مغزه‌های یخی
رمزگشای رازهای اقلیم گذشته

زهرا صمدی، دانشجوی دکترای اقلیم‌شناسی دانشگاه تهران
سعید جوی‌زاده، کارشناس ارشد اقلیم‌شناسی

چکیده:

درک سیستم زمین و بویژه اقلیم آن، یکی از دغدغه‌ها و چالش‌های فکری عمده در مقابل دانشمندان است. فرایندهای تأثیر اقلیم، مکانیزم‌های عمل‌کننده و واکنش‌های آنها، به نسبت اهمیت آنها پیچیده بوده و کمتر درک می‌شوند. از آنجایی که گزارشات ناشی از فرایندهای اقلیمی در سال‌های اخیر تاریخ زمین، صرفاً متأثر از دخالت‌ها و فعالیت‌های انسانی در طبیعت بوده است، گزارش‌های مربوط به اقلیم در گذشته برای پیشرفت درک علمی سیستم‌های اقلیمی محلی، منطقه‌ای و جهانی حائزاهمیت فراوانی می‌باشد. در این زمینه، مغزه‌های یخی بیشترین توان تجزیه و تحلیل و بررسی جو گذشته را فراهم می‌کند که در این مقاله به تجزیه و تحلیل آن به عنوان راهنمایی جهت نتیجه‌گیری از اقلیم در گذشته پرداخته شده است .

واژه گان کلیدی: سیستم زمین، اقلیم، مغزه یخی، اقلیم گذشته، تغییر اقلیم

مقدمه

در طی چند دهه گذشته، محققان وجود سیستم اقلیمی را در روی زمین تأییدکرده‌اندکه باترکیب پیچیده مشخص شده است. خورشیدو تمامی قسمت‌های زمین (اقیانوس‌ها، جو، توده‌های خشکی، برف و توده‌های یخ، تمامی حیات و درون زمین) قسمت‌هایی از این سیستم هستند. تغییر در هر قسمت روی تمامی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

بخش‌های دیگراثرگذاشته و در نهایت باعث تغییر اقلیم می‌گردد. در واقع تغییرات اقلیم یک فرایند متوالی است[۹] که معمولاً با زمان و طول مقیاسی که در آن اتفاق می‌افتند، توصیف می‌شوند[۱۵]. با آنالیز آرشیوهای اقلیمی دوران گذشته می‌توان سه نوع تغییرات را تشخیص داد[۲۳]:

۱- افت و خیزهای[1] طبیعی حول و حوش یک وضعیت میانه مانند هولوسن [۲۲]. تغییراتی از این نوع مانند نوسان جنوبی النینو[2](ENSO) و نوسان اطلس شمالی[3] (NAO) [۲۷] با زمان خاص و طول مقیاسی به ترتیب با ۱۵-۳ سال و $۱۰^{۷}$- $۱۰^{۶}$ متر است.

۲- تسلسلی از تغییرات ناگهانی در طی آخرین یخبندان شامل حوادث دانسگارد- اوسجر[4](D/O) [۱۶]، حوادث هاینریچ[5][۷] و پایان عصرهای یخ[۶] و زمان خاص و طول مقیاسی به ترتیب با ۱۰۰-۳ سال و $۱۰^{۶}$ متر برای جهان که اختلاف عمده آن با نوع اول، دامنه تغییرات بسیار بزرگتر آنها می‌باشد.

۳- تغییرات آرام که احتمالاً بوسیله تغییر در پارامترهای مدار زمین ایجاد می‌شود. تئوری میلانکوویچ یکی ازبنیادهای فکری واستنباطی دانشمندان از عصریخی کواترنری است[۱۰] گرچه سوالات مهمی هنوز بدون جواب مانده‌اند. مقیاس‌های زمانی خاص آن ۲۰۰۰۰، ۴۰۰۰۰، ۱۰۰۰۰۰ و ۴۰۰۰۰۰ سال بوده و تغییرات در سطح جهانی می‌باشد.

---

[1]- Fluctuations
[2] - El Nino Southern Oscillation(ENSO)
[3] - North Atlantic oscillation(NAO)
[4] - Dansgaard/oeschger
[5] - Heinrich Events

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

بدین‌ترتیب محیط طبیعی در گذشته در سطوح مختلف (محلی، منطقه‌ای، جهانی) تغییر داشته و در آینده نیز تغییر می‌کند. چنین تغییرات محیطی (از آرام و تدریجی گرفته تا سریع و ناگهانی) می‌تواند اثرات منفی بر روی بسیاری از نواحی جهان بگذارد. تغییرات در آینده نزدیک می‌تواند در اثر تغییرپذیری طبیعی اقلیم (که بیش ازچندمیلیون‌سال‌گذشته باعث توالی‌دوره‌های سردوگرم، دوره‌های یخچالی- بین‌یخچالی) شده است و تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسان در ترکیبات جوی (بویژه در گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسیدکربن (Co_2) ، متان(CH_4) و ترکیبات نیتروژن (NO_2) و گیاهان، هر دو باشد. در صورتی که بخواهیم اثرات نامساعد چنین تغییراتی را از طریق برنامه‌ریزی و سیاست‌های طولانی‌مدت کاهش دهیم، تغییرات محیطی موردانتظار در طی چند دهه (یا چند قرن) آینده بایستی با دقت بیشترومفصل‌تر ازآنچه امروزه تصور می‌شود، پیش‌بینی گردد. این امر نیاز به درک تعامل پیچیده بین عوامل تعیین‌کننده اقلیم (میزان تابش دریافتی، جو، اقیانوس، بیوسفر و یخ کره) دارد [۹، ۱۱، ۱۹، ۲۳، ۲۶]. اندازه‌گیری سیستماتیک پارامترهای اقلیمی (مثلاً دمای هوای سطح و فشار سطح دریا) تقریباً به ۱۵۰ سال پیش برمی‌گردد، درست زمانی که در طی آن غلظت CO_2 جوی به بیش از سطح ماقبل صنعتی‌شدن رسید و اولین اثرات انسانی بر روی سیستم اقلیم قابل‌شناسایی گردید [۱۳] . با گسترده‌ترکردن مقیاس زمانی به گذشته، دستیابی به اطلاعات ذخیره شده در آرشیوهای اقلیمی گذشته ضروری است[۵] زیرا اینها سیستم محیطی هستند که قادر به حفظ اطلاعات پارامترهای محیطی در گذشته می‌باشند و بطور خاص دارای سیستمی هستند که در آن مواد بطورپیوسته رسوب می‌کنند مانند حلقه‌های رشد سالیانه مرجانی[1] یا

[1] - Annual Growth Rings of Coral

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

حلقه‌های درختی[1]، گرده‌های گیاهی[2]، رسوبات دریاچه‌ها یا اقیانوس[3] و یا رسوبات برف بر روی پوشش یخ دائمی مناطق قطبی یا عرض‌های جغرافیایی بالا.

ازآنجایی که اطلاعات محیطی اغلب بصورت کدگذاری‌شده‌درچنین آرشیوهایی موجود است، تکنیک‌های خاصی برای ترجمه متغیرهای اندازه‌گیری شده، بایستی ایجاد شده و توسعه یابد [۲۳].

