آب و هواشناسی دیرینه و چرخه‌ی میلانکوویچ

جهانبخش دانشیان، لیلا رمضانی دانا و ناهید سحابی‌فر
گروه زمین‌شناسی ـ دانشکده علوم ـ دانشگاه تربیت معلم

چکیده

«چرخه‌ی میلانکوویچ» نامی عمومی برای چرخه‌های گردشی کره‌ی زمین، و در ارتباط با میزان جذب انرژی خورشیدی و تغییرات لایه‌های یخی آن است. اگرچه این چرخه را میلوتین میلانکوویچ تفسیر و ارائه کرد، اما او اولین فرد نبود و قبل از او دانشمندان دیگری چون ادمار[1] (۱۸۴۲) و «کرال»[2] (۱۸۷۵) چرخه‌های گردشی زمین را مورد بحث و بررسی قرار داده بودند. چرخه‌ی میلانکوویچ مبتنی بر سه ویژگی مدار انتقالی زمین[3]، زاویه‌ی انحراف[4] و چرخش محور زمین[5] است [23,25&28].

میلانکوویچ با استفاده از این عوامل و به‌ویژه بر پایه‌ی چرخش محور زمین، تغییرات دریافت انرژی خورشیدی و درجه‌ی حرارت مربوط به سطح آن را، در سطح زمین و در طول زمان و دوره‌های شش ماهه، و در عرض‌های جغرافیایی ۶۰،۵۵ و ۶۵ درجه محاسبه کرد [۱] تا مطابقتی بین این تغییرات و نوسانات آب و هوایی پلیوستوسن برقرار کند. تأثیر این سه عامل در میزان انرژی وارد به زمین هیچ یا ناچیز است، اما چون شدت اختلاف آن‌ها بین فصول تغییر می‌یابد، لذا تأثیرات آن‌ها باعث ایجاد زمستان‌های معتدل بارش زیاد برف، و در نتیجه، تابستان‌های خنک‌تر با ذوب برف‌ها در عرض‌های جغرافیایی متوسط و بالا می‌شود.

نظریه‌ی میلانکوویچ تا مدت‌ها مورد قبول دانشمندان و محققان بود، اما برای مدتی کنار گذاشته شد و اکنون با توجه به مطالعات اخیر که شامل حفاری بستر اقیانوس‌ها و مطالعه‌ی رسوبات و محتویات فسیلی آن‌هاست، دوباره پذیرفته شده است. این مطالعات نشان داده‌اند که تغییرات آب‌وهوایی زمین در صدها هزار سال گذشته، با تغییرات هندسی مدار زمین، تغییر شکل مدار و تغییر در میزان تمایل و انحراف محور زمین مطابقت دارد و از آن جهت مهم است که این تغییرات علت اصلی توالی دوره‌های یخبندان کواترنر بوده‌اند [29].

به این ترتیب، این تغییرات روی آب‌وهوای زمین در دوره‌های متفاوت و متوالی تأثیر گذاشته‌اند که بخش مهم و اعظم آن در خصوص دوره‌های یخچالی ـ بین‌یخچالی است. در مقاله‌ی حاضر سعی بر این بوده است که ابتدا پس از آشنایی و معرفی مختصر این چرخه و تغییرات آن در طول زمان، ارتباط آن با تغییرات آب‌وهوای گذشته و حتی حال بررسی و تفسیری مختصر از اتفاقات آب‌وهوایی دیرینه ارائه شود. ابتدا اصول و سازوکار حرکات کره‌ی زمین و چگونگی تأثیر آن بر فصول و آب‌وهوا مختصراً توضیح داده شده و سپس وضعیت آب‌وهوای دیرینه مورد بررسی قرار گرفته است [۲].

کلید واژه‌ها: چرخه‌ی میلانکوویچ، کره‌ی زمین، آب‌وهوا، فسیل.

مقدمه

یکی از بخش‌های مورد توجه علم زمین‌شناسی که جزو مباحث مشترک زمین‌شناسی و جغرافیا نیز محسوب می‌شود، آب‌وهوا و تغییرات آن در ارتباط با وضعیت و موقعیت قرارگیری زمین در مدار چرخشی خود است. تغییرات انرژی خورشیدی متأثر از موقعیت کره‌ی زمین و تأثیر آن بر دما و آب‌وهوا، در فصل دوم کتاب زمین‌شناسی سال سوم و مفهوم انحراف محور زمین و اثر آن در پیدایش فصول و تنوع آب‌وهوایی، در فصل اول کتاب پیش‌دانشگاهی به‌طور مختصر و مبهم ارائه شده است. با توجه به اهمیت موضوع و مشترک بودن این مباحث در دو درس زمین‌شناسی و جغرافیا و تدریس کتاب‌ها توسط دبیران هر دو رشته، بر آن شدیم برای درک بهتر مطالب و رفع ابهامات موجود به ارائه‌ی اطلاعات بیشتری بپردازیم. در مقاله‌ی حاضر، این موضوعات در قالب و مفهوم جدید چرخه‌ی میلانکوویچ و به‌عنوان یکی از علل اصلی تغییرات آب‌وهوایی و موضوع روز دنیا مورد بررسی قرار گرفته‌است.

میلوتین میلانکوویچ

میلوتین میلانکوویچ[6] ژئوفیزیک‌دان صربستانی (۱۹۵۸ـ۱۸۷۹)، به‌خاطر نظریه‌هایی که در مورد عصرهای یخبندان و اختلاف مدار زمین به‌دور خورشید در دوره‌های آب‌وهوایی ارائه داد، به شهرت رسید. وی موفق به دریافت مدرک دکترای فناوری در سال ۱۹۰۴ از دانشگاه وین در اتریش شد.

اقامت او در بلگراد (پایتخت یوگسلاوی سابق) مقارن با جنگ جهانی اول بود. در پایان جنگ جهانی اول در سال ۱۹۱۸، به‌عنوان کارمند کتاب‌خانه‌ی آکادمی علوم مجارستان

در «اتریش ـ مجارستان»[7] مشغول به‌کار شد [25&30]. وی در سال ۱۹۱۲ به مطالعه‌ی آب‌وهوا و دمای سیارات علاقه‌مند شد. پایان جنگ و استخدام میلانکوویچ در کتاب‌خانه، موقعیتی مناسب برای وی فراهم آورد تا به مطالعه در این رشته بپردازد.

میلانکوویچ سرانجام در سال ۱۹۲۰ مقاله‌ای در مورد محاسبه‌ی پدیده‌ی حرارتی ناشی از پرتوهای خورشیدی ارائه کرد. آن‌چه او ارائه کرد، در واقع منحنی تغییرات پرتوهای خورشیدی بود که به سطح زمین می‌تابید. البته ایده‌ی وی تا سال ۱۹۲۴ مورد توجه قرار نگرفت تا این‌که آب‌وهواشناسان معروف آن زمان، یعنی ولادیمیر کوپن[8] و پسرش این منحنی‌ها را تحت عنوان آب‌وهوای یخچال‌های گذشته ارائه کردند. این اتفاق سبب شدکه میلانکوویچ به همکاری در نشر دو کتاب در مورد آب‌وهوا و ژئوفیزیک دعوت شود.

میلانکوویچ به تحقیق خود ادامه داد و به نتایج دقیق‌تری از مطالعات آب‌وهوایی دست یافت و آن را در سال ۱۹۳۰ در آلمان منتشر کرد. میلانکوویچ در سال ۱۹۲۰ به‌عنوان عضو افتخاری آکادمی علوم و فنون صربستان و در سال ۱۹۲۴ و به‌عنوان عضو فعال این آکادمی برگزیده شد [11&30]. در سال ۱۹۵۰ او تئوری عصر یخ را ارائه داد که با مخالفت گروهی از زمین‌شناسان مواجه شد. این گروه مدعی بودند تغییرات پرتوهای خورشیدی حاصل از تغییرات مدار زمین بسیار کم و ناچیز است و نمی‌تواند روی سیستم آب‌وهوای زمین تأثیر بگذارد. اما ده سال بعد و بعد از مرگ میلانکوویچ (۱۹۸۵ در بلگراد) و در طول سال‌های ۷۰ـ۱۹۶۰، تحقیقات وسیع روی بستر دریاها نظریه‌های او را تأیید کرد [30].

