

زمین گرم

ارمغان سده بیست و یکم

یوسف ثبوتی

دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه - زنجان

نویسندگان همکار:

محمدجواد بنی مهدی دهکردی

فائزه طباطبائی

زهره غفاری

زینب مختاری

کاظم نجفی قوشه بلاغ

شمس الدین اسماعیلی

زینب خرمی

سمیه عبدالهی

ماندانا فرهادیان

پروین مصطفوی

فهرست مطالب

۹	پیش‌گفتار
۱۴	نقشه جهان
۱۷	بخش ۱: چکیده برای آنهایی که تنها مجال خلاصه‌خوانی دارند
۱۸	اقلیم: تعریف و مولفه‌های آن
۲۲	طبقه‌بندی اقلیم‌های جهان
۲۲	تاریخچه اقلیم‌شناسی
۲۳	اقلیم‌های دیرینه
۲۴	اثر گل‌خانه‌ای و گازهای گل‌خانه‌ای
۲۵	نقش انسان در دست‌کاری اقلیم
۲۶	سازگاری و کاهش تبعات تغییر اقلیم
۲۸	یافته‌ها و پیش‌نگری‌های اقلیم
۳۷	بخش ۲: هواکره
۳۸	لایه‌های هواکره
۴۱	ترکیب شیمیایی هواکره
۴۲	فشار هوا
۴۳	نظام باده‌ها
۴۶	نم هوا

بخش ۳: اثر گل خانه‌ای

- ۴۹ تعادل دمایی سطح زمین و لایه‌های زیرین هواکره
۴۹ بخار آب و اثر گل خانه‌ای افزوده
۵۲ گازهای گل خانه‌ای
۵۴ زور تابشی گازهای گل خانه‌ای
۵۶ تغییر در گازهای گل خانه‌ای
۵۸ دسته‌بندی آلاینده‌های جو از دیدگاه‌های گوناگون
۶۵

بخش ۴: چرخه‌های کربن و نیتروژن

- ۶۹ کربن و اثر آن بر مولفه‌های اقلیم
۶۹ ذخایر کربن
۷۱ چرخه کربن
۷۱ اسیدی شدن اقیانوس و اثرات آن بر اقلیم و اکوسیستم دریایی
۷۳ چرخه نیتروژن
۷۳

بخش ۵: آب کره

- ۷۷ آب‌های شیرین
۷۸ برف و یخ قطب‌ها و یخچال‌ها
۷۹ روان‌آب‌ها
۸۰ آب‌های زیرزمینی
۸۰ آب‌های شور (اقیانوس‌ها)
۸۱ ساختار لایه‌های اقیانوسی
۸۴ جریان‌های اقیانوسی
۸۵ جریان‌های سطحی بزرگ
۸۶ تغییر در اقیانوس‌ها و تغییر در اقلیم
۸۸ گلف استریم
۹۱ ال نینو
۹۳

۹۷	بخش ۶: اقلیم‌های دیرینه
۹۸	عوامل مؤثر در سامانه اقلیم
۱۰۵	اقلیم دوره کواترنری
۱۰۷	اقلیم دور پلیستوسن
۱۰۹	اقلیم آخرین یخبندان
۱۱۰	اقلیم هولوسن
۱۱۴	سازوکار اقلیم هولوسن
۱۱۴	اقلیم در عصر انقلاب صنعتی
۱۲۱	بخش ۷: اقلیم سده بیست و یکم
۱۲۲	گرمایش زمین در سده ۲۱
۱۲۳	تراز آب دریاها در سده ۲۱
۱۲۶	منابع آب شیرین در سده ۲۱
۱۲۷	شدت و فراوانی فرینه‌های اقلیمی در سده ۲۱
۱۲۸	واکنش زیست‌بوم‌ها
۱۳۱	نشت متان از کف اقیانوس‌ها
۱۳۲	گرمایش زمین و امنیت غذایی
۱۳۳	گرمایش زمین و یخ‌های قطبی و کوهستانی
۱۳۹	بخش ۸: مدل‌های اقلیم
۱۴۰	مدل‌های هواشناسی
۱۴۳	مدل‌های پیش‌بینی‌های فصلی
۱۴۴	مدل‌های اقلیمی
۱۴۵	بازخوردها در سامانه اقلیم، پیش‌نگری‌های اقلیم
۱۴۹	اعتبار مدل‌ها
۱۵۳	آینده مدل‌های اقلیم

۱۵۵	بخش ۹: انرژی و آینده
۱۵۵	منابع انرژی
۱۵۶	سابقه استفاده انسان از منابع انرژی
۱۵۷	مصرف انرژی و گرمایش زمین
۱۵۸	راه‌های کاهش نشر کربن دی‌اکسید
۱۵۹	برق بدون کربن
۱۶۴	انرژی آب
۱۶۵	انرژی زیست‌توده
۱۶۷	زیست‌سوخت‌ها
۱۶۹	انرژی باد
۱۷۰	انرژی خورشید
۱۷۶	انرژی‌های نو و نوشونده نو
۱۷۷	فناوری در آینده‌های دورتر
۱۸۱	کوتاه سخن
۱۸۵	پیوست الف : پانل دولت‌ها برای تغییر اقلیم (آی‌پی‌سی‌سی)
۱۹۱	پیوست ب : معاهده‌های بین‌المللی
۲۰۳	پیوست ج: سناریوهای نشر گازهای گل‌خانه‌ای
۲۰۹	پیوست د: منتقدان گرمایش انسان‌پایه زمین
۲۱۳	تعریف بعضی واژه‌های علمی
۲۱۸	فهرست قاب‌ها

۲۱۹

واژه‌نامهٔ فارسی به انگلیسی

۲۲۳

واژه‌نامهٔ انگلیسی به فارسی

۲۲۷

نمایه

پیش گفتار

سخن از گرم شدن زمین و آثار ناخوشایند آن روی گیاه، حیوان، انسان، و نسل‌های آینده آنهاست. کره زمین در طول تاریخ تکوین و تحول خود فراز و نشیب‌های آب‌وهوایی زیادی داشته است. تنها در دو میلیون سال گذشته چندین یخبندان بسیار سرد و میان‌یخبندان گرم از سر گذرانده است. ولی دوران‌های گرم و سرد در فواصل زمانی چند ده و چند صد هزار سال آمده و رفته‌اند. گیاه و جانور مجال سازگاری با اقلیم زمان خود را داشته‌اند. دو سده اخیر چنین نبوده است.

جمعیت جهان تا دو سده پیش از چند صد میلیون نفر تجاوز نمی‌کرد. دانش و صنعت جدید آن را به هفت میلیارد و بیشتر رسانده است. انسان زمان‌های پیشین تنها در حد زنده ماندن می‌توانست غذا و آب و سرپناه پیدا کند، انسان مدرن منابع زمین را مسرفانه و زیان‌بارانه مصرف کرده و اقلیم را با بحران روبرو کرده است. توسعه پایدار جوامع، اعم از غنی و فقیر، و اعم از توسعه یافته و در حال توسعه، به خطر افتاده است. گیاه و جانور مجال سازگاری با جهان گرم‌شده را از دست داده‌اند. تثبیت اقلیم و برگرداندن آن به روال طبیعی، آسان و کم هزینه نیست.

این سخنان، بخشی از گفته‌ها و نوشته‌های پژوهشگران و چاره‌اندیشان و دولت‌مردان در سال‌های اخیر است که نگران پیامد کرده‌های ناسنجیده انسان صنعتی و نگران شرایط زیست در زیست‌بوم‌های جهان هستند.

نوشته حاضر بر پایه یک دوره درسی که در پائیز ۱۳۸۸ در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه — زنجان داده شده تنظیم شده است. کتاب در گرماگرم گفت‌وگوها و

پیش‌اندیشی‌های کنفرانس ۲۰۰۹ کپنهاگ، که مسئله گرمایش زمین را در دستور کار داشت، نوشته شده است. هدف کتاب انگیزتن کنجکاوی در جامعه فارسی‌زبان درباره گذشته و آینده کره زمین از نظر شرایط زندگی انسان، حیوان و گیاه است. مطالعه کتاب برای همه آنهایی که به محیط‌زیست، به آنچه که بر زمین در دو سده گذشته رفته است، به سرنوشت آن در یکی دو سده آینده، به مسئله جمعیت و امنیت مسکن و غذا و آب برای نسل‌های آینده، و به توافقات و اختلاف‌نظرهای بین‌المللی در مورد کره زمین علاقه‌مندند، سودمند خواهد بود.

