چکیده

دوران مربوط به پیشروی یخچال در اواخر دورهٔ کواترنر در عرض میانی (۵۵-۴۰ جنوبی) کمربند کوهستانی نیم‌کرهٔ جنوبی، در بحث پیوند از دور[1] آب و هوای جهانی، به‌طور جدی در کانون توجه محققان قرار گرفته است. براساس داده‌های یخچالی که از زلاندنو و جنوب آمریکای جنوبی به‌دست آمده‌اند، انطباق یا عدم انطباق بین نیم‌کره‌ای وقایع دوران یخچالی «کواترنر»[2] درنتیجهٔ تأثیرپذیری آب و هوای نیم‌کرهٔ شمالی از وقایع نیم‌کرهٔ جنوبی، از طریق سیستمهای اقیانوسی یا جوی، مورد بحث قرار داده است. در این‌جا الگوی تعادل توده‌های برف یخچالی را ارائه می‌دهیم که نشان می‌دهد مقیاس بزرگی از یخچال در کوههای معتدل مرطوب جنوب زلاندنو، می‌تواند با افت تدریجی دما شکل بگیرد. این به‌علت تغییر سریع بارش از باران به برف است که تودهٔ یخی عظیمی را در اثر تغییرات دمای کم (بین ۴-۱ درجه) به حرکت درمی‌آورد. الگویی که ما ارائه می‌دهیم، با بازسازیهای اخیر از محیط گذشته که پیشروی یا گسترش یخچال در زلاندنو را طی بزرگ‌ترین دورهٔ یخچالی[3] و بین‌یخچالی انتقالی اخیر[4] که در سرمای بسیار ملایم اتفاق می‌افتد، سازگار است. فرض می‌کنیم که چنین سرمای ملایمی می‌تواند با تغییراتی در مطالعهٔ آب و هوای سینوپتیک، به‌ویژه از طریق افزایش جریان رطوبت منطقه‌ای توده‌های هوای در حال حرکت به‌طرف غرب، ایجاد شود. بنابراین نتایج حاصل به‌طور ضمنی می‌رساند که تأثیرات اقلیمی نیم‌کرهٔ شمالی، تنها عامل محرک یخچالهای کواترنر در زلاندنو نبوده‌اند. بلکه نوع تغییرات آب و هوای سینوپتیک، توضیح بهتری برای حداقل پدیده‌های یخچالی کواترنر اخیر، به‌ویژه طی دورهٔ بین‌یخچالی انتقالی اخیر، ارائه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: تغییرات اقلیمی، دوره‌های یخبندان، عرضهای میانی.

مقدمه

نشانه‌های یخچال کواترنر در کمربند کوهستانی عرض نیم‌کرهٔ جنوبی، به‌ویژه در زلاندنو و جنوب آمریکای جنوبی، آزمایش مدلهای گذشته و حال ارتباط از دور اقلیم بین نیم‌کره‌ای را حائز اهمیت کرده است. چنین استدلال شده است که هم‌زمانی (انطباق) پیشروی یخچالهای گذشته، حاکی از تأثیر اقلیمی مستقیم بین نیم‌کره‌ای از طریق جو است؛ به‌طوری‌که عدم انطباق به‌عنوان ارتباط آب و هوایی از طریق انتقال‌دهندهٔ خط دمایی تفسیر شده است. توجه به این بحث براساس زمان‌بندی مطلق پیشرویهای یخچالی کواترنر در عرض میانی نیم‌کرهٔ جنوبی بوده است که به‌عنوان شاخصی برای تعیین سطح ارتباط کلی بین آب و هوای نیم‌کرهٔ شمالی به‌طور مجزا، و آب و هوای نیم‌کرهٔ جنوبی به‌کار برده شده است.

در سالهای اخیر، پیشرفت در «کیهان‌شناسی»[5] و پرتوافشانی اجسام[6] تکنیکهایی برای تعیین قدمت مستقیم یخچالهای سطح زمین و رسوباتی فراهم آورده است که در رشته‌کوههای عرض میانی نیم‌کرهٔ جنوبی قرار دارند. اولین نتایج به‌دست آمده از رشته‌کوههای آلپ جنوب زلاندنو و کوههای آند نیم‌کرهٔ جنوبی، به‌عنوان هم‌زمانی بین نیم‌کره‌ای آشکار از پیشرویهای یخچالی مربوط به بزرگ‌ترین دورهٔ یخچالی اخیر، ارزیابی شده است. هم‌چنین عنوان شده است که رویدادهای اقلیمی ویژهٔ دورهٔ بین‌یخچالی انتقالی اخیر دیده شده در منطقهٔ اقیانوس اطلس شمالی، می‌تواند ارتباط مستقیمی با پیشرویهای یخچالی کوهستانی در عرض میانی نیم‌کرهٔ جنوبی داشته باشد. پیش از این نیز چنین سطحی از هم‌زمانی در مورد الگوی تأثیرات جوی نیم‌کرهٔ شمالی در یخچالهای

یافته‌های جدید

تغییرات اقلیم

و نقش آن در یخبندان‌های اواخر دوره کواترنر در عرض‌های میانی نیمکره جنوبی

نیم‌کرهٔ جنوبی مطرح شده بود.