شواهد مغزه‌های یخی[4]

۱- دلایل مطالعه مغزه‌های یخی

مغزه‌های یخی بیش از هر رکورد[5] طبیعی دیگر اقلیم (مانندحلقه‌های درختی یا لایه‌های رسوبی) دارای اطلاعات اقلیمی فراوان است و تنها آرشیوی است که بطور مستقیم تعدادی از متغیرهای کلیدی و مهم سیستم زمین را ثبت می‌کند [۲،۹، ۲۳] . مغزه‌های عمیق دریا نیز اطلاعاتی درباره اقلیم از طریق رسوبات کف اقیانوس امابطورغیرمستقیم فراهم می‌کند. مثالی ازغیرمستقیم‌بودن اطلاعات، روش تعیین دما است. هنگامی که مغزه‌های رسوبی آنالیز می‌شوند، محققین به سختی ورقه‌های پلانکتونی را که در جهات مختلف و بسته به دمای آبی که در آن رشد کرده و حالت گرفته‌اند، جدا می‌کنند. با شمارش تعداد ورقه‌های پیچ‌خورده، دمای سطح آب در زمان رشد آنها را می‌توان تعیین نمود. درک رفتار و عملکرد پلانکتون‌ها برای یافتن رکورد تاریخی دمای اقیانوس ضروری است. از سوی دیگر تجمع رسوبات نسبت به تجمع برف برروی‌ضخامت یخ، خیلی کندصورت می‌گیرد.

---

[1] - Tree Rings
[2] - Plant Pollen
[3] - Ocean or Lakes sediments
[4] - Ice Core
[5] - Record

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

این‌امرموجب‌رکوردهای طولانی‌ترازمغزه‌های رسوبی ولی باقابلیت کمتربرای تحلیل تغییرات‌کوتاه‌مدت‌می‌شود. بطوری‌که دوره‌های چندین‌ساله‌را می‌توان در مغزه‌های رسوبی تحلیل کرد اما تجزیه وتحلیل‌های سالیانه و حتی فصلی از طریق مغزه‌های یخی امکان‌پذیر است. به عبارت دیگرگرچه مغزه‌های رسوبی می‌توانند رکوردهایی چند میلیون ساله فراهم کنند که باچندصدهزارسال‌مغزه‌های یخی برابری می‌کند ولی رکوردهای مغزه یخی بخوبی و بطورمفصل قابل شرح بوده و شامل رکوردهای اقلیمی مفصل وغیرمنقطع مربوط به صدهاهزارسال می‌باشد. این‌رکوردهامی‌توانند دربرگیرنده دما، بارش، سرعت باد، رطوبت، ترکیب شیمیایی و گاز جو پایین، فوران‌های آتشفشانی، ایزوتوپ‌های مواد کیهانی، مواد فرازمینی، تغییرپذیری خورشیدی و تنوعی از دیگر شاخص‌های اقلیم باشند. به دلیل همزمانی این خصوصیات ثبت‌شده در یخ است که مغزه‌های یخی ابزار قدرتمندی در تحقیقات اقلیم گذشته‌بوده و با داشتن اطلاعات مستقیم و بی‌واسطه، قدرت تجزیه و تحلیل بالاتری را در پیش‌روی محققین قرار می‌دهند [۲ ، ۲۳ ، ۲۹].

۲- نحوه حفاری و ترتیب مغزه‌های یخی

مغزه اصطلاحی است که برای توصیف یک بخش استوانه‌ای یا رشته‌ای از مواد به هم پیوسته بکار می‌رود که در اینجا بطورخاص، مغزه‌های یخی استوانه‌های[1] یخ حفر شده از یخچال‌های طبیعی و صفحات یخ قطبی است[۱ ، ۹]. بازیابی مغزه کار ساده ای نیست. یخ بایستی از عمق و تحت فشارهای زیاد دوباره بدست آید. اطلاعات درباره زاویه کندن، عمق، نیروهایی که باید صرف گردد، همه بایستی در طی حفاری تقویت شودو اندکی نقص درلوله مته می‌تواندبرای مغزه زیان‌آور باشد.

[1] - Cylinder

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

کندن ۲۰ متر یخ، دربرگیرنده نوک مته خاص، لوله مغزه، گیرنده تراشه، موتور، بسته ابزار وتیغه‌های ضدگشتاوری است که به طورمثال دریک مغزه ۳۰۰۰ متری، همه از کابل ۴۰۰۰ متری آویزان هستند. در حالی که مته برای ایجاد سوراخ و یخ در درون زمین پایین می‌رود، بخشی از مغزه بین ۲ و ۶ متر بریده شده و از پایه یخ جدا گردیده ، به سطح کشیده می‌شود. سپس این مغزه به اتاق بزرگی برای برش جهت پردازش و آنالیزهای بعدی فرستاده می‌شود. در این محل مغزه‌ها پس از پردازش ونمونه‌گیری، جهت ارسال به آزمایشگاه‌هایی درایالت‌متحده بسته‌بندی می‌شوند. از آنجایی که غلظت ترکیبات اندازه‌گیری شده در یخ خیلی پایین است، به آسانی نمونه‌های یخ آلوده می‌شوند بطوری که لمس نمونه یخ نهایی با دست لخت، آن راآلوده خواهد کرد. به همین دلیل در کلیه مراحل محققین باید بر روی لباس گرم خود، لباس تمیز خاصی را بپوشند تا از عدم آلودگی نمونه‌ها مطمئن گردند. سطح خارجی مغزه برای استفاده در آنالیز ایزوتوپ بریده می‌شود و قطعات تمیزتر درونی مغزه مختصراً در آب بی‌نهایت خالص تحت شرایط تمیز آبشویی می‌شودوبرای ارسال درکیسه‌های پلی‌اتیلن بسته‌بندی شده و در دمای زیر $-15^{\circ}c$ عمل انتقال و ذخیره آنها صورت می‌گیرد. در آزمایشگاه نیز پس از وزن‌کردن، آلاینده‌های سطح ازطریق تصعید لبه‌های بیرونی مغزه برطرف می‌شود [۸ ، ۹].

اگرچه اکثر آنالیزها بایستی تحت شرایط آزمایشگاه روی دهد ولی اندازه‌گیری در محل حفاری نیز حائزاهمیت فراوان است. اندازه‌گیری در محل استخراج مغزه ضمن آن‌که تنش عمودی، کجی سوراخ، دمای یخ، پژواک‌شناختی و خصوصیات الکتریکی را آشکار می‌کند به دانشمندان اجازه می‌دهد تا دینامیک ورقه‌های یخ و تغییرات اثرگذار بر چینه‌شناسی مغزه یخ را تعیین نمایند[۸].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

تمامی مغزه‌های یخی برابر نیستند و تغییرات بستگی به عمق حفاری و عرض جغرافیایی محل دارد. مغزه‌ها را از نظر عمق به سه دسته کم‌عمق، متوسط و عمیق طبقه‌بندی می‌کنند. رکوردهای مغزه‌یخی بلند($10^5<$ سال) به مناطق قطبی محدودمی‌شود. گرفتن یک مغزه بلند، نیازبه چندفصل حفاری وعملیات لجستیکی عمده دارد. برای بهینه‌سازی عملکرد علمی چنین سرمایه‌گذاری بزرگ (از نظر زمان و پول)، محل حفاری براساس مقادیر تجمع سطحی، شرایط برف دانه‌ها، توپوگرافی بستر و سطح و جریان یخ، بایستی با دقت انتخاب شود. در ابتدا توسط رادار هوایی سیستماتیک و مخصوص یخ، از طریق ژرفاسنجی پتانسیل محل‌های مغزه شناسایی می‌گردد. لازمه این کار برنامه‌ریزی دقیق و طولانی‌مدت است زیرا به طورمعمول تنها یک سیستم رادار وجود دارد که قادر به نفوذ در چند هزارمتر یخ است و زمان پرواز آن خیلی محدود است. علاوه بر این ژرفاسنجی رادار یخی سطحی، نمونه‌گیری جوی، گودال‌های برف ومغزه‌های کم‌عمق در این محل‌ها باید انجام گیرد و جزئیات به داده‌های بررسی شده رادار هوایی اضافه گردد تا کیفیت اطلاعات محیطی گذشته موردانتظار از محل، تعیین گردد. بدین ترتیب چندسال اززمان تحقیق صرف انتخاب محل مناسب‌قبل ازحفاری مغزه‌های عمیق خواهد شد.[۲۶]