موضوع کتاب به معنای کلمه میان‌رشته‌ای است. فیزیک‌دان و شیمی‌دان و زیست‌شناس می‌تواند ناشناخته‌های اقلیم را بکاود. مهندس چالش‌های فناورانه در آن بیابد. پزشک نگران تاثیر تغییر اقلیم بر بهداشت و درمان باشد. جامعه‌شناس و اقتصاددان، به صرافت ذوق خود از رفتار فردی و گروهی آدمیان در مواجهه با شرایط اقلیمی بپرسد. و حقوق‌دان به اقتضای حرفه‌اش از حقوق و تعهدات ملل در مقابله با تغییر اقلیم سخن بگوید.

در چکیده گسترده کتاب، اقلیم و مولفه‌های عمده آن معرفی شده‌اند. سازوکار گرم شدن و نقش انسان در دست‌کاری اقلیم بررسی شده است. یافته‌های مطمئن و نامطمئن که حکایت از تغییر اقلیم دارند شماره شده‌اند. خواندن آن برای دولت‌مردان و افرادی که تنها فرصت خلاصه‌خوانی و خلاصه‌شنوی دارند خالی از فایده نخواهد بود. در بخش‌های ۲ تا ۶ هرکدام از مولفه‌های اقلیم با تفصیل بیشتری بررسی شده‌اند. در بخش ۷ اقلیم سده بیست‌ویکم و در بخش ۸ مدل‌های محاسباتی آورده شده‌اند. بخش ۹ به مسئله انرژی، و جایگزین‌های آنها با منابع نو و نوشونده، و فناوری‌های مورد نیاز دهه‌های آینده اختصاص داده شده است.

در لابه‌لای صفحات کتاب بعضی مفاهیم علمی و تکنیکی که برای عموم کمتر شناخته شده‌اند وجود دارد. برای پرهیز از درازی سخن، این مفاهیم جداگانه و با اصطلاحات نسبتاً فنی، ولی حتی‌المقدور ساده، در داخل قاب گذاشته شده‌اند. «پانل دولت‌ها برای تغییر اقلیم»، «آی‌پی‌سی‌سی»^۱، یک ارگان بین‌المللی برای بررسی تغییر اقلیم و کنار آمدن با تبعات آن و احیاناً تخفیف آثار ناخواسته تغییر اقلیم است. تاریخچه، سیاست، و عملکرد این

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

ارگان در پیوست الف آورده شده است. قراردادهای بین‌المللی و سناریوهای نشر کربن‌دی-اکسید در سده بیست‌ویکم در دو پیوست ب و ج آورده شده‌اند. نظریه گرم شدن زمین، در اثر دستکاری بزرگ‌مقیاس انسان صنعتی، منتقدانی هم دارد. تعداد قابل‌توجهی از این منتقدان صاحب‌نظراند. آنان شواهد دال بر دخالت انسان در تغییر اقلیم را قانع‌کننده نمی‌دانند. بعضی از این نظرات انتقادی در پیوست د آورده شده است.

نویسندگان کتاب، در عین حال که هر کدام در بخشی از شاخه‌های دانش روز صاحب‌نظر هستند، هیچ کدام تخصص اقلیم، به صورتی که در دو دهه گذشته مورد بحث جوامع علمی و دانشگاهی و رسانه‌ای بوده، ندارند. صاحبان‌نظر کاستی‌ها و احیاناً بی‌دقتی‌هایی در تنظیم مفاهیم و مطالب کتاب خواهند دید. امید که چشم ببوشند و اگر حوصله کنند از راهنمایی لازم برای رفع کاستی‌ها دریغ نورزند.

بخش عمده مطالب کتاب از گزارش‌های سال ۲۰۰۷ آی‌پی‌سی‌سی گردآوری شده است. بخشی دیگر از کتاب‌های کلاسیک هواشناسی و اقلیم‌شناسی و از گزارش‌های فنی و رسانه‌ای گزیده شده‌اند. در پایان هر بخش کتاب، منابع مورد استفاده آورده شده‌اند. یادآوری یک نکته لازم است: بعضی از مطالب و نمودارهای کتاب از سایت‌های الکترونیکی نهادهای پژوهشی، خدماتی و مدیریتی بین‌المللی و دولت‌ها برداشته شده است. این مطالب الزاماً برای همیشه در سایت‌های یاد شده نگهداری نمی‌شوند و خواننده علاقمند ممکن است به هنگام مراجعه به این سایت‌ها مطالب اشاره شده در آنها را نیابد.

سپاس: ماندانا فرهادیان نه تنها در گردآوری مطالب بعضی از بخش‌های کتاب مشارکت داشته، وظیفه تنظیم مباحث، ویراستاری، صفحه‌آرایی، و هماهنگی با نویسندگان همکار و ناشر را نیز عهده‌دار بوده است.

دکتر محمدرضا خواجه‌پور، فیزیک‌دان و مترجم، با دقت یک منتقد حرفه‌ای کتاب را خوانده و راهنمایی‌های ارزنده‌ای کرده است.

دکتر فرهاد ثبوتی، زمین‌شناس و ژئوفیزیک‌دان؛ دکتر محمدابراهیم ابوکاظمی، فیزیک‌دان، مترجم و ویراستار؛ دکتر حمیدرضا محمدی خالصی فرد، فیزیک‌دان؛ دکتر مهناز رضائیان، زمین‌شناس و ژئوفیزیک‌دان؛ هر کدام بخش‌هایی از کتاب را خوانده و پیشنهادهای سازنده داشته‌اند.

لی لی فرهادی آماده‌سازی برای چاپ، و یکنواخت‌سازی شکل‌های کتاب را که از منابع مختلف گرفته شده‌اند انجام داده است. طراحی جلد کتاب نیز از اوست. صندوق حمایت از پژوهشگران، بخشی از هزینه‌های تألیف و تدوین مطالب، ویراستاری و چاپ کتاب را تأمین کرده است. موسسه جغرافیایی و کارتوگرافی گیتاشناسی، ناشر باسابقه و آزموده کشور، انتشار و توزیع کتاب را برعهده گرفته است. بدون فراهم بودن زیرساخت‌های آموزشی و پژوهشی در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه - زنجان، کتاب نمی‌توانست از قوه به فعل در آید. از همه بزرگواران و نهادهای یاد شده سپاسگزارم.

یوسف ثبوتی

تابستان ۱۳۹۰

نقشه جهان

نقشه جهان

رصد جهانی، دمای میانگین هوا و اقیانوس‌ها، آب شدن وسیع برف‌ها و یخ‌ها،
و بالا آمدن جهانی تراز دریاها، حکایت از گرمایش مسلم نظام اقلیم دارد.
آی‌پی‌سی‌سی، گزارش چهارم ارزیابی اقلیم، ۲۰۰۷

بخش ۱

چکیده برای آنهایی که تنها مجال خلاصه‌خوانی دارند

در آغاز دهه ۱۹۸۰ (۱۳۶۰ ش) گروهی از پژوهشگران از گرم شدن زمین خبر دادند. به تدریج که شواهد عینی و علمی بیشتر بدست آمد، زمزمه‌ها بلندتر شد و جوامع علمی مسئله گرمایش زمین را در بستر گسترده‌تر تغییر اقلیم بررسی کردند. مآلاً مجامع بین‌المللی و دولت‌ها دست به کار شدند و به تغییر اقلیم به عنوان رویدادی که آثار ناخوشایند بر زیست‌بوم‌های گیاهی و حیوانی و انسانی دارد بذل توجه کردند. اینک پس از گذشت سی سال، در آغاز دهه دوم سده بیست‌ویکم، تغییر اقلیم و پیامدهای آن از موضوعات زیست-محیطی روز شده است. از چارچوب بحث‌های تخصصی علمی و روشنفکری فراتر رفته و وارد گفتمان رسانه‌های جمعی و صحبت‌های روزانه مردم سراسر جهان شده است. در این بخش از کتاب سعی شده است چرایی و چگونگی گرمایش زمین به کوتاهی بیان شود و تصویری، هر چند کلی، از آنچه که اتفاق افتاده و می‌افتد برای جامعه فارسی‌زبان، و شاید سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران، ارائه شود.

