مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۲۰، شماره ۴، ۱۴۰۵، صفحه ۱۸۱–۲۰۰ (مقاله پژوهشی) DOI: 10.30499/ijg.2026.578031.1758

تغییرات چرخه برف در نیمکره شمالی: تحلیل چندمدلی سناریوهای گرمایش زمین و مهندسی اقلیم

شیرین عجبی[1*] و ابوالفضل رضائی[2]

[1] کارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران
[2] دانشیار، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۶، پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۳)

چکیده

گرمایش جهانی، چرخه‌ی برف در سطح کره زمین را به‌طور چشمگیری دگرگون کرده است؛ کاهش پوشش برف، ذوب زودهنگام و ناپایداری در زمان‌بندی فصلی، تهدیدی جدی برای منابع آب، امنیت غذایی و پایداری اکوسیستم‌ها محسوب می‌شود. در این راستا، مهندسی اقلیم و به‌ویژه روش تزریق هواویزها در پوشن‌سپهر (stratospheric aerosol injection)، الگوبرداری شده از آتشفشان‌های بزرگ، به‌عنوان راهکاری مکمل، برای کاهش دمای سطح مطرح شده است. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر سناریوی مهندسی اقلیم G6sulfur بر متغیرهای کلیدی چرخه‌ی برف سطحی شامل مقدار برف سطحی، شار ذوب، درصد پوشش و عمق برف، از خروجی شش مدل اقلیمی جهانی CESM2-WACCM، CNRM-ESM2-1، IPSL-CM6A-LR، MPI-ESM1-2-HR، MPI-ESM1-2-LR و UKESM1-0-LL تحت سناریوی انتشار شدید گازهای گلخانه‌ای SSP5-8.5 با و بدون اعمال مهندسی اقلیم از طریق سناریوی G6sulfur، بهره گرفته است. آنالیزها تحت سناریوهای آینده (۲۰۹۹–۲۰۷۰) با شرایط دوره‌ی پایه (۲۰۱۵–۲۰۳۴) مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داد که در سناریوی SSP5-8.5، متغیرهای برفی با کاهش معناداری مواجه شدند؛ به‌طور متوسط مقدار برف سطحی تا حدود ۲۵٪، شار ذوب برف تا ۱۴٪، درصد پوشش برف تا ۲۷٪ و عمق برف تا ۵۰٪ کاهش یافته است. همچنین تحت سناریوی گرمایش اقلیم، زمان وقوع اوج برف و ذوب برف بین ۱ تا ۲ ماه زودتر نسبت به دوره پایه رخ خواهد داد. در مقابل، مهندسی اقلیم توانسته است که این روندها را بصورت نسبی تعدیل کند؛ بطوریکه کاهش مقدار برف سطحی به حدود ۱۱٪، شار ذوب برف به ۱۰٪، درصد پوشش برف به ۱۲٪ و عمق برف به ۱۹٪ محدود گردید و همچنین جابه‌جایی زمانی اوج‌ها نیز به کمتر از نیم‌ماه کاهش یافت. این یافته‌ها نشان می‌دهد که مهندسی اقلیم می‌تواند بخشی از اثرات منفی گرمایش جهانی بر چرخه‌ی برف را بطور موثری جبران کند. با این حال، مداخلات اقلیمی نمی‌توانند تمامی تغییرات هیدرولوژیکی را به‌طور کامل معکوس سازند و گرمایش باقیمانده و پویایی ذوب برف همچنان نقشی کلیدی در رواناب عرض‌های میانی تا بالا ایفا می‌کنند. بنابراین مهندسی اقلیم می‌تواند به عنوان یک روش مکمل تغییرات رخ داده در چرخه هیدرولوژی ناشی از گرمایش اقلیم را بصورت نسبی به شرایط دوره پایه نزدیک گرداند، اما نمی‌تواند جایگزین راهبردهای اصلی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای باشد.

کلمه‌های کلیدی: چرخه برف، مهندسی اقلیم، گرمایش جهانی، مدل‌های اقلیمی، تزریق هواویز، در پوشن‌سپهر

[*] نگارنده رابط: ajabishirin@gmail.com

۱ مقدمه

برف و ذخایر برفی نیمکره شمالی، علیرغم تأمین آب شیرین بیش از یک میلیارد نفر در کره زمین (موسلمن و همکاران، ۲۰۲۱)، در طی دهه‌های اخیر دچار کاهش چشمگیری شده‌اند و این روند پیامدهای گسترده‌ای بر منابع آب، کشاورزی، تولید انرژی برق‌آبی و پایداری اکوسیستم‌ها داشته است (موت و همکاران، ۲۰۰۵؛ موت، ۲۰۰۶). برخلاف روند افزایشی بارش زمستانه در برخی مناطق، کاهش انباشت برف بهاره و ذوب زودهنگام آن در غرب آمریکای شمالی به وضوح با گرمایش زمین مرتبط است (موت و همکاران، ۲۰۰۵؛ موت، ۲۰۰۶). این تغییرات می‌تواند تأمین آب آبیاری در فصل خشک را به طور چشمگیری کاهش دهد. به عنوان مثال، در صورت وقوع ۴ درجه سانتی‌گراد گرمایش جهانی، تنها ۴۰ درصد آب مورد نیاز آبیاری از منابع برفابی در مقایسه با شرایط کنونی تأمین خواهد شد (چین و همکاران، ۲۰۲۰). تحلیل‌های مدل‌های اقلیمی نسل پنجم و ششم (CMIP5/CMIP6) نشان می‌دهد که بسیاری از مناطق کوهستانی جهان در آینده با شرایط «کم‌برف یا بدون برف» مواجه خواهند شد (چین و همکاران، ۲۰۲۰؛ سیریلا–وودبورن و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعات اخیر نیز کاهش تدریجی ذخایر برفی، تغییر الگوهای ذوب و دگرگونی اساسی روندهای وابسته به برف را تأیید کرده‌اند (موسلمن و همکاران، ۲۰۲۱). افزون بر این، کاهش برف در نیمکره شمالی مستقیماً تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و انتشار گازهای گلخانه‌ای قرار دارد (گاتلیب و منکین، ۲۰۲۴). به طور خاص، پیش‌بینی‌های مدل‌های CMIP6 تحت سناریوی انتشار بالای SSP5-8.5 حاکی از آن است که کاهش سطح پوشش برف در نیمکره شمالی بیش از ۳۰ درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت (ژونگ و همکاران، ۲۰۲۱). تغییر اقلیم همچنین شدت و فراوانی رخدادهای حدی وابسته به برف مانند سیلاب‌های ناگهانی و خشکسالی‌های شدید را افزایش داده است (دیفنباف و همکاران، ۲۰۱۳). این تغییرات نه تنها رواناب‌های تابستانه و منابع آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند، بلکه امنیت اجتماعی و اقتصادی جوامع را نیز تهدید می‌کنند.

در پی ناکامی نسبی برنامه‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (مک‌مارتین و همکاران، ۲۰۲۲)، دانشمندان به طور جدی راهکارهای مکمل برای کنترل و مقابله با گرمایش جهانی را مورد توجه قرار داده‌اند. در این میان، مهندسی اقلیم از طریق مدیریت تابش خورشیدی (Solar Radiation Modification) و به ویژه روش تزریق هواویزها در پوشن‌سپهر (Stratospheric Aerosol Injection – SAI)، الگوبرداری شده از اثرات سرمایشی فوران‌های آتشفشانی بزرگ، یکی از امیدوارکننده‌ترین رویکردها محسوب می‌شود. مکانیسم اصلی SAI مبتنی بر افزایش آلبدو کره زمین است: ذرات سولفاتی تزریق شده در پوشن‌سپهر ، تابش موج کوتاه خورشیدی ورودی را به فضا بازمی‌تابانند، در حالی که همزمان با جذب تابش موج بلند زمینی، باعث گرمایش لایه زیرین پوشن‌سپهر می‌شوند (جونز و همکاران، ۲۰۲۲؛ سازمان فضایی اروپا (ESA)، ۲۰۲۵). فوران آتشفشان پیناتوبو در سال ۱۹۹۱ با تزریق حدود ۲۰ تراگرم (Tg) دی‌اکسید گوگرد به پوشن‌سپهر ، منجر به کاهش حدود ۰.۵ درجه سلسیوس دمای سطح زمین در سال پس از فوران شد (آی‌پی‌سی‌سی (IPCC)، ۲۰۲۱؛ سازمان فضایی اروپا (ESA)، ۲۰۲۵). از میان سناریوهای مختلف SAI، سناریوی G6sulfur که در قالب پروژه مقایسه مدل‌های مهندسی اقلیم (GeoMIP) تعریف شده است، از پراستنادترین سناریوها در این حوزه می‌باشد (جونز و همکاران، ۲۰۲۲). هدف G6sulfur کاهش گرمایش ناشی از سناریوی انتشار بالای SSP5-8.5 تا سطح گرمایش سناریوی انتشار متوسط SSP2-4.5 با استفاده از

تزریق پیوسته دی‌اکسید گوگرد در منطقه حاره (استوا) است (کرویتز و همکاران، ۲۰۱۵؛ جونز و همکاران، ۲۰۲۲). بر اساس یافته‌های شش مدل سیستم زمین که این سناریو را اجرا کرده‌اند، نرخ تزریق مورد نیاز بین سال‌های ۲۰۸۱ تا ۲۱۰۰ به طور میانگین ۲۹ ± ۹ $Tg\text{-}SO_2$ در سال برآورد شده است (جونز و همکاران، ۲۰۲۲). دستاوردهای این سناریو در زمینه تعدیل دمای جهانی و بازگشت نسبی دمای سطح به شرایط سناریوی SSP2-4.5 در شش مدل CMIP6 به اثبات رسیده است. با این وجود، پراکندگی قابل توجه پاسخ منطقه‌ای بین مدل‌های مختلف حاکی از وجود عدم قطعیت‌های قابل توجه در شبیه‌سازی اثرات منطقه‌ای SAI است و ضرورت بررسی دقیق اثرات این مداخله بر مؤلفه‌های مختلف سامانه اقلیم، از جمله چرخه برف و منابع آبی وابسته، را بیش از پیش آشکار می‌سازد (جونز و همکاران، ۲۰۲۲).