با وجود نشانه‌هایی از هم‌زمانی بین نیم‌کره‌ای معدودی از پیشرویهای یخچالی بزرگ‌ترین دورهٔ یخچالی و بین‌یخچالی انتقالی اخیر، هنوز تعبیر و برداشت اقلیم‌شناسان دیرینه از این داده‌ها چندان روشن نیست. در مورد زلاندنو شماری از بازسازیهای محیطی گذشته و استفاده از «غارها»[7] و گردآوری فسیل سوسکها نشان می‌دهد که سرد شدن بزرگ‌ترین دورهٔ یخچالی اخیر بسیار آهسته و احتمالاً کمتر از ۳-۲ درجهٔ سانتی‌گراد بوده است. کاهش ارتفاع خط تعادل[8] (ELA) از سرد شدن دمای هوا در حدود ۵-۴ درجهٔ سانتی‌گراد خبر می‌دهد. نتایج حاصل با محاسبات الگوی جریان عمومی هوا که دمای ۳-۲ درجه پایین‌تر از سطح دریا در «دریای تاسمانی»[9] جنوب استرالیا را طی بزرگ‌ترین دورهٔ یخچالی اخیر پیش‌بینی می‌کند، تأیید می‌شود، درحالی‌که بازسازیهای دمای سطح دریا، از سرد شدن تدرجی بیشتری در حدود دمای ۴ درجهٔ سانتی‌گراد خبر می‌دهد. خلاصه این‌که هیچ‌یک از این بازسازیها، سرد شدن بیشتر از ۷-۵ درجهٔ دما را در نیوزیلند طی بزرگ‌ترین دورهٔ یخچالی اخیر نشان نمی‌دهد. در حالی‌که پایان بازسازیها کاهش دمای شبیه تغییرپذیری سالانهٔ کنونی در ارتباط با پدیدهٔ «انسو»[10] و دیگر سیستمهای نوسانی را نشان می‌دهد.

در مورد دورهٔ بین‌یخچالی انتقالی اخیر، حداقل پیشروی یک یخچال برای کوههای آلپ جنوبی به اثبات رسیده است. به هر حال، این پیشروی دوباره در اصل به منطقهٔ «یانگر درایاس»[11] مربوط بوده است که نه به‌طور گسترده در گزارشات ثبت‌شدهٔ یخچال نیوزلند به آن پی برده‌اند و نه به‌طور جدی سرمای هم‌زمانی معنی‌داری از «گرده‌افشانی»[12] یا دیگر گزارشات «دیرین‌شناسی محیطی»[13] در آن ظاهر شده است. گزارشات گرده‌افشانی زلاندنو، توقف یا وارونگی دمایی سریع یخچالی را تنها بین $cal.c^{14}_{ka}$ ۱۴/۶-۱۳/۶ نشان می‌دهد، درحالی‌که گرم‌شدن طی دوران بعد از زمان‌بندی منطقه‌ای «یانگر درایاس» ادامه داشته است (۱۲/۷-۱۱/۵Ka).

علیرغم ادامهٔ بحث دربارهٔ تعیین زمان دقیق وقوع پدیده‌های فوق‌الذکر و ارتباط پیشرویهای یخچالی در بزرگ‌ترین دورهٔ یخچالی و بین‌یخچالی انتقالی اخیر در زلاندنو، بسیاری از داده‌های دیرین‌شناسی محیطی مستدل به نظر می‌رسند. با وجود این، تأیید پیدایش گسترهٔ یخچالی قابل توجه تنها هم‌زمان با سرمای معتدل، بسیار دشوار بوده است. این موضوع معنای وسیع‌تری پیدا کرده است، چون ابهام مشابهی را در بحث دورهٔ بین‌یخچالی انتقال اخیر در جنوب آمریکای جنوبی با صاحب‌نظرانی که نظریهٔ سرما یا فقدان وجود آن را طی این دوره ارائه داده‌اند، مطرح کرده است.

در این مجموعه، الگوی تعادل تودهٔ برف کوههای آلپ جنوب زلاندنو ارائه می‌شود تا حساسیت تودهٔ یخچالی نسبت به تغییرات دمایی، سنجیده شود. با چنین آزمایشی بررسی می‌شود که آیا آشکار شدن تقدم و تأخر یخچالی و گزارشات دیرین‌شناسی محیطی زلاندنو با واقعیت سازگار است یا نه، و آیا حداقل تأثیرات دمایی برای گسترش کامل یخچال در کوههای آلپ جنوبی کافی است. این پرسش ابعاد وسیع‌تری نیز دارد، چون براساس چنین طرحی باید دید، بعضی پیشرویهای یخچالی کواترنر در زلاندنو طی بزرگ‌ترین دورهٔ یخچالی اخیر، با استناد به مناطقی از آمریکای جنوبی، تنها با تغییرات اقلیمی سینوپتیک به‌وجود

می سینوپتیک

اچ رادر و جی شلمیستر

استاد علوم زمین دانشگاه کانتربری، نیوزیلند

H. Rother and J. shulmeister

ترجمه:

دکتر محمود خسروی، عضو هیئت علمی دانشگاه سیستان و بلوچستان

کاظم پارسیانی، کارشناس ارشد جغرافیای طبیعی و دبیر آموزش و پرورش

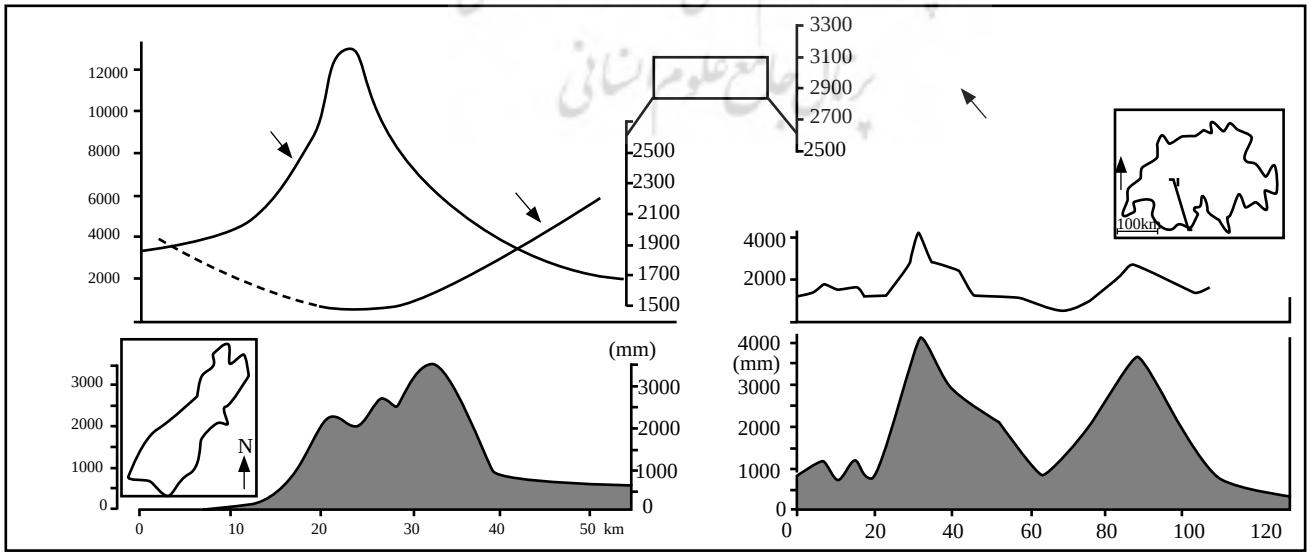
اقلیم این منطقه به‌طور اساسی تحت‌تأثیر جهت شمالی‌شرقی‌ـ جنوب‌غربی کوههای آلپ جنوبی (۴۱-۴۶ درجهٔ جنوبی) قرار گرفته است

آمده‌اند یا آنها را باید به تأثیرات اقلیمی ناشی از وقایع دورهٔ بین‌یخچالی انتقالی اخیر نیم‌کرهٔ شمالی مربوط بدانیم.

موقعیت ناحیهٔ مورد مطالعهٔ یخچال: زلاندنو

زلاندنو در کمربند بادهای غربی نیم‌کرهٔ جنوبی واقع شده است و با آب و هوای اقیانوسی توصیف می‌شود. اقلیم این منطقه به‌طور اساسی تحت‌تأثیر جهت شمالی‌شرقی‌ـ جنوب‌غربی کوههای آلپ جنوبی (۴۱-۴۶ درجهٔ جنوبی) قرار گرفته است که مانعی کوهستانی با ارتفاع سه‌هزار متر بلندی در مسیر جنوبی اقیانوس به‌طرف غرب ایجاد می‌کند. به علت تأثیر ارتفاع و جهت کوهستانها بر توده‌های هوای مرطوب غربی، مرکز کوههای آلپ جنوبی جزو مرطوب‌ترین نواحی سیارهٔ زمین است. بارش سالانهٔ مجاور مرز ناهمواریهای یخچالی به‌طور معمول بیشتر از ۹ هزار میلی‌متر، و با حداکثر حجم مشاهده شده حدود ۱۶ هزار میلی‌متر است. نکتهٔ بسیار مهم برای موقعیت منطقهٔ مورد مطالعهٔ یخچال، پراکندگی بارش در تقاطع ناهمواری است که نشان‌دهندهٔ منطقهٔ کم‌عرض با رطوبت بالاست و در تمام طول کوههای آلپ جنوبی کشیده می‌شود. تقریباً تمام ۳۱۰۰ یخچال موجود در زلاندنو در این منطقه قرار گرفته‌اند. یخچالهای تمام محیطهای مرطوب به‌طور کلی با عنوان سیستمهای یخی جابه‌جا شدهٔ مرتفع با توازنهای توده‌ای مثبت و منفی بزرگ، و یخچالهای با سرعت جریان بالا و زمانهای عکس‌العمل آب و هوایی نسبتاً کوتاه شرح داده شده‌اند.

ارتفاعات خط تعادل یخچال در کوههای آلپ جنوبی، دقیقاً تفاوت شیب بارش در جهت رو به باد را که باعث می‌شود میزان شیب ارتفاع خط تعادل در زلاندنو بیشتر از ۲۰ بار شدیدتر از نواحی قطبی و جنب قطبی گزارش شود، نشان می‌دهد. با وجود موقعیت ممتاز منطقهٔ مورد مطالعه، مطالعات یخچالهایی از دوران کواترنر از کوههای آلپ جنوبی، غالباً به‌طور مستقیم با شواهدی از کمربند کوهستانی دیگر عرضهای متوسط، مخصوصاً با کوههای آلپ اروپا ثبت شده است. مقایسهٔ شاخصهای یخچال اصلی دو رشته کوه (شکل ۱) نشان می‌دهد که علی‌رغم ارتفاعات بیشتر از حد متوسط کوههای آلپ اروپا، این مناطق تنها سه‌چهارم حجم بارش کوههای زلاندنو را دریافت می‌کند، درحالی‌که توزیع پراکندگی آن بسیار یکنواخت است. فشار شدید ناشی از ارتفاع خط تعادل، پیامد مستقیم رطوبت بیش از حد در مرکز رشته‌کوههای آلپ جنوبی است که به‌طور کلی ارتفاع آن حدود هزار متر کمتر از رشته‌کوههای آلپ اروپاست. این تفاوتها در شرایط طبیعی معانی مهمی برای ساختارهای تودهٔ یخچالی و اشکال حاصل از یخچالها در این دو رشته‌کوه دارند.



