند، یافته‌های Flanner و همکاران (۲۰۰۷) و Zhang و همکاران (۲۰۲۵) جهت و شدت همبستگی در ماه‌های مشخص (مثلاً ژانویه-فوریه در برابر مارس-آوریل) به‌شدت وابسته به عمق و وضعیت بسته برف، منابع ته‌نشینی آلاینده‌ها، و شرایط تابشی-دمایی محلی دانسته‌اند بنابراین مشاهده یک الگوی یکنواخت منفی زمستانی و مثبت بهاری در سطح جهانی مورد تایید قطعی قرار نگرفت و نیازمند تحلیل‌های فضایی-زمانی دقیق و اعتبارسنجی میدانی است. همچنین خروجی مدل GAM وجود یک رابطه غیرخطی را آشکار کرد که در آن حساسیت آلبیدو در محدوده غلظتی ۰/۴ تا ۰/۵ میکروگرم بر متر مربع به اوج خود می‌رسد و پس از آن کاهش می‌یابد (رفتار اشباع). این الگوی اشباع با گزارش‌های میدانی و مدل‌سازی بین‌المللی که وابستگی اثر غلظت کربن سیاه به عمق و ساختار پشته برف را نشان می‌دهند، برای مثال و مقایسه با پژوهش Hadley و همکاران (۲۰۱۰) و Hu و همکاران (۲۰۲۰) سازگار است ولی بازه ۰/۵-۰/۴ میکروگرم بر متر مربع گزارش نشده است. با این حال، از آنجا که آستانه دقیق وابسته به شرایط محلی (عمق/تراکم برف، اندازه دانه و حالت اختلاط ذرات) است، این مقدار به‌عنوان «آستانه منطقه‌ای/شرایط-محور» باید در نظر گرفته شود و برای تعمیم آن به نواحی دیگر احتیاط شود. توزیع ماهانه روزهای دارای غلظت بحرانی کربن سیاه (۰/۴ تا ۰/۵ میکروگرم بر متر مربع) نیز بررسی شد و بیشترین فراوانی این روزها

در ماه‌های زمستان و اوایل بهار رخ داده است. به‌طور مشخص، ماه مارس (اسفند-فروردین) با ثبت ۲۰ روز بحرانی بیشترین فراوانی را به‌خود اختصاص داد که می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه آلبیدو و در نتیجه تسریع فرآیند ذوب برف شود. در ادامه با تحلیل عاملی بر مجموعه‌ای از متغیرهای اقلیمی و محیطی شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، دمای میانگین، بارش، رطوبت نسبی، آلبیدو، سرعت باد و غلظت کربن سیاه، دو عامل اصلی «عامل دما-رطوبت» و «عامل آلودگی-تابشی» به‌ترتیب عوامل اصلی ذوب برف شناخته شدند. هر چند عامل آلودگی-تابشی در رتبه دوم است ولی به‌علت دماهای پایین در ابتدای سال میلادی و روند افزایشی الودگی در سال‌های اخیر نقش آلودگی برجسته‌تر است. در ادبیات بین‌المللی مقاله‌ای که دقیقاً با تحلیل عاملی به ترکیب «عامل دما-رطوبت» و «عامل آلودگی-تابشی» رسیده باشد مشاهده نشد و اغلب تحقیقات بیشتر از مدل‌سازی انرژی-تابش یا تحلیل سلسله‌مراتبی و روش‌های حساسیت‌سنجی استفاده کرده‌اند مثل Li و همکاران (۲۰۲۲) و Zhang و همکاران (۲۰۲۵). ولی همگی دمای سطح، تابش خورشیدی و شرایط برفی را به‌عنوان عوامل کلیدی عنوان نمودند و در کنار آنها سهم آلاینده‌ها مثل BC در آغاز ذوب برف در برخی ماه‌ها را برجسته دانسته‌اند. این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که رتبه بالای عامل آلودگی-تابشی در تحلیل عاملی ما، نه‌تنها منطقی است، بلکه با یافته‌های جهانی نیز همخوانی دارد. با این حال، باید توجه داشت که اثر آلاینده‌ها می‌تواند بسته به شرایط محلی، زمان، و نوع آلاینده متفاوت باشد. به‌همین دلیل، پژوهش‌های آینده باید به‌سمت استفاده از روش‌های ترکیبی (مانند ادغام داده‌های ماهواره‌ای با اندازه‌گیری‌های میدانی) و مدل‌سازی پیشرفته (مانند مدل‌های جفت‌شده اقلیم-آلودگی) حرکت کنند تا جایگاه نسبی هر عامل در فرآیندهای ذوب برف با دقت بیشتری مشخص شود.