اقلیم: تعریف و مولفه‌های آن

سردی و گرمی هوا، کمی و زیادی برف و باران، شدت و ضعف طوفان‌ها و گردبادها در طول چند روز و چند هفته موضوعات هواشناسی را تشکیل می‌دهند. دانش هواشناسی به پیش‌بینی آنچه در کوتاه‌مدت در جو زمین اتفاق می‌افتد می‌پردازد. اقلیم، میانگین شرایط آب‌وهوایی یک منطقه را در فاصله‌های زمانی طولانی مدنظر قرار می‌دهد. منظور از منطقه ممکن است کره زمین، یک قاره، بخشی از یک ناحیه (مثلاً ناحیه غربی کوه‌های زاگرس) و حتی کوچک‌تر باشد و منظور از بازه‌های زمانی طولانی ممکن است چند ده و چند صد سال و بیشتر باشد.



اقلیم یک سامانه دینامیکی است و حاصل برهم‌کنش مولفه‌های مختلف زمین با یکدیگر و با خورشید است. مولفه‌های مهم سامانه اقلیم عبارتند از هواکره^۱ (جو)، آب-کره^۲ (اقیانوس‌ها و آب‌های زیر و روی زمین)، سرماکره^۳ (یخچال‌های کوهستانی، ورقه‌های یخ روی خشکی‌ها، و یخ‌های قطبی)، زیست-کره^۴ (توده‌های زنده گیاهی و

شکل ۱ - ۱ مولفه‌های اقلیم

جانوری)، و سنگ‌کره^۵ (قاره‌ها و پوسته‌های اقیانوسی). این مولفه‌ها با یکدیگر اندرکنش دارند، از خورشید انرژی می‌گیرند و به فضا انرژی می‌دهند و در بلندمدت تغییر می‌کنند.

هواکره یا جو را شاید بتوان مهم‌ترین مولفه اقلیم دانست. جو لایه‌ای از گازهاست که زمین را در بر می‌گیرد و توسط نیروی گرانش زمین نگاه داشته می‌شود. شمایی از این لایه‌ها در شکل ۲ - ۱ نشان داده شده است. زمین تقریباً کروی است و محور دوران آن با عمود بر صفحه مدار زمین به دور خورشید زاویه $23\frac{5}{2}$ درجه می‌سازد. بنابراین تابش

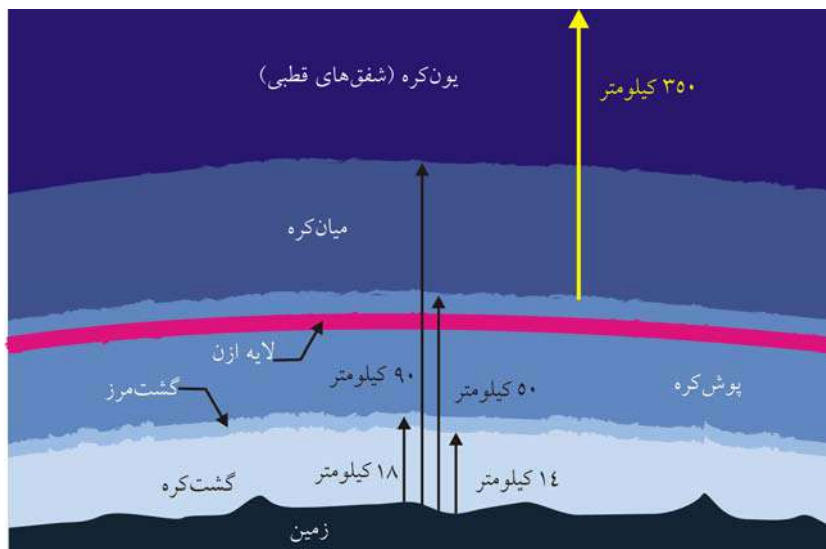
1. atmosphere

2. hydrosphere

3. cryosphere

4. biosphere

5. lithosphere



شکل ۲ - ۱ جو و لایه‌های آن

<http://www.brandonsd.mb.ca/crocus/Staff/mckellar/sci20s/s2sdl/sdlweather>

خورشید در نزدیکی استوا بیش از تابش آن در قطب‌هاست. این توزیع ناهمگن تابش خورشید نظامی از جریان‌های جوی ایجاد می‌کند که گرما و بخار آب را از استوا به قطب‌ها منتقل می‌کنند. زمین در ۲۴ ساعت یک بار به دور خود دوران می‌کند. این امر سبب به وجود آمدن نیروهای کوریولیس می‌شود که در شکل دادن نظام بادهای و نیز جریان‌های اقیانوسی، نقش اساسی بازی می‌کنند.

آب کره، شامل اقیانوس‌ها و آب‌های زیر و روی زمین، با هواکره برهم‌کنش دارد. بخشی از نیروی محرکه جریان‌های اقیانوسی در اثر بادهای پدید می‌آید. بخشی دیگر ناشی از اختلاف دما و شوری آب در مناطق مختلف کره زمین است. اقیانوس‌ها به نوبه خود به هواکره گرما و بخار آب می‌دهند. جریان‌های اقیانوسی در انتقال گرما از استوا به قطب‌ها و تعدیل و تنظیم آب‌وهوای قاره‌ها نقش اساسی دارند. ظرفیت گرمایی اقیانوس‌ها، به سبب چگال بودن آب، بیش از ظرفیت گرمایی هواکره است. به همین سبب گرمای جابه‌جا شده از طریق جریان‌های اقیانوسی بسیار زیاد است و بر اقلیم اثر درازمدت می‌گذارد.

سرماکره به برف و یخ و یخچال‌های کوهستانی و قطب‌ها و زمین‌های یخ‌زده گفته



شکل ۳ - ۱ آب‌کره شامل اقیانوس‌ها و آب‌های زیر و روی زمین است. اقیانوس‌ها بزرگ‌ترین بخش آب‌کره هستند و همیشه در جریان‌اند. <http://marinebio.org/oceans/marine-ecology.asp>

می‌شود. سرماکره برگردش انرژی و رطوبت در جو و سطح زمین اثر می‌گذارد و با نظام بارش‌ها و جریان‌های اقیانوسی اندرکنش دارد. بیشترین حجم یخ‌های روی زمین در قطب جنوب و پهناورترین مساحت یخی در نیم‌کره شمالی است. در شمالگان، در حوالی اسفندماه، حدود ۲۳ درصد سطح زمین از برف و یخ پوشیده می‌شود. مهم‌ترین ویژگی

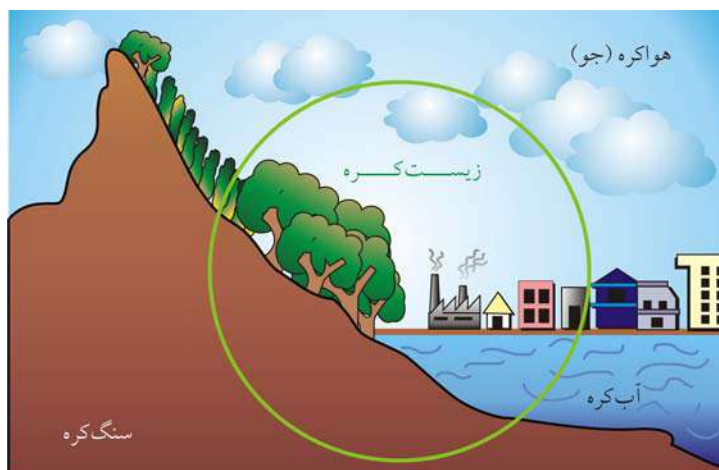


نیم‌کره شمالی در ماه مارس



نیم‌کره جنوبی در ماه سپتامبر

شکل ۴ - ۱ کلاهک‌های یخی قطب‌های شمال و جنوب. اندازه کلاهک شمالی در زمستان ۶ برابر تابستان است. اندازه کلاهک جنوبی تنها دو برابر می‌شود. سبب این است که جنوبگان قاره است و شمالگان اقیانوس یخ‌زده. برگرفته از *NASA Blue Marble NG*