تغییر شکل مدار زمین یا خروج از مرکز

زمین در چرخش خود به دور خورشید در مدار مشخصی حرکت می‌کند که شکل این مدار حول خورشید، به دلیل نیروی جاذبه‌ی بین سیارات، مانند مدار بسیاری دیگر از سیارات منظومه‌ی شمسی ثابت نیست و تغییر می‌کند. این مقدار طی فواصل زمانی متفاوت از یک مسیر دایره‌ای تا بیضوی و طی دوره‌های۱۰۰،۱۲۵ و ۹۵ هزار ساله طی می‌شود و تغییر می‌یابد. تغییر شکل مدار زمین را با e نشان می‌دهند

$$e=\frac{d_a - d_p}{d_a - d_a}$$

که با استفاده از رابطه‌ی بدست می‌آید. در این رابطه، da بیشترین

فاصله تا مرکز خورشید و dp کمترین فاصله است. برای مثال، اگر e=0 باشد، شکل مدار دایره‌ای و اگر 0<e<1 باشد، مدار بیضی خواهد بود [29].

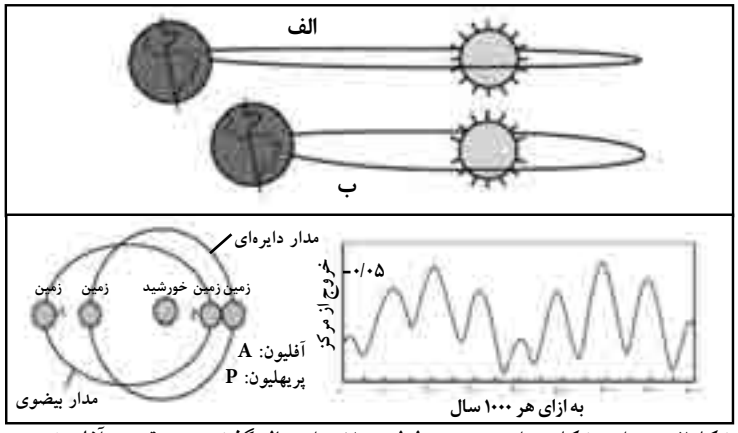
خروج از مرکز، در رابطه با تغییر شکل مدار سیارات و تغییرات تبدیل شکل دایره‌ای و بیضی مدار زمین حول خورشید است و کشیدگی این مدار از حالت کاملاً دایره تا بیضوی، در سیارات مختلف متفاوت است (شکل ۱). برای مثال، بین سیارات منظومه‌ی شمسی، عطارد دارای چرخه‌ی خروج از مرکز ۰/۲۰۵ است [۱]. خروج از مرکز مدار زمین در طول زمان از کمترین مقدار، یعنی صفر و شکل دایره‌ای تا حدود سه برابر حالت امروزی تغییر یافته است [34]. بیشترین مقدار خروج از مرکز مدار زمین ۰/۰۵۸ و کمترین مقدار آن ۰/۵۰۰ است. خروج از مرکز کنونی مدار زمین ۰/۰۱۷۰ است؛ یعنی دارای مداری تقریباً دایره‌ای شکل است. وقتی مدار زمین بیضی شکل باشد، خورشید در مرکز این بیضی نیست و به یک سمت نزدیک‌تر است. بدین‌ترتیب، زمین طی چرخش به دور خورشید، به‌طور متناوب به خورشید نزدیک و دور می‌شود که به تعریف دو نقطه‌ی آفلیون[9] و پریهلیون[10] می‌انجامد. نقطه‌ی آفلیون دورترین فاصله تا خورشید و پریهلیون نزدیک‌ترین فاصله تا خورشید خواهد بود [29] (شکل ۲). فاصله‌ی خورشید تا زمین در پریهلیون کمتر از این فاصله در آفلیون است ولی این تفاوت اندک است و تنها ۳ درصد کمتر از فاصله‌ی آن در آفلیون است [34] و این اختلاف حدود ۳ درصدی، برابر مقدار عددی معادل ۵/۱ میلیون کیلومتر است [11]. به عبارت دیگر، زمین در موقعیت آفلیون خود حدود ۵/۱ میلیون کیلومتر دورتر از خورشید نسبت به موقعیت پریهلیون است و تفاوت مقدار انرژی دریافتی این دو نقطه از خورشید تنها ۳۰ درصد است [27&33].

خروج از مرکز زمین در حال حاضر ۱ درصد است، اما در عصر یخ ۶ درصد بوده است. یعنی در آن زمان، مدار زمین کشیده‌تر و زمین مسافت بیشتری را به دور خورشید می‌چرخیده است. به عبارت دیگر، عصر یخ زمانی آغاز شد که مدار زمین در کشیده‌ترین حالت خود و وقتی که در نقطه‌ی آفلیون در دورترین فاصله قرار داشته، رخ داده است. امروزه آفلیون در ژانویه (دی) و پریهلیون در جولای (تیر) رخ می‌دهد [33] و این تغییر فاصله‌ی زمین از خورشید به ایجاد فصول منجر می‌شود. برای مثال، وقتی زمین در پریهلیون است، در اول ژانویه به خورشید نزدیک و در نیم کره‌ی شمالی فصل زمستان است [34].

شکل ۱. چرخه‌ی تغییر شکل زمین

الف) مدار زمین با خروج از مرکز بیشتر (بیضی‌شکل).

ب) مدار زمین با خروج از مرکز کمتر (بیضی با کشیدگی کمتر) [28].



شکل ۲. تغییرات شکل مدار زمین در طول ۷۵۰ هزار سال گذشته و موقعیت آفلیون و پریهلیون زمین [۵]

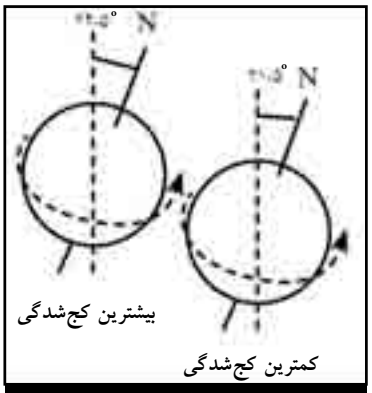
انحراف محور زمین[11]

محور زمین، خطی فرضی و عمود بر استواست که از دو قطب شمال و جنوب زمین می‌گذرد. این خط نسبت به خط فرضی قائم بر مدار زمین و سطح افق، دارای کجی و انحراف است. به عبارت دیگر، محور زمین به صورت عمود بر زمین است، ولی این محور به صورت قائم در فضا قرار ندارد و با خط قائم زاویه می‌سازد [29]. تصور ما بر این است که این محور ثابت، و سمت شمال آن به‌سوی ستاره‌ی قطبی است. اما این جهت دائمی و ثابت نیست و به اندازه‌ی نیم درجه در هر قرن حرکت می‌کند مثلاً در زمان ساخت اهرام مصر و حدود ۲۵۰۰ سال قبل از میلاد، نزدیک ستاره‌ی «توبان»[12] بوده، ولی امروزه به سمت ستاره‌ی قطبی است [34]. پس میزان این کجی و انحراف (زاویه‌ی انحراف) در طول زمان متغییر است و مقدار آن از ۲۱/۵ درجه به ۲۴/۵ رسیده و دوباره به حالت اولیه‌ی خود (۲۱/۵) بازمی‌گردد که زمان این جابه‌جایی دارای چرخه‌ای است که این چرخه‌ی تکرار، ۴۱۰۰۰ سال طول می‌کشد.