مغزه‌های یخی کم‌عمق و متوسط (۱۰۰۰-۱۰ متر، $۱۰^۲$-$۱۰^۱$ سال) نه‌تنها از مناطق قطبی که از محل‌هایی با عرض جغرافیایی بالا- پایین نیز تهیه می‌شوند. حفاری این مغزه‌ها از نظر لجستیکی آسان‌تر است چون معمولاً می‌توان در یک فصل و بوسیله یک گروه نسبتاً کوچک انجام داد. با وجود این، انتخاب محل برای مغزه‌های کم‌عمق و متوسط نیز نیاز به چندسال مطالعه میدانی قبل از حفاری دارد. بررسی راداری در اینجا چندان عامل محدودکننده نیست چون بیش از یک

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

سیستم راداری می‌تواند به اعماق صدتا هزارمتری نفوذ کند. از طرف دیگر انتهای مغزه‌های یخی به اندازه کافی از بالای سنگ بستر دور است که توپوگرافی بستر صرفاً یک عامل فرعی در انتخاب محل به حساب آید. آنچه در برنامه‌ریزی عرض-های پایین مشکل‌زا است، از یک طرف توسعه حمایتی و تشریک مساعی در پروژه تحقیقاتی کشورهایی است که مغزه در آنها می‌باشد و از طرف دیگر پیداکردن توده یخ مناسب در زمین‌های متغیر از نظر توپوگرافی و اقلیمی است. علاوه بر این مطالعه گازهای حبس شده در یخ نیز مشکل می‌باشد زیرا نیاز به حمل و انتقال نمونه مغزه‌های یخزده از یک محل دور دارد [۲۶].

علی‌رغم مشکلات فوق، به دلیل آن‌که استفاده از مغزه‌های یخی عرض‌های جغرافیایی متفاوت، چشم‌اندازهای مختلفی از نوسانات اقلیمی را به روی محققین می‌گشاید، سعی در بازیابی آنها از اطراف جهان می‌شود. به طوری که از مناطق حفاری مغزه‌های یخی در جهان می‌توان به مغزه‌های حفاری شده در گرینلند که شامل کرت[۱]، میل‌سنت[۲]، سامیت[۳]، پروژه ضخامت یخی گرینلندایالات متحده[۴](GISP)، $GISP_2$، پروژه مغزه‌یخی‌گرینلند[۵] (GRIP)(حاصل تلاش‌های مشترک فرانسه- ایالات متحده- روسیه) و $GRIP_2$ می‌باشد و مغزه‌های حفاری شده درقطب‌جنوب که شامل بایرد[۶]، وستک[۷]و دوم سی[۸] می‌باشد، اشاره کرد[۸].

[1] - Crete
[2] - Milcent
[3] - Summit
[4] - The U.S.Greenland Ice sheet project
[5] - Greenland Ice Core project
[6] - Byrd
[7] - Vostok
[8] - Dome C

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

۳- بازسازی اقلیم گذشته (آرشیو یخ)

برف در موقع بارش، ترکیباتی را که در آن لحظه در هوا وجود دارد با خود حمل می‌کند، این ترکیبات شامل یون‌های سولفات، نیترات و یون‌های دیگر، گرد و غبار، ذرات رادیواکتیو و فلزات ناچیز می‌باشد. زمانی که برف در مکانی می‌بارد، دماهای بالای درجه یخزدگی (صفر درجه سانتی‌گراد) بندرت وجود دارد. مانند مناطق قطبی یاعرض‌های‌جغرافیایی بالا، درنتیجه برف یکسال روی برف‌های ذوب نشده سال قبل می‌ریزد. همچنان‌که برف هر سال بوسیله بارش برف بعدی دفن می‌شود، ترکیبات آن نیزبا آن دفن می‌شود. با حفاری از سطح صفحات یخ و آنالیز برف از عمق‌های بیشتر و بیشتر، تاریخ و گذشته ترکیبات موجود در هوا می‌تواند بدست آید. بدین ترتیب برفی که در عمق بیش از ۸۰ متری است در اثر وزن برف بالای آن، به یخ تبدیل‌شده وحباب‌های کوچک هوا در آن حبس می‌شود. بنابراین صفحات یخ علاوه بر حبس ترکیبات هوا، نمونه کوچکی از هوای خود را نیز حبس می‌کنند. به‌عنوان‌مثال، دی‌اکسیدکربن واکسیژن به همان نسبتی‌که درجو بوده‌اند، باقی می‌مانند. این هوای حبس شده نیز آنالیز شده و اطلاعاتی درباره ترکیب جو در زمان شکل‌گیری یخ فراهم می‌کند[۸ ، ۹]. یخچال نتیجه تجمع و تراکم برف در طی دوره‌های زمانی طویل‌المدت است. هنگامی که تراکم برف کمتر گردد و به عبارتی خشکی اتفاق افتاده باشد، این موضوع در لایه‌های یخ حفظ می‌گردد. آب حبس شده دریخچال‌ها، درشرایط اصلی واولیه خودباقی می‌ماند و تا امروز شرایط اقلیمی حاکم در زمان خود را با خود نگه داشته است. بقایای عناصر و آئروسل‌ها بر روی سطح برف و یخ ته‌نشین می‌شود. تجزیه و تحلیل همین ناخالصی‌ها است که می‌تواند اطلاعات مفیدی بدست دهد و راز اقلیم گذشته را آشکار نماید. بدین ترتیب ضخامت یخ قطبی و توده‌های یخ عرض‌های بالا، در سردترین نواحی خود،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

رکورد تفصیلی از شرایط اقلیمی و ترکیب جوی و حدود زمانی رسوب برف را حفظ می‌کنند. جدول شماره (۱) مولفه‌هایی که تغییرات جهانی آنها می‌تواند با استفاده از رکوردهای مغزه یخی اثبات گردد، نشان می‌دهد [۲۶] .

۴- روش‌های تفسیر اطلاعات و سن‌یابی از مغزه‌های یخی

- تفسیر اطلاعات

ویژگی‌هاوخصوصیاتی که‌درتحقیقات‌حاصل‌ازمغزه‌های‌یخی‌می‌تواندازه‌گیری شودو اطلاعات محیطی که ازآنهاحاصل می‌گردد در جدول (۲) نشان داده شده است. در اینجا به جهت اختصار به عمده‌ترین روش‌های تفسیر اطلاعات اقلیمی گذشته حاصل ازمغزه‌های یخی اشاره می‌گردد.