نتایج تحلیل سری‌های زمانی امتیازهای عاملی نشان داد که دو عامل اصلی شناسایی‌شده (عامل دما-رطوبت و عامل آلودگی-تابشی) الگوهای رفتاری متفاوتی دارند. عامل دما-رطوبت در فصل سرد سال عمدتاً پایدار بوده و مقادیر منفی یا نزدیک به صفر داشته است، که بیانگر تداوم شرایط حرارتی و رطوبتی ثابت در زمستان و اوایل بهار است. این موضوع با یافته‌های Deems و همکاران (۲۰۱۳) درباره پایداری الگوهای زمستانی برف همخوانی دارد. در مقابل، عامل آلودگی-تابشی از حدود سال ۲۰۱۰ روندی افزایشی همراه با نوسانات آشکارتر به‌ویژه در ماه‌های مارس و آوریل نشان داد؛ این امر تأکیدی بر نقش روزافزون آلاینده‌های جوی (مانند کربن سیاه) و تغییرات تابش در کاهش آلبیدو و تسریع ذوب برف است. همچنین تحلیل پراکندگی دو عامل نشان داد که در ژانویه و فوریه اثر آلودگی-تابشی محدود بوده، اما در مارس و آوریل پراکندگی بیشتر و مقادیر مثبت عامل دوم، برهم‌کنش تابش و آلاینده‌ها را برجسته کرده است. در مجموع، این نتایج همسو با مطالعات گذشته تأکید می‌کنند که ترکیب آلاینده‌ها و تغییرات اقلیمی در حال افزایش، به‌ویژه در مناطق کوهستانی ایران، نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییر چرخه ذوب برف دارند. از این منظر، پژوهش‌های آینده می‌توانند بر بهبود تفکیک داده‌های ماهواره‌ای، برآورد دقیق‌تر سهم گردوغبار در مقایسه با کربن سیاه، و مدل‌سازی اثرات بلندمدت این آلاینده‌ها بر منابع آب تمرکز داشته باشند.

References

- Azizi, G., Rahimi, M., Mohammadi, H., Khoshakhlagh, F., 2017. Spatio-temporal variations of snow cover in the southern slope of central Alborz. *Physical Geography Research* 49(3), 381-393. (In Persian)
- Deems, J.S., Fassnacht, S.R., Elder, K.J., 2013. Interannual consistency in climate and snowpack variables in mountain basins. *Hydrological Processes* 27(13), 1874-1888.
- Doherty, S.J., Warren, S.G., Grenfell, T.C., Clarke, A.D., Brandt, R.E., 2010. Light-absorbing impurities in Arctic snow. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10(23), 11647-11680.
- Dong, C., Menzel, L., 2016. Improving the accuracy of MODIS 8-day snow products with in situ temperature and precipitation data. *Journal of Hydrology*, 534, 466-477.
- Ekrami, M., Talebi, A., Soleimani Motlagh, M., 2010. Investigation of the effect of dust on accelerating snowmelt: A case study of Shirkuh Heights, Yazd. The 2nd National Conference on Wind Erosion and Dust Storms, Yazd, Iran. (In Persian)
- Field, A., 2017. *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics* (5th ed.). SAGE Publications, London.