شکل ۱

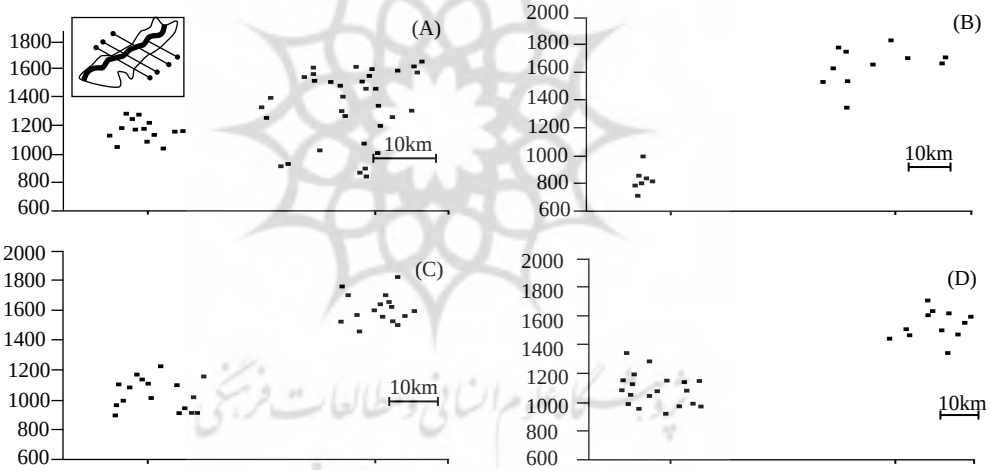
به‌علت این‌که موقعیت ناحیهٔ مورد مطالعه یخچال در زلاندنو اساساً مربوط به تعامل بین رشته کوههای آلپ جنوبی و کمربند بادهای غربی است، مطالعات الگوهای قدیمی جریانهای منطقه برای بازسازی شرایط اساسی یخچالهای پیشین بسیار مهم است. شواهد، بالا آمدن آب اقیانوس شرق زلاندنو و افزایش جریان گرد و غبار را، به‌طور کلی به ثبات و قدرت جریان رو به غرب، طی بزرگ‌ترین دورهٔ یخچالی اخیر نسبت داده‌اند. هم‌چنین طبق شواهد، نوسان سطح آب ناشی از ذوب و انجماد یخچالی، مربوط است به کوههای آلپ جنوبی که به‌طور منظم تأثیر ارو گرافیک رطوبت توده‌های هوای رو به غرب را تشدید می‌کنند. احتمال می‌رود که مسیر شیبهای رو به بادهای شدید در بارش و ارتفاع خط تعادل روی کوههای آلپ جنوبی، طی دوران مربوط به کواترنر دست نخورده باقی مانده باشد. چنین شرایطی را می‌توان با بازسازی ارتفاعاتی که خط تعادل گذشته از بلندیهای کف سیرک یخچالی که در مقایسه با غرب و مرکز رشته کوههای آلپ شرقی مطابقت دارد، به‌دست آورد (شکل ۲).

نتایج حاصل نشان می‌دهد با وجود براورد کاهش ارتفاع خط تعادل به میزان تقریباً ۸۰۰ متر، مسیر پر شیب این ارتفاعات در گذشته در طول یخچال قدیمی ثابت مانده است.

به‌طور خلاصه، ترکیبی از رطوبت زیاد و مسیر پر شیب ارتفاع خط تعادل قدیمی طی یخبندانهای اواخر دورهٔ کواترنر، باعث شکل‌گیری تودهٔ یخچالی ویژه در زلاندنو شده است. نخست سطوح بسیار بلند بارش برف در منطقهٔ وسیع ۳۰-۱۵ کیلومتری مجاور خط حائل آلپی روی می‌دهد که با کم‌ترین وسعت ارتفاع خط تعادل مطابقت دارد، و دوم این‌که به‌واسطهٔ تأثیرات باران بادپناهی[۱۴] و نیز به‌علت این‌که ارتفاع خط تعادل حدفاصل شرقی را به شدت افزایش می‌دهد، مناطق آلپی که دارای فاصلهٔ کمی از این خط حائل هستند، میزان برف بسیار کمتری دریافت می‌کنند و تنها بلندترین قله‌ها، کمربند برفی سالانه را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند. این نتایج به شکل‌گیری یک الگوی یخچالی منجر می‌شود که در آن، مقیاس بزرگی از تودهٔ یخ در منطقه‌ای کم‌عرض اما بسیار مرطوب در کوههای آلپ مرکزی متمرکز شده است، در حالی‌که نقش همهٔ‌مناطق دیگر در سراسر تودهٔ یخچالی کوههای آلپ جنوبی، از درجهٔ اهمیت کمتری برخوردار بوده است.

اثرات دما بر تعادل تودهٔ برف در کوههای آلپ جنوبی

در کوههای آلپ جنوبی دامنهٔ ارتفاعات خط تعادل بین ۲۱۰۰-۱۵۰۰ متر است. در این ارتفاعات دمای هوا به‌طور نگران‌کننده‌ای به‌مدت قابل



شکل ۲

نتایج حاصل نشان می‌دهد با وجود براورد کاهش ارتفاع خط تعادل به میزان تقریباً ۸۰۰ متر، مسیر پر شیب این ارتفاعات در گذشته در طول یخچال قدیمی ثابت مانده است