جدول (۱) : اجزای متغیر سیستم زمین و قابل اثبات از طریق رکوردهای مغزه یخی●

اجزاء سیستم زمین	نمونه
• اقلیم جهان	- گازهای گلخانه‌ای - آئروسل‌ها - دمای جوی - تبادل استراتوسفر- تروپوسفر - منابع توده هوا - الگوهای بارش
• یخ جهان	- توزیع یخچال‌ها، برف و یخ‌های دریا - حجم یخ و سطح دریا - دینامیک یخچال و ویژگی‌های یخ
• چرخه‌های زیست گیاه‌شناسی	- گازهای بیوژنیک - آئروسل‌های بحری - آئروسل‌های بری - تبدیلات درون جوی
• مواد حاصل از فعالیت‌های انسانی	- گازهای تابشی فعال و آئروسل‌ها - آلاینده‌های ارگانیکی و غیرارگانیکی
• فعالیت‌های زمین‌شناسی و فرازمینی	- فعالیت آتشفشانی - میدان جاذبه زمین - فعالیت خورشیدی - شارهای فرازمینی

● اقتباس از منبع شماره (۲۶)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

● **ضریب(دلتا) ایزوتوپ اکسیژن-۱۸**. ایزوتوپ‌های ثابت[۱] ناچیز که بصورت مقادیر دلتا محاسبه می‌شود از زمان توسعه ابزار دقیق اندازه‌گیری‌های آنها در دهه ۱۹۵۰، جزء لاینفک تحقیقات اقلیم شده‌اند. اختلاف‌های ایزوتوپی، ناشی از تعداد متفاوت نوترون‌ها در هسته اتم می‌باشد. برای مثال اکثر اتم‌های اکسیژن[۲](۹۹/۸٪) ۸ نوترون و ۸ پروتون دارند و باعث می‌شود تا اکسیژن دارای جرم اتمی ۱۶ $\left(o^{16}\right)$ گردد که به ایزوتوپ سبک معروف است. ایزوتوپ دیگر اکسیژن دارای ۱۰ نوترون و جرم اتمی ۱۸ $\left(o^{18}\right)$ می‌باشد (با فراوانی طبیعی ۰/۲٪) که ایزوتوپ سنگین می‌گویند. در مجموع به ترکیبات مختلف یک ساختمان اتمی اصطلاحاً « ایزوتروپومرس[۳] » می‌گویند[۸].

آب اقیانوس‌ها شامل مقادیر زیادتری o^{16} و مقدار کمی o^{18} می‌باشد. مولکول‌های آب با o^{18} همان نظم آب را در جنبه‌های دیگر دارند جز این‌که چون سنگین‌تر است (۱۲٪ سنگین‌تر از اکسیژن معمولی) در روی زمین به طرف قطبین حرکت می‌کنند، سرد می‌شوند و آب کمتری را می‌توانند در خود نگه دارند در نتیجه آب از توده هوا بصورت بارش (باران یا برف) از دست می‌رود . بدین‌ترتیب برف حاصل از بارش دارای مقادیر بیشتری از o^{16}، نسبت به o^{18} می-شود، زیرا هم مقدار آن در بخارات کم بوده و هم به دلیل انقباض آسان‌تر از o^{16}، در اثر بارش زودتر به زمین می‌رسد. اگر یخچال‌ها گسترش یابند، نسبت ایزوتوپ اکسیژن آب اقیانوس بطور فزاینده‌ای از نظر o^{18} غنی می‌شود، زیرا به هر طریق o^{16} در یخ یخچال‌ها کاهش و کمبود دارد. از سوی دیگر این فرایند به دما بستگی دارد، بنابراین برفی که در زمستان می‌بارد از o^{16} غنی شده است.

---

[۱]- به ایزوتوپ‌های ثابت می‌گویند که تجزیه نمی‌شوند مانند ایزوتوپ‌های رادیواکتیو (مثل اورانیوم).

[۲]- اکسیژن دارای سه نوع ایزوتوپ ۱۶، ۱۷، ۱۸ می‌باشد.

[3]- Isotropomers

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

جدول(۲):ویژگی‌های قابل‌اندازه‌گیری در تحقیقات مغزه یخی و اطلاعات محیطی حاصل از آنها●

ویژگی	نوع	اطلاعات محیطی
مقدار گاز	- مقدار کل گاز - غلظت CO2 - CH4 و گازهای ناچیز دیگرمثل N2O، CH3CL و هیدروکربنات - نسبت O2/AR و N2/AR	- ارتفاع گذشته سطح یخ - گاز گلخانه‌ای با دما افزایش می‌یابد ، بازخورد مثبت - گازهای گلخانه‌ای مانند CO2 و نیز شاخص‌های ظرفیت اکسیده کردن جو - جدا سازی گازهای حبس شده در یخ ، تاثیرات سهم هریک
ایزوتوپ‌های ثابت	الف) در گازها - 13-C/12-C در CO2 - 18-O/16-O در O2 - 15-N/14-N در N2 - 13-C/12-C و D/H در CH4 - 15-N/14-N و18-O/16-O در N2O ب) در یخ - D/H و18-O/16-O در یخ	- اندازه نسبی منابع کربن - چرخه O2 و علامت چینه‌شناختی جهانی - جداسازی ایزوتوپ گازهای حبس‌شده در یخ - توزیع منبع CH4 جوی - توزیع منبعNO2 جوی - شاخص‌های‌اولیه‌اقلیم‌گذشته، مازاددوتریوم(d)
ایزوتوپهای کیهانی	- 14-C/C در CO2 - غلظت 10Be ، 26AJ ، 36CL - 81Kr/Kr در هوای حبس شده	- سن یابی برابر با ۳۰ تا ۴۰ هزار سال پیش - مقدار تولید اشعه کیهانی ، مقدار تراکم - سن یابی یخهای قدیمی
شیمی	- آنیونها و کاتیونهای عمده - فلزات ناچیز (Pb , Ir) - اجزاء ارگانیکی (آلی) -H2O2	- تعادل توده و مناسبت فصلی، حوادث آتشفشانی ، گردش جوی ، - گستردگی یخ دریا ، چرخه زیست گیاه‌شناسی - منابع طبیعی فلزات ناچیز و تغییرپذیری آنها - چرخه زیست گیاه‌شناسی - شیمی جوی ، فصلی‌بودن
غلظتهای بسیار ناچیز		- گردش جوی ، منابع غبار جهانی ، حوادث آتشفشانی
قابلیت‌دایت الکتریکی		- افق‌های شیمیایی ، فصلی‌بودن
فیزیکی		- پیوستگی چینه‌شناختی و مکانیکی ، ضخامت لایه ، مطالعه چاه‌های گمانه، مدل‌سازی جریان یخ
مطالعات جوی		- عملکرد انتقال ایزوتوپ‌ها، یون‌ها و خردریزه‌ها از جو به یخ