- Flanner, M.G., Zender, C.S., Randerson, J.T., Rasch, P.J., 2007. Present-day climate forcing and response from black carbon in snow. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 112(D11).
- Gafurov, A., Bardossy, A., 2009. Cloud removal methodology from MODIS snow cover product. *Hydrology and Earth System Sciences* 13(7), 1361-1373.
- Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M.J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C.A., Darmenov, A., Bosilovich, M.G., Reichle, R., Wargan, K., 2017. The Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA 2). *Journal of Climate* 30(14), 5419-5454.
- Ghasemi, F., Abbasi, S., Keshavarzi, B., Moore, F., Turner, A., 2021. Microplastics in snow of urban and remote areas of northern Iran. *Science of The Total Environment* 779, 146530. (In Persian)
- Gonzalez, R.C., Woods, R.E., 2002. *Digital Image Processing* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Hadley, O.L., Kirchstetter, T.W., 2012. Black-carbon reduction of snow albedo. *Nature Climate Change* 2(6), 437-440.
- Hu, Z., Huang, J., Zhao, C., Ma, Y., Jin, Q., Qian, Y., Leung, L.R., Bi, J., Ma, J., Yang, B., 2020. Modeling dust sources, transport, and radiative effects at different altitudes over the Tibetan Plateau. *Atmospheric Chemistry and Physics* 20(3), 1507-1529.
- Kang, S., Zhang, Y., Qian, Y., Wang, H., 2020. A review of black carbon in snow and ice and its impact on the cryosphere. *Earth-Science Reviews* 210, 103346.
- Karbalaee, M., 2022. Spatiotemporal analysis of albedo variability in Iran (2000–2018) and its controlling factors. *Atmospheric Research* 270, 106087.
- Kefayat Motlagh, M., 2024. Detection of land surface albedo changes over Iran using satellite observations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.
- Li, H., Deng, Y., Han, C., Chen, S., Xu, C., 2022. Quantitative determination of environmental factors governing the snow melting: A geodetector case study in the central Tianshan Mountains. *Environmental Science and Pollution Research* 29(51), 77483-77496.
- Li, X., Heap, A.D., 2014. A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. *Environmental Modelling and Software*, 53, 173–189.
- Lindsay, C.H., Zhu, J., Miller, A.E., Wilson, T.L., 2015. Deriving snow covers metrics for Alaska from MODIS. *Remote Sensing* 7, 12961-12985.
- Mir Yaghoubzadeh, M.H., Ghanbarpour, M.R., 2010. Investigation to MODIS snow cover maps usage in snowmelt runoff modeling (Case study: Karaj River Basin). *Journal of Geoscience* 76, 140-148. (In Persian)
- Molod, A., Takacs, L., Suarez, M.J., Bacmeister, J., 2012. Development of the GEOS 5 Atmospheric General Circulation Model: Mean Climate and Variability. *Proceedings of the 10th Annual GMAO MERRA 2 Workshop*, NASA Goddard Space Flight Center.
- Painter, T.H., Skiles, S.M., Deems, J.S., Brandt, W.T., Dozier, J., 2013. Variation in rising limb of snowmelt runoff in response to dust radiative forcing in the Upper Colorado River Basin. *Geophysical Research Letters* 40(15), 3945-3949.
- Qian, Y., Flanner, M.G., Leung, L.R., Wang, W., 2011. Sensitivity studies on the impacts of Tibetan Plateau snowpack pollution on the Asian hydrological cycle and monsoon climate. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11(5), 1929-1948.
- Raispour, K., Khosravi, Y., 2021. Long-term monitoring of black carbon concentration over Iran using MERRA-2 reanalysis data. *Environmental Sciences (Tarbiat Modares University)*. (In Persian)
- Réveillet, M., Brun, E., Dumont, M., 2022. Snow darkening by light-absorbing impurities: Impacts on snowmelt and regional hydrology in the Alps and Pyrenees. *Nature Communications* 13, 4512.
- Schafer, J.L., Graham, J.W., 2002. Missing data: Our view of the state of the art. *Psychological Methods* 7(2), 147–177.
- Shahroudi, N., Rossow, W., 2014. Using land surface microwave emissivities to isolate the signature of snow on different surface types. *Remote Sensing of Environment* 152, 638-653.
- Skiles, S.M., Flanner, M.G., Cook, J.M., Dumont, M., Painter, T.H., 2018. Radiative forcing by light-absorbing particles in snow. *Nature Climate Change* 8(11), 964-971.
- Skiles, S.M., Painter, T.H., 2017. Assessment of radiative forcing by light-absorbing particles in snow over the Sierra Nevada. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 122(12), 6738-6756.
- UNEP, 2007. *Global outlook for ice and snow*. United Nations Environment Programme. ISBN: 978-92-807-2799-9.
- Wilks, D.S., 2011. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press.

- Wood, S.N., 2017. Generalized Additive Models: An Introduction with R (2nd ed.). Chapman and Hall/CRC.
- Wood, S.N., 2025. mgcv: Mixed GAM computation vehicle with automatic smoothness estimation (Version 1.9-3) [Software]. CRAN.
- Yousefi, R., Wang, F., Ge, Q., Lelieveld, J., Shaheen, A., 2023. Analysis of the winter AOD trends over Iran from 2000 to 2020 and associated meteorological effects. Remote Sensing 15(1), 1-20.
- Zhang, B., Wu, Y., Lei, L., Li, J., Liu, L., 2013. Monitoring changes of snow cover, lake and vegetation phenology in Nam Co Lake Basin (Tibetan Plateau) using remote sensing (2000–2009). Journal of Great Lakes Research 39, 224-233.
- Zhang, X., Jiao, Z., Zhao, C., Qu, Y., Liu, Q., Zhang, H., Cui, L., 2022. Review of land surface albedo: Variance characteristics, climate effect and management strategy. Remote Sensing 14(6), 1382.
- Zhang, Y., Li, X., Wang, S., 2024. Effects of black carbon deposition on snow albedo and surface energy balance: Evidence from numerical simulations. EGU Preprints, egusphere-2024-1717.
- Zhang, Y., Li, X., Wang, S., Chen, H., 2025. Coupled SNICAR–Polar-WRF modeling of black carbon impacts on Arctic snowmelt and radiative forcing. Atmospheric Chemistry and Physics 25, 1-20.
- Zhang, Y., Wang, S., Li, X., 2025. Black carbon and mineral dust effects on snow and glacier melt over the Tibetan Plateau. Science of The Total Environment 1025, 154584.
- Zhou, H., Aizen, E., Aizen, V., 2013. Deriving long term snow covers extent dataset from AVHRR and MODIS data: Central Asia case study. Remote Sensing of Environment 136, 146-162.