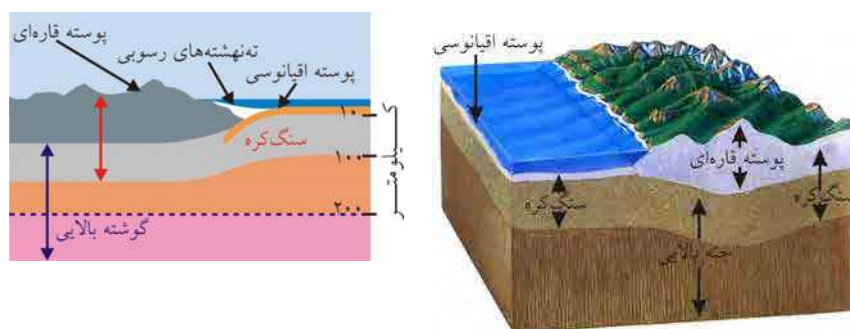


شکل ۵ - ۱ زیست کره مولفه‌ای از اقلیم است که در آن زندگی وجود دارد. از کف اقیانوس‌ها تا قله بلندترین کوه‌ها را در برمی‌گیرد. www.image.tutorvista.com

برف و یخ، سپیدایی و سردی آنهاست. سفیدی برف و یخ، تابش خورشید را به فضا برمی‌گرداند و سردی آنها سبب کاهش تابش زمین می‌شود. هر دو ویژگی مآلاً به خنک شدن اقلیم کمک می‌کنند. تعریف و نقش سپیدایی در قباب ۲ - ۳ و تابش اجرام گرم و سرد در قباب ۴ - ۳ آمده است.

زیست کره شامل همه زیست‌بوم‌ها، اعم از دریایی و زمینی، و اعم از گیاهی، حیوانی، و انسانی است. از قطب‌ها تا استوا، و از اعماق اقیانوس‌ها تا بلندی کوه‌ها، هر بخش از کره زمین نوعی از حیات را میزبانی می‌کند. تا آنجا که دانش روز اجازه می‌دهد زمین تنها جایی در کیهان است که در آن حیات شناخته شده است. زیست کره در به راه انداختن و تکمیل چرخه‌های کربن و نیتروژن و آب نقش اول را دارد.

سنگ کره به لایه سطحی زمین، به ضخامت تقریبی ۱۰۰ کیلومتر، گفته می‌شود و پوسته‌های اقیانوسی و قاره‌ای را در بر می‌گیرد. سنگ کره پایدارترین مولفه اقلیم است و از این رو تغییرات در آن در بازه‌های زمانی بسیار طولانی، از مرتبه میلیون‌ها سال، روی می‌دهد. سنگ کره با سایر مولفه‌های اقلیم انرژی و ماده مبادله می‌کند. مبادله رطوبت بین سنگ کره و جو سبب تعادل گرمایی در سطح زمین می‌شود و نقش بسزایی در ساختار اقلیم دارد.



شکل ۶- ۱ سنگ کره شامل پوسته‌های اقیانوسی و قاره‌ها.

<http://www.tutorvista.com/content/biology/biology-i/environment/biosphere.php>

طبقه‌بندی اقلیم‌های جهان

تفاوت گرما و رطوبت در نقاط مختلف جهان، اقلیم‌های متفاوت به وجود می‌آورد. تقسیم‌بندی متعارف و تقریبی اقلیم را که از زمان‌های قدیم تا اندازه‌ای شناخته شده‌اند، به شرح زیر می‌توان خلاصه کرد:

- اقلیم جریان‌های هوایی حاره‌ای.
 - اقلیم جریان‌های هوایی استوایی و قطبی.
 - اقلیم جریان‌های هوایی سرد و قطبی یخ‌بسته.
 - اقلیم سرزمین‌های مرتفع که به خاطر ارتفاع از سطح دریا ویژگی‌های خاص دارند.
- اقلیم‌های دیگری که بر اساس الگوهای بارش، دما و رطوبت به وجود می‌آیند، زیرمجموعه‌هایی از اقلیم‌های اصلی بالا هستند. این طبقه‌بندی به تقسیم‌بندی تجربی اقلیم موسوم است.

تاریخچه اقلیم‌شناسی

دانش اقلیم هم قدیم و هم جدید است. پیشینه آن به دیرینگی کنجکاوی انسان درباره محیط‌زیست‌اش می‌رسد. اقوام، بنا به باورها و اسطوره‌های خود، رخدادهای جوی و اقلیمی را به درست یا نادرست تفسیر کرده‌اند. این باورها همراه با حدس و گمان و احیاناً همراه با خرافه در پیشرفت دانش اقلیم و هواشناسی نقش داشته‌اند و تا پایان سده هفدهم و شاید دیرتر دوام آورده‌اند. اقلیم‌شناسی جدید با پیدایش ابزارهای اندازه‌گیری آغاز

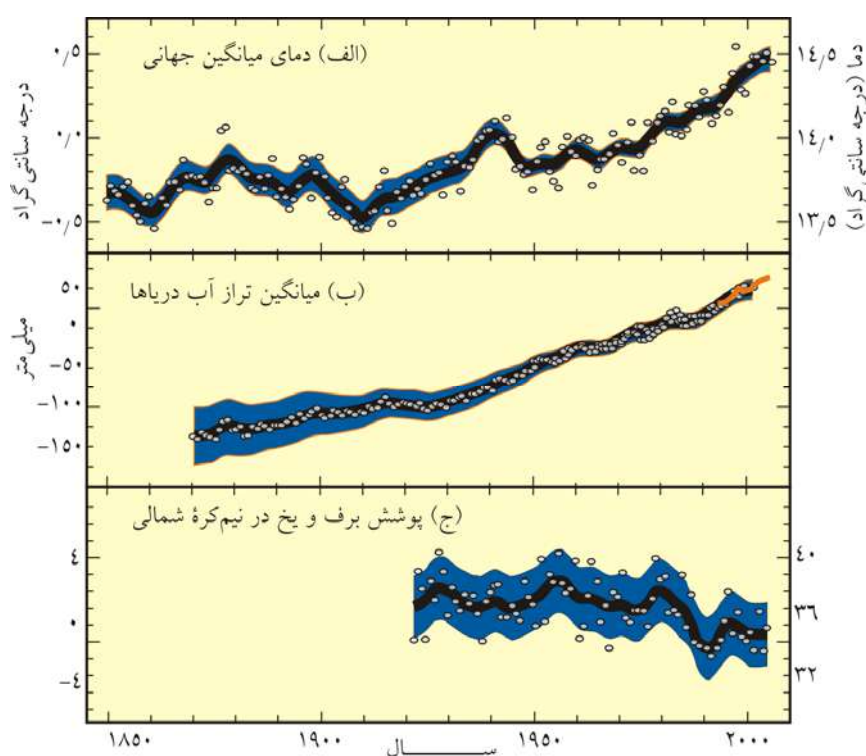
می‌شود. از سده هفدهم به این سو، رواج اندازه‌گیری‌های هواشناسی و ثبت دیده‌بانی‌های طبیعت در دریا و خشکی، هواشناسی و اقلیم‌شناسی را به معنای امروزی آنها شکل داده‌اند. داده‌های مشاهده‌ای امکان تجزیه و تحلیل رخداد‌های جوی و اقلیمی را فراهم کرده‌اند. مدل‌های هواشناسی از سده بیستم مطرح شده‌اند. با آمدن رایانه به عرصه علم، امکان طراحی مدل‌های اقلیمی فراهم شده است. امروزه مدل‌هایی که بتوانند رویدادهای چند هزار سال گذشته را با دقت نسبتاً خوب بازتولید کنند و اقلیم‌های چند ده سال آینده را از پیش بگویند میسر شده است. پیش‌بینی‌های هواشناسی امروز دقیق و قابل اعتمادند. پیش‌نگری‌های مدل‌های اقلیمی نیز به‌طور قابل توجهی بهتر شده‌اند.