انحراف محور زمین از حالت قائم تأثیر بسیار زیاد و مهمی روی آب و هوای زمین دارد. به‌طوری که اگر محور زمین مایل و کج نبود، قطب‌ها همواره در زمستان و سرد بودند (عصر یخ). چرا که در این صورت،

زمین کروی‌شکل و پرتوهای تابشی خورشید مستقیم می‌شوند و این‌گونه سرمای دائمی عصر یخ را خواهیم داشت. وقتی کج‌شدگی زیاد باشد، زمستان‌ها بسیار سرد و تابستان‌ها گرم‌تر می‌شوند و با کج‌شدگی کم‌محور زمین، زمستان‌ها ملایم‌تر و تابستان‌ها خنک‌تر می‌شوند. زمستان‌های ملایم، رطوبت هوا را جذب می‌کنند و سبب بارش برف متوالی می‌شوند. هم‌چنین تابستان‌های سردتر، ازذوب یخ‌های زمستانی جلوگیری می‌کنند و امکان تشکیل لایه‌های یخی را افزایش می‌دهند. تمام این عوامل باعث شروع عصر یخ و گسترش یخچال‌ها می‌شوند [29]. قابل توجه است که وجود دو عامل کمترین کجی محور زمین (۲۱ درجه) و بیشترین کشیدگی مدار آن در ۱۱۵ هزار سال قبل، باعث ایجاد زمستان‌های شدید (منطبق با عصر یخ) شده است [33].

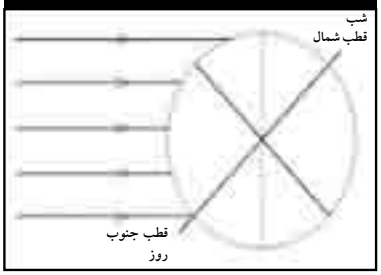
همان‌طور که اشاره شد، انحراف محور زمین تأثیر شگرفی بر دما در بخش‌های گوناگون زمین



شکل۳. میزان کج شدگی محور در بیشترین و کمترین مقدار

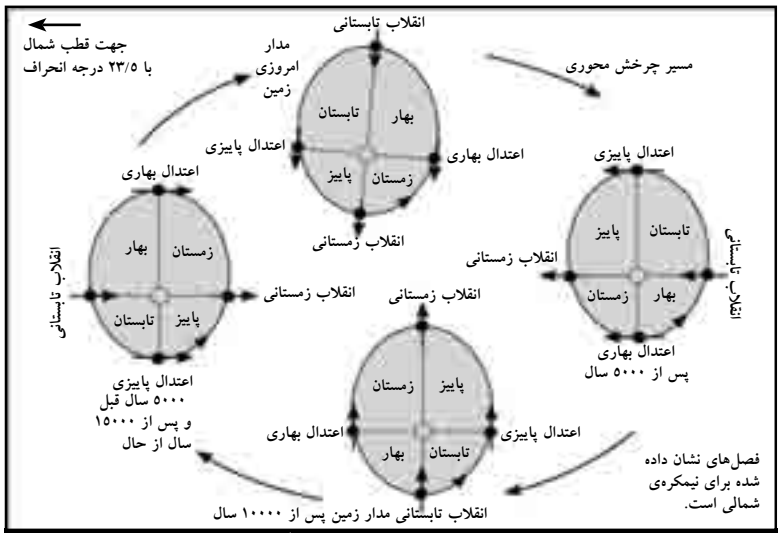
گذاشته است؛ به‌طوری که در حال حاضر نیم‌کره‌ی جنوبی کره‌ی زمین در پریهلیون رو به خورشید است و با وجود چرخش زمین به دور خود، قطب شمال ۶ ماه شب و بر عکس قطب جنوب ۶ ماه روز است. اما در آفلیون، قطب شمال ۶ماه روز و قطب جنوب ۶ماه شب است که به وضعیت زمین در این حالت وقتی در موقعیت پریهلیون باشد، انقلاب زمستانی و وقتی در موقعیت آفلیون باشد، انقلاب تابستانی گویند (شکل‌های ۵و۶) [29].

شکل٤. زمین در وضعیت پریهلیون[۲۷]



هستند و قطبین از دریافت پرتوهای نورانی خورشید محروم‌اند [29]. بدین‌ترتیب، در این موقعیت‌ها یک قطب نسبت به قطب دیگر تفاوت فاحش فصلی نشان خواهد داد. نیم‌کره‌ای که در پریهلیون تابستان را سپری می‌کند، انرژی نورانی بیشتری دریافت می‌کند، اما در آفلیون در زمستان سرد قرار دارد. اما در نیمکره‌ی مقابل شرایط کاملاً برعکس خواهد بود [29&34]. همان‌طور که گفته شد، در حال حاضر نیم‌کره‌ی جنوبی در پریهلیون تابستان را سپری می‌کند و زمستان در این نیم‌کره زمانی است که زمین در موقعیت آفلیون قرار گیرد.

قابل توجه است که چرخه‌ی ۴۱هزارساله‌ی



شکل۵. تغییر در مدار چرخش زمین و موقعیت‌های متفاوت آن طی چرخش به دور خورشید و ایجاد فصول [۲٤]

همان‌طور که در شکل‌های (۴و۵) نشان داده شده است، در نزدیک‌ترین فاصله تا خورشید (پریهلیون)، با وجود چرخش زمین به دور خود، در قطب شمال همواره شب و در قطب جنوب همواره روز خواهد بود. در موقعیت آفلیون نیز قطب شمال همواره روز و قطب جنوب همواره شب خواهد بود. چرا که زمین گرد و پرتوهای نورانی مستقیم

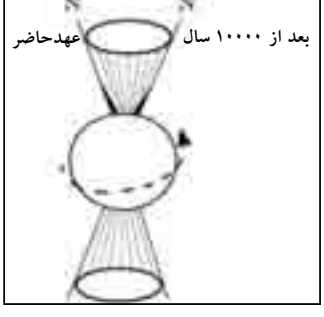
کج‌شدگی محور زمین و تأثیر آن بر آب‌وهوا، به مطالعات زیادی منجر شده است. به طوری که مطالعه‌برروی گروهی از فرامینیفرهای بنتیک، نسبت ایزوتوپ‌های اکسیژن در حجم یخ‌های جهانی و در کربنات کلسیم اسکلت مرجان‌ها و پوسته‌ی فرامینیفرها و هم‌چنین نسبت منیزیم به کلسیم موجود در آب‌های عمیق، به خوبی صحت آن را به اثبات رسانده است.

به‌علاوه، اخیراً گروهی از محققان اعلام کرده‌اند که اشتقاق و تنوع گونه‌های استراکد بنتیک نیز کاملاً با این چرخه قابل انطباق است [33].

تغییر جهت محور زمین [13]

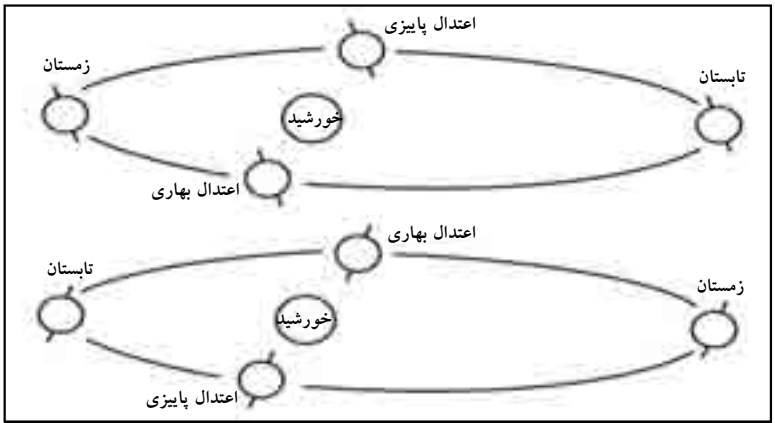
زمین کره‌ای است که محور فرضی آن از قطب شمال به قطب جنوب کشیده شده است. این محور نسبت به سطح افق قائم نیست و دارای زاویه است که در صفحه از شرق به غرب بین ۲۱/۵ تا ۲۴/۵ درجه تغییر می‌کند. اما این محور دارای جابه‌جایی دیگری نیز هست که خارج از یک بعد است و به‌صورت چرخشی حول یک مرکز ثابت جابه‌جا می‌شود. در واقع، زمین در حین چرخش حول محور خود یک مسیر دایره‌ای ۳۶۰ درجه‌ای را در فضا طی می‌کند. این چرخش در حول محور، برابر ۱ درجه در طول حدود ۱۸۰ سال است و یک چرخه‌ی کامل ۲۵۸۵۰۰ سال طول می‌کشد و علت اصلی آن، نیروی گرانشی ماه و خورشید بر زمین، به‌ویژه بر قسمت استوایی آن است [24]. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، حلقه‌ای فرضی در قسمت بالایی زمین (به موازات خط استوا) در نظر می‌گیریم که محور زمین روی محیط دایره حرکت می‌کند و حدود هر ۲۵۸۵۰۰ سال یک دور کامل می‌زند.