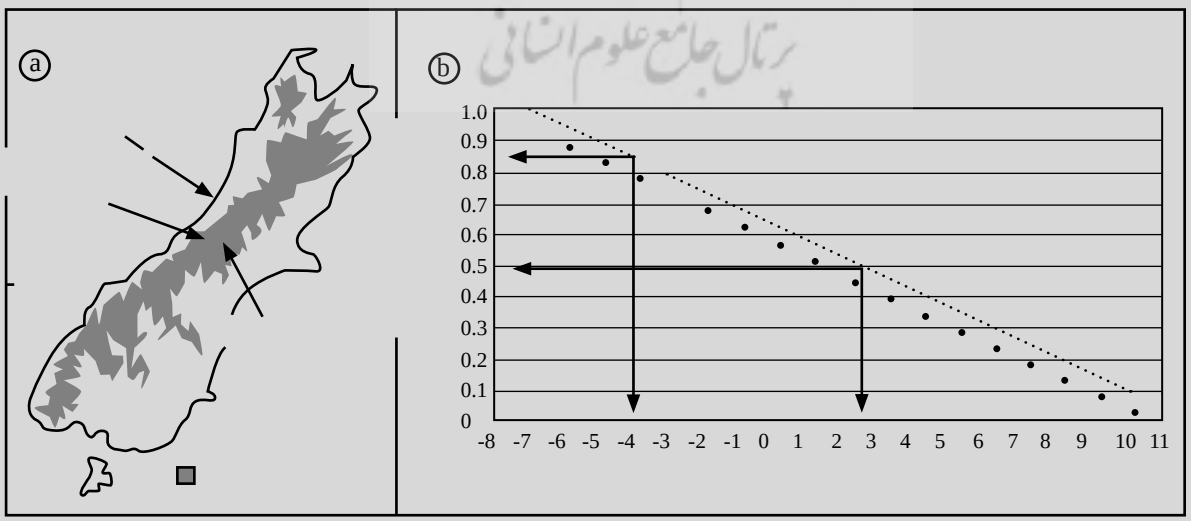
برای بررسی اثرات دما در انباشت تودهٔ یخچالی پر رطوبت در کوههای آلپ جنوبی، از «الگوی تعادل تودهٔ برفی» استفاده شده است

توجهـی بالاتر از دمای انجماد باقـی می‌ماند. این یعنی بخش مهمی از بارش عظیم سـالانه در ارتفاع خط تعـادل و اطراف آن، به‌صورت باران اسـت. اگر آب و هوا بدون تغییرات سـینوپتیکی سرد شود، منبع برفی کلانی پدید می‌آید. در مقایسه با کوههای آلپ اروپا، ارتفاعات خط تعادل کنونی به‌طور متوسط ۱۰۰۰ متر (۳۵۰۰-۲۵۰۰ متر) بلندتر هستند و دمای هوای مشابه برای بارش باران بسیار سردتر از آن است که به شکل باران ببارد تا سـهم مهمی را از بارش سالانه در ارتفاع خط تعادل شکل دهد (شکل ۳b).

برای بررسـی اثرات دما در انباشت تودهٔ یخچالی پر رطوبت در کوههای آلپ جنوبی، از «الگوی تعادل تودهٔ برفی» استفاده شده است.[۱۵] این الگو، کل انباشت برف سالانه را برای شرح مختصر سرمای متغیر (بین ۱- تا ۹- درجه در میانگین t) با تحلیل دمای مرتبط با تغییرات نسبت باران- برف، کل بارش سالانه و میزان ذوب برف محاسبه می‌کند.

این داده‌ها برای مرکز منطقهٔ آلپی که بسیار مرطوب و دارای ارتفاع خط تعادل ۱۶۰۰ متر و بارش سـالانهٔ کل ۹۰۰۰ میلی‌متر اسـت، محاسبه شده است (شکل ۳-a). سراسـر نمودار توپوگرافی وضعیت ارتفاع خط تعـادل و مقدار بارش سـالانه در این منطقه، شـرایط معتدلی را برای قسـمتهای وسـیعی در کوههای آلپ مرکزی ارائه می‌دهـد. داده‌های دمایـی به‌کار رفتـه در این الگو از نزدیک‌ترین ایسـتگاه اقلیمی گرفته شـده است و با استفاده از «افتاهنگ محیطی استاندارد»[۱۶]، شش درجهٔ سانتی‌گراد در هر کیلومتر به بلندی ارتفاع خط تعادل تبدیل شده است. تغییرات مربوط به سـرما، در انباشـت کلی بـرف در ارتفاع خط تعادل ۱۶۰۰ متر، جایی که میزان جریان تودهٔ برفی صفر است، محاسبه شده و سپس دماهای متوسط به‌طور فزاینده‌ای کاهش داده شده‌اند تا امکان سرد شدن جوی به‌وجود آید.

بررسی نسـبت برف از بارش کل برای کوههای آلپ جنوبی امکان‌پذیر



شکل ۳

مازاد مقدار عظیمی از برف اضافی ناشی از تبدیل برف‌ـباران، تأثیر شگرفی روی میزان تودهٔ برف در محیطهای بسیار مرطوب دارد