اقلیم‌های دیرینه

زمین در چند میلیون سال گذشته چند دوره یخبندان و میان‌یخبندان از سر گذرانده است. دوره‌های یخبندان معمولاً طولانی و از مرتبه صد هزار سال و بیشتراند. میان‌یخبندان‌ها کوتاه و از مرتبه چند ده هزار سال‌اند. آخرین یخبندان ۱۰۰ هزار سال دوام داشت و ۲۰ هزار سال پیش پایان پذیرفت.

عواملی که دوران‌های سرد و گرم زمین را در گذشته به وجود آورده‌اند طبیعی بوده‌اند و بی‌شک در آینده نیز اقلیم زمین را شکل خواهند داد. دانش روز بعضی از این عوامل را می‌شناسد و به بعضی دیگر هنوز اشراف کافی ندارد.

سه پارامتر، (الف) دمای میانگین سطح زمین و لایه‌های پایین جو، (ب) تراز میانگین دریاها، و (ج) وسعت زمین‌های پوشیده از یخ و برف قطب‌های شمال و جنوب و کوهستان‌ها، می‌توانند تصویری اجمالی از اقلیم بدهند. اندازه‌گیری‌های دستگاهی در ۱۵۰ سال گذشته نشان می‌دهند که هر سه پارامتر تغییرات قابل توجه و خارج از معمول داشته‌اند: زمین نیم درجه گرم‌تر شده، تراز آب‌ها ۲۰۰ میلی‌متر بالا آمده، و وسعت و مقدار برف و یخ به طور قابل ملاحظه‌ای کم شده است (شکل ۷ - ۱). به نظر می‌رسد این تغییرات با پیدایش صنعت جدید و به تبع آن افزایش جمعیت جهان، از چند صد میلیون به چند میلیارد نفر، و تغییر بسیار فاحش در الگوی مصرف جوامع در سراسر جهان بی‌ارتباط نیست. در زیر سازوکار گرمایش زمین و نحوه دخالت انسان در آن به اجمال بررسی می‌شود.



شکل ۷ - ۱ (الف) تغییرات دما، (ب) تراز آب دریاها، و (ج) پوشش برف و یخ در نیم‌کره شمالی. ارقام سمت راست اندازه‌های مطلق، و ارقام سمت چپ تغییرات نسبت به میانگین سال‌های ۱۹۶۱ - ۱۹۹۰ هستند. برگرفته از گزارش چهارم آی‌پی‌سی‌سی

اثر گل‌خانه‌ای و گازهای گل‌خانه‌ای

اکسیژن، نیتروژن، و آرگن به ترتیب ۲۰/۹۵، ۷۸/۰۸، و ۰/۹۳ درصد و جمعاً ۹۹/۹۶ درصد از جو را تشکیل می‌دهند. این گازها در سرمایش و گرمایش زمین نقش زیادی ندارند. ۰/۴ درصد از گازها به ترتیب اهمیت، کربن دی‌اکسید، متان، نیتروژن اکسید، ازن، و کلروفلوروکربنها (CFC, HCFC) تشکیل می‌دهند. این گازها تابش خورشید را از بالای جو به پایین راه می‌دهند، ولی از خارج شدن تابش میکرومتری زمین به فضا جلو می‌گیرند. این گازها نقشی همانند شیشه در دیوارها و سقف گل‌خانه دارند و به همین سبب به

- گازهای گل‌خانه‌ای موسوم‌اند. اگر مقدار این گازها در جو بالا رود زمین گرم می‌شود.
- کربن‌دی‌اکسید عمدتاً از سوختن سوخت‌های فسیلی و غیرفسیلی، از دم و بازدم موجودات زنده، از تبدیل سنگ‌های کربن‌دار به ترکیبات سیلیسی در طبیعت نشر می‌شود. از سوی دیگر کربن‌دی‌اکسید توسط رویدانی‌ها، مرجان‌ها و موجودات دریایی صدف‌دار جذب می‌شود و در آب اقیانوس‌ها نیز به خوبی قابل حل است.
 - متان عمدتاً از تجزیه مواد آلی گیاهی و حیوانی در مرداب‌ها، کف دریاها و جنگل‌ها و نشخوار نشخوارکنندگان منتشر می‌شود. قسمت عمده گاز طبیعی فسیلی هم متان است.
 - نیتروژن‌اکسید در طبیعت به وجود می‌آید و از بین می‌رود. مصرف روزافزون سوخت‌های فسیلی و کودهای شیمیایی به افزایش آن در جو کمک می‌کند.
 - ازن در لایه‌های بالای جو در اثر تابش فرابنفش خورشید به وجود می‌آید و اثر خنک‌کنندگی دارد. ولی در لایه‌های پایین جو و سطح زمین، ازن در ضمن فرایندهای صنعتی، مانند جوشکاری و جرقه‌های الکتریکی تولید می‌شود و گرم‌کننده جو و زمین است.
 - CFCها و HCFCها به طور طبیعی به وجود نمی‌آیند و انسان‌ساخت هستند و در افشانه‌ها و ماشین‌های سرمازا به کار می‌روند. معاهده‌های بین‌المللی تولید انواع آسیب‌رسان آنها را محدود کرده است.

نقش انسان در دست‌کاری اقلیم

از آغاز عصر صنعتی (بنا به قرارداد ۱۷۵۰ میلادی) به این سو، جمعیت جهان از چند صد میلیون به چند میلیارد نفر رسیده است. الگوی زندگی محقر و مقتصدانه انسان دویست سال پیش به الگوی جاه‌طلبانه و مسرفانه انسان سده بیست‌ویکم تحول یافته است. تحقق این وضع در درجه نخست در سایه مصرف منابع انرژی فسیلی (زغال‌سنگ، نفت، و گاز) و در درجه دوم، تبدیل جنگل‌ها به زمین‌های کشاورزی و سکونت‌گاه‌های شهری امکان‌پذیر شده است. در این میان هر گامی که انسان صنعتی برداشته مقداری به میزان گازهای گل‌خانه‌ای جو افزوده است.

شکل‌های ۴، ۵، و ۶ فصل ۳ میزان سه گاز کربن‌دی‌اکسید، متان، و نیتروژن‌اکسید را از ۱۰ هزار سال پیش تا زمان حال نشان می‌دهند. داده‌های چند دهه پایانی سده بیستم از

اندازه‌گیری‌های دستگاهی بدست آمده‌اند. داده‌های گذشته‌های دورتر از تخمین نشانگرهای میانجی^۱ هستند. منظور از نشانگر میانجی، رخدادی بازمانده از زمان‌های پیشین است که نشانی از دما، رطوبت، یا مشخصه دیگری از اقلیم گذشته را در خود نگاه داشته است. حباب‌های هوای محبوس در یخ‌های قطبی و لجن‌های دریایی، ایزوتوپ‌های اکسیژن و هیدروژن و کربن در بازمانده‌های آلی از زمان‌های پیشین نمونه‌هایی از نشانگرهای میانجی هستند.

در هر سه شکل یاد شده تغییرات از ۱۰ هزار سال گذشته تا پنجاه سال پیش بسیار کند و ناچیز بوده است، اما در پنجاه سال گذشته هر سه گاز گل‌خانه‌ای ناگهان افزایش می‌یابند، و متناظر با آنها دما و تراز آب دریاها و گستردگی یخ و برف نیز تغییر می‌کنند (شکل ۷ - ۱). آنچه افزون بر روال طبیعی اتفاق افتاده، به فعالیت‌های انسان و مصرف فزاینده انرژی‌های فسیلی نسبت داده می‌شود. در سطور آینده، به بعضی از آمار انرژی پرداخته خواهد شد. در این جا تنها به این نکته بسنده می‌شود که در فاصله سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ میلادی سالانه ۷/۲ میلیارد تن کربن از منابع فسیلی سوزانده شده و به صورت ۲۶/۲ میلیارد تن کربن دی‌اکسید به هواکره و آب‌کره داده شده است.