شکل ۶. موقعیت محور زمین طی چرخش ۳۶۰ درجه‌ای حول محور مرکزی از حالا تا ۱۰ هزار سال آینده.



در طول زمان، چرخش آرام زمین حول محور خود و در مسیر دایره‌ای باعث تغییر موقعیت زمین نسبت به خورشید و جذب انرژی نورانی آن می‌شود و به ایجاد فصل‌های گرم و سرد با توجه به مقدار انرژی می‌انجامد. به عبارت دیگر، با این چرخه دو نیم‌کره‌ی شمالی و جنوبی با فاصله‌ی زمانی حدود ۲۳ هزار سال به سمت خورشید قرار می‌گیرند (شکل ۷). این وضعیت در ایجاد آب‌وهوای متفاوت و ایجاد فصل‌ها نقش دارد (شکل‌های ۵ و ۷). به این ترتیب که سمت رو به خورشید، انرژی نورانی بیشتری دریافت می‌کند و دارای گرمای بیشتری می‌شود و فصل تابستان را ایجاد می‌کند. این تأثیر زمانی که مسیر مدار زمین به‌دور خورشید نزدیک دایره است، کم است، اما وقتی مسیر بیضی باشد، این تأثیر به ایجاد فصول سرد و گرم با اختلاف دمایی فاحش منجر می‌شود [24 و ۲].

هم‌چنین، این شرایط با کج‌شدگی محور زمین تشدید می‌شود و علت آن کرویت شکل زمین است. به طوری که هرچه از سمت استوا به سمت قطبین حرکت کنیم، به علت کروی بودن آن، زاویه‌ی تابشی پرتوهای خورشیدی مایل‌تر می‌شود و انرژی گرمایی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با حرکت به سمت استوا، زاویه‌ی تابشی نزدیک به قائم و انرژی تشعشعی بیشتر و دمای زمین افزایش می‌یابد که انحراف محور زمین در وضعیت قطبین تغییر ایجاد می‌کند و مقدار تشعشعات نورانی را تقلیل می‌دهد. حال هرگاه نیم‌کره‌ای رو به خورشید باشد، به علت جذب اشعه‌های نورانی بیشتر، دارای فصل تابستان و نیم‌کره‌ی دیگر در همین وضعیت دارای فصل زمستان خواهد بود. بنابراین تنوع فصلی در دو نیم‌کره، تحت تأثیر مستقیم انحراف محور زمین و چرخش آن است [۲ و 27]. جدول ۱ وضعیت فصل سرد و گرم را در دو نیم‌کره بیان می‌کند.



شکل ۷. تغییرات حرکات زمین حول خورشید که نشان‌دهنده‌ی تغییرات آب‌وهوای زمین است.

الف	ب	الف	ب	
پریهلیون	پریهلیون	آفلیون	آفلیون	
تابستان	زمستان	زمستان	تابستان	نیم‌کره‌ی شمالی
زمستان	تابستان	تابستان	زمستان	نیم‌کره‌ی جنوبی

جدول ۱. الف) نیمکره‌ی شمالی به سمت خورشید باشد.
ب) نیمکره جنوبی به سمت خورشید باشد (در حال حاضر)

لازم به ذکر است، چرخه‌های انحراف محور زمین و خروج از مرکز نیز در تغییرات آب‌وهوا نقش دارند. اما نقش آن‌ها نسبت به چرخه‌ی تغییر جهت محور زمین قابل ملاحظه نیست [۲۷].

تغییر جهت محور زمین و طول شب و روز

با توجه به ارتباط چرخه‌ی تغییر جهت محور زمین و تنوع فصلی در نیم‌کره‌ها، می‌توان گفت تحول شب و روز در نیم‌کره‌ها در موقعیت آفلیون و پریهلیون طی زمان‌های متفاوت یکسان نیست. چرا که تغییر طول شب و روز در ابتدای زمستان و ابتدای تابستان برای هر دو نیم‌کره اتفاق می‌افتد. حال اگر در زمستان و تابستان نیم‌کره‌ها در وضعیت پریهلیون و آفلیون تغییر کند، یقیناً تحول طول شب و روز را در نیم‌کره‌ها بیان می‌کند. چرا که طول و دمای روز و شب نیز مستقیماًبه میزان تشعشعات نورانی خورشید که زمین دریافت می‌کند، وابسته است و کرویت و میزان انحراف محور زمین در طول آن‌ها تأثیر مستقیم دارد (جدول۲) [۲۷].

زمین دارند. برای داشتن تفسیر و تجزیه و تحلیل صحیح از این تغییرات آب‌وهوایی، باید اطلاعات دقیقی از این چرخه‌ها داشت. به یقین در گذشته نیز کره‌ی زمین دچار این تغییرات و نوسانات بوده است که بررسی و مطالعه‌ی آن‌ها در حیطه‌ی آب‌وهواشناسی دیرینه است در این‌جا به اهمیت این چرخه در طول تاریخ زمین به‌ویژه در «نئوژن» می‌پردازیم.

در مطالعه ی آب‌وهوای گذشته‌ی زمین ضروری است که دوره‌های یخچالی و بین یخچالی کره‌ی زمین مورد بررسی قرار گیرند. به‌طور کلی، دوره‌های یخچالی دوره‌های سردتر آب‌وهوای زمین، و دوره‌های میان یخچالی، دوره‌های گرم‌تر آب‌وهوای زمین در طول میلیون‌ها سال قبل هستند [28]. نظریه‌ها بیانگر آن است که قدیمی‌ترین عصر یخ در حدود ۲/۷ـ۲/۳ میلیارد سال قبل در طول پروتروزئیک پیشین اتفاق افتاده است. اما قدیمی‌ترین اسناد معتبر مربوط به عصر یخ نشان می‌دهد که حداقل چهار عصر یخی مهم در گذشته‌ی زمین وجود داشته است [26]:

۱. عصر یخی اولیه در حدود ۸۰۰ـ۶۰۰ میلیون سال قبل: در این مدت یخ‌های دریایی تا نزدیک استوا پیش آمده و زمین از فاصله‌های خیلی دور شبیه گلوله برفی بوده است. پایان این دوره مطابق با پایان کامبرین بوده است.

۲. عصر یخچالی دوم که به‌طور ضعیفی در حدود ۴۶۰ـ۴۳۰ میلیون سال قبل در طول اردویسین پسین اتفاق افتاده است.

۳. عصر یخچالی سوم که در حدود ۳۵۰ـ۲۶۰ میلیون سال قبل در طول پرمین پیشین رخ داده است.

۴. آخرین عصر یخچالی که از ۴۰ میلیون سال قبل آغاز شده است و تا ۱۰ هزار سال قبل ادامه داشته است.

در میان دوره‌های یخچالی، دوره‌های چندین میلیون‌ساله نیز وجود دارند که زمین دارای آب‌وهوای معتدل‌تری است. دوره‌هایی که آب‌وهوای زمین گرم‌تر است، دوره‌های میان‌یخچالی و دوره‌های سردتر، دوره‌های یخچالی نامیده می‌شوند. ما هم اکنون دوره‌ی میان یخچالی را سپری می‌کنیم که حدود ۱۰ هزار سال از شروع آن گذشته است [28]. چرخه‌های میلانکوویچ در دوره‌های یخچالی و بین یخچالی تأثیر دارند، چرا که مهم‌ترین دوره‌های یخچالی ۱۰۰هزار سال قبل رخ داده‌اند و از نظر زمانی با تغییرات مدار و محور زمین مطابقت می‌کند که این تغییرات در میزان پرتوهای

الف	ب	الف	ب	
پریهلیون	پریهلیون	آفلیون	آفلیون	
بلندترین روز	کوتاه‌ترین روز	کوتاه‌ترین روز	بلندترین روز	نیم‌کره‌ی شمالی
کوتاه‌ترین روز	بلندترین روز	بلندترین‌روز	کوتاه‌ترین‌روز	نیم‌کره‌ی جنوبی

جدول ۲ . الف) اگر نیمکره ی شمالی به سمت خورشید باشد. ب) اگر نیمکره جنوبی به سمت خورشید باشد (در حال حاضر).