● اقتباس از منبع شماره (۲۶)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

علاوه بر این در طی دوره‌های سرد، ^{16}o در یخچال‌ها بطور نسبی افزایش می‌یابد در حالی که اقیانوس‌ها از نظر ^{18}o بطور نسبی غنی می‌شوند. این عدم‌تعادل بیشتر برای اقلیم مناطق سردتر قابل‌توجه است تا اقلیم‌های گرمتر، بدین‌ترتیب بسته به دمای تبخیرواین‌که چقدر راه را آب قبل از این‌که بصورت برف روی مناطق مرتفع ریزش کند، طی کرده است، نسبت ^{18}o به ^{16}o متفاوت خواهد بود. این نسبت به عنوان ضریب یا دلتای ^{18}o ($\delta^{18}o$) شناخته شده و می‌تواندبا دقت زیاد با استفاده از طیف‌سنج توده‌ای[1] اندازه‌گیری شود. تغییر دما از تابستان به زمستان، در دراز مدت نوسان خیلی مشخصی در نسبت ^{18}o به ^{16}o ایجاد می‌کند. بطوری که هر لایه سالیانه برف با ^{18}oغنی آغاز می‌شود و سپس از نظر ^{18}o فقیر شده و مجدداً غنی می‌گردد. با شمارش تعداد نوسانات، سن مغزه در عمق‌های مختلف تعیین می‌شود. در دوره‌های زمانی طولانی‌تر، این نسبت متوسط دمای مناطق بین محل تبخیر و محل مغزه را نشان می‌دهد. برای اهداف اقلیم‌شناسی دیرینه، مقدار دلتا برای نشان‌دادن مقدار نسبی ^{18}o به صورت زیر استفاده می‌شود :

$$\delta = (\ ^{18}o / {}^{16}o \text{ نمونه} \ ) - (\ ^{18}o / {}^{16}o \text{ استاندارد} \ ) / (\ ^{18}o / {}^{16}o \text{ استاندارد} \ ) \times ۱۰۰۰$$

این ضریب نسبت به یک استاندارد معروف به استانداردViennaیا (SMOW)[2] محاسبه می‌شود. این استاندارد (نسبت ^{18}o به ^{16}o) برای میانگین آب اقیانوس برابر با $۱۲۰۰۵/۲ \times ۱۰^{۶}$ می‌باشد [۸ ، ۹ ، ۱۸ ، ۲۴]. بدین‌ترتیب مغزه‌های یخی ضمن نشان‌دادن دمای اقلیم گذشته با تعیین تاریخ رویدادها به سن‌یابی آنها نیز می‌پردازند.

[1] - Mass Spectrometer
[2] - Standard Mean Ocean Water (SMOW)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

● **قابلیت هدایت الکتریکی**[1]. یکی از اندازه‌گیری‌ها در برنامه‌های مغزه یخ، قابلیت هدایت الکتریکی است. زیرا که باعث توصیف سریعی از برخی از خواص شیمیایی مغزه می‌شود. گرچه عموماً ۲ متر اول مغزه برای استفاده خیلی نازک و شکننده است ولی اندازه‌گیری‌های الکتریکی می‌تواند بر روی کل مغزه انجام شود. روش قابلیت الکتریکی(ECM)، جریان جاری بین دو الکترود را که اختلاف پتانسیل چند هزار ولت دارند، اندازه‌گیری می‌کند. الکترودها در یک ردیف یک سانتی‌متری جدا ازیکدیگرهستندو از جریان مستقیم استفاده می‌شود. اندازه‌گیری توان مکانی چند میلی‌متری داشته و با حرکت الکترودها در طول سطح هموار آماده شده، عمل می‌کند. ECM منحصراً مربوط به تعادل اسید- پایه در یخ است که جریان بالا نشانگر شرایط اسیدی بیشتر است. به دلیل حساسیت اسید سولفوریک و توانایی حل ترکیباتی که ضخامت کمتر ازسانتی‌متر دارند، این روش برای موقعیت‌هایی که رخ داد آتشفشانی در مغزه وجود دارد، مناسب می‌باشد. همچنین تحت‌شرایط صحیح، روش ECM می‌تواند لایه‌های سالیانه و شاید آمونیاک همراه با بیوماس را شناسایی کند [۹، ۲۴].

● **دوتریوم**[2]. هیدروژن نیز دارای ایزوتوپ است. چنانچه یک پروتون در هسته اتم خود داشته باشد، این اتم، هیدروژن معمولی است. اگر یک نوترون نیز باشد، اتم را هیدروژن سنگین یا دوتریوم می‌نامند. دوتریوم یک ایزوتوپ ثابت است که قدرت ترکیب ۰/۰۱۴ تا ۰/۰۱۵ درصد ترکیبات هیدروژن طبیعی را دارد و از هیدروژن معمولی، فعل وانفعالات آرامتری داردومی‌تواندبعنوان‌ردیاب اقلیم‌شناسی دیرینه همچون ^{18}o استفاده شود، درواقع به صورت ضریب (دلتا) محاسبه می‌شود.

[1] - Electrical Condutivity Method(ECM)
[2] - Deuterium

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

در قطب جنوب افزایش یک درجه سانتی‌گراد دما باعث کاهش ۹ میل[۱] دوتریوم می‌شود[۲]. ضریب دوتریوم(مقدار دلتا) درست مانند o^{18} محاسبه شده و دمای گذشته را نشان می‌دهد. مقدار دوتریوم تماماً مازاد نیست، با وجود این ازنظر کمی به عنوان دوتریوم اضافی شناخته شده است. مقایسه خطی دوتریوم و اکسیژن - ۱۸ در موقعیت‌های مختلف که اصطلاحاً GMWL [۲] نامیده می‌شود، واحد مازاد دوتریوم را تعیین می‌کند: [۴]

$$d = dD - 8d.\ ^{18}o$$

مازاد دوتریوم (d) شاخص پیچیدگی گردش هوا است. آنالیز مازاد دوتریوم حاکی از تاریخ پیچیده بارش و تبخیر مجدد از مغزه‌های یخی است [۲۵]. ضریب (d) با ارتفاع افزایش می‌یابد و بنابراین می‌تواند شرایط محلی را که برف باریده قبل از این‌که بصورت یخچال حرکت کند، نشان دهد [۸ ، ۹].

● **رکوردیون‌های عمده**. یون‌های‌عمده یافت‌شده دربرف دارای سیگنال‌های سالیانه هستند. منشاء برخی از یون‌ها مانند سدیم(Na^{+}) و کلرید (Cl^{-}) اصولاً از دریا است و بقیه مانند سولفات(So_4^{--}) از فعالیت‌های انسانی، بیولوژیکی و آتشفشانی و نیز دریا حاصل می‌شود. سوزاندن سوخت‌های فسیلی در نیمکره شمالی تولید سولفات و نیترات (No_3^{-}) می‌کند و می‌توان سطوح زیادی از این ترکیبات را در رکورد یون حاصل از حفاری مغزه‌های یخی مشاهده نمود. رکورد یون حاصل از مغزه یخی اطلاعات مهمی درباره منبع هوا نسبت به محل حفاری (که برای تفسیر اندازه‌گیری‌های دیگر مهم می‌باشد)، آتشفشان‌ها (که تولید سولفات و کلرید می‌کنند) و تغییر در فعالیت‌های تولیدکننده یون (مانند احتراق سوخت فسیلی) فراهم می‌کند[۹].

[1] - Mil
[2] - Deviation of a Sample from the Meteoric water Line(GMWL)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

● **گرد و غبار**[1]. یکی دیگر از خصوصیات مغزه‌های یخی، سیگنال‌های سالیانه حاصل از گرد و غبار در آنها است. مقدار گرد و غبار حمل شده به مناطق قطبی و صفحات یخ بسته به وسعت مناطق تغذیه‌کننده گردوغبار، نیروی باد، فعالیت‌های آتشفشانی و آتش‌سوزی‌ها متفاوت می‌باشد. اوج گردوغبار اغلب در بخش بهار لایه سالیانه یافت می‌شود. بدین‌ترتیب همچون ایزوتوپ‌ها می‌توانند برای تعیین سن مغزه شمارش شوند. آتشفشان‌ها می‌توانند تولید مقادیر زیادی ذرات کنند و رکوردی در یخ باقی گذارند. اسکن میکروگراف الکترون ذرات بویژه از اوج گرد و غبار در مغزه یخی، می‌تواند نشان دهد که آیا سیگنال گرد و غبار مربوط به آتشفشانی شناخته شده است و بر این اساس سن قطعی برای آن بخش از مغزه محاسبه گردد. برای دوران‌های پیش از تاریخ، رکورد گرد و غبار ابزار مهمی جهت بازسازی تاریخ فعالیت آتشفشانی است. به علاوه درپایان پیشروی یخبندان و عقب‌نشینی یخچال‌ها، اغلب دوره‌ای از آلودگی در خاک بوجود می‌آید و مناطق غیرقابل‌رویش زیادی باقی می‌گذارد. این دوره‌هامی‌تواند از طریق سطوح زیاد گرد و غبار در مغزه شناسایی شود [۹].