سازگاری^۲ و کاهش^۳ تبعات تغییر اقلیم

از آنچه تاکنون درباره تغییر اقلیم و تبعات آن گفته شد می‌توان تصویر زیر را ترسیم کرد. افزایش جمعیت و توسعه اقتصادی - اجتماعی جوامع مستلزم مصرف انرژی بوده است. منابع انرژی در دسترس، عمدتاً منشاء فسیلی داشته‌اند و مصرف آنها همراه با تغییر در نحوه استفاده از زمین، سبب نشر گازهای گل‌خانه‌ای شده و اقلیم را از روال طبیعی خارج کرده است. مهم‌ترین این تغییرات عبارتند از گرم شدن زمین، بالا آمدن آب دریاها، به هم خوردن الگوهای بارش، کم و زیاد شدن روان‌آب‌ها، فراوان‌تر و شدیدتر شدن سیل‌ها و طوفان‌ها و خشکسالی‌ها و مانند آنها. هر یک از این رخدادها بر منابع غذا، آب، بهداشت، سکونت‌گاه‌های انسانی، زیست‌بوم‌ها، و تنوع زیستی اثر می‌گذارد. به احتمال زیاد بیشتر این آثار ناخوشایند هستند و توسعه اجتماعی و اقتصادی جوامع را محدود می‌کنند. دو راه برای پرهیز از تبعات ناخواسته تغییر اقلیم پیش روی محافل علمی، صنعتی، اقتصادی، و

1. proxy

2. adaptation

3. mitigation

سیاسی جهان است.

- نخست آن که با تبعات اجتناب‌ناپذیرِ اقلیم «سازگاری» به وجود آید.
- دوم آن که با هدف تثبیت اقلیم و «کاهش» آثار ناخوشایند آن از نشر گازهای گل‌خانه‌ای کاسته شود.

کنترل جمعیت و گذر از الگوی مصرفِ مسرفانهٔ زمان حاضر به الگوهای مقتصدانه از نمونه‌های سازگاری هستند. جابه‌جایی جمعیت‌هایی که سکونت‌گاه‌ها و منابع غذا و آب، و شرایط بهداشتی آنها در معرض تهدید قرار گرفته است نیز سازگاری با اقلیم است. اقلیم تغییر یافته ممکن است آفت‌های گیاهی و حیوانی و انسانی نوظهوری را که تاکنون سابقه نداشته، به وجود آورد. تجدیدنظر در راه‌های مبارزه با آفات و ایجاد موازین بهداشتی و درمانی تازه نیز سازگاری است.

کاهش نشر گازهای گل‌خانه‌ای با هدف تثبیت اقلیم، مستلزم بهتر و کارآتر کردن فناوری‌های موجود و ایجاد طیف وسیعی از فناوری‌های نو است. مثال‌های زیر نمونه‌هایی از راهکارهای کاهش هستند: طراحی ماشین‌های حرارتی با بازدهی بالاتر، جایگزین کردن منابع انرژی فسیلی با منابع نوشونده و نو.

خورشید، رودخانه‌ها، باد، رویدنی‌ها و زیست‌توده‌ها، نمونه‌های منابع انرژی نوشونده هستند. با تناوب‌های زمانی معین می‌توان از آنها بهره گرفت.

انرژی زمین‌گرمایی، الکتریسیته از خورشید، انرژی از جزر و مد و امواج دریا، تجزیهٔ آب به کمک خورشید به منظور تهیه سوخت هیدروژن، نمونه‌های انرژی نو هستند. در گذشته به طور وسیع معمول نبوده‌اند و دسترسی به آنها مستلزم پژوهش و ایجاد فناوری‌های جدید است و سرمایه‌گذاری‌های کلان می‌طلبد.

تخریب وسیع جنگل‌ها و تبدیل آنها به زمین‌های کشاورزی به نشر گازهای گل‌خانه‌ای کمک کرده است. توقف تخریب و اقدام به کاشت درختان نیز از راهکارهای کاهش آثار ناخواستهٔ تغییر اقلیم است.

کسانی که می‌توانند یاری‌رسان باشند: نمونه‌های سازگاری و کاهش آثار، که در بالا ذکر شد، کلان‌اندازه‌اند. برای تأثیرگذاری در مقیاس جهانی به تصمیم‌ها و سیاست‌های کلان و جهانی نیاز است. دانش‌پیشگان با هر تخصصی می‌توانند با کندوکاو در گوشه‌های ناشناختهٔ دانش اقلیم و یافتن چاره‌ها به یاری برخیزند. فناوران فناوری‌های نو بیافرینند. برنامه‌ریزان

و سیاست‌گذاران انواع برنامه‌های ملی و منطقه‌ای تدوین کنند. جامعه‌شناسان رفتار و کردار جوامع را در شرایط اقلیم تغییر یافته بررسی کنند. اقتصاددانان و سرمایه‌گذاران حساب و کتاب کتاب دخل و خرج‌ها را داشته باشند. و بالاخره دولت‌مردان در معاهده‌ها و قراردادهای منطقه‌ای و بین‌المللی که در جهت سازگاری و کاهش آثار ناخواسته اقلیم پیشنهاد می‌شود به توافق رسند.

یافته‌ها و پیش‌نگری‌های اقلیم

پیش‌نگری اقلیم دهه‌ها و سده‌های آینده با ابهام قابل ملاحظه‌ای روبه‌روست. نخست آن که اقلیم سامانه پیچیده‌ای است و دانش روز به همه پیچیدگی‌های آن اشراف ندارد. دوم آن که روند توسعه اجتماعی و اقتصادی آینده جوامع و به طور کلی جهان روشن نیست. وجود این ناشناخته‌ها بر تصمیم‌گیری‌های علمی، اقتصادی و سیاسی برای مقابله با تهدیدهای تغییر اقلیم اثر می‌گذارد. در هر حال با وجود همه ناشناخته‌ها باید توجه داشت که پاسخ اقلیم به نشر گازهایی مانند کربن دی‌اکسید خوشایند نیست و چاره فوری می‌طلبد. منتظر ماندن و تماشا کردن واکنشی غیرمسئولانه است.

در چند صفحه باقی مانده این بخش، آنچه که دانش روز تاکنون در مورد تغییر اقلیم یافته است و آنچه که می‌تواند درباره اقلیم سده بیست و یکم حکم کند گردآوری شده است. موارد ابهام و مواردی که هنوز به خوبی شناخته نشده‌اند و نیاز به پژوهش بیشتر دارند نیز گفته شده‌اند. مطالب از گزارش چهارم سال ۲۰۰۷ «پانل دولت‌ها برای تغییر اقلیم» (آی‌پی‌سی‌سی) گردآوری شده‌اند.

(الف) هواکره و سطح زمین

یافته‌های مطمئن

- فراوانی کنونی کربن دی‌اکسید، متان، و نیتروژن اکسید بیشتر از فراوانی آنها در آغاز صنعتی شدن جهان (۲۵۰ سال پیش) است. استفاده از سوخت‌های فسیلی، تغییر در نحوه استفاده از زمین (جنگل‌زدایی در جهت توسعه زمین‌های کشاورزی و سکونت‌گاهی)، و صنعت سیمان دلیل افزایش آنها در ۲۵۰ سال گذشته شناخته شده است (شکل-های ۴، ۵، و ۶ از بخش ۳).