آب‌وهوا و دوره‌های یخچالی و بین یخچالی

چرخه‌های حرکت زمین که توسط میلانکوویچ معرفی شدند، نقش بسیار مهمی در آب‌وهوای نقاط گوناگون کره‌ی خورشیدی تأثیر گذاشته و سردی هوا و یخبندان را منجر شده است [26]. برخی از دانشمندان مانند **رودیمن** (۱۹۹۱) معتقدند که تأثیر عامل فعالیت‌های انسانی و تشکیل گازهای گل‌خانه‌ای حاصل از فعالیت‌های

صنعتی انسان‌ها، با عامل کشیدگی محور زمین یا خروج از مرکز صدهزار ساله و چرخش محوری ۴۱ هزار ساله ترکیب شده و تمام این عوامل بر مدت زمان دوره‌های میان یخچالی و یخچالی تأثیرگذار بوده و سبب تغییر زمانی در رخداد این دوره شده است [۳و 26].

قابل ذکر است که سه عامل کلی در پیدایش یخچال‌ها در سطح زمین نقش بیشتری دارند که عبارت‌اند از: ۱. ترکیب اتمسفر (مقدار CH_4 و CO_2) و مقدار غبار، ۲. تغییرات حرکت زمین حول خورشید، ۳. نحوه‌ی قرارگیری قاره‌ها [36 و 17 و 16 و 15 و3].

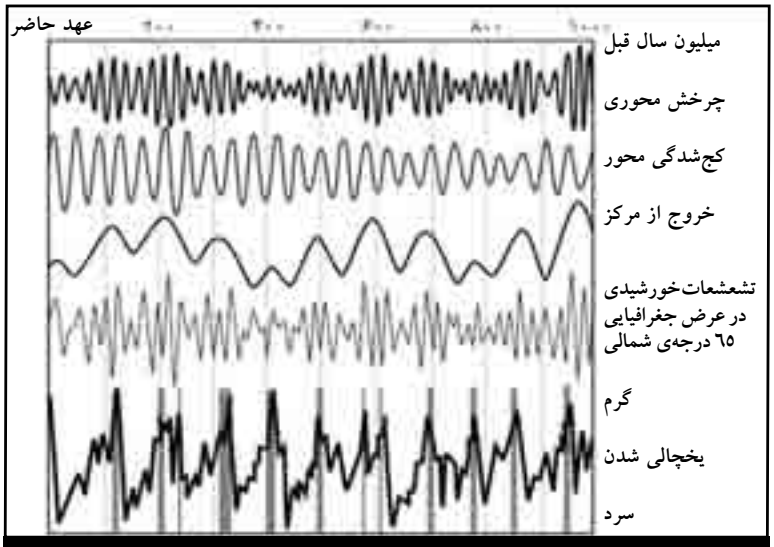
به نظر می‌رسد، نقش تغییرات حرکت زمین حول خورشید بر اساس چرخه‌ی میلانکوویچ، تأثیر مهم‌تر و شگرف‌تری داشته که در این‌جا قابل بررسی و تجزیه و تحلیل است [15].

در این راستا می‌باید تأثیر سه چرخه‌ی میلانکوویچ چرخه‌ی میلانکوویچ (چرخه‌ی خروج از مرکز، چرخه‌ی انحراف محوری زمین و چرخه‌ی تغییر جهت محور زمین) بر آب و هوا (تشکیل دوره‌های یخچالی و میان یخچالی) مورد بررسی قرار گیرد. هرچند ابتدا تأثیر این چرخه‌ها در تغییرات آب‌وهوا در گذشته و ایجاد دوره‌های یخچالی با توجه به تغییر در میزان پرتوهای خورشیدی رد شد، اما امروزه صحت این نظریه به اثبات رسیده است. به‌طوری که امروزه مبنایی برای بررسی تغییرات آب و هوای پلیوستوسن شده و علت اصلی شروع دوره های یخچالی و بین یخچالی در نظر گرفته شده است[8]. حتی از آن برای تعیین سن رسوبات قبل از پلیوستوسن نیز استفاده می‌شود [22].

مطالعات متفاوت صحت و قابل انطباق بودن این چرخه‌ها باتغییرات آب‌وهوایی را به اثبات رسانده‌اند. شکل ۸ ، ارتباط و هماهنگی چرخه‌های میلانکوویچ را با یخچالی شدن و نیروهای کهکشانی در طول زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تمام چرخه‌های به سمت حال حاضر کوچک می‌شوند. مثلاً کج‌شدگی محوری متوسط است، اما به سمت عهد حاضر درحال کاهش است و این خود باعث کاهش تغییرات فصلی می‌شود. به این ترتیب، با بررسی نمودارها مشخص می‌شود که شرایط امروزی قابل مقایسه و تطبیق با شرایط ۴۰۰هزار سال قبل و دوره‌ی بین یخچالی آن زمان است؛ البته با این تفاوت که دوره‌ی بین یخچالی عهد حاضر، کمی گرم‌تر از ۴۰۰ هزار سال قبل است. اضافه شدن دی‌اکسید کربن به اتمسفر، زمان عصر یخ را در آینده تحت تأثیر قرار خواهد داد و دوره‌ی یخچالی بعدی ۵۰ هزار سال به تعویق خواهد افتاد [۲۸&۳۱].

زمین در چرخش خود به دور خورشید در مدار مشخصی حرکت می کند که شکل این مدار حول خورشید، به دلیل نیروی جاذبه‌ی بین سیارات، مانند مدار بسیاری دیگر از سیارات منظومه‌ی شمسی ثابت نیست و تغییر می کند

در این زمینه، **برگر** (۱۹۹۱) و **لاسکر** (۱۹۹۳) نیز مطالعاتی را در خصوص چرخه‌های میلانکوویچ و تأثیر پرتوهای خورشید در عرض‌های متفاوت جغرافیایی انجام دادند. آن‌ها مطالعات خود را روی عرض ۶۵ درجه‌ی شمالی و در محدوده‌ی زمانی یک‌میلیون‌سال قبل تا عهد حاضر به انجام رساندند و مشخص کردند که در نیم‌کره‌ی شمالی، اوج پرتوهای تابستانی حدود نه‌هزار سال قبل بوده و به ذوب ورقه‌های بزرگ یخ منجر شده است. بعد از آن زمان، تابستان‌های نیم‌کره‌ی شمالی

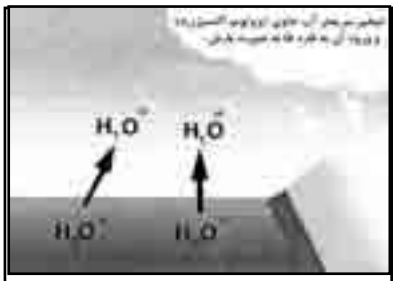


شکل۸. تطابق نمودارهای مربوط به چرخه میلانکوویچ با دوره‌ی یخبندان و دمای زمین [31].

تشعشعات خورشیدی کمتری دریافت کرده است. آنالیزهای طیفی روی تشعشعات خورشیدی و پراکندگی نوسانات آن، تأثیر آن‌ها را روی آب و هوا اثبات و تأیید کرده است.