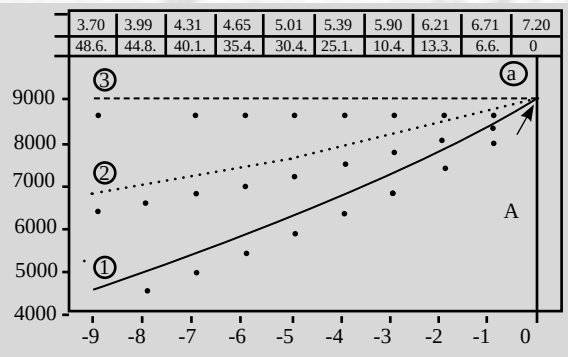
نیست، اما نشان داده شده است که نسبت برف کاملاً به میانگین دمای ماهانه بستگی دارد. برای محاسبهٔ نسبت برف از میزان بارش کل، از عملکرد پسرفت تودهٔ برفی که به‌طور تجربی از ۳۲ ایستگاه در کوههای آلپ سوئیس گرفته‌ایم، استفاده کرده‌ایم. نتایج نسبت برف به‌دست آمده از کوههای آلپ جنوبی در مورد تغییرات فصلی در بارش، با کاربرد میانگینهای وزنی از بارش ماهانهٔ مشاهده شده در نزدیکی «یخچال ایوری»[۱۷] مطابقت داشت. در ارتفاع خط تعادل ۱۶۰۰ متر، میانگین دمای سالانهٔ ۲/۳ درجه با دامنهٔ‌دمای ماهانه، از ۲/۱- درجه در ماه جولای، به ۶/۴ درجه در ماه فوریه است. این نتایج نشان می‌دهد که در این ارتفاع، ۴۹/۲ درصد (۴۴۳۰ میلی‌متر آب هم‌ارز) از بارش سالانهٔ کل ۹۰۰۰ میلی‌متر آن به‌صورت برف است. درحالی‌که ۵۰/۸ درصد (۴۵۷۰ میلی‌متر) بارش به‌صورت باران است. این منبع، برف اضافی فوق‌العاده‌ای را فراهم می‌آورد. یعنی به‌ازای هریک درجهٔ سانتی‌گراد سرما، در میانگین دمای ماهانه، درصد برف به‌عنوان بخشی از بارش، حدود ۵/۵ درصد رشد می‌یابد (شکل ۳- b).

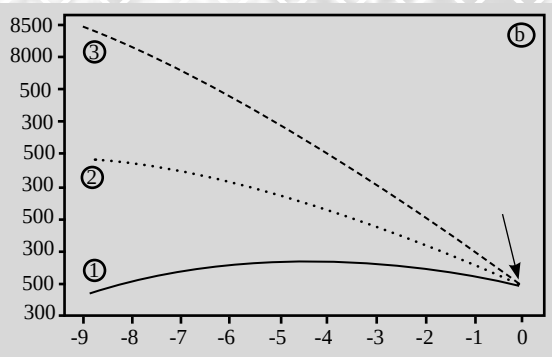
امکان دارد که سرمای جوی، مقدار کل بارش سالانه‌ای را که کوههای آلپ جنوبی دریافت می‌کنند، تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. درحالی‌که بعضی محققان اظهار می‌دارند که رطوبت تا حدی طی دوران یخبندان کاهش یافته است. در حال حاضر هیچ اطلاعات قدیمی باارزشی در مورد بارش منطقهٔ زلاندنو مبنی بر سرد شدن دمای هوا در بزرگ‌ترین دورهٔ یخچالی و بین‌یخچالی انتقالی اخیر وجود ندارد. به‌طور کلی، بارش از طریق سازگاری با تغییرات فشار بخار اشباع تودهٔ هوا، تبخیر و تفاوت در مسیر و سرعت انتقال جوی واکنش نشان می‌دهد. به‌منظور نمایش ارتباط کلی بین بارش، دما، نسبت برف، باران و تودهٔ برف در منطقهٔ زلاندنو، از سه شرح سادهٔ بارش برای محاسبهٔ میزان حجم بارش ممکن استفاده کرده‌ایم (شکل ۴- d).

در شرح ۱ فرض می‌شود که سرد شدن دما با کاهش بارش سالانه مرتبط است و تقریباً کاهش غیر خطی دما به تغییرات فشار بخار اشباع تودهٔ هوا وابسته است. در این شرح اجمالی، کاهش باران از طریق تغییر فشار بخار اشباع که برای براورد ظرفیت رطوبت جو، جایی که کاهش دمایی تا ۵- درجه، رطوبت سراسری را تقریباً ۳۰ درصد کاهش می‌دهد، شرح داده شده است. در شرح ۲ که شرح ۱ و ۳ مکمل آن در کاهش بارش سالانه محسوب می‌شوند، جایی مطرح می‌شود که بارش کل در سطح کنونی، حتی تحت شرایطی که هوا به‌طور فزاینده‌ای سرد می‌شود، باقی می‌ماند. شرحهای مذکور تنها با هدف مطالعهٔ این الگو طراحی شده‌اند و واکنش عینی بارش در سرمای یخبندان گذشته در زلاندنو را به‌طور دقیق ترسیم نمی‌کنند. به‌هرحال این شرحها منحصراً براوردهای کلی ارائه شده از بارش و یخبندان گذشته را پوشش می‌دهند.

شکل ۴-b، کل بارش برف سالانه را برای شرایطی که هوا به‌طور فزاینده‌ای سردتر می‌شود، نشان می‌دهد. همان‌طور که محاسبه شده شرح‌های مربوط به بارش با نسبت برف، باران شدید توأم می‌شود و همان‌طور که انتظار می‌رفت، کل بارش برف بستگی شدیدی به بارش سالانه‌ای دارد که به‌عنوان الگو ارائه شده است. داده‌ها به‌طور کلی دو رویهٔ جبرانی را طی دورهٔ سرما منعکس می‌کنند. نخست تداوم در افزایش نسبت برف در بارش کل، و دوم کاهش دمای وابسته به کاهش بارش کل (شرح ۱ و ۲).