پژوهش‌های متعددی اثرات SAI بر مؤلفه‌های مختلف سامانه اقلیم، از جمله دمای سطح، تغییرات دماهای حدی، الگوهای بارش، چرخه هیدرولوژیکی و همچنین مؤلفه‌های کرایوسفر مانند یخچال‌ها و یخ‌های دریایی را مورد بررسی قرار داده‌اند. برای نمونه، تایلمز و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که SAI می‌تواند شدت و فراوانی پدیده‌های حدی مانند سیلاب را در مقایسه با سناریوهای صرفاً گرمایشی کاهش دهد. بررسی‌های ژائو و همکاران (۲۰۱۷) نشان داده است که مهندسی اقلیم به روش SAI قادر است روند کاهش یخچال‌ها در آسیا را کندتر کند. مور و همکاران (۲۰۱۹) نیز کاهش سرعت ذوب یخ در گرینلند را تحت تأثیر SAI گزارش کرده‌اند. در مطالعات دیگر، چن و همکاران (۲۰۲۳) به تأثیر مثبت SAI بر کاهش نرخ تخریب لایه‌های یخ‌زده دائمی (permafrost) در عرض‌های بالا اشاره کرده‌اند. همچنین لی و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که تزریق هواویزها در عرض‌های جغرافیایی بالا می‌تواند روند ذوب یخ دریای شمال را کند کرده و به حفظ یخ‌های قطبی کمک نماید. در بحث آب‌شناسی، مطالعات رضایی و همکاران (۲۰۲۴ و ۲۰۲۵) تغییرات ذخایر آبی در مقیاس منطقه‌ای در پاسخ به SAI را ارزیابی کرده‌اند. علاوه بر این، تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که SAI می‌تواند چرخه هیدرولوژیکی را تحت تأثیر قرار دهد، به گونه‌ای که میانگین جهانی بارش و تبخیر–تعرق در مقایسه با سناریوهای گرمایشی بدون مداخله کاهش می‌یابد (تایلمز و همکاران، ۲۰۱۳؛ رضایی و همکاران، ۲۰۲۴). با وجود این حجم از پژوهش‌ها، یک شکاف دانشی قابل توجه در زمینه بررسی همزمان و جامع اثرات SAI بر متغیرهای کلیدی چرخه برف (شامل مقدار برف سطحی، عمق برف، درصد پوشش برف و شار ذوب برف) در مقیاس جهانی و با استفاده از مجموعه‌ای از شش مدل CMIP6 وجود دارد. به عبارت دیگر، تا کنون مطالعه‌ای که به صورت کمی و چندمدلی، پاسخ تمامی متغیرهای اصلی تعیین‌کننده رژیم برف را در مقابل سناریوی استاندارد G6sulfur ارزیابی کرده باشد، انجام نشده است.

این شکاف پژوهشی، ضرورت انجام مطالعه حاضر را توجیه می‌کند. بنابراین این پژوهش با بکارگیری همزمان معتبرترین مدل‌های سیستم زمین نسل ششم شامل CESM2-WACCM; CNRM-ESM2-1; IPSL-) CM6A-LR; MPI-ESM1-2-HR; MPI-ESM1-2-LR; UKESM1-0-LL) به بررسی همزمان چهار متغیر اصلی چرخه برف (مقدار برف سطحی، درصد پوشش برف، عمق برف و شار ذوب برف) می‌پردازد. علاوه بر مقادیر میانگین، تغییرات زمانی اوج انباشت و ذوب برف که از اهمیت حیاتی برای مدیریت منابع آب و پیش‌بینی سیلاب‌های بهاره دارند، تحت سناریوی گرمایش جهانی SSP5-8.5 و سناریوی مهندسی اقلیم G6sulfur در مقایسه با شرایط دوره پایه (۲۰۱۵–۲۰۳۴) مورد مطالعه قرار بگیرد. نتایج این پژوهش می‌تواند تصویری کمّی از

ظرفیت و محدودیت‌های مهندسی اقلیم در حفاظت از ذخایر برفی جهانی در مواجهه با گرمایش شدید آینده ارائه دهد.

این شکاف پژوهشی، ضرورت انجام مطالعه حاضر را توجیه می‌کند. بنابراین این پژوهش با به‌کارگیری همزمان معتبرترین مدل‌های سیستم زمین نسل ششم (CESM2-WACCM; CNRM-ESM2-1; IPSL-CM6A-LR; MPI-ESM1-2-HR; MPI-ESM1-2-LR; UKESM1-0-LL) به بررسی همزمان چهار متغیر اصلی چرخه برف (مقدار برف سطحی، درصد پوشش برف، عمق برف و شار ذوب برف) می‌پردازد. همچنین، این مطالعه تغییرات زمانی اوج انباشت و ذوب برف را که از اهمیت حیاتی برای مدیریت منابع آب و پیش‌بینی سیلاب‌های بهاره برخوردارند، تحت سناریوی گرمایش جهانی SSP5-8.5 و سناریوی مهندسی اقلیم G6sulfur (۲۰۷۰ تا ۲۰۹۹) در مقایسه با شرایط دوره پایه (۲۰۱۵–۲۰۳۴) مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج این پژوهش می‌تواند تصویری کمی از ظرفیت و محدودیت‌های مهندسی اقلیم در حفاظت از ذخایر برفی جهانی در مواجهه با گرمایش شدید آینده ارائه دهد.

۲ مواد و روش‌ها

۲.۱. مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی

پیش‌بینی واکنش سیستم اقلیمی زمین به سناریوهای گرمایش جهانی و مداخلات انسانی مانند SAI مستلزم بهره‌گیری از مدل‌های اقلیمی چندبعدی است که فرآیندهای جوی، اقیانوسی، زمینی، یخی و زیستی را به‌صورت هم‌زمان شبیه‌سازی می‌کنند (آیرینگ و همکاران، ۲۰۱۶). در این پژوهش، برای بررسی اثر مهندسی اقلیم بر رژیم‌های برف جهانی، از خروجی‌های مجموعه‌ای از مدل‌های اقلیمی جهانی نسل ششم استفاده شده است. مدل‌های انتخاب‌شده بر اساس معیارهایی نظیر دسترسی به متغیرهای کلیدی چرخه برف شامل مقدار برف سطحی، درصد پوشش برف، شار ذوب برف و عمق برف، و همچنین وجود خروجی‌های هم‌زمان با بقیه مدل‌ها انتخاب شدند.

سناریوی G6Sulfur یکی از سناریوهای استاندارد پروژه GeoMIP است که با هدف ارزیابی اثرات مهندسی اقلیم از طریق تزریق هواویزهای سولفاتی به پوشن‌سپهر طراحی شده است. این سناریو بر پایه سناریوی انتشار شدید گازهای گلخانه‌ای SSP5-8.5 تعریف شده و در آن میزان تزریق دی‌اکسید گوگرد به پوشن‌سپهر به‌صورت پویا تنظیم می‌شود تا میزان افزایش دمای جهانی از سطح SSP5-8.5 به سطح سناریوی با انتشار متوسط SSP2-4.5 کاهش داده شود (جونز و همکاران، ۲۰۲۲). در این چارچوب، هواویزهای سولفاتی با افزایش بازتاب تابش خورشیدی، بخشی از اثر گرمایشی ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای را خنثی می‌سازد. سناریوی G6Sulfur به دلیل برخورداری از پروتکل یکسان در میان مدل‌های مختلف اقلیمی، یکی از پرکاربردترین سناریوهای مهندسی اقلیم برای ارزیابی پاسخ سامانه اقلیم و چرخه هیدرولوژیکی محسوب می‌شود. در مجموع، شش مدل اقلیمی وجود دارند که سناریوی G6Sulfur را شبیه‌سازی نموده‌اند که هر یک دارای ساختار فیزیکی و دینامیکی متفاوتی است و ترکیب آن‌ها امکان تحلیل جامع‌تری از اثرات سناریوهای اقلیم مصنوعی را فراهم می‌سازد. مدل CESM2-WACCM (داناباسوغلو و همکاران، ۲۰۲۰) توسعه‌یافته توسط مرکز ملی پژوهش‌های جوی ایالات‌متحده، از جامع‌ترین مدل‌های سیستم زمین به‌شمار می‌آید و با شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای فیزیکی، دینامیکی و شیمیایی جو تا سطوح فوقانی، ابزار مؤثری برای بررسی اثرات تزریق هواویزها در پوشن‌سپهر محسوب می‌شود. مدل CNRM-ESM2-1 که توسط Météo-France و CNRS توسعه یافته است (سفرین و همکاران، ۲۰۱۹)، تمرکز ویژه‌ای بر تعامل بین

بیوسفر، تبخیر—تعرق و چرخه آب خاک دارد و توان بالایی در شبیه‌سازی بازخوردهای زمین—جو، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای، نشان می‌دهد. مدل IPSL-CM6A-LR متعلق به مؤسسه Pierre-Simon Laplace فرانسه، با ساختاری منسجم میان مؤلفه‌های تابشی، فیزیکی و شیمیایی جو و سطح زمین، قادر است بازخوردهای غیرخطی مرتبط با تغییرات آلبدو و پوشش برف را در مقیاس جهانی بازنمایی کند (بوشر و همکاران، ۲۰۲۰). مدل‌های MPI-ESM1-2-HR و MPI-ESM1-2-LR از مؤسسه ماکس پلانک آلمان نیز به‌ترتیب نسخه‌های با تفکیک بالا و پایین یک سیستم زمین مشترک هستند (Müller et al., 2018; Mauritsen et al., 2019). نسخه با تفکیک بالا (HR) به‌دلیل قدرت مکانی بالای خود در مؤلفه‌های جوی و اقیانوسی، توانایی چشمگیری در بازنمایی الگوهای فضایی دقیق برف، دمای سطح و جریان‌های سطحی در مناطق کوهستانی دارد. در مقابل، نسخه کم‌تفکیک (LR) با وجود جزئیات مکانی کمتر، به‌دلیل پایداری عددی و هزینه محاسباتی پایین‌تر، برای شبیه‌سازی‌های بلندمدت و تحلیل روندهای اقلیمی جهانی مناسب‌تر است. مدل UKESM1-0-LL که توسط اداره هواشناسی بریتانیا توسعه یافته، ترکیبی از مدل اقلیم HadGEM3 و ماژول‌های پیشرفته شیمی جوی است (سلار و همکاران، ۲۰۱۹). این مدل توانایی بالایی در شبیه‌سازی تعامل میان هواویزهای سولفاتی، ابرها، تابش خورشیدی و بازخوردهای سطح زمین دارد و به‌عنوان یکی از مدل‌های مرجع برای سناریوهای تزریق هواویز در پوشن‌سپهر شناخته می‌شود.

جدول ۱. خلاصه مشخصات مدل‌های مورد استفاده در این مطالعه.