هم‌چنین، مطالعات روی رسوبات کف دریاها که به وسیله‌ی پیش‌روی و پس‌روی یخچال‌ها به هم ریخته نشده‌اند و برجا هستند، به‌علاوه تکنیک‌های ایزوتوپی، امکان ترسیم منحنی‌های آب‌وهوایی را در طول هفت هزار سال گذشته فراهم کرده است. ترکیب این اطلاعات با یافته‌های مربوط به واژگونی قطب‌های مغناطیسی زمین، می‌تواند زمان این منحنی‌ها را مشخص کند که نتایج حاصل، به‌علاوه اطلاعات چندین چرخه‌ی آب‌وهوایی مشخص، با ایده‌های میلانکوویچ نزدیک است و هماهنگی نشان می‌دهد [37&38]. این اطلاعات نشان می‌دهند که زمان‌های مربوط به فصول با درجه‌ی حرارت‌های شدید، مانند تابستان‌های خیلی گرم و زمستان‌های خیلی سرد، برای رشد یخچال‌های مطلوب نبوده است. چرا که باعث ذوب یخ‌ها طی تابستان و ایجاد یخ کمتر در طول زمستان‌های سرد و خشک می‌شده است. اما طی شرایط معتدل تابستان، ذوب برف کمتر و بارش برف در زمستان بیشتر است که به تجمع برف‌ها و ایجاد یخچال می‌انجامد [35&33]. در واقع، تابستان‌های داغ و زمستان‌های سرد به عقب‌نشینی یخچال‌ها و پایان عصر یخ منجر شده است [35].

مطالعات ایزوتوپی و بررسی درصد ایزوتوپ‌های اکسیژن در رسوبات اقیانوس نشان می‌دهد که عصر یخ دقیقاً چه زمانی رخ داده‌است. چرا که اکسیژن ۱۶ به عنوان ایزوتوپ سبک، به آسانی از آب اقیانوس تبخیر می‌شود و مقدار آن در باران و برف حاصل از تبخیر آب اقیانوس‌ها، نسبت به اکسیژن ۱۸ بیشتر است. به همین دلیل یخچال‌ها غنی از اکسیژن ۱۶ هستند. این کاهش یک در میلیون اکسیژن ۱۸ نسبت به اکسیژن ۱۶ در یخ‌ها، منعکس‌کننده‌ی کاهش ۱/۵ درجه‌ی دما و سرد شدن در طول زمان است. بررسی‌ها ثابت کرده‌اند، این تغییرات ایزوتوپی منطبق بر چرخه‌ی خروج از مرکز ۱۰۰ هزار ساله است [18&33] (شکل۹). بدین‌ترتیب، اگر امروز مانند عصر یخ، یخچال‌ها وجود داشتند، با ورود اکسیژن ۱۶ به یخ‌ها آب اقیانوس‌ها تهی از اکسیژن ۱۶ و غنی از اکسیژن ۱۸ می‌شدند که این ویژگی به خوبی در رسوبات مربوط به کف اقیانوس‌ها منعکس شده و بررسی می‌شود. از آن‌جا که اقیانوس‌ها حدود هزار سال قبل به هم متصل بوده‌اند، نبود اکسیژن ۱۶ در آب تمام اقیانوس‌ها دیده می‌شود [32&9].



شکل۹. خروج سریع اکسیژن ۱۶ از آب دریاها و ذخیره‌ی آن در یخچال‌ها [32].

مطالعات **مولر** و **مک دونالد** (۱۹۹۵) نشان می‌دهد که ما در طول یک میلیون‌سال گذشته، در هر ۱۰۰ هزار سال دارای اوج تمرکز ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ در آب اقیانوس‌ها و اکسیژن ۱۶ در یخ‌ها بوده‌ایم. این دقیقاً بر دوره‌های سرد و تراکم یخچال‌ها و شروع عصر یخبندان دلالت دارد. از طرف دیگر، مقدار این ایزوتوپ در هر ۱۰هزار سال در آب‌های اقیانوسی کم شده که بیانگر دوره‌ی گرم و ذوب یخچال‌هاست. تئوری میلانکوویچ این تغییرات آب‌وهوا را منطبق بر تغییر شکل مدار زمین و چرخه‌های خروج از مرکز آن که در دوره‌های ۴۰۰، ۱۲۵ و ۹۵ هزارساله اتفاق می‌افتد، در نظر می‌گیرد. البته مطالعات دیگر نظیر بررسی فسیل‌ها و مشاهده‌ی تغییرات آب‌وهوا روی آن‌ها در محدوده‌ی زمانی یک میلیون سال قبل به عنوان شاهد مستدل دیگر، بر دوره‌هایی که تئوری میلانکوویچ پیش‌بینی کرده، منطبق است. به عبارت دیگر، تغییرات گوناگون موجود در مجموعه‌های فسیلی باقی مانده از موجودات، با زمان این چرخه‌ها هماهنگ و تحت تأثیر آن‌هاست [14&9].

علاوه بر این، مطالعات جدید نشان می‌دهند که حدود ۲۳ میلیون سال قبل، ورقه‌های وسیع یخ روی قطب جنوب گسترش داشته‌اند که با گرم شدن جهانی زمین، حجم این یخ‌ها کاهش یافت. این یافته‌ها نشان داده‌اند که این یخچال‌های موقت و تغییرات آب‌وهوایی در طول دوره‌ای برابر ۲۰ تا ۲۵ میلیون سال قبل، به ویژه در مرز الیگوسن ـ میوسن، با چرخه‌ی میلانکوویچ منطبق است [13]. زاکوس و همکارانش (۲۰۰۱ و ۱۹۹۷) اعلام کردند که

مطالعه بر روی گروهی از فرامینیفرهای بنتیک، نسبت ایزوتوپ‌های اکسیژن در حجم یخ‌های جهانی و در کربنات کلسیم اسکلت مرجان‌ها و پوسته‌ی فرامینیفرها و هم‌چنین نسبت منیزیم به کلسیم موجود در آب‌های عمیق، به خوبی صحت آن را به اثبات رسانده است

در این زمان، خروج از مرکز زمین کم بوده و مدار گردش زمین به دور خورشید، دایره‌ای و کج‌شدگی در حداقل خود قرار داشته است. در نتیجه، فاصله‌ی آن از خورشید در طول سال یکسال باقی می‌مانده است. به علاوه، افزایش کج‌شدگی محور زمین که ایجاد کننده‌ی تغییرات شدید فصل‌هاست، در این زمان در حداقل مقدار خود قرار داشته است.

این وضعیت باعث شده است که اختلاف کمی در درجه‌ی حرارت بین تابستان و زمستان در قطب وجود داشته باشد. همین موضوع به گسترش ورقه‌های یخ در قطب جنوب کمک کرده است. این محققان به وسیله‌ی تجزیه‌وتحلیل رسوبات مربوط به مغزه‌های رسوبات کف اقیانوس، جزئیات بیشتری از آب‌وهوای موجود در زمان الیگوسن پسین ـ میوسن پیشین به‌دست آوردند. این لایه‌های رسوبی به ویژه لایه‌های شیلی که مربوط به میلیون‌ها سال قبل‌اند، حاوی جان‌داران کوچک دریایی فسیل شده هستند که اطلاعات زمانی مربوط به آب‌وهوای گذشته را ثبت کرده‌اند. علاوه بر این، موارد ایزوتوپ‌های اکسیژن موجود در رسوبات دمای آب اقیانوس‌ها و مقدار یخ‌گیر افتاده در یخچال‌ها را نشان می‌دهد [37&38].