- نشر میانگین کربن در دهه ۱۹۹۰ برابر با ۶/۴ میلیارد تن کربن در سال بوده است. در فاصله سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ این مقدار به ۷/۲ میلیارد تن در سال افزایش یافته است. جذب طبیعی کربن‌دی‌اکسید در آب‌کره و زیست‌کره ۵۰ تا ۶۰ درصد از نشر انسانی را حذف می‌کند.
- کره زمین در یکصد سال گذشته نزدیک به نیم درجه گرم شده است. آهنگ گرمایش زمین در ۴۰ سال گذشته بیشترین مقدار در ۲۰۰۰ سال گذشته را داشته است.
- سطح خشکی‌ها با سرعتی دو برابر سطح اقیانوس‌ها گرم می‌شود. دمای گشت‌کره زیرین در فاصله سال‌های ۱۹۵۸ تا ۲۰۰۰ بیشتر از سطح زمین گرم شده است.
- ۱۱ سال از ۱۲ سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۶ رکورد گرم‌ترین سال‌های پس از ۱۸۵۰ را داشته‌اند. به گزارش سازمان جهانی هواشناسی، سال ۲۰۱۰ گرم‌ترین سال عصر صنعتی بوده است. خشکسالی‌ها پس از سال ۱۹۷۹ به خصوص در مناطق گرمسیری و مجاور آن فراوان‌تر شده‌اند. با این وجود بخار آب موجود در جو دست‌کم از دهه ۱۹۸۰ به این سو رو به افزایش بوده است.
- هواویزها (غبار و ذرات معلق در هوا) اثر خنک‌کنندگی دارند. این اثر در نیم‌کره شمالی بیش از نیم‌کره جنوبی است.
- تغییرات در تابش خورشید ناچیز بوده و اثر قابل ملاحظه‌ای در گرمایش غیرعادی زمین نداشته‌اند.

نکته: در یافته‌هایی که در بالا عنوان شدند تردیدهایی به شرح زیر وجود دارند:

- هواویزها بر خواص ابرها و به تبع آن بر سپیدایی (قاب ۲ - ۳) آنها تاثیر می‌گذارند. اما مکانیسم تأثیر کاملاً شناخته نیست. بزرگی زور تابشی^۱ (قاب ۳ - ۳) حاصل از تأثیر غیرمستقیم هواویزها بر ابرها نیز به خوبی شناخته نیست.
- آهنگ افزایش متان در جو به خوبی شناخته نیست. نقش عوامل موثر در افزایش میزان ازن در گشت‌کره به خوبی شناخته نیست.
- خواص سطح زمین و اندرکنش زمین و جو به خوبی شناخته نیستند.
- تغییرات تابش خورشید در زمان‌های گذشته بر اساس اندازه‌گیرهای دقیق نیست.

- داده‌های رادیوسوندها از نظر توزیع مکانی، در مقایسه با داده‌های ثبتی ایستگاه‌های زمینی، کامل نیستند و در بعضی جاها اصلاً وجود ندارند. از این رو احتمال دارد که داده‌های ثبت شده مربوط به دمای گشت‌کره هنوز دارای خطا باشند.
- رصدهای ماهواره‌ای و زمینی در مورد تغییرات کلی ابرها، به خصوص در ارتفاعات پایین، باهم همخوانی ندارند. قسمتی از این ناهمخوانی‌ها به دلیل ناکافی بودن مشاهدات ابرها و هواویزهاست.
- داده‌های ثبت‌شده از رطوبت خاک‌ها و جریان رودها و رودخانه‌ها کم و کوتاه‌مدت‌اند و تنها برای چند ناحیه در دسترس‌اند. این امر مانع تحلیل خشکسالی‌ها می‌شود.
- در تفسیر داده‌های ماهواره‌ای سوالات و ابهامات زیادی وجود دارد.
- مشکل کمی کردن فرینه‌های اقلیمی و میزان بارش‌های منطقه‌ای هنوز باقی است. شواهد برای بررسی روند درازمدت گردبادهای شدید، رعدوبرق و طوفان‌های گردوغبار اندک‌اند.

(ب) برف، یخ، و زمین‌های یخ‌زده

یافته‌های مطمئن

- مقدار برف و یخ روی زمین رو به کاهش است. بسیاری از یخچال‌های کوهستانی، پس از سده نوزدهم شروع به عقب‌نشینی کرده‌اند. آهنگ آب شدن یخچال‌ها و ورقه‌های یخی گرینلند تندتر می‌شود.
- رودخانه‌های فصلی و مدت یخ‌زدگی آن‌ها در ۱۵۰ سال گذشته رو به کاهش بوده است. از سال ۱۹۷۸ به این سو، یخ دریایی در قطب شمال در حال کاهش بوده است.
- لایه فوقانی خاک‌های همیشه یخ‌زده^۱ از سال ۱۹۸۰ در قطب شمال تا ۳ درجه سانتی‌گراد گرم شده است.
- حداکثر وسعت زمین که به صورت فصلی در نیم‌کره شمالی یخ می‌زند از ۱۹۰۰ به این سو نزدیک به ۷ درصد کاهش یافته است. از میانه‌های سده بیستم پیشینه عمق آن در حدود ۳۰ سانتی‌متر کم شده است.
- نازک‌شدگی یخ در قاره جنوبگان و ورقه یخی آموندسن در دهه ۱۹۹۰ محسوس بوده

1. permafrost

است. یخچال‌های فرعی به سرعت در حال از بین رفتن‌اند. ورقه یخی لارسن بی^۱ در سال ۲۰۰۲ به طور کامل از بین رفت.

خطاها

- اطلاعات درباره افزایش و کاهش یخ‌های قطب شمال تنها از طریق مشاهدات ماهواره-ای میسر بوده و بسیار اندک است. تردیدهای زیادی در مورد آنها وجود دارد.

(ج) تراز آب اقیانوس‌ها

یافته‌های مطمئن

- تراز دریاها در یکصد سال گذشته به طور میانگین ۲۰۰ میلی‌متر بالا آمده است. آهنگ بالا آمدن رو به افزایش است. در سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳ آب دریاها سریع‌تر از سال‌های ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۳ بالا آمده است.
- انبساط گرمایی آب اقیانوس و آب شدن یخچال‌ها و یخ جنوبگان و گرینلند نقش اول را در بالا آمدن آب دریاها دارند.
- دما و انرژی درونی اقیانوس‌ها پس از سال ۱۹۹۵ افزایش یافته است. با انتقال بخار آب بیشتر به جو، توزیع و الگوهای بارش تغییر کرده است.
- در دهه‌های گذشته در شوری اقیانوس‌ها تغییرات بزرگ‌مقیاس مشاهده شده است. شوری در مناطق مجاور قطب کاهش یافته و در مناطق کم‌عمق حاره‌ای و مجاور حاره-ای افزوده شده است.

خطاها

محدودیت در نمونه‌برداری از اقیانوس‌ها برای بررسی دهه‌ای ظرفیت گرمایی و شوری آب دریاها عامل اصلی خطاهاست. نتایج را تنها با اطمینان متوسط می‌توان ارزیابی کرد. تجزیه و تحلیل علل بالا آمدن تراز آب دریاها با ابهام همراه است. به نظر می‌رسد متوسط بالا آمدن آب دریاها از ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۳ بیشتر از آن است که انبساط گرمایی و آب شدن یخ‌ها بتوانند آن را سبب شده باشند.

(د) اقلیم‌های دیرینه

در بازسازی اقلیم‌های دیرینه از نشانگرهای میانجی، مانند رسوب‌های بدست آمده از اعماق دریاها، روش‌های ژئوشیمیایی، ایزوتوپ‌های اکسیژن و کربن، نهشته‌های آهکی غارها، حلقه‌های رشد سالانه درختان استفاده می‌شود و داستان اقلیم از گذشته تا اکنون بازسازی می‌شود.

یافته‌های مطمئن

- آخرین دوره یخبندان حدود ۱۲۰ هزار سال پیش شروع شده و نزدیک به ۲۰ هزار سال پیش پایان یافته است. در این یخبندان میانگین سطح دریاها ۴ تا ۶ متر پایین‌تر از مقدار کنونی بوده است.
- پس از پایان آخرین یخبندان در ۲۰ هزار سال پیش، با آب شدن یخ‌های کوهستانی و یخچال‌ها، مجدداً آب دریاها بالا آمده است. جایی که اکنون دریای سیاه قرار دارد در میان یخبندان کنونی پر شده است.
- ۱۷ هزار سال پیش فوران کوه پیناتوبو^۱، در جزایر سوماترا^۲، ۲۸۰۰ کیلومتر مکعب مواد آتشفشانی به جو پرتاب کرد. این حادثه تأثیر بسزایی در کاهش دمای زمین داشت.
- حباب‌های هوای محبوس در یخ‌های قطبی و نشانگرهای میانجی دیگر نشان می‌دهند خشک‌سالی‌های چندین ده ساله از ویژگی‌های اقلیم مناطق مختلف در ۲۰۰۰ سال گذشته بوده است.