مدل	رزولوشن (long × lon, level)	تعداد عضو	مرجع	استراتژی تزریق SO2
CESM2-WACCM	288 × 192, L49	2	Danabasoglu et al. (2020)	Direct SO_2 injection (Equatorial one point injection)
CNRM-ESM2-1	256 × 128, L40	1	Séférian et al. (2019)	Prescribed stratospheric aerosol optical depth (SAOD) from Tilmes et al. (2015)
IPSL-CM6A-LR	144 × 143, L79	3	Boucher et al. (2020)	Direct SO_2 injection (Uniform tropical injection)
MPI-ESM1.2-HR	384 × 192, L95	2	Mauritsen et al. (2019)	Prescribed SAOD from Niemeier & Schmidt (2017)
MPI-ESM1.2-LR	192 × 96, L47	3	Mauritsen et al. (2019)	Prescribed SAOD from Niemeier & Schmidt (2017)
UKESM1-0-LL	192 × 144, L85	3	Sellar et al. (2019)	Direct SO_2 injection (Uniform tropical injection)

۲-۲ داده‌ها و متغیرها

برای ارزیابی اثرات سناریوهای گرمایش جهانی و مداخلات مهندسی اقلیم بر پوشش برف و چرخه‌های مرتبط با آن، خروجی مدل‌های اقلیمی منتخب در قالب دو سناریوی انتشار شدید گازهای گلخانه‌ای SSP5-8.5 و سناریوی مداخله‌ای تزریق هواویز در پوشن‌سپهر G6sulfur آنالیز شدند. برای مقایسه شرایط حال و آینده، دوره زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۴ به‌عنوان دوره پایه و دوره ۲۰۷۰ تا ۲۰۹۹ به‌عنوان دوره آینده برای هر دو سناریوی گرمایش (SSP5-8.5) و مهندسی اقلیم (G6sulfur) انتخاب گردید. تمامی داده‌ها با مقیاس زمانی ماهانه دریافت و پردازش شدند. برای بررسی دقیق تغییرات برف، چهار متغیر کلیدی انتخاب شد که هر یک جنبه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولوژیکی پوشش برف را توصیف می‌کنند. این متغیرها شامل مقدار برف سطحی (Surface Snow Amount) به‌عنوان مقدار آب معادل

ذخیره‌شده در پوشش برف بر واحد سطح ($kg\ m^{-2}$ که معادل میلیمتر است)، درصد پوشش برف سطحی (Snow Cover Fraction) به‌عنوان سهم سطح پوشیده از برف نسبت به کل سطح هر سلول شبکه (٪)، شار ذوب برف سطحی (Surface Snow Melt Flux) به‌عنوان نرخ ذوب برف در واحد سطح و زمان ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ یا $mm\ s^{-1}$)، عمق برف سطحی (Snow Depth) به‌عنوان عمق فیزیکی لایه برف انباشته‌شده بر سطح زمین (m) هستند.

به‌منظور افزایش دقت تحلیل‌ها و فراهم‌سازی امکان مقایسه مستقیم بین خروجی مدل‌های اقلیمی با رزولوشن‌های مکانی متفاوت، مجموعه‌ای از مراحل پیش‌پردازش بر روی داده‌های خام اعمال گردید. این مراحل شامل حذف داده‌های مربوط به نواحی قطبی و گرینلند، بازآرایی مکانی شبکه داده‌ها زیرا مدل‌ها دارای دقت مکانی مختلف هستند، یکپارچه‌سازی ساختار فایل‌ها، و همسان‌سازی واحدهای اندازه‌گیری بین مدل‌های مختلف بود. داده‌های مربوط به گرینلند و نواحی قطبی از تحلیل حذف شدند، زیرا هدف این پژوهش بررسی تغییرات چرخه برف فصلی بود، در حالی که در این مناطق، وجود یخسارها و صفحات یخی دائمی سبب می‌شود پویایی آن‌ها با فرآیندهای حاکم بر پوشش برف فصلی تفاوت اساسی داشته باشد. ازاین‌رو، حذف این نواحی موجب تمرکز تحلیل بر مناطق دارای رژیم برف فصلی و افزایش قابلیت مقایسه نتایج بین مدل‌های اقلیمی شد. به‌منظور ایجاد هم‌خوانی مکانی بین مدل‌ها، تمامی داده‌ها با استفاده از الگوریتم میان‌یابی دوخطی به شبکه‌ای یکنواخت با رزولوشن مکانی ۱.۲۵° × ۰.۹° متناسب با مدل CESM2 (دارای بالاترین قدرت تفکیک مکانی در میان مدل‌ها) منتقل شدند. این بازآرایی مکانی، پایه‌ای منسجم برای اجرای تحلیل‌های آماری و ترسیم نقشه‌های مقایسه‌ای فراهم ساخت. برای ارزیابی معناداری تغییرات میانگین متغیرها بین سناریوها، آزمون t-test دو نمونه‌ای استفاده شد. مقادیر p-value کمتر از ۰.۰۵ بیانگر تغییرات معنی‌دار تلقی شدند و مناطق معنادار در نقشه‌های مکانی با هاشور مشخص شدند.

برای هر سال، ماه وقوع بیشینه و کمینه هر یک از متغیرهای برفی تحت سناریوهای مختلف استخراج شد. سپس، جابه‌جایی زمانی اوج و کمینه نسبت به دوره پایه بر حسب ماه محاسبه شد؛ به‌طوری‌که مقادیر مثبت نشان‌دهنده تأخیر و مقادیر منفی بیانگر وقوع زودهنگام آن متغییر است. همچنین، دامنه فصلی هر متغیر به‌صورت نصف اختلاف بین بیشینه و کمینه مقادیر ماهانه در هر سال محاسبه و تفاوت آن بین سناریوهای مختلف با استفاده از آزمونt دو نمونه‌ای ارزیابی شد.

کلیه تحلیل‌های مکانی، زمانی و آماری ارائه‌شده در این پژوهش بر اساس این میانگین چندمدلی انجام شده است. علاوه بر این، دامنه تغییرات بین نتایج مدل‌های مختلف از طریق نمودارهای جعبه‌ای و شاخص‌های آماری به نمایش گذاشته شده است تا میزان عدم قطعیت ناشی از تفاوت ساختار مدل‌ها به تصویر کشیده شود.

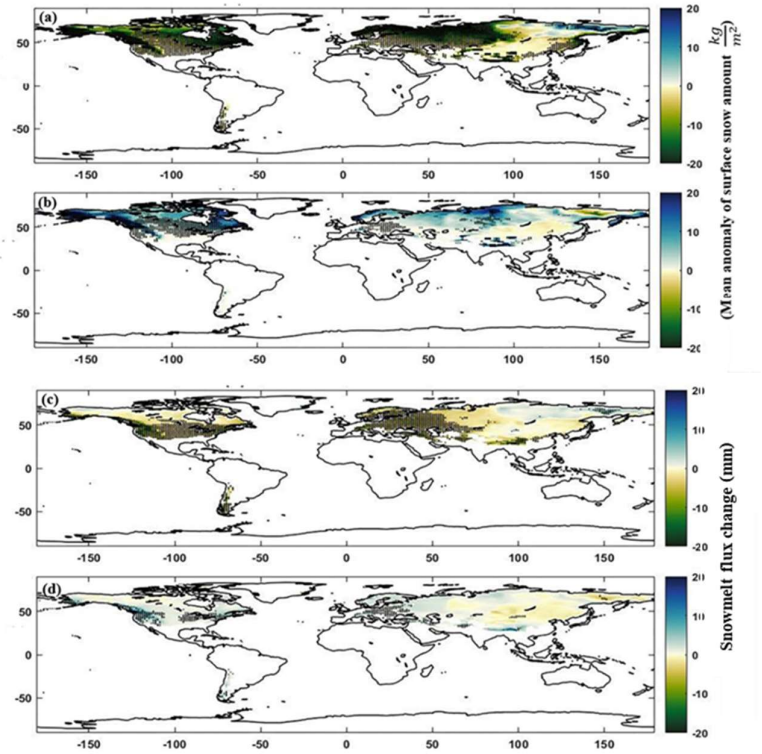
۳ نتایج و بحث

در این بخش نتایج مربوط به تغییرات متغیرهای مختلف برف تحت سناریوهای مورد مطالعه ارائه شده است. همانطور که نقشه اختلاف مقدار برف سطحی بین سناریوی SSP5-8.5 و دوره پایه در پنل a شکل ۱ نشان می‌دهد (نواحی هاشورخورده بیانگر تغییرات معنادار آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد است)، سناریوی SSP5-8.5 سبب کاهش قابل‌توجه مقدار برف سطحی در عرض‌های میانی و بالای دوره پایه نیمکره شمالی نسبت به دوره پایه شده است. بیشترین افت مقدار برف سطحی در مناطق سیبری، شمال اروپا، آلاسکا و رشته‌کوه‌های راکی مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که مقدار ناهنجاری منفی در برخی نواحی از ۲۰ میلیمتر (kg m-2 آب) نیز فراتر

رفته است. این کاهش عمدتاً ناشی از افزایش دمای زمستان، کوتاه‌تر شدن فصل‌های برفی و تغییر فاز بارش از برف به باران در پی گرمایش زمین است (بارنت و همکاران، ۲۰۰۵). در مقابل، ارتفاعات هیمالیا و بخش‌هایی از آمریکای جنوبی افزایش خفیفی در مقدار برف سطحی نشان می‌دهند که ناشی از افزایش بارش در پی سناریوی انتشار شدید گازهای گلخانه‌ای در این منطقه می‌باشد (رضایی و همکاران، ۲۰۲۶). در مقابل، نقشه مربوط به مقادیر برف سطحی تحت مهندسی اقلیم منهای مقادیر تحت سناریوی گرمایش نشان می‌دهد (پنل b در شکل ۱) که سناریوی G6sulfur بصورت بخشی سبب تعدیل تغییرات ناشی از گرمایش زمین شده است بطوریکه در گستره قابل توجهی از عرض‌های میانی و بالایی نیمکره شمالی (غیر از شرق روسیه)، مقدار برف سطحی (رنگ آبی) نسبت به سناریوی گرمایش زمین افزایش قابل توجهی داشته است.

پنل های c و d تغییرات شار ذوب برف سطحی را به ترتیب تحت سناریوهای گرمایش (SSP5-8.5) در مقایسه با دوره پایه و سناریوی مهندسی اقلیم (G6Sulfur) نسبت به گرمایش زمین را نشان می‌دهد. تحت سناریوی SSP5-8.5، مناطق شرقی روسیه دچار افزایش در شار ذوب برف نسبت به دوره پایه شده‌اند در حالیکه بقیه مناطق، به‌ویژه عرض‌های میانی نیم‌کره شمالی در اروپا و آمریکای شمالی، کاهش معناداری (در سطح اطمینان ۹۵٪) در شار ذوب برف را تجربه کرده‌اند (پنل c در شکل ۱). سناریوی مهندسی اقلیم G6sulfur، تنها در برخی مناطق مرکزی اروپا و آمریکای شمالی بصورت معنادار توانسته است بخشی از کاهش شار ذوب برف را خنثی نماید که دلیل اصلی آن کاهش دمای رخ داده در پی تزریق هواویزها در پوشن‌سپهر می‌باشد. در گستره وسیعی از نیمکره شمالی تاثیر مهندسی اقلیم از طریق سناریوی G6Sulfur تاثیر معناداری، در مقایسه با سناریوی گرمایش اقلیم، نداشته است زیرا مهندسی اقلیم اگرچه توانسته است درصد برف را افزایش دهد (رضایی و همکاران، ۲۰۲۶) اما در مقابل مقدار کل بارش را کاهش و در نتیجه چرخه هیدرولوژیکی را تضعیف می‌کند (چنگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ اروین و کیت، ۲۰۲۰؛ سیمپسون و همکاران، ۲۰۱۹؛ رضایی و همکاران، ۲۰۲۵؛ تایلمز و همکاران، ۲۰۱۳).