هم‌چنین، مطالعات دیگری نشان می‌دهند جان‌داران و گونه‌های متفاوت مناطق خشکی، آب شیرین و دریا، با توجه به شرایط منحصر به‌فرد خود برای رشد در محیط، به تغییرات آب وهوایی محیط که منطبق بر چرخه‌های میلانکوویچ در کواترنری است واکنش می‌دهند. بدین‌معنی که چرخه‌های میلانکوویچ بر چرخه‌ی حیات موجودات نیز تأثیر گذاشته و به تغییر و تحول در تنوع و فراوانی جان‌داران و تغییرات بزرگ‌گونه‌ای در میان آنان منجر شده است. به‌عبارت دیگر، تغییرات آب‌وهوایی حاصل از این چرخه‌ها، باعث تفکیک و تغییر منظم و مرتب جمعیت‌های موجودات و ایجاد و توسعه‌ی اجتماعات جدید تحت شرایط آب‌وهوایی محیطی جدید شده است. یعنی گروهی از آن‌ها در پی این تغییرات از بین رفته و گروهی جدید جای‌گزین شده‌اند [9]. به‌طوری که مطالعات ون‌دام و همکارانش (۲۰۰۶) بر فسیل گروهی از پستان‌داران نشان داد که مسیر تکاملی گروهی از جوندگان در اسپانیای مرکزی، منطبق بر چرخه‌های خروج از مرکز و کج شدگی محور زمین و توسعه‌ی ورقه‌های یخ و سرمای حاصل از آن است. بدین‌ترتیب، تغییرات آب‌وهوایی حاصل که بر زمان این چرخه‌ها منطبق است، به تحولات گونه‌ای بین این موجودات انجامیده است [18]. تحقیقات زیادی در زمینه تأثیر چرخه‌های آب‌وهوایی بر روی گروه‌های مختلف جانداران انجام شده که بنت [۴] به اختصار به مواردی از آن‌ها به شرح ذیل اشاره می‌نماید:

با توجه به فسیل های یافت شده از پستان‌داران کوچک در کواترنری از شمال آمریکا، **گراهام** (۱۹۸۶) بیان کرد که گونه‌های این پستان‌داران، طی زمان‌های متفاوت پراکندگی وسیع داشته و در جهت‌های جغرافیایی شمال، جنوب، شرق و غرب آمریکا حرکت کرده و پخش شده‌اند. اما گونه‌هایی که در زمان پلیوستوسن در شمال شاخص و فراوان بودند، با تغییر شرایط محیطی و آب‌وهوا در زمان هولوسن، به سمت جنوب حرکت کرده و تغییر مکان داده‌اند. به این معنی که تغییرات آب‌وهوا به‌طور گسترده به تغییر و تحول در پراکندگی گونه‌ها و مهاجرت‌های بزرگ در میان آن‌ها منجر شده است.

هم‌چنین **کوپ** (۱۹۸۷ و ۱۹۷۹) توصیف کرد که چگونه گونه‌های سوسک با تغییر آب‌وهوا در کواترنری از نظر پراکندگی تغییر یافته‌اند. به‌طوری که در شمال آمریکا، با عقب‌نشینی یخ‌ها تنوع گونه‌ای افزایش یافته و گونه‌های متنوع سوسک‌ها با منشأهای متفاوت جغرافیای زیستی (بیوژئوگرافی) ظاهر شده‌اند. گونه‌های زیادی از آن‌ها نیز که در آخرین دوره‌ی بین یخچالی تنها در جنوب انگلستان یافت شده و مختص به این منطقه بودند، امروزه تنها در جنوب اروپا حضور دارند و فقط در این قاره یافت می‌شوند [6&7].

علاوه بر این استاگر (۱۹۸۸)، با بررسی رسوبات دریاچه‌ای در زامبیا شرح داد که فراوانی گونه‌های متفاوت «دیاتوم» تغییرات وسیع نشان داده‌اند و این تغییرات در گونه‌های دیاتوم‌ها طی ۴۰ هزار سال پیش، انطباق بر آخرین دوره‌های یخچالی را نشان می‌دهد. او این تغییر زیاد در فراوانی را پاسخی به تغییرات آب‌وهوایی کواترنری دانست. هم‌چنین، مطالعه روی مغزه‌های بستر اقیانوس‌ها در کواترنری پیشین و بررسی میکروفسیل‌های آهکی و سیلیسی بنتیک و پلانکتونیک نشان داده که گرم و سرد شدن آب‌ها طی این زمان، روی فراوانی و تنوع آن‌ها تغییر ایجاد کرده است. طی فاز یخ‌بندان، اجتماعات «فرامینیفر»های مربوط به شمال اقیانوس، به علت تغییرات دما به سمت جنوب آن‌که دارای شرایط محیطی مناسب‌تر بوده است، حرکت کرده‌اند.

ایمبری و **کیپ** (۱۹۷۱) عنوان کردند که حرکت «فرامینیفر بنتیک»[۱۴] در اقیانوس اطلس طی ۱۵۰ هزار سال گذشته، تحت

دوره‌های یخچالی دوره‌های سردتر آب‌وهوای زمین، و دوره‌های میان یخچالی، دوره‌های گرم‌تر آب‌وهوای زمین در طول میلیون‌ها سال قبل هستند

تأثیر شرایط محیطی و به علت تغییرات مربوط به جریان‌های عمیق اقیانوسی اتفاق افتاده که این تغییرات محیطی وابسته به چرخه‌های میلانکوویچ بوده است. فراوانی و تنوع اجتماعات «کوکولیت» نیز در اقیانوس آرام، طی ۴۰۰ هزار سال گذشته تغییر کرده است و بعضی گونه‌ها در رسوبات عصر یخ و بعضی نیز در رسوبات زمان بین عصر یخچالی فراوان هستند. از «رادیولرها گونه»[۱۵] که گسترش جهانی داشته است، امروزه تنها در محدوده‌ی دریای «اختسک»[۱۶] در شمال ژاپن و جنوب شرق روسیه، فراوان است. اما طی فاز یخبندان کواترنری، در عرض بالای اقیانوس آرام فراوان بوده است. این‌گونه نشان می‌دهد تغییرات جمعیتی مربوط به گونه‌های آن در مقیاس جهانی، حاصل تغییرات هوای کواترنری است. در بین «ماکروفونای دریایی»، نرمتنان نیز نسبت به تغییرات محیط به‌خوبی واکنش می‌دهند، به طوری با سرمای ابتدای کواترنری، این گروه به سمت مدیترانه حرکت می‌کنند و در آن‌جا فراوان می‌شوند.

علاوه بر تغییرات ایجاد شده در فونای جانوری، این تغییرات در فلورا و گیاهان نیز دیده شده است که نشانگر تأثیرات چرخه‌های میلانکوویچ روی این دسته از جانداران است. این تغییرات دمایی روی جنگل‌های استوایی در فراوانی و تنوع «تاکساها» و ترکیب جنگل‌ها تأثیر گذاشته است **اسپولدینگ** و همکارانش (۱۹۸۳) با مطالعات خود نشان دادند که گونه‌های درختان در ایالات متحده، در پلئیستوسن پسین و در عرض‌های پایین‌تر، تنوع بیشتری نسبت به امروزه داشته‌اند، اما فراوانی آن‌ها نسبت به امروز کمتر بوده است.

به‌این ترتیب و با موارد ذکر شده مشخص می‌شود که چگونه چرخ‌های میلانکوویچ بر وضعیت آب‌وهوا و حیات گروه‌های گوناگون موجودات تأثیر گذاشته و چگونه به تغییر و تحول در تنوع و فراوانی آن‌ها در مکان‌های گوناگون و طی زمان منجر شده است.