خطاها

- مکانیسم تغییرات ناگهانی اقلیم در گذشته به خوبی شناخته نیست و میزان اطمینان به مدل‌های شبیه‌سازی شده کم است.
- سرعت از بین رفتن ورقه‌های یخی گذشته معلوم نیست. مطالعه تغییرات اقلیم در نیم-کره جنوبی و مناطق حاره‌ای به دلیل فقدان داده در این مناطق کامل نیست.
- بررسی داده‌های میانجی به کمک روش‌های آماری در بازه‌های زمانی چند هزار ساله دقت و حوصله بیشتری می‌طلبد.

- به نظر می‌رسد سیاهه عوامل طبیعی مؤثر در تغییرات اقلیم دیرینه طولانی‌تر از چند موردی است که تا بحال منظور شده‌اند. به بررسی بیشتر نیاز است.

(ه) اقلیم سده‌های آینده

مدل‌های اقلیمی بر پایه قواعد فیزیکی ساخته می‌شوند و می‌توانند اقلیم‌های گذشته و حال و آینده را شبیه‌سازی کنند. در حال حاضر مدل‌های فراوانی توسط پژوهشگران به کار می‌روند. مدل معروف به (AOGCM)^۱ می‌تواند با اطمینان بیش از ۸۰٪، نگرشت کمی از اقلیم آینده بدست دهد. در این مدل، تخمین دما بهتر از تخمین پارامترهای دیگر اقلیم (مانند بارش) انجام می‌گیرد. با گذشت زمان روش‌های محاسباتی بهتر و قدرت تفکیک مدل‌ها بیشتر شده است و متغیرهای بیشتری در مدل‌سازی دخالت داده می‌شوند. در ساخت و پرداخت مدل‌ها تلاش‌های هماهنگ بین‌المللی صورت می‌گیرد. با وجود این هنوز جامعه جهانی پژوهشگران مدل واحدی که مورد قبول همگان باشد و با مشاهدات همخوانی قابل قبول نشان دهد انتخاب نکرده است.

یافته‌های مطمئن

- بر اساس مشاهدات و مدل‌ها، حساسیت اقلیم^۲ ۲ تا ۴/۵ درجه و با احتمال زیاد ۳ درجه سانتی‌گراد است. بنا به تعریف حساسیت اقلیم عبارت است از افزایش دمای میانگین زمین در ازای دو برابر شدن کربن‌دی‌اکسید جو. به اعتبار این تعریف، منظور از گفته بالا این است که اگر کربن‌دی‌اکسید جو در هر زمانی در آینده دو برابر شود، دمای جو ۲ تا ۴/۵ درجه سانتی‌گراد و با احتمال زیاد ۳ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت.
- حساسیت کمتر از ۱/۵ درجه و بیشتر از ۴/۵ درجه بسیار نامحتمل است. به این معنا که با دو برابر شدن کربن‌دی‌اکسید جو، زمین کمتر از ۱/۵ درجه یا بالاتر از ۴/۵ درجه گرم نخواهد شد.
- افزایش دمای سطح زمین و گشت‌گره در سده بیست‌ویکم ادامه خواهد داشت.
- تراز آب دریاها در سده بیست‌ویکم به بالا آمدن ادامه خواهد داد.

1. Atmosphere Ocean General Circulation Model
2. climate sensitivity

- بالا آمدن آب دریا در گذشته توزیع جغرافیایی یکنواخت نداشته و در آینده نیز نخواهد داشت.
- حتی در صورت تثبیت ترکیب شیمیایی جو و ثابت نگاه داشتن گازهای گل‌خانه‌ای، بالا آمدن آب دریاها در سده‌ها و هزاره‌های آینده ادامه خواهد یافت.

خطاها

- اغلب مدل‌ها در نشان دادن راندگی اقلیم^۱ مخصوصاً در اعماق اقیانوس‌ها ناتوانند. راندگی اقلیم بنا به تعریف عبارت است از تغییر دمای میانگین در بازه‌های زمانی یکصد ساله.
- قدرت تفکیک مکانی مدل‌های اقلیمی به دلیل محدودیت در توان محاسباتی رایانه‌های امروزی محدود است و در بسیاری از آنها سوگیری سیستماتیک دیده شده است.
- مدل‌های مختلف مقادیر متفاوت برای حساسیت گذرا^۲ و حساسیت میانگین^۳ اقلیم نشان می‌دهند. بنا به تعریف میزان افزایش دمای میانگین زمین در ازای دو برابر شدن لحظه‌ای کربن‌دی‌اکسید جو حساسیت گذرا نامیده می‌شود و افزایش دمای میانگین زمین در ازای دو برابر شدن کربن‌دی‌اکسید در یک بازه زمانی معین حساسیت میانگین برای آن بازه زمانی خوانده می‌شود.
- سازوکار بازخورد از ابرها، بزرگ‌ترین عامل اختلاف بین مدل‌ها است. هنوز ناشناخته‌های زیادی در این که ابرها چگونه به تغییر اقلیم واکنش نشان می‌دهند وجود دارد.
- فرایندهای کلیدی و عمده‌ای که در قطب جنوب و در ورقه یخی گرینلند می‌توانند سبب ورود انبوه یخ‌ها به داخل اقیانوس‌ها شوند هنوز به خوبی شناخته نیستند. حساسیت ورقه‌های یخ به تغییرات جهانی اقلیم نه با مشاهدات و نه با مدل شناخته نیستند.
- در فصل‌های آینده، موضوع تغییر اقلیم و پیامدهای آن، به تفکیک موضوع، مورد بررسی بیشتر قرار خواهد گرفت.

1. climate drift

2. transient sensitivity

3. average sensitivity

مرجع‌ها:

- IPCC. *Climate Change 2007, The Physical Science Basic*, Cambridge University Press 2007
- Geological Survey of Iran (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی): www.gsi.ir
- Climatological Research Institute (پژوهشکده اقلیم‌شناسی): www.cri.ac.ir
- United States Enviromental Protection Agency: www.epa.gov
- National Oceanic and Atmospheric Administrtation: www.noaa.gov
- www.visualdictionaryonline.com
- www.kidsgeo.com
- www.climatechange.gov.au

بخش ۲

هواکره

هواکره یا جو مهم‌ترین مولفه اقلیم است. در سیر تحول سیاره زمین، هواکره از حیات متأثر شده و بر آن تأثیر گذاشته است. ترکیب شیمیایی آن پایه‌پای تکامل حیات، از موجودات بی‌هوازی مانند بعضی باکتری‌ها گرفته تا موجودات نیازمند به اکسیژن، تحول پیدا کرده است. در حال حاضر هوایی که اطراف زمین را فرا گرفته ترکیبی از چند گاز است که هر یک ویژگی فیزیکی خاص خود را دارد. هواکره توسط نیروی گرانش زمین نگاه داشته می‌شود. لایه‌های بالایی آن تابش آسیب‌رسان فرابنفش خورشید را جذب می‌کنند. لایه‌های پایین‌تر آن با حفظ گرمای سطح زمین، زندگی را در روی کره زمین ممکن می‌سازند. دمای هواکره به گونه‌ای است که آب به صورت مایع وجود دارد و سطح زمین به طور وسیع یخ نمی‌زند.

هواکره بخش کوچکی از زمین را تشکیل می‌دهد. ضخامت قسمت عمده آن از چند ده کیلومتر تجاوز نمی‌کند و جرم آن در مقایسه با جرم آب اقیانوس‌ها و جرم کل زمین بسیار

جدول ۱ - ۲ جرم قسمت‌های مختلف سیاره زمین

جرم کل هواکره	$5,14 \times 10^{18}$ کیلوگرم
جرم اقیانوس‌ها	$1,39 \times 10^{21}$ کیلوگرم
جرم کل زمین	$5,98 \times 10^{24}$ کیلوگرم

ناچیز است (جدول ۱ - ۲).