شکل ۲ اختلاف درصد پوشش برف سطحی (شکل‌های a و b) و عمق برف سطحی (شکل‌های a و b) را به ترتیب بین سناریوی گرمایش جهانی و دوره پایه و بین سناریوهای مهندسی اقلیم و گرمایش زمین (دوره‌ی ۲۰۷۰–۲۰۹۹) را نشان می‌دهد. نتایج میانگین‌گیری بین‌مدلی بیانگر آن است که در سناریوی SSP5-8.5 کاهش گسترده و معناداری در درصد پوشش سطحی برف در عرض‌های میانی تا بالایی نیم‌کره‌ی شمالی رخ داده است. بیشترین کاهش در شمال اوراسیا، اسکاندیناوی، سیبری و رشته‌کوه‌های آمریکای شمالی مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که ناهنجاری‌های منفی در برخی نواحی به ۱۰ تا ۱۵ درصد می‌رسد. چنین تغییری عمدتاً ناشی از افزایش دمای زمستان، کوتاه‌تر شدن دوره‌ی تجمع برف و تغییر فاز بارش از برف به باران تحت سناریوی گرمایش زمین است (بارنت و همکاران، ۲۰۰۵). آزمون آماری t نیز نشان می‌دهد که این تغییرات در بخش عمده‌ای از مناطق یادشده از نظر آماری معنادار هستند. در مقابل، تحت سناریوی G6sulfur، میزان کاهش پوشش برف نسبت به سناریوی SSP5-8.5 به‌طور محسوسی کمتر شده است، بطوریکه در مناطقی مانند شرق سیبری، ارتفاعات پامیر، آلاسکا و غرب کانادا حتی ناهنجاری‌های مثبت بین ۲ تا ۵ درصد مشاهده می‌شود.

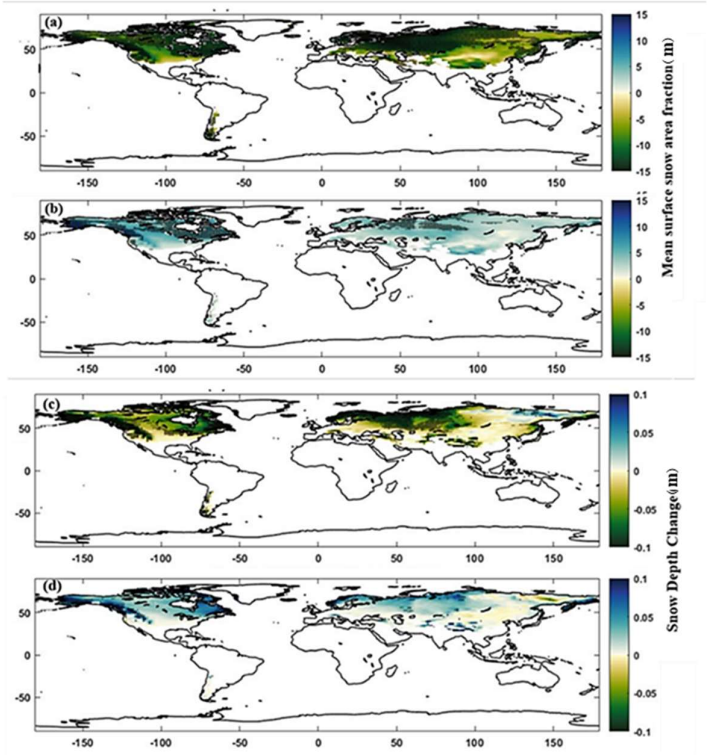


شکل ۱. (a) اختلاف مقدار برف سطحی بین SSP5–8.5 و دوره پایه (یعنی مقدار تحت سناریوی گرمایش منهای مقدار در دوره پایه) و (b) بین G6Sulfur و SSP5-8.5، برای نشان دادن میزان خنثی سازی تغییرات ناشی از گرمایش زمین. شکل های c و d نیز به ترتیب همانند a و b اما مربوط به شار ذوب برف سطحی هستند. دقت شود که اساس سناریوهای آینده دوره ۲۰۷۰–۲۰۹۹ و برای شرایط پایه ۲۰۱۵–۲۰۳۴ انتخاب شده است. نواحی هاشورخورده بیانگر تغییرات آماری معنادار هستند ($p < 0.05$، آزمون t).

این افزایش ناشی از اثر خنک‌سازی هدفمند تزریق هواویزهای سولفاتی در پوشن‌سپهر است که موجب کاهش دمای زمستان، کند شدن نرخ ذوب و افزایش سهم بارش جامد می‌شود (چن و همکاران، ۲۰۰۵؛ رضایی و همکاران، ۲۰۲۶). با این حال، در عرض‌های پایین‌تر مانند قفقاز، غرب ایران و بخش‌هایی از غرب آسیا، کاهش پوشش برف هرچند با شدت کمتر، همچنان ادامه دارد که نشان می‌دهد اثرات سناریوی G6sulfur در این مناطق نسبت به عرض‌های بالاتر محدودتر است.

در بخش مربوط به عمق برف سطحی (پنل‌های c و d در شکل ۲)، نتایج نشان می‌دهد که تحت SSP5-8.5 کاهش قابل‌توجه و معناداری در عمق میانگین برف در اغلب نواحی برف‌گیر نیم‌کره‌ی شمالی نسبت به دوره پایه رخ داده است. بیشترین کاهش در سیبری مرکزی، آلاسکا، کوهستان‌های کانادا و اسکاندیناوی مشاهده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در برخی مناطق میزان افت از ۱۵ میلیمتر نیز فراتر می‌رود. این روند بازتاب دهنده مطالعات قبلی است که در آنها اثر مستقیم گرمایش جهانی بر کاهش انباشت فصلی و افزایش نرخ ذوب برف به تصویر کشیده شده است (ژانگ و چه، ۲۰۱۹؛ لی و همکاران، ۲۰۲۴). در عرض‌های پایین‌تر، از جمله قفقاز، آناتولی شرقی و شمال‌غرب ایران نیز کاهش‌های خفیف‌تر اما از نظر آماری معنادار مشاهده می‌شود. در مقابل، سناریوی G6sulfur بصورت بخشی سعی در خنثی سازی کاهش رخ داده در عمق برف تحت سناریوی گرمایش زمین را دارد، بطوریکه در اکثر مناطق (غیر از شرق روسیه)، در

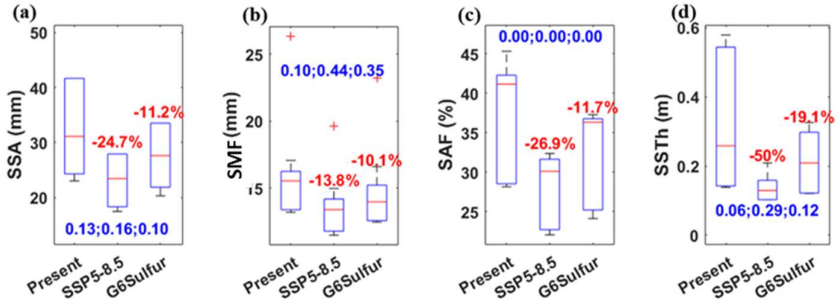
پنل d شکل ۲، تن رنگی آبی ظاهر شده است. در برخی نواحی از جمله شرق سیبری، پامیر، آلاسکا و ارتفاعات آسیای مرکزی ناهنجاری‌های مثبت تا حدود ۵۰ میلیمتر مشاهده می‌شود که ناشی از کاهش دمای سطحی حاصل از مهندسی اقلیم و افزایش سهم بارش جامد در فصل سرد است (مور و همکاران، ۲۰۱۹؛ لی و همکاران، ۲۰۲۳). نقشه‌ی اختلاف میان دو سناریو نشان می‌دهد که در عرض‌های بالا و مناطق کوهستانی، عمق برف در G6sulfur به‌طور میانگین بین ۳۰ تا ۱۰۰ میلیمتر بیشتر از سناریوی SSP5-8.5 برآورد می‌شود. این افزایش در مناطق حساس آب‌شناسی مانند آلاسکا، شمال اوراسیا و دامنه‌های کوهستانی آسیا از نظر آماری معنادار است و می‌تواند نقش کلیدی در حفظ ذخایر برفی و تنظیم جریان‌های سطحی ایفا کند (ژائو و همکاران، ۲۰۱۷؛ چن و همکاران، ۲۰۲۳). آزمون آماری نیز تفاوت‌های مشاهده‌شده را با سطح اطمینان بالا معنادار تلقی کرده است.



شکل ۲. همانند شکل ۱ اما به ترتیب برای متغیرهای درصد پوشش برف سطحی و عمق برف سطحی.

شکل ۳ مقایسه آماری بین‌مدلی ناهنجاری متغییرهای مختلف برف را در دو سناریوی اقلیمی انتشار شدید گازهای گلخانه‌ای با و بدون مهندسی اقلیم در مقایسه با دوره پایه نمایش می‌دهد. در سناریوی گرمایش زمین SSP5-8.5، مقدار برف سطحی (SSA در پنل a) حدود ۲۵ درصد نسبت به دوره پایه (۲۰۱۵–۲۰۳۴) کاهش یافته است که سناریوی مهندسی اقلیم آن را به حدود ۱۱٪ تعدیل کرده است. یعنی مهندسی اقلیم حدود ۱۴٪ از کاهش رخ داده بوسیله سناریوی انتشار شدید گازهای گلخانه‌ای را جبران کرده است. بطور مشابه مقدار شار

ذوب برف (SMF در پنل b)، درصد پوشش برف سطحی (SAF در پنل c) و عمق برف (SSTh در پنل d) به ترتیب به میزان حدود ۱۴٪، ۲۷٪ و ۵۰٪ کاهش یافته است اما در مقابل مهندسی اقلیم توانسته است به طور بخشی این کاهش‌ها را جبران کند و به ترتیب این کاهش را به حدود ۱۰٪، ۱۲٪ و ۱۹٪ برساند. این یافته‌ها تأیید می‌کنند که مهندسی اقلیم از طریق تزریق هواویزها در پوشن‌سپهر می‌تواند علی الرغم کاهش بارش کل و تضعیف سیستم هیدرولوژیکی (چنگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ اروین و کیت، ۲۰۲۰؛ سیمپسون و همکاران، ۲۰۱۹؛ رضایی و همکاران، ۲۰۲۵؛ تایلمز و همکاران، ۲۰۱۳)، با افزایش سهم برف از بارش بخاطر کاهش دمای سطح زمین سیستم برف در نیکمره شمالی (Rezaei et al., 2026 رضایی و همکاران، ۲۰۲۶) را تعدیل نماید.