وجودگردوغباربیشتردردوره‌های یخچالی نسبت به دوره‌های بین‌یخچالی حاکی از آن است که دوره‌های یخچالی دارای بیابان‌های وسیع، وزش شدید بادهای سطحی در مناطق بیابانی و انتقال موثرتر ذرات گرد و غبار در طول مسیر (از قطبین به طرف استوا) بوده‌اند. مقادیر بالای آئروسل‌های دریایی در دوره‌های یخبندان نسبت به سطوح بین‌یخچالی، گردش قویتر جریانات هوایی در طی دوره‌های یخچالی را تقویت کرده است[۲].

[1] - Dust

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

● **گازهای گلخانه‌ای.** برخلاف اکسیژن و دوتریوم که بصورت شاخص‌های مستقیم در اقلیم‌شناسی دیرینه استفاده می‌شوند، روش‌های غیرمستقیمی نیز با همان کیفیت در این زمینه وجود دارد. گازهای گلخانه‌ای حاکی از نیروی تابشی بوده و ایزوتوپ‌های کیهانی مانند بریلیم حاکی از نیروی خورشیدی می‌باشند. استخراج گازهای خشک نه‌تنها مقدار CO_2 در هوا را در هر زمان مورد بررسی نشان می‌دهد بلکه محققین را قادر به یافتن ترکیب ایزوتوپی CO_2 در حباب‌های گاز مغزه یخی می‌کند که بعداً می‌تواند با مقادیر دوتریوم مقایسه شود و هر دو حاکی از گرم‌شدن جهان می‌باشند. زمانی که نوسانات آنها (بالا و پایین رفتن) هماهنگ باشد، رکورد CO_2 بادقت بیشتری می‌تواندبدست آید. کشف این‌که چه گازی اول افزایش می‌یابد اثر کمی بر روی دینامیک اقلیم دارد. برای مثال مانین[1] و همکارانش دریافتند که چنانچه CO_2 اول افزایش یابد باعث می‌شود شروع افزایش دوتریوم ۶۰۰ $^{+}_{-}$ ۸۰۰ سال در مغزه‌های یخی Dome Concordia در قطب جنوب به زمان ۲۰۰۱برگردد (۲۰۰۱). آنها احتمال تناوب CO_2 را نیز از طریق واکنش‌های شیمیایی در یخچال‌ها با استفاده از واکنش‌های اسیدکربنات و اکسیداسیون ترکیبات ارگانیکی بررسی کردند و نتیجه گرفتند چون پراکنش مقادیر CO_2 حاصل از نمونه‌های مجاور هم راستای عدم‌اطمینان در آنالیز است، اندازه‌گیری‌ها حاکی از دقت CO_2 جوی است [۸].

اکسید نیتروس۲، یکی از گازهای ناچیز گلخانه‌ای (جوی) است که از بالاآیی۳ (فرازجوشی) اقیانوس و خاک‌ها در مناطق حاره و معتدله تولید می‌شود و در استراتوسفربوسیله انرژی تابشی‌تفکیک می‌شود. به دلیل فعالیت‌های انسان غلظت

[1] -Monnin
[2] - Nitrous Oxide
[3] - Ocean upwelling

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

آن حدود ۰/۲۵ درصد در سال افزایش می‌یابد. فلو کیجر۱ و همکارانش با استفاده از دو مغزه یخی از سامیت گرینلند مرکزی، دریافتند که غلظت اکسید نیتروس هماهنگ با تغییرات دما در نیمکره شمالی (۱۹۹۹) افزایش می‌یابد. با وجود این آنها متوجه شدند که اندازه‌گیری اکسید نیتروس می‌تواند از طریق یک واکنش شیمیایی در یخ، تاثیر مغزه بعدی یا یک تجزیه و تحلیل انسانی تحت‌تاثیر قرار گیرد. بازبینی و آزمایش مجدد احتمال آلودگی را حذف کردولی واکنش شیمیایی یا منابع مصنوعی موثر در آن را از بین نبرد[۸].

● **ظرفیت فلزات ناچیز.** ایریدیوم[۲] عنصری است که به فراوانی در مواد خارج از زمین یافت می‌شود. بنابراین مطالعات مربوط به ظرفیت فلزات ناچیز در مغزه‌های یخی به روشن‌شدن بحث برخورد شهاب سنگ بزرگی به زمین، از طریق شناسایی ایریدیوم حاصل از برخورد شهاب سنگ کمک خواهد کرد[۹].

● **خصوصیات فیزیکی مغزه.** این ویژگی، لایه‌های سالیانه حاصل از اختلاف دمای بین تابستان و زمستان و نیز شناسایی هر تغییر شکل یخچال که بتواند بر رکورد اثرگذار باشد را نشان می‌دهد. این امر در آنالیز و نتایج مراحل بعدی کاربر روی مغزه‌ها حائزاهمیت می‌باشد[۹] .

- روش‌های سن‌یابی[۳]

سن‌یابی دقیق، مرحله اساسی در کار با داده‌های اقلیمی گذشته می‌باشد[۳] زیرا ذکر دقیق رویدادها به ترتیب تاریخ وقوع (وقایع‌نگاری) برای تفسیر داده‌های اقلیم گذشته حاصل از مغزه‌های یخی ضروری است. بدون برآورد سن قابل اطمینان نمی‌توان همزمان‌بودن داده‌ها، پیشگام یا کند بودن زمان‌یابی و یا برآورد

[1] - Fluckiger et al.
[2] - Iridium
[3] - Dating Methods

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

مقدار تغییر را پیش‌بینی نمود. سن‌یابی مغزه یخی اساساً فرایند ایجاد یک مدل عمق به سن با استفاده از تنوعی از روش‌های مکمل می‌باشد. سن‌یابی همیشه موضوعی برای بازبینی و اصلاح مدل جهت درک بهتر آن است. برای مثال برآورد سن از طریق مشاهده بصری یک حادثه آتشفشانی ممکن است بعداً بوسیله نتایج یک آنالیز شیمیایی بر روی مغزه اصلاح شود. همچنین این موضوع برای مقایسه نتایج روش‌های‌مختلف‌ودرنتیجه چگونگی استفاده وارتباط آنهابایکدیگرمفید است. روش‌های‌سن‌یابی به سه‌دسته‌تئوریکی، فیزیکی‌وشیمیایی‌تقسیم می‌شوند [۱۹]:

● **روش‌های سن‌یابی تئوریکی**. این روش برای سن‌یابی، از مدل‌هایی استفاده‌می‌کندکه قوانین علمی‌جریان‌یخ را شرح می‌دهد [۱۷] . اگرچه روش‌های بهتری وجود دارد اما مدل‌سازی جریان، بهترین تکنیک موجود قبل از نمونه‌گیری است و می‌تواند برای برنامه‌ریزی استفاده شود. مدل‌سازی روند تولید یخ براساس ضخامت (باریک) لایه‌های سالیانه برف است که هر سال اتفاق می‌افتد وبوسیله ریزش برف بعدی دفن می‌شود و در ابتدا برف فشرده شده و به دنبال آن به دلیل شکل‌پذیری برف، تغییر شکل داده و در نهایت به یخ تبدیل می‌شود (با چگالی $830\text{-}900\ kg/m^{-3}$). ساده‌ترین مدل ریاضی براساس کار انجام شده توسط نای[1] است که فرض می‌شود « تغییرشکل عمودی در طول هر خط عمودی در یخ، در هر لحظه یکسان و یکنواخت است و هیچ ذوب‌شدگی در اساس وجود ندارد »[۱۷]. با فرض بعدی که میزان نازکی ضخامت یخ یکسان است مقیاس زمانی نای بدست می‌آید که t سن در عمق است و h کل ضخامت معادل یخ است (مغزه ممکن است شامل برف و یخ برف باشد که هنوز به یخ تبدیل نشده‌اند)، c مقدارتراکم سالیانه و z فاصله بالای بستراست. مقدارتراکم نسبت عکس با حداکثر

[1] - Nye

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

سن محتمل دارد بطوری که افزایش آن حداکثر سن محتمل را کوتاه می‌کند (در صورتی که تفکیک زمانی افزایش می‌یابد).

- **روش‌های سن‌یابی فیزیکی.** مدل نای بطور ضمنی اشاره به این حقیقت دارد که فاصله زمانی هرمغزه درابتدا ازطریق مقدارتراکم درمنطقه کنترل می‌شود. بنابراین چناچه نازکی لایه‌ها و دیگر فرایندهای فیزیکی نادیده گرفته شود برآورد مقدار تراکم، اولین برآورد تقریبی از سن مغزه را فراهم می‌کند. لایه‌های مشخص خاکستر در یخ، ویژگی فیزیکی دیگری برای سن‌یابی مغزه است. در این مورد، داده خالص ازطریق تقارن زمانی باحوادث آتشفشانی شناخته شده درقبل می‌تواند مشخص گردد که برای پیشرفت در این کار معمولاً نیاز به تاریخ تقریبی است تا بتوان جستجوی مقایسه‌ای را آسانتر انجام داد.

- **روش‌های سن‌یابی شیمیایی.** یکی از روش‌های سن‌یابی شیمیایی، از انواع یون‌های‌اتمسفری‌شناخته‌شده برای‌داشتن تغییرات‌فصلی درغلظت (مثلاً cl^-) استفاده می‌کند تا شروع فصل‌های خاص سال(مانند پاییز)را شناسایی کند. زمانی که نشانه‌های فصلی پیدا شوند، لایه‌های سالیانه می‌توانند شمارش گردند. این کار برای درک تغییرات در گردش جوی، میزان تولید و ناحیه منبع یون مفید است. همچنین می‌تواند برای تشخیص بین منابع محلی و منابع دورتر جهت انواع مختلف یون‌ها استفاده شود و به تفسیر رکوردیخ کمک نماید. کاسته‌شدن از نقاط اوج سالیانه (مثلاً به دلیل فاصله از منبع) یا فرایندهای پس از رسوب که منجر به نامشخص‌شدن این نقاط می‌شود، می‌تواند روش فوق را مشکل سازد. در روش دیگری برای شناخت تغییرات فصلی از یک ذوب کننده مستمر استفاده می‌شود. مزیت این روش آن است که کمتر خسته‌کننده بوده و اندازه‌گیری‌های بیشتری (مثلاً ۲۴۰۰ نمونه در هر متر) [۲۱] برای انواع یون‌های موردنظر و در مدت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

زمان کمتری (مثلاً ۲۰ دقیقه در هر متر) [۲۸] فراهم می‌کند. این مسئله تا حدودی شناسایی لایه‌های سالیانه را ساده می‌کندومی‌تواندبرای سن‌یابی شمارش شود. علاوه براین تفکیک داده‌ها بوسیله ذوب‌کننده مستمر، به شناسایی زمان‌یابی فصلی انواع یون‌ها کمک می‌کند. در روش شیمیایی دیگر، از مشخصه شیمیایی حوادث آتشفشانی استفاده می‌شود. با عدم‌حضور خاکستر مرئی، نقاط اوج در اسیدیته می‌تواند برای جایابی وتاریخ حوادث آتشفشانی استفاده گردد. زیرا مقادیر زیادی از گازهای اسیدی قوی در طی فوران‌های بزرگ آزاد می‌شوند[۱۲]. از سوی دیگر این روش برای سن‌یابی آتشفشان‌ها، معمول‌تر است[۳۰]. برای مثال ۵ حادثه آتشفشانی نیمکره شمالی و جنوبی از سال ۱۲۵۰ بعد از میلاد(جدول ۳) تاکنون در مغزه‌های یخی Dominion Range و Newall Glacier با استفاده از جداکننده‌هایی با منشاء غیرنمک دریایی که از $\left(So_4^{--}\right)$ حاصل می‌شود، شناسایی شدند[۱۴] .

جدول (۳) : حوادث آتشفشانی از سال ۱۲۵۰ بعد از میلاد در مغزه‌های یخی The Dominion Range and Newall Glacier

موقعیت	تاریخ (بعد از میلاد)
Agung	۱۹۶۳
Tambora , Subawa	۱۸۱۵
Huaynaputina , Peru	~ ۱۶۰۰
Mt. St.Helens	۱۴۸۰
Unknown , possibly EL Chichon , Mexico (Zielinksi , et al. , 1994)	۱۲۵۹

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

مطالعات مکمل

مطالعات اقلیم‌شناسی دیرینه بر روی مغزه‌های یخی نشان می‌دهد که صرف انتخاب یک محل مناسب برای گرفتن رکورد محیطی طولانی، خود به تنهایی نیاز به همکاری حداقل سه رشته یخرودشناسی مختلف (ژرفاسنجی را داری یخ سطحی، توپوگرافی بستر لایه درونی و مطالعه سطح توده، دگرگونی و دما) دارد تا در نهایت منجر به مدل‌سازی جریان یخ برای انتخاب محل گردد. علاوه بر این نیاز به متخصصین دیگری در زمینه علوم جوی، اقیانوس‌شناسی، زمین‌شناسی و مدل‌سازی است تا بتوان از پتانسیل کامل اطلاعات محیطی گذشته مغزه‌های یخی استفاده کرد.[۱]

نتیجه‌گیری

زمین سرنوشت سیستم دینامیکی را دارد که توسط نیروهای بیرونی (پارامترهای مداری و تابشی) وفرایندهای درونی تعیین می‌شود. تغییرات اقلیم در همه زمان‌ها بر روی سیستم زمین تاثیر داشته‌اند. از گذشته نه‌چندان دور اثرات ناشی از فعالیت‌های انسانی و دخالت‌های او در طبیعت به این چرخه اضافه شده است با این تفاوت که انسان‌ها به دلیل تقریباً ثابت‌بودن اقلیم در طی ۵۰۰۰ سال گذشته (اواخر هولوسن) تغییرات اقلیمی را خوب تجربه نکرده‌اند و نسبت به آن نیز بسیار آسیب‌پذیر هستند. بنابراین شناسایی تاثیرات متقابل اقلیم، اتمسفر، اقیانوس و جریانات آن، بیوسفر و یخ کره برای ادامه حیات بر روی کره زمین و برنامه‌ریزی‌های آتی در جهت بهینه‌سازی آن ضروری است. در این راستا بررسی