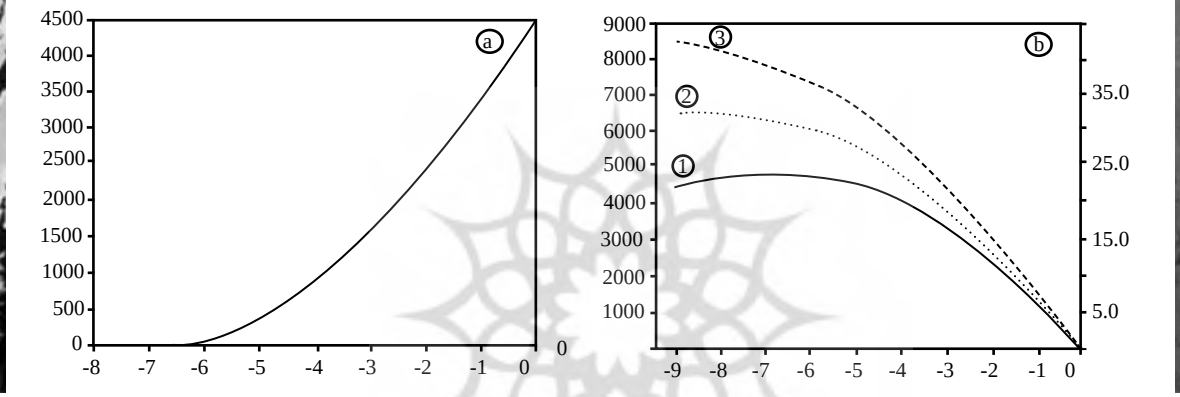
نتایج حاصل حاکی از آن است که مازاد مقدار عظیمی از برف اضافی ناشی از تبدیل برف‌ـ باران، تأثیر شگرفی روی میزان تودهٔ برف در محیطهای بسیار مرطوب دارد. حتی اگر بارش سالانه به‌طور اساسی کاهش پیدا کند، بارش برف افزایش خواهد یافت (شرح ۲) یا با ارتفاع زیادی بر جای خواهد ماند (شرح ۱). اگر شرایط جوی نمناک‌تر باشد (شرح ۳)، همان‌طور که بارش کل در همان ارتفاع زیاد باقی می‌ماند، بارش برف نیز به‌طور وسیع گسترش پیدا می‌کند. کل بارش برف سالانهٔ پیش‌بینی‌شده برای ارزیابی وزن خالص بارش برف سالانه، باید با ذوب





شکل ۴

شکل ۵



شکل ۵

آن ارتباط داشته باشد. ذوب برف را با استفاده از تعادل تودهٔدرجه‌ـ روز محاسبه کردیم؛ الگویی که در میانگین دماهای روزانه به‌عنوان شاخص کامل تنظیم گرما ارائه شده است؛ جایی که فرض شده، ذوب شدن به‌طور نسبی در میانگین دمای هوا اتفاق می‌افتد. الگوهای تعادل تودهٔ درجه‌ـ روز کاملاً تحت شرایط میدانی آزمایش شده‌اند؛ جایی که آنها پیش‌بینی ذوب‌شدن را با اعتبار زیادی ثابت کرده‌اند. فرمول مورد استفاده از این قرار است:

$$a(z)=Kt_{(sum)} \qquad (z)+H_s \ / \ , T>O^{oc}$$

که ذوب شدن (a) برای ارتفاع (z)، با به‌کار بردن میانگین مجموع دماهای روزانهٔ مثبت T(SUM) در Z محاسبه می‌شود. روزهای با دمای مثبت در K که شاخص تجربی برگرفته از مضرب درجه- روز است، ضرب می‌شود. ما ضریب درجه- روز ۴/۵ میلی‌متر ۱- روز و ۱- درجه، همان‌طور که از «یخچال فرانس جوزف»[۱۸] در مرکز کوههای آلپ جنوبی گرفته شده است، استفاده می‌کنیم. H_s ذوب شدن ناشی از گرمای نهان (باران روی برف) است که تقریباً ۲۰ درصد از ذوب سالانه در کوههای آلپ جنوبی را به خود اختصاص می‌دهد. ما این الگو را با ذوب پیش‌بینی شده در ارتفاع خط تعادل کنونی که بارش برف سالانهٔ آن ۴۴۳۲ میلی‌متر است، آزمایش کردیم، اما انباشت وزن خالص اتفاق نیفتاد (تعادل توده صفر بود). این الگو، ذوب ۴۳۵۹ میلی‌متر را که تنها ۱/۷ درصد است، نشان می‌دهد. نمودار a-۵ چگونگی کاهش ذوب را در ارتفاع خط تعادل تحت سرمای شدیدب از ۴۴۳۲ mm/a (در شرایط دمای کنونی) را نشان می‌دهد، تا این‌که عملاً در دمای ۶/۵- درجه متوقف شود.

ما تمام پارامترهای تحلیل‌شدهٔ قبلی را (نسبت برف- باران، بارش کل و ذوب برف) ترکیب کردیم تا تراکم خالص برف در کوههای آلپ مرکزی در شرایط کاهش دمای فزاینده را پیش‌بینی کنیم. نتایج مشاهدات در نمودار b-۵ نشان داده شده که صفر درجهٔ سلسیوس شرایط اقلیم کنونی در ارتفاع خط تعادل، بدون انباشتگی خالص است. این انباشتگی برف در کوههای آلپ جنوبی پاسخ بسیار دقیقی برای معتدل شدن سرماست. انباشت برف به‌طور شگرفی طبق همهٔ توضیحات ارائه شده از بارش، حتی زمانی که رطوبت کلی به‌طور اساسی کاهش می‌یابد، افزایش پیدا می‌کند. مشخصهٔ جالب توجه، افزایش شیب گزارش شده برای اولین دورهٔ کاهش دما (۴-۱ درجه) است که انباشت برفی به‌طور قابل ملاحظه‌ای عمدتاً از طریق تغییر سریع از باران به برف افزایش می‌یابد. کاهش دمای ۳-۲ درجه در ارتفاع خط تعادل کنونی، به افزایش سالانهٔ خالص تقریباً ۱۵ متری ارتفاع برف منجر می‌شود (نمودار b-۵).