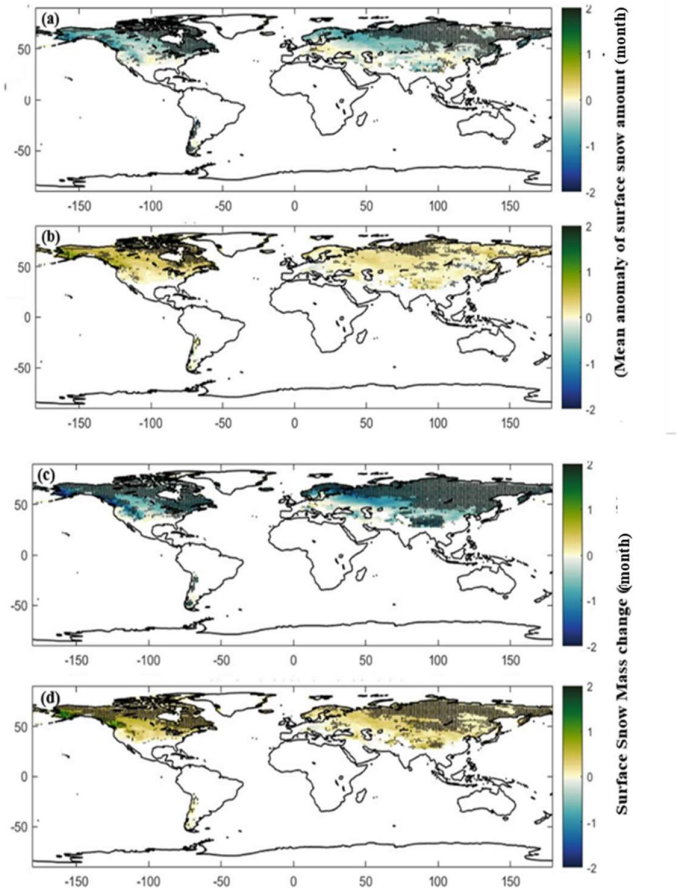


شکل ۳. پلات‌های جعبه ای برای میانگین متغییرهای (a) جرم برف سطحی (SSA)، (b) شار ذوب برف (SMF)، (c) درصد پوشش سطحی برف (SAF) و (d) عمق برف (SSTH). در هر جعبه، میانه، دامنه بین‌چارکی، و پراکندگی نقاط پرت نمایش داده شده است. سه عدد آبی در هر پلات، از چپ به راست، به ترتیب مقادیر p برای تفاوت‌های آماری بین SSP5–8.5 و شرایط پایه، G6sulfur و شرایط پایه، و بین SSP5–8.5 و G6sulfur می‌باشد. درصدهای قرمز رنگ نیز بیانگر تغییرات تحت سناریوهای آینده نسبت به دوره پایه می‌باشد.

شکل ۴ جابه‌جایی زمانی (برحسب ماه) وقوع بیشینه‌ی سالانه‌ی مقدار برف سطحی (پنل‌های a و b) و شار ذوب برف سطحی (پنل‌های c و d) را نشان می‌دهد. دقت شود که در پنل‌های a و c اختلاف مقادیر تحت سناریوی گرمایش زمین با دوره پایه اما در پنل‌های b و d اختلاف بین مقادیر تحت سناریوی مهندسی اقلیم با گرمایش زمین نشان داده شده است. مقادیر منفی بیانگر پیش‌افتادگی و مقادیر مثبت نشان‌دهنده‌ی تأخیر در وقوع اوج هستند. در سناریوی SSP5–8.5 (پنل a) زمان وقوع اوج مقدار برف سطحی در بخش وسیعی از نیم‌کره‌ی شمالی، به‌ویژه در عرض‌های بالا نظیر سیبری، آلاسکا و شمال اروپا، نسبت به دوره‌ی پایه زودتر رخ داده است، بطوریکه میزان تقدم زمانی در این مناطق بین ۰.۵ تا ۲ ماه برآورد شده است. آزمون آماری t نیز نشان می‌دهد که این تغییرات در سطح اطمینان ۹۵٪ معنادار هستند. در مقابل، سناریوی مهندسی اقلیم (پنل b) سبب تعدیل این جابجایی زمانی شده است؛ بطوریکه در بسیاری از مناطق، زمان وقوع اوج مقدار برف سطحی بدون تغییر یا با تأخیر اندک (۰ تا ۱+ ماه) مشاهده می‌شود. در نهایت، مقایسه‌ی پنل‌های a و b نشان می‌دهد که در عرض‌های بالا، از جمله شمال آسیا و آمریکای شمالی، زمان اوج انباشت برف سطحی در G6sulfur به‌طور میانگین ۱ تا ۲ ماه دیرتر از SSP5–8.5 رخ داده است. برای متغیر شار ذوب برف سطحی، سناریوی SSP5–8.5نسبت به دوره پایه (پنل c)، سبب رخ دادن زودهنگام مقادیر اوج، به میزان حدود دو ماه، در اغلب مناطق سردسیر نیم‌کره‌ی شمالی از جمله سیبری، آلاسکا، کانادا و شمال اوراسیا می‌شود. در مقابل، مهندسی اقلیم (پنل d) در بیشتر مناطق سبب تعدیل این جابجایی زمانی

شده است بطوریکه این تعدیل در گستره وسیعی از عرض‌های جغرافیایی متوسط تا بالا در نیمکره شمالی از نظر آماری معنادار است.

شکل ۵ همانند شکل ۴ تغییرات وقوع بیشینه‌ی سالانه‌ی درصد پوشش برف سطحی (پنل‌های a و b) و عمق برف (پنل‌های c و d) را نشان می‌دهد.



شکل ۴. همانند شکل ۱ اما برای اختلاف زمان رخ دادن پیک سالانه.

در سناریوی SSP5–8.5 (پنل a)، بخش وسیعی از مناطق برفی نیم‌کره‌ی شمالی، به‌ویژه در عرض‌های بالا مانند سیبری، آلاسکا و شمال اروپا، تجربه‌ی وقوع زودتر اوج پوشش برف نسبت به دوره‌ی پایه را داشته‌اند. میزان جابه‌جایی زمانی در این مناطق بین ۱ تا ۲ ماه ثبت شده است. آزمون‌های آماری نیز معناداری این تغییرات را در سطح اطمینان ۹۵٪ تأیید کرده‌اند. این تغییر فاز منفی بیانگر تسریع در انباشت اولیه و ذوب زودهنگام برف در اواخر زمستان است که به کوتاه‌تر شدن دوره‌ی ماندگاری برف سطحی منجر می‌شود (چینگ و همکاران، ۲۰۲۵؛ چن و همکاران، ۲۰۲۵؛ گو و همکاران، ۲۰۲۶). در سناریوی G6sulfur (پنل b)، الگوی زمانی متعادل‌تر و نزدیک‌تر به شرایط پایه مشاهده می‌شود. در اغلب مناطق نیم‌کره‌ی شمالی، تغییرات زمانی اندک (کمتر از ±۰.۵ ماه) بوده و در برخی نواحی کوهستانی مانند پامیر، قفقاز و ارتفاعات شمالی، تأخیر حدود ۱ ماهه در زمان اوج پوشش ثبت شده است. این رفتار نشان‌دهنده‌ی اثربخشی مهندسی اقلیم در تثبیت چرخه‌ی

زمانی پوشش برف است. مقایسه‌ی پنل‌های (b) و (a) نشان می‌دهد که در بخش عمده‌ی مناطق برفی نیم‌کره‌ی شمالی، زمان وقوع اوج پوشش برف در G6sulfur به‌طور متوسط ۱ تا ۲ ماه دیرتر از SSP5–8.5 رخ داده است. این تغییر مثبت زمانی بیانگر موفقیت مداخلات اقلیمی در بازگرداندن فاز طبیعی چرخه‌ی برف و کاهش اثرات گرمایش جهانی بر زمان‌بندی فصلی آن است. بیشترین تفاوت‌ها در عرض‌های بالا، حوضه‌های رودخانه‌ای حساس و نواحی کوهستانی سردسیر مشاهده شده‌اند.

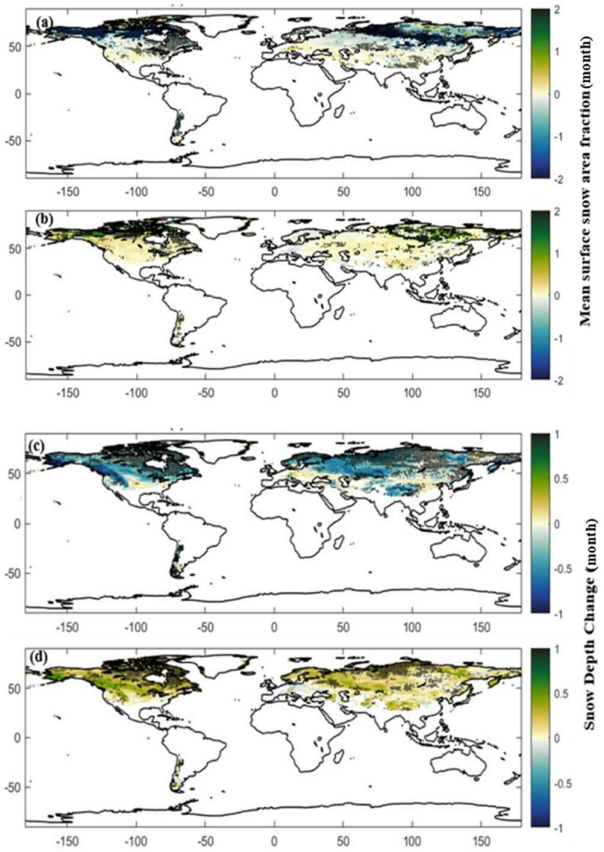
تغییرات زمانی وقوع بیشینه‌ی عمق برف سطحی در پنل‌های (c) و (d) بررسی شده است. در سناریوی SSP5–8.5 (پنل c)، در گستره‌ی وسیعی از عرض‌های بالا شامل سیبری، آلاسکا و کانادا، اوج عمق برف زودتر از دوره‌ی پایه رخ داده است. بررسی هم‌زمان داده‌های دمای فصل سرد (که در این مطالعه محاسبه شده است) نشان می‌دهد که افزایش دمای زمستان و کوتاه‌تر شدن پنجره‌ی دمای زیرصفر، سهم بیشتری در این پیش‌افتادگی (حدود ۱ ماه) نسبت به خود فرآیند ذوب زودهنگام دارد؛ به‌گونه‌ای که کاهش مدت تجمع برف، عامل اصلی جابه‌جایی زمانی اوج عمق برف محسوب می‌شود. به‌دنبال آن، چرخه‌ی انباشت–ذوب فشرده‌تر شده و فصل برفی کوتاه‌تر می‌شود. در سناریوی G6sulfur (پنل d)، تغییرات زمانی ملایم‌تر و در بسیاری از مناطق ناچیز است. در برخی نواحی از جمله شرق اوراسیا، آلاسکا و پامیر، تأخیر اندک حدود ۰.۵+ ماه در زمان اوج عمق مشاهده شده است. مقایسه‌ی پنل‌های (d) و (c) نشان می‌دهد که در اغلب عرض‌های بالا و مناطق کوهستانی، زمان وقوع اوج عمق برف در G6sulfur حدود ۰.۵ تا ۱ ماه دیرتر از SSP5–8.5 ثبت شده است. از منظر هیدرولوژیکی، چنین جابه‌جایی زمانی می‌تواند در بهبود شرایط رواناب بهاری، حفظ ذخایر برفی و کاهش خطر آب‌شدن ناگهانی برف نقش اساسی داشته باشد (چن و همکاران، ۲۰۲۳).

آزمون‌های آماری نیز تفاوت‌های مشاهده‌شده را در مناطق کلیدی معنادار گزارش کرده‌اند.

شکل ۶ تغییرات مکانی ناهنجاری مقدار اوج سالانه جرم برف سطحی و شار ذوب برف سطحی ، همانند شکل ۱ برای میانگین تغییرات، را نشان می‌دهد. در سناریوی SSP5–8.5، کاهش قابل‌توجه و معناداری (در سطح اطمینان ۹۵٪) در مقدار اوج تجمع برف در عرض‌های شمالی نیم‌کره‌ی شمالی (غیر از شرق روسیه) نسبت به دوره پایه مشاهده می‌شود. نواحی مرکزی سیبری، آلاسکا، شمال کانادا و دامنه‌های اروپای شرقی بیشترین افت را تجربه کرده‌اند، به‌گونه‌ای که ناهنجاری‌های منفی تا بیش از ۱۵ میلیمتر ثبت شده است. در مقابل، سناریوی G6sulfur عملکرد تعدیل‌گرایانه‌ای را نشان می‌دهد. مقایسه رنگ‌ها در پنل‌های a و b نشان می‌دهد که مهندسی اقلیم سعی دارد در جاهایکه تحت سناریوی گرمایش زمین، کاهش رخ داده است مانند اکثر مناطق نیمکره شمالی، افزایش و در جاهاییکه افزایش رخ داده است مانند شرق روسیه، کاهش ایجاد کند.

در بخش مربوط به شار ذوب برف سطحی (پنل‌های c و d)، نتایج نشان می‌دهد که تحت SSP5–8.5 بخش عمده‌ای از عرض‌های بالا و مناطق کوهستانی نیم‌کره‌ی شمالی افزایش چشمگیری در مقدار اوج ذوب برف را در مقایسه با شرایط دوره پایه تجربه کرده‌اند. در مناطقی مانند سیبری، آلاسکا و شمال اروپا، ناهنجاری‌های مثبت بیش از ۲۰ میلیمتر ثبت شده است که بیانگر تشدید فرآیند ذوب فصلی و تمرکز ذوب در بازه‌ی زمانی کوتاه‌تر است. این افزایش با کاهش مقدار برف و افزایش شار ذوب هم‌راستا بوده و دگرگونی ساختار زمانی شدتی چرخه‌ی برف در اثر گرمایش جهانی را تأیید می‌کند. آزمون‌های آماری نیز معناداری این تغییرات را در سطح اطمینان ۹۵٪ تأیید کرده‌اند. در سناریوی G6sulfur، تغییرات ملایم‌تر بوده و در بسیاری از مناطق ناهنجاری‌ها

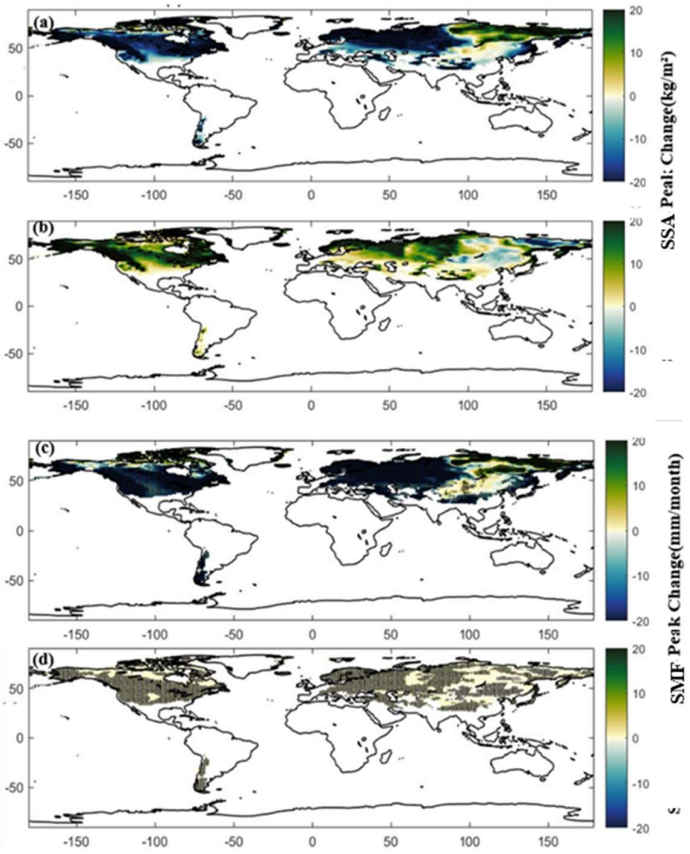
به مقادیر نزدیک به صفر متمایل شده‌اند. در برخی نواحی مانند شرق سیبری، پامیر و شمال کانادا کاهش یا تأخیر در اوج ذوب تا حدود ۵–۱۰٪مشاهده شده است. این کاهش ناشی از اثر خنک‌کنندگی هواویزهای پوشن‌سپهر در حفظ چرخه‌ی طبیعی انباشت و جلوگیری از ذوب زودهنگام است. در مناطق حساس آب‌شناسی، این تعدیل



شکل ۵. همانند شکل ۲ اما برای اختلاف زمان رخ دادن پیک سالانه به ترتیب در متغیرهای درصد پوشش برف سطحی (پنل های a و b) و عمق برف (پنل های c و d).

می‌تواند نقش مهمی در کنترل رواناب بهاره و جلوگیری از سیلاب‌های ناگهانی ایفا کند.

شکل ۷ تغییرات مکانی ناهنجاری مقدار بیشینه‌ی سالانه درصد پوشش برف سطحی و عمق برف سطحی را تحت دو سناریوی گرمایش جهانی SSP5–8.5و مهندسی اقلیم G6sulfur نشان می‌دهد. برای پوشش برف سطحی (پنل a) سناریوی SSP5–8.5 کاهش قابل‌توجه و معناداری در مقدار اوج پوشش برف در بیشتر مناطق سردسیر نیم‌کره‌ی شمالی را ایجاد کرده است. نواحی سیبری مرکزی، اسکاندیناوی، شمال کانادا و آلاسکا افتی بیش از ۴۰ نسبت به مقدار دوره پایه را تجربه کرده‌اند. این کاهش نتیجه‌ی ترکیب چند عامل از جمله افزایش دمای تروپوسفری، کاهش نسبت بارش برف به باران و آغاز زودهنگام ذوب زمستانی است. نتایج مشابه برای عمق برف نیز در پنل c قابل مشاده است در مقابل، هم راستا با نتایج سایر پارامترها، سناریوی مهندسی اقلیم G6Sulfur بصورت بخشی سعی دارد که تغییرات ایجاد شده بوسیله سناریوی گرمایش زمین را خنثی نماید.



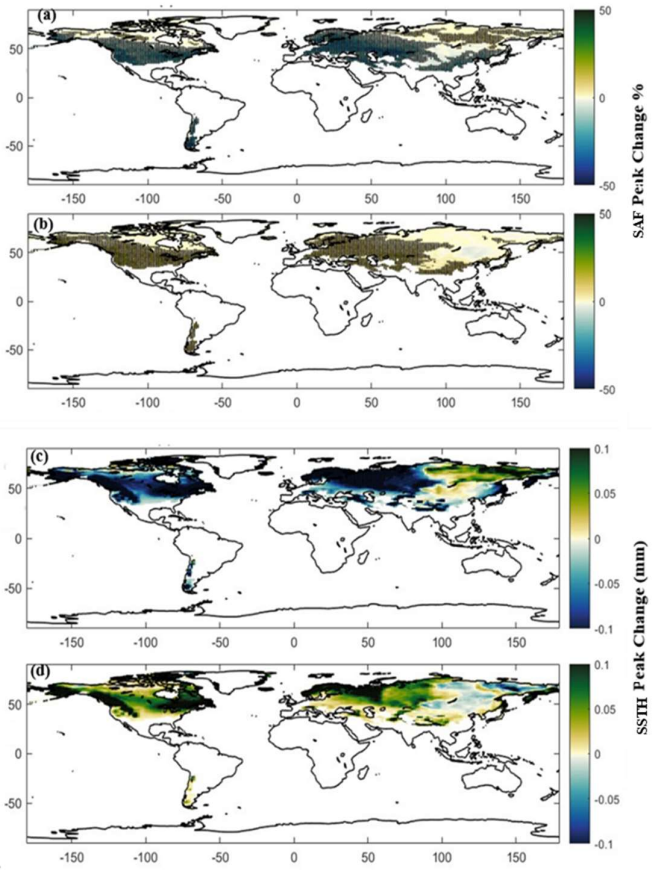
شکل ۶. همانند شکل ۱ اما برای اختلاف مقدار پیک سالانه.

وجود رنگ‌های مخالف در پنل‌های b و d به ترتیب در مقایسه با پنل‌های a و c این ادعا را تایید می‌کند.

۴ بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تداوم گرمایش جهانی تحت سناریوی SSP5-8.5 می‌تواند تغییرات گسترده‌ای در رژیم برف جهانی ایجاد کند. کاهش جرم برف، عمق برف و درصد پوشش برف همراه با افزایش شار ذوب برف، بیانگر کاهش ذخایر برفی و تشدید فرآیند ذوب در بسیاری از مناطق سردسیر و کوهستانی جهان است. همچنین جابه‌جایی زمان اوج انباشت و ذوب برف به دوره‌های زودتر سال، نشان‌دهنده کوتاه‌تر شدن دوره ماندگاری برف و تغییر در الگوی فصلی آن است. این تغییرات در عرض‌های بالا و مناطق کوهستانی شدت بیشتری داشته و می‌تواند بر منابع آب وابسته به برف، اکوسیستم‌های طبیعی و فعالیت‌های اقتصادی مرتبط با آن تأثیرگذار باشد.

در مقابل، نتایج سناریوی G6sulfur نشان داد که مداخله اقلیمی از طریق تزریق هواویزها در پوشن‌سپهر قادر است بخشی از اثرات ناشی از گرمایش جهانی را کاهش دهد. در این سناریو، افت متغیرهای برفی نسبت به شرایط گرمایش شدید کمتر بوده و الگوی زمانی انباشت و ذوب برف نیز تا حدی به شرایط دوره پایه نزدیک‌تر شده است. این موضوع بیانگر آن است که مهندسی اقلیم



شکل ۷. همانند شکل ۱ اما برای اختلاف مقدار پیک سالانه به ترتیب در متغیرهای درصد پوشش برف سطحی و عمق برف.

می‌تواند در کاهش شدت برخی پیامدهای گرمایش جهانی مؤثر باشد.

با این حال، نتایج نشان داد که پاسخ مناطق مختلف جهان به این مداخله یکسان نیست. در برخی نواحی، بهبود شرایط برفی محسوس‌تر بوده، در حالی که در برخی مناطق تغییرات محدودتر مشاهده شده است. این ناهمگنی فضایی نشان می‌دهد که آثار مهندسی اقلیم می‌تواند در مناطق مختلف متفاوت باشد و ارزیابی آن نیازمند توجه به شرایط اقلیمی و جغرافیایی هر منطقه است. بهرحال این ناهمگونی منطقه‌ای مشاهده‌شده در پاسخ‌های سناریوی G6Sulfur ناشی از اثرات ترکیبی تنظیمات گردش‌های بزرگ‌مقیاس و فرایندهای توپوگرافی–بازخورد محلی و همچنین رفتار رخ داده در سناریوی گرمایش زمین (بدون مداخله) است. از یک سو، تزریق پوشن‌سپهری هواویزهای سولفاتی در سناریوی G6Sulfur، پوشن‌سپهر تحتانی را از طریق جذب تابشی گرم می‌کند، که این امر شیب‌های دمای نصف‌النهاری را تغییر داده و تنظیماتی را در نوسان اطلس شمالی و گردش‌های موسمی ایجاد می‌کند (جونز و همکاران، ۲۰۲۱؛ جونز و همکاران، ۲۰۲۲). جالب‌توجه اینکه این پاسخ نوسان اطلس شمالی در آزمایش G6solar (که کاهش یکنواخت ثابت خورشیدی را اعمال می‌کند) وجود ندارد و این موضوع تأیید می‌کند که اثرات گرمایش تابشی هواویزها در پوشن‌سپهر –

به‌جای سرمایش سطحی – محرک‌های اصلی این تنظیمات دینامیکی هستند (Jones et al., 2021). مطالعات تطبیقی نشان می‌دهند که G6Sulfur پاسخ‌های بارشی پیچیده‌تر و ناهمگن‌تری نسبت به G6solar به دلیل الگوهای پراکندگی هواویزها و بازخوردهای گردش پوشن‌سپهری تولید می‌کند (فنگ و همکاران، ۲۰۲۵). از سوی دیگر، توپوگرافی پیچیده، پاسخ‌های اقلیمی محلی را از طریق گرمایش وابسته به ارتفاع تعدیل می‌کند (پیین و همکاران، ۲۰۱۵). در حالی که بازخوردهای مثبت آلبدوی برف در عرض‌های میانی تا بالا و بازخوردهای پوشش گیاهی–هیدرولوژی، اختلافات منطقه‌ای را بیشتر تشدید می‌کنند (رضایی و همکاران، ۲۰۲۵). این دو سازوکار (تنظیمات گردشی بزرگ‌مقیاس و فرایندهای محلی) مکمل یکدیگرند: تنظیمات گردشی، چارچوب دینامیکی بزرگ‌مقیاس را برای تفاوت‌های منطقه‌ای فراهم می‌کنند، در حالی که فرایندهای توپوگرافی و بازخوردی، نحوه‌ی بروز محلی و دامنه‌ی شدت آن‌ها را تعیین می‌کنند.

از دیگر یافته‌های مهم این پژوهش می‌توان به بررسی هم‌زمان تغییرات جرم برف، ضخامت برف، درصد پوشش برف و شار ذوب برف در مقیاس جهانی و همچنین تحلیل تغییرات زمانی اوج انباشت و ذوب برف اشاره کرد. این رویکرد امکان شناخت جامع‌تری از نحوه پاسخ رژیم برف به گرمایش جهانی و مداخلات مهندسی اقلیم را فراهم ساخت و تصویری کامل‌تر از تغییرات احتمالی آینده ارائه داد.خنثی‌سازی تغییرات زمانی اوج متغیرهای برفی در حوضه‌های آبریز وابسته به برف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چرخه‌ی فصلی برف به‌عنوان یک «مخزن طبیعی» عمل می‌کند که آب حاصل از بارش‌های فصل سرد را ذخیره و در فصل گرم به‌صورت رواناب در دسترس قرار می‌دهد (بارنت و همکاران، ۲۰۰۵). این تأخیر زمانی بین بارش و ورودی آب به سطح، یکی از مؤلفه‌های بنیادین چرخه‌ی هیدرولوژیکی در مناطق برف‌گیر محسوب می‌شود. هرگونه جابه‌جایی در زمان وقوع اوج پوشش یا عمق برف پیامدهای زنجیره‌ای بر تمامی اجزای سیستم آب–انرژی–غذا–اکوسیستم داشته باشد (سیریلا–وودبورن و همکاران، ۲۰۲۱). تغییر فاز منفی مشاهده‌شده در سناریوی SSP5-8.5 که به‌معنی وقوع زودتر اوج متغیرهای برفی تا ۱ تا ۲ ماه است (شکل‌های ۴ و ۵) بیانگر اختلال جدی در چرخه‌ی طبیعی انباشت–ذوب می‌باشد. این پیش‌افتادگی زمانی باعث می‌شود که رواناب ناشی از ذوب برف در اوایل بهار، پیش از شروع فصل نیاز آبی (که معمولاً در اواخر بهار و تابستان همزمان با دوره‌ی رشد گیاهان و اوج مصرف کشاورزی است) رخ دهد. در نتیجه، عدم‌هماهنگی بین زمان عرضه و زمان تقاضای آب تشدید شده و کارایی ذخایر آبی به‌شدت کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، حتی اگر حجم کل رواناب تغییر چشمگیری نداشته باشد، اما تغییر در زمان‌بندی آن، دسترسی به آب را در ماه‌های خشک و گرم سال با محدودیت مواجه می‌سازد. از منظر هیدرولوژیکی، جابه‌جایی زمانی اوج عمق برف و پوشش برف می‌تواند مدت زمان ماندگاری برف در حوضه را کاهش داده و پنجره‌ی زمانی در دسترس بودن آب را کوتاه‌تر کند. این موضوع به‌ویژه در حوضه‌های آبریز که معیشت میلیون‌ها نفر به رواناب ناشی از ذوب برف وابسته است (بارنت و همکاران، ۲۰۰۵)، پیامدهای جبران‌ناپذیری به‌دنبال خواهد داشت. کاهش ذخایر برفی و ذوب زودهنگام، نه‌تنها تولید انرژی برق‌آبی را با اختلال مواجه می‌سازد، بلکه تأمین آب کشاورزی را در دوره‌های اوج نیاز با بحران روبه‌رو می‌کند و اکوسیستم‌های وابسته به برف را نیز دچار تنش می‌نماید (سیریلا–وودبورن و همکاران، ۲۰۲۱). در مقابل، سناریوی G6sulfur با بازگرداندن فاز طبیعی چرخه‌ی برف به شرایطی نزدیک‌تر به دوره‌ی پایه

(شکل های ۴ و ۵)، توانسته است بسیاری از تغییرات هیدرولوژیکی ناشی از SSP5–8.5 از جمله دامنه‌های فصلی و زمان‌بندی اوج‌ها را تا حد قابل‌توجهی جبران کند. این امر نشان‌دهنده‌ی اثربخشی مهندسی اقلیم در تثبیت چرخه‌ی زمانی متغیرهای برفی و کاهش اثرات مخرب گرمایش جهانی بر زمان‌بندی فصلی منابع آبی است. با این حال، باید توجه داشت که مداخلات اقلیمی نیز نمی‌توانند تمامی تغییرات هیدرولوژیکی را به‌طور کامل معکوس سازند و گرمایش باقیمانده و پویایی ذوب برف همچنان نقشی کلیدی در رواناب عرض‌های میانی تا بالا ایفا می‌کنند. بنابراین، خنثی‌سازی تغییرات زمانی اوج متغیرهای برفی در حوضه‌های وابسته به برف، نه‌تنها از منظر تأمین آب پایدار، بلکه از حیث حفظ امنیت غذایی، تولید انرژی و پایداری اکوسیستم‌ها، نقشی راهبردی و غیرقابل‌انکار دارد.

اگرچه نتایج نشان می‌دهد که سناریوی G6sulfur می‌تواند بخشی از پیامدهای گرمایش جهانی بر رژیم برف را تعدیل کند، اما این روش خالی از چالش و عدم‌قطعیت نیست. مداخلات اقلیمی در مقیاس جهانی ممکن است پیامدهایی فراتر از تغییرات دما داشته باشند و بر سایر مؤلفه‌های سامانه اقلیم نیز اثر بگذارند. ازاین‌رو، ارزیابی جامع مزایا، محدودیت‌ها و پیامدهای احتمالی این راهکار همچنان ضروری است.با این وجود، در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که مهندسی اقلیم می‌تواند به‌عنوان ابزاری مکمل در کاهش بخشی از اثرات گرمایش جهانی بر رژیم برف مورد توجه قرار گیرد، اما نمی‌تواند جایگزین راهبردهای اصلی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای باشد. بنابراین، مدیریت پایدار تغییر اقلیم مستلزم ترکیبی از کاهش انتشار، سازگاری با شرایط جدید اقلیمی و بررسی دقیق راهکارهای نوظهور مداخله در سامانه اقلیم است.

مراجع

Akbari, H., Menon, S., & Rosenfeld, A. (2009). Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO_2. Climatic Change, 94(3–4), 275–286. https://doi.org/10.1007/s10584-008-9515-9

Bala, G., Caldeira, K., Nemani, R., Cao, L., Ban-Weiss, G., & Shin, H.-J. (2010). Albedo enhancement of marine clouds to counteract global warming: Impacts on the hydrological cycle. Climate Dynamics, 37(4), 915–931. https://doi.org/10.1007/s00382-010-0868-1

Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. Nature, 438(7066), 303–309. https://doi.org/10.1038/nature04141

Bednarz, E. M., Butler, A. H., Visioni, D., Zhang, Y., Kravitz, B., & MacMartin, D. G. (2023). Injection strategy – A driver of atmospheric circulation and ozone response to stratospheric aerosol geoengineering. Atmospheric Chemistry and Physics, 23(21), 13665–13684. https://doi.org/10.5194/acp-23-13665-2023

Beerling, D. J., Kantzas, E. P., Lomas, M. R., et al. (2020). Potential for large-scale CO_2 removal via enhanced rock weathering with croplands. Nature, 583(7817), 242–248. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9

Boucher, O., Servonnat, J., Albright, A. L., Aumont, O., Balkanski, Y., Bastrikov, V., … & Vuichard, N. (2020). Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 12(7), e2019MS002010. https://doi.org/10.1029/2019MS002010

Chen, Y., Ji, D., Zhang, Q., Moore, J. C., Boucher, O., Jones, A., Lurton, T., Mills, M. J., Niemeier, U., Séférian, R., & Tilmes, S. (2023). Northern-high-latitude permafrost and terrestrial carbon response to two solar geoengineering scenarios. Earth System Dynamics, 14(1), 55–79. https://doi.org/10.5194/esd-14-55-2023

Chen, N., Wang, X., Yuan, F., Song, Y., Sun, L., Zuo, Y., ... & Wang, Q. (2025). Warming-independent shortened snow cover duration enhances vegetation greening across northern permafrost region. Communications Earth & Environment, 6(1), 250.

Cheng, W., MacMartin, D. G., Dagon, K., Kravitz, B., Tilmes, S., Richter, J. H., Mills, M. J., & Simpson, I. R. (2019). Soil moisture

and other hydrological changes in a stratospheric aerosol geoengineering large ensemble. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124, 12773–12793, https://doi.org/10.1029/2018JD030237

Danabasoglu, G., Lamarque, J.-F., Bacmeister, J., Bailey, D. A., DuVivier, A. K., Edwards, J., Emmons, L. K., Fasullo, J., Garcia, R., Gettelman, A., Hannay, C., Holland, M. M., Large, W. G., Lauritzen, P. H., Lawrence, D. M., Lenaerts, J. T. M., Lindsay, K., Lipscomb, W. H., Mills, M. J., et al. (2020). The Community Earth System Model Version 2 (CESM2). Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 12(2), e2019MS001916. https://doi.org/10.1029/2019MS001916.

Diffenbaugh, N. S., Scherer, M., & Ashfaq, M. (2013). Response of snow-dependent hydrologic extremes to continued global warming. Nature Climate Change, 3(4), 379–384. https://doi.org/10.1038/nclimate1732

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geoscientific Model Development, 9(5), 1937–1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016

ESA (2025). Stratospheric Aerosol Injection (SAI). ACtIon4Cooling Project, European Space Agency. Available at: https://climate.esa.int

Feng, Z. Q., Tan, M. L., Juneng, L., Tye, M. R., Xia, L. L., & Zhang, F. (2025). Effects of solar radiation modification on precipitation extremes in Southeast Asia: Insights from the GeoMIP G6 experiments. Advances in Climate Change Research, 16(3), 591-605 .

Gottlieb, A. R., & Mankin, J. S. (2024). Evidence of human influence on Northern Hemisphere snow loss. Nature, 625(7994), 293–300. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06794-y

Guo, H., Wang, X., Guo, Z., Zhu, G., & Che, T. (2026). Latitude/elevation-dependent response of snow phenology to climate change in the Northern Hemisphere from 1972 to 2022. Journal of Hydrology, 135331.

Irvine, P., Emanuel, K., He, J. et al. (2019) Halving warming with idealized solar geoengineering moderates key climate hazards. Nature Climate Change, 9, 295–299. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0398-8

Kravitz, B., MacMartin, D. G., & Tilmes, S. (2015). A new Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) experiment designed for climate modelers. Nature Climate Change, 5(5), 403-406.IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

Jones, A., Haywood, J. M., Scaife, A. A., Boucher, O., Henry, M., Kravitz, B., Lurton, T., Nabat, P., Niemeier, U., Séférian, R., Tilmes, S., & Visioni, D. (2022). The impact of stratospheric aerosol intervention on the North Atlantic and Quasi-Biennial Oscillations in the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) G6sulfur experiment. Atmospheric Chemistry and Physics, 22(5), 2999–3016. https://doi.org/10.5194/acp-22-2999-2022

Jones, A., Haywood, J. M., Jones, A. C., Tilmes, S., Kravitz, B., & Robock, A. (2021). North Atlantic Oscillation response in GeoMIP experiments G6solar and G6sulfur: why detailed modelling is needed for understanding regional implications of solar radiation management. Atmospheric Chemistry and Physics, 21(2), 1287–1304. https://doi.org/10.5194/acp-21-1287-2021

Lee, W. R., MacMartin, D. G., Visioni, D., Kravitz, B., Chen, Y., Moore, J. C., et al. (2023). High-latitude stratospheric aerosol injection to preserve the Arctic. Earth's Future, 11, e2022EF003052. https://doi.org/10.1029/2022EF003052

Lejano, R. P., & Kan, W. S. (2024). IPCC and the City: The need to transition from ideology to climate justice. Journal of Planning Education and Research, 44(3), 983-990.

Li, M., Ke, C., Cheng, B., Ma, J., Jiang, H., & Shen, X. (2024). Inter-comparisons of Arctic snow depth products. International Journal of Digital Earth, 17(1), 2376286.

Liu, Z., Yang, Y., Han, J., Guo, Y., & Yang, D. (2025). Transitioning climate control on snow and streamflow dynamics over the past 70 years. Geophysical Research Letters, 52, e2024GL114381. https://doi.org/10.1029/2024GL114381

MacMartin, D. G., Visioni, D., Kravitz, B., Richter, J. H., Felgenhauer, T., Lee, W. R., ... & Sugiyama, M. (2022). Scenarios for

modeling solar radiation modification. Proceedings of the National Academy of Sciences, 119(33), e2202230119.

Moore, J. C., Yue, C., Zhao, L., Guo, X., Watanabe, S., & Ji, D. (2019). Greenland ice sheet response to stratospheric aerosol injection geoengineering. Earth's Future, 7, 1451–1463. https://doi.org/10.1029/2019EF001393

Mote, P. W. (2006). Climate-driven variability and trends in mountain snowpack in western North America. Journal of Climate, 19(23), 6209–6220. https://doi.org/10.1175/JCLI3971.1

Mote, P. W., Hamlet, A. F., Clark, M. P., & Lettenmaier, D. P. (2005). Declining mountain snowpack in western North America. Bulletin of the American Meteorological Society, 86(1), 39–50. https://doi.org/10.1175/BAMS-86-1-39

Musselman, K. N., Addor, N., Vano, J. A., & Molotch, N. P. (2021). Winter melt trends portend widespread declines in snow water resources. Nature Climate Change, 11(5), 418–424. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01014-9

Pepin, N., Bradley, R. S., Diaz, H. F., et al. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. Nature Climate Change, 5(5), 424–430. https://doi.org/10.1038/nclimate2563

Qin, Y., Abatzoglou, J. T., Siebert, S., Huning, L. S., AghaKouchak, A., Mankin, J. S., et al. (2020). Agricultural risks from changing snowmelt. Nature Climate Change, 10(5), 459–465. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0746-8

Qing, Y., Wang, S., AghaKouchak, A., & Gentine, P. (2025). Delayed formation of Arctic snow cover in response to wildland fires in a warming climate. Nature Climate Change, 15(10), 1091-1098.

Rezaei, A., Karami, K., Tilmes, S., & Moore, J. C. (2024). Future water storage changes over the Mediterranean, Middle East, and North Africa in response to global warming and stratospheric aerosol intervention. Earth System Dynamics, 15(1), 91–108. https://doi.org/10.5194/esd-15-91-2024

Rezaei, A., et al. (2024). Future water storage changes over the Mediterranean, Middle East, and North Africa in response to global warming and stratospheric aerosol intervention. Earth System Dynamics, 15(1), 91-108.

Rezaei, A., Moore, J., Tilmes, S., & Karami, K. (2025). Regional and seasonal hydrological changes with and without stratospheric aerosol intervention under high greenhouse gas climates. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 130, e2025JD044163. https://doi.org/10.1029/2025JD044163

Rezaei, A., Moore, J., Tilmes, S., Visioni, D. (2026). Hydrologic Sensitivity of Snow and Streamflow Dynamics to Climate Forcing with and without Stratospheric Aerosol Intervention. Water Resources Research, in press.

Saeed, F., Schleussner, C.-F., & Hare, W. (2018). Why geoengineering is not a solution to the climate problem. Climate Analytics Briefing Paper, December 2018. Retrieved from https://climateanalytics.org

Séférian, R., Nabat, P., Michou, M., Saint-Martin, D., Voldoire, A., Colin, J., et al. (2019). Evaluation of CNRM Earth System Model, CNRM-ESM2-1: Role of Earth System Processes in Present-Day and Future Climate. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11(12), 4182–4227. https://doi.org/10.1029/2019MS001791

Siirila-Woodburn, E. R., Rhoades, A. M., Hatchett, B. J., Huning, L. S., Szinai, J., Tague, C., et al. (2021). A low-to-no snow future and its impacts on water resources in the western United States. Nature Reviews Earth and Environment, 2(11), 800–819. https://doi.org/10.1038/s43017-021-00219-y

Simpson, I. R., Tilmes, S., Richter, J. H., Kravitz, B., MacMartin, D. G., Mills, M., Fasullo, J. J. T., & Pendergrass A. G. (2019). The regional hydroclimate response to stratospheric sulfate geoengineering and the role of stratospheric heating. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124, 12587–12616. https://doi.org/10.1029/2019JD031093

Tilmes, S., Fasullo, J., Lamarque, J. F., Marsh, D. R., Mills, M., Alterskjær, K., ... & Watanabe, S. (2013). The hydrological impact of geoengineering in the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(19), 11-036.

Zhang, T., & Che, T. (2019). Soil freeze depth variability across Eurasia during 1850–2100. Climatic Change, 158, 453–469.

Zhong, W., et al. (2021). Historical evolution and future trend of Northern Hemisphere snow cover in CMIP5 and CMIP6 models. Environmental Research Letters, 16(6), 065013. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abff92Zhao, L., Yang, Y., Cheng, W., Ji, D., & Moore, J. C. (2017). Glacier evolution in high-mountain Asia under stratospheric sulfate aerosol injection geoengineering. Atmospheric Chemistry and Physics, 17(11), 6547–6564. https://doi.org/10.5194/acp-17-6547-2017.

Iranian Journal of Geophysics, Vol 20, No 4, 2026, P. 10 (Research article)
DOI: 10.30499/ijg.2026.578031.1758

Changes in the snow cycle in the northern hemisphere: a multimodel analysis of global warming scenarios and climate engineering

Shirin Ajabi [1*] and Abolfazl Rezaei[2]

[1] *M.Sc., Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran*
[2] *Associate Professor, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran*

(Received: 25 February 2026, Accepted: 25 July 2026)

Summary

Global warming has profoundly altered the global snow cycle, causing widespread reductions in snow cover, earlier snowmelt, and instability in seasonal timing. These transformations pose serious threats to water resources, food security, and ecosystem sustainability. In response, climate engineering particularly stratospheric aerosol injection (SAI), which mimics the cooling effects of large volcanic eruptions has been proposed as a potential complementary strategy to mitigate surface warming. This study evaluates the influence of the G6sulfur climate engineering scenario on key snow cycle variables, including surface snow mass, snowmelt flux, snow cover fraction, and snow depth. We analyzed outputs from six global climate models (CESM2-WACCM, CNRM-ESM2-1, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MPI-ESM1-2-LR, and UKESM1-0-LL) under the high-emission SSP5-8.5 scenario, both with and without the G6sulfur intervention. Future projections (2070–2099) were compared against baseline conditions (2015–2034). Under SSP5-8.5, snow variables exhibited significant declines: surface snow mass decreased by approximately 25%, snowmelt flux by 14%, snow cover fraction by 27%, and snow depth by 50%. Additionally, the timing of peak snow accumulation and melt shifted 1–2 months earlier relative to the baseline period. In contrast, the G6sulfur scenario substantially moderated these trends: snow mass loss was limited to ~11%, snowmelt flux to ~10%, snow cover decline to ~12%, and snow depth reduction to ~19%, while the temporal shift in peak occurrence was reduced to less than half a month. These findings demonstrate that climate engineering can effectively offset a portion of the adverse impacts of global warming on the snow cycle. However, climate interventions cannot fully reverse all hydrological changes, as residual warming and snowmelt dynamics continue to play a critical role in runoff generation at mid-to-high latitudes. Therefore, while SAI may serve as an effective complementary tool to partially restore hydrological conditions toward baseline levels, it cannot replace the primary strategy of reducing greenhouse gas emissions.

Keywords: Snow cycle, climate geoengineering, global warming, climate Models, stratospheric aerosol injection

[*] Corresponding author: ajabishirin@gmail.com