[۱]- جهت اطلاع بیشتر به منابع ذکر شده در پایان مقاله و دیگر تحقیقات انجام شده در زمینه مغزه‌های یخی مراجعه شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

اقلیم گذشته جهت پی‌بردن به عملکرد آن از گذشته تاکنون و پیش‌بینی شرایط اقلیمی آینده براساس آن، می‌تواند آگاهی و درک انسان را از سیستم زمین بیشتر نماید. بدین‌منظور در سال‌های آتی رکوردهای مغزه‌های یخی به همراه رکوردهای دیگر در این زمینه (مانند حلقه‌های درختی، گرده‌های گیاهی، رسوبات دریاچه‌ای و اقیانوسی و...) می‌تواند چشم‌انداز موردنیاز برای پیشرفت درک انسان از تغییرات اقلیم و شاید نتایج حاصل از رفتار انسان را در محیط فراهم نماید.

نکته‌ای که باید بدان توجه کرد آن است که با توجه به گرم‌شدن زمین در سال‌های اخیر، توده‌های یخ نزدیک به نقطه ذوب بوده و به کوچکترین تغییر در دما حساس هستند. این مسئله در عرض‌های پایین بسیار حادتر می‌باشد زیرا که هر ساله در برخی از مناطق، ضخامتی از یخ همراه با گنجینه اطلاعات درون آن در حال آب‌شدن می‌باشد. این امر از یک‌سو تغییر رکوردهای جوی در این مغزه‌ها را به دنبال دارد و از سوی دیگر لزوم مطالعات سریعتر بر روی مغزه‌های یخی عرض‌های پایین را نشان می‌دهد، زیرا که برای پوشش کامل اطلاعات محیطی از کره زمین، دسترسی به اطلاعات فوق لازم است. دراین راستاضروری بنظر می‌رسد که مطالعه بر روی مغزه‌های یخی در کشورهای مناطق حاره و جنب‌حاره مانند ایران در اولویت قرار گیرد و پس از مطالعات مقدماتی، در صورت مساعدبودن شرایط، تحقیقات آن جامه عمل بگیرد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

منابع

۱- آندرسون، دیوید، تغییرات ناگهانی آب و هوا، ترجمه شهرام بهرامی، مجله رشد جغرافیا، سال هفدهم، شماره ۶۱، ۱۳۸۱ .

2- Abysov,S.S, et al . (1995), Deciphering Mysteries of Past Climate From Antarctic Ice Cores, Earth in Space, Vol.8, No.3, p.9.

3- Bradley, R.S, (1985), Quaternary Paleoclimatology: Methods of Paleoclimatic Reconstruction, London, Chapman & Hall.

4- Craig, H, (1961), Isotopic Variations in Meteoric Waters, Science, 133:1702-1703.

5- Crowley, TJ, North, GR, (1991), Paleoclimatology, Number 18 in Oxford monographs on geology and geophysics. Oxford University Press, Oxford.

6- Dansgaard, W., White, J.W.C., Johnsen, S.J, (1989), The Abrupt Termination of the Younger Dryas Climate Event, Nature, 339:532-534.

7- Heinrich, H, (1988), Origin and Consequences of Cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130000 years , Quaternary Res, 29:142-152. Ice Cores and Climate Change, (2004),http://www.emporia.edu/earthsci/student/sedlacek3/icecore.htm .

8- Ice Cores That Tell the Past, http://www.gisp2.sr.Unh.edu/GISP2/moreInfo/Ice_cores-past.html.

9- Imbrie , J, et al. (1992), On the Structure and Origin of Major Glaciation Cycles 1 Linear responses to Milankovitch forcing, Paleoceanography, 7:701-738 .

10- Isaksson, Elisabeth, et al. (2003), Ice Cores from Svalbard-useful archives of past climate and pollution history, Physics and Chemistry of the Earth, Vol.28, p.1217-1228.

11- Langway, C.C.J, Clausen, H.B, et al. (1988), An Inter-Hemispheric Volcanic Time-Marker in Ice Cores from Greenland and Antarctica, Ann, Glaciol. 10:102-108.

12- Mann ,ME, Bradley, RS, Hughes, MK, (1998), Global-Scale Temperature Patterns and Climate Forcing over the Past six Centuries, Nature, 392:779-787.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

13- Mayewski, P.A, Meeker, L.D, et al. (1995), Decomposition and Interpretation of a 110000 Year Long Atmospheric Circulation Record from a Greenland Ice Core, Science: 1-8.
14- Mitchell, JM, (1976), An Oerview of Climatic Variability and its Causal Mechanisms, Quaternary Res, 6:481-493.
15- Oeschger, H, et al. (1984), Late Glacial Climate History from Ice Cores, Geophys Monogr, 29:299-306.
16- Paterson,W.S.B.(1994), The Physics of Glaciers, Oxford, Pergamon press.Peixoto and Oort.(1992).The Physics of Climate. New York, American Institute of Physics.
17- Rebetez, Martine, et al. (2003), To What Extent can Oxygen Isotopes in Tree Rings and Precipitation be Used to Reconstruct Past Atmospheric Temperature? A Case Study, Climatic Change, Vol. 61: 237-248.
18-Reusch, David B, (1997), Resent Climate in West Antarctica Using Ice cores to Understant Climate Change, http://www.ccrc.sr.vnh.edu/~dbr/proposa4proposal.html.
19- Schwander, J, et al., (1993), The Age of the air in the firn and the Ice at Summit, Greenland, Journ Geophys Res, 98:2831-2838.
20- Sigg, A. et al. (1994), A Continuous Analysis Technique for Trace Species in Ice Cores, Environ, Sci. Technol. 28(2):204-209.
21- Stocker,T.F ,(1996b), An Overview of Century Time-Scale Variability in the Climate System: observations and models. In: Anderson DLT, Willebrand J (eds) Decadal climate variability: dynamics and predictability. Vol I 44 of NATO ASI. Springer, Berlin. Heidelberg New York, pp.379-406.
22- Stocker,T.F, (1999), Abrupt Climate Changes: from the past to the future- a review, Int Journ .Earth Sciences, Vol.88, p.365-374.
23- The Summit Ice Cores (GISP2 and GRIP), http://www.agu.org/revgeophys/mayews01/node2.html .
24- Thompson, L.G, et al. (1995), Glacial Stage and Holocene Tropical Ice Core Records from Huascaran, Peru, Science, 269:46.
25- US Global Ice Core Research Program: West Antarctica and Beyond, http://www.nicl-smo.sr.unh.edu/documents/pdf/ICWG1989.pdf .

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

26- Wallace, JM, Gutzler, DS, (1981), Teleconnections in the Geopotential Height Field During the Northern Hemisphere Winter, Monthly Weather Rev, 109:784-812.
27- Whitlow, S., et al. (1992), A Comparison of Major Chemical Species Seasonal Concentration and Accumulation at South Pole and Summit, Greenland, Atmos.Environ.26A:2045-2054.
28- Why Study Ice Cores? http://nicl.usgs.gor/why.htm.
29- Zielinski, G.A., et al., (1994), Record of Volcanism Since 7000 B.C. from the GISP2 Grennland Ice Core and Implications for the Volcano-Climate System, Science 264:948-952.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]