اشکالات وارد بر چرخه‌ی میلانکوویچ

در بررسی چرخه‌ی میلانکوویچ و آثر آن بر آب‌وهوا، دانشمندان نکاتی را ذکر می‌کنند که چرخه‌ی میلانکوویچ از پاسخ به آن‌ها ناتوان است. از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- همان‌طور که اشاره شد، خروج از مرکز چرخه‌های ۱۰۰ هزار، ۱۲۵ هزار و ۹۵ هزار ساله دارد. اما اطلاعات کافی از علت، سازوکار و چگونگی تبدیل این چرخه‌ها به هم وجود ندارد. حتی برخی در خصوص صحت اطلاعات موجود مشکوک هستند.
- چرخه‌های آب‌وهوا دارای سیکل ۴۱ هزار و ۱۰۰ هزار ساله است که چرخه‌ی ۴۱ هزار ساله با چرخه‌ی کجی محور زمین و چرخه‌ی ۱۰۰ هزار ساله با چرخه‌ی خروج از مرکز مطابقت می‌کند. ولی تاکنون دلیلی بر تبدیل این دو چرخه و ارتباط آن‌ها با هم ارائه نشده است.
- اگر خروج از مرکز دارای چرخه‌ی ۱۲۵ هزار ساله باشد، با توجه به این‌که بزرگ‌ترین چرخه‌ی آب‌وهوا ۱۰۰ هزار ساله است، میزان اطلاعات ثبت شده‌ی آب‌وهوای دیرینه برای تبدیل ارتباط بین آب‌وهوا و چرخه‌ی گریز از مرکز کافی نیست. زیرا اگر چرخه‌ی آب و هوا ۱۰۰ هزار ساله باشد، آن‌گاه تمام اثرات آب‌وهوا ۱۰۰ هزار ساله بررسی می‌شوند و نمی‌توان ارتباطی بین چرخه‌ی ۱۲۵ هزار و ۱۰۰ هزار ساله برقرار کرد.
- خروج از مرکز به‌طور واضح چرخه‌های ۹۵ هزار و ۱۲۵ هزار ساله را نشان می‌دهد، اما اطلاعات ثبت شده‌ی مربوط به تغییرات آب‌وهوا، این زمان‌ها را ثبت نکرده است و همه‌ی تغییرات تنها بر چرخه‌ی ۱۰۰هزار ساله منطبق است و جوابی برای این مسئله وجود ندارد.
- برخی از اطلاعات و محاسبات، زمان اوج خروج از مرکز مدار زمین را ۴۰۰ هزار سال نشان می‌دهند. اما این چرخه و آثار آن در تغییرات آب‌وهوایی شناخته نشده است. اگر چرخه‌ی ۱۰۰ هزار ساله دارای تأثیر آن‌چنان قوی بر آب‌وهوا است، دوره‌ی ۴۰۰ هزار ساله نیز باید آن‌را نشان دهد که بررسی ایزوتوپ‌ها تأثیر این چرخه را رد می‌کند. در این قضیه ابهامات زیادی وجود دارد.
- در طول یک میلیون سال قبل، آب‌وهوا حالت مشخصی داشته است که با چرخه‌ی ۴۱ هزار ساله‌ی چرخش محور و کج‌شدگی آن تطابق دارد. اما بعد از یک میلیون سال، با تغییرات ۱۰۰ هزار ساله ی خروج از مرکز هماهنگ است که هنوز دلیلی برای این تغییرات بیان نشده است.
- این چرخه برای پیش‌روی و عقب‌گرد دوره‌های یخبندان در دوره‌های یخبندان در

دوره‌ی زمانی ۱۰ تا ۱۰۰ هزار ساله مفید و قابل ارجاع است، اما نمی‌تواند علت ایجاد یخچال‌ها را در اولین بار توضیح دهد [29].

اما با تمامی اشکالات مذکور، این نظریه امروزه به جد قابل قبول و استفاده است و بسیاری از ابهامات موجود در زمینه‌ی تغییرات آب‌وهوا را پاسخ می‌گوید و از مباحث مورد توجه محافل علمی است. مطالعه‌ها و پژوهش‌های متفاوتی بر اساس آن صورت گرفته‌اند و موارد فراوانی نیز در حال انجام هستند.

پی نوشت

1. Adhemar
2. Croll
3. Eccentricity
4. Obliquity
5. Precession
6. Milutin Milankovich
7. Austro-Hungrian
8. Wladimir Koppen
9. Aphelion
10. Perihelion
11. Axial Tilt
12. Thuban
13. precession
14. Uvigerina peregrine
15. Cycladophora davisiana
16. Okhotsk

منابع

۱. اسدیان، خ. (۱۳۶۵). جغرافیای دیرینه. انتشارات دانشگاه تهران.

۲. اخروی، ر. (۱۳۸۲). مبانی زمین‌شناسی. انتشارات امیرکبیر.

۳. دانشیان، ج و رمضانی دانا، ل (۱۳۸۸). «آشنایی با اهمیت یخچال‌ها در زمین‌شناسی». مجله‌ی آموزشی رشد زمین‌شناسی. دوره‌ی پانزدهم. شماره‌ی ۲.

4. Bennett, K.D., 1990., Milankovitch Cycle and their Effect on Species in Ecological and Evolutionary Time, Paleobiology, vol. 18, no.1.

5. Berger A, Loutre MF (2002). "Climate: An exceptionally long interglacial ahead?". Science 297 (5585): 1287-1288.

6.Coope, G.R.,1979., Late Cenozoic fossil Coleoptera: evolution, biogeography, and ecology. Annual Review of Ecology and Systematic, vol. 10, no. 247-267.

7. Coppe, G.R., 1987, The response of late Quaternary insect communities to sudden climatic changes. Pp.421-438.

8. Crucifix, M., Loutre, A., and Berger, A., 2007, The Climate Response to the Astronomical Forcing, Solar Variability and Planetary Climates, pp.213-226.

9. Deeker, W., 1997. Earth's orbit and the recurring ice age, GSIRO Space Industry News, Issue 77.

10. Graham, R.W. 1986., Response of mammalian communities to environmental change during the late Quaternary .pp.300-313.

11. Grubic, A., 2006., The astronomic theory of climatic change of Milutin Milankovich, Episodes, vol.29.no.3

12. Imbrie J., and kipp, N.G., 1971., A new Micro paleontological method for quantitative paleoclimatology: application to a late Pleistocene Caribbean core. Pp.71-181.

13. Hiroki Y. and Matsumoto, R., 2003., Correlation of Miocene (18-12 Ma) sequence boundaries in central Japan to major Antarctic glaciations event. Sedimentary Geology Volume 157, Issues 3-4, 22 April 2003, Pages 303-315.

14. Muller, R.A. and MacDonald, G.J., 1995, Glacial cycles and orbital inclination, Nature 377, pp.107-108,.

15. Plummer, CH., C., Mcgeary, D. and Carlson, D.H, 2005., Physical geology, pp.288-311.

16. Robert H. Dott, J.R. and Roger L. Batten, 1981. Evolution of the earth, Hill Book company, third edithion.

17. Ruddiman, W.F. and Kutzbach, J.E., 1991., Plateau uplift and climate change scientific American, 66.74.

18. Shackleton, N.J., 2000, The 100,000-year ice- Age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity, Science, vol. 289, no.5486.

19. Spaulding, W.G., E.B. Keopold, and T.R. van Devender, 1983., Late Wisconsin paleoecology of the American southwest. Pp.259-293.

20. Stager, J.C., 1988., Environmental change at Lake Cheshi, Zambia since 40,000 year B.P. Quaternary Research, vol.29, no.54-65.

21. Van Dam, J.A., Abdul Aziz, H. and Alvarez Sierra, M.A., 2006., Long-period astronomical forcing of mammal turnover, Nature 443, pp.6870691.

22. www.http:// Astronomical troubles for the astronomical hypothesis of ice ages. htm by Michael J. Order

23. www.http:// Astro-fact: Milutin Millankovich, Carmen Rush, 2007.

24. www.http:// en. Wikipedia.org/wiki/Apsidal-precession.

25. www.http:// Eo Library: Milutin Millankovich. htm.

26. www.http:// Ice age- Wikipedia, the free encyclopedia.

27. www.http:// Milankovitch cycles and Glaciation.

28. www.http:// Milankovitch cycles in paleoclimate.

29. www.http:// Milankovitch cycles - Wikipedia, the free encyclopedia.mht.

30. www.http:// Milutin Millankovich - Wikipedia, the free encyclopedia.

31. www.http:// Milankovitch Orbital Cycles.htm.

32. www.http:// Milanko/Paleoclimates.htm.Past Climates on Earth by Wilhelm Mueller.

33. www.http:// The Milankovitch insolation hypothesis for climatic cycle.

34. www.http:// The Seasons and the Earth's Orbit-Milankovitch cycles, U.S. Naval Observatory., aa.usno-// navy. Mil/faq.d.cs/seasons-orbit.htm.

35. www.http:// Why Do Glacial Age Occur, by World Web Travel Guide.

36. Wicander, R. and Mouroe, J., S., 2000., Historical geology, pp. 83, 224, 226, 463, 472, 473.

37. Zachos, J.C., Flower, B.P. and Paul, H., 1997. Orbitally paced climate oscillations across the Oligocene/Miocene boundary. Nature 388, pp.567-570.

38. Zachos, J., 2001., Earth orbit variation link to Global climate change, daily university science news.