یخچالهای دورهٔ کواترنر و پایین آمدن تدریجی و به‌هم پیوستهٔ سطح دریا، ارتفاع نسبی کوههای آلپ جنوبی، هم‌چون مانعی برای رطوبت توده‌های هوای غربی، افزایش بیشتری یافته است

جالب اســت که افزایش ارتفاع به‌طور کلی با کاهش شدیدتر دما، روند آرامی را درپیش می‌گیرد. برای بارش شرح ۱ (برگرفته از تغییرات فشار بخار اشباع)، رویهٔ انباشت برف، حتی در سرمای حدود ۶- درجهٔ زمانی که انباشــت سالانهٔ‌خالص شــروع به کاهش می‌کند، تغییر می‌یابد. این تأثیر به‌واســطهٔ تناســب ارتفاع برف در کاهش دمــا و توقف مؤثر ذوب شــدن بعد از کاهش پیوستهٔ بارش کل ســالانه، انباشت خالص را وادار به کاهش می‌کند.

نتیجه‌گیری

بارش کوهســتانی ســنگین در مناطــق مرکزی طولانــی (تقریباً ۸۰۰ کیلومتر) امــا کم‌عرض (تقریباً ۸۰ کیلومتــر) کوههای آلپ جنوبی، به بیشتر شدن مقدار شیب در مسیر ارتفاع خط تعادل یخچال روی زمین منجر شــده اســت. طی یخچالهای دورهٔ کواترنر و پایین آمدن تدریجی و به‌هم پیوستهٔ سطح دریا، ارتفاع نسبی کوههای آلپ جنوبی، هم‌چون مانعی برای رطوبت توده‌های هوای غربی، افزایش بیشــتری یافته است و جهت شیب‌های ارتفاع خط تعادل حفظ شده یا حتی پرشیب‌تر شده اســت. ارتفاع خط تعادل بازسازی‌شــدهٔ گذشــته بر این دلالت دارد که تــودهٔ یخی طی بزرگ‌ترین دورهٔ یخچالی اخیر در کوههای آلپ مرکزی پررطوبت به‌وجود می‌آید. این شــرایط، گســترده‌های یخی وســیع یا احتمالاً کلاهک باریکی به‌وجود آورده است که منطقهٔ بسیار مرطوب وســیعی حدود ۳۰ کیلومتر نزدیک حد فاصل آلپی را تحت پوشــش قرارداده‌اســت.

یخچالهــای دره‌ای از منطقهٔ ابناشــتی آلپ مرکزی، به‌طور متوســط ۷۰-۵۰ کیلومتر تا پایان بزرگ‌ترین دورهٔ یخچالی اخیر آنها توســعه یافته‌انــد. داده‌های مربــوط به تعادل تودهٔ برفی نشــان می‌دهند که انباشــت یخچــال در کوههای آلــپ جنوبی، به تغییــرات دمایی کم حســاس اســت. کاهش دمای متوســط (۴-۲ درجه) بــرای افزایش چشــم‌گیر بارش برف کافی است که در یک چشــم برهم‌زدن باعث تعــادل تــودهٔ یخچالی می‌شــود. اگر ایــن کاهش دمــا تحت بارش ۸۰۰۰-۵۰۰۰ میلی‌متر حفظ شود، منجر به پیشرویهای یخچالی در مقیاسهای ثبت شده برای بزرگ‌ترین دورهٔ یخچالی اخیر می‌انجامند. حساسیتهای بالای سیســتمهای یخچالی در زلاندنو، اساساً از طریق رطوبت شــدید و سطح کم و به‌هم پیوســتهٔ ارتفاع خط تعادل که با مناطق انباشت یخچال کنونی در جنوب کوههای آلپ مطابقت دارد، باعث دریافت مقدار زیادی باران می‌شــود؛ همان‌طور که بیشــترین بــارش فصلی طی فصلهای پاییز و بهــار خنک‌تر به‌وجود می‌آید. این وضــع تبدیل باران به برف را به‌ســرعت تحت‌تأثیر قــرار خواهد داد. بدین‌طریــق، تنها به متعادل‌کردن ســرمای شــدیدتر نیــاز داریم تا تبدیل باران-برف کامل شــروع شــود.

پی‌نوشت

1. teleconnecection
2. Quaternary
3. The last Glacial Maximum
4. The last interglacial Transition
5. cosmogenic
6. luminescence
7. speleothems

۸. ارتفــاع خــط تعادل، تــودهٔ یخچال را از مناطق ذوب‌شــدهٔ اطراف جــدا می‌کند و ارتفاعی اســت که تعادل تودهٔ یخچالی صفر را ارائه می‌دهد. عوامل اصلی که موقعیت ارتفــاع خط تعــادل را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند، بارش و میانگیــن دما در دورهٔ زمانی طولانی است.

9. Tasman sea
10. ENSO
11. Yanger Dryas
12. Pollen
13. Paleoecological
14. rainshadow

۱۵. جزئیات کامل مدل مورد نظر در ضمیمهٔ بارگاه سایت: www.climate-past.net قابل دست‌رسی است.

16. Standard Environmental Lapse rate
17. Ivory Glacier
18. Franz Joseef Glacier

منبع

http:www-clim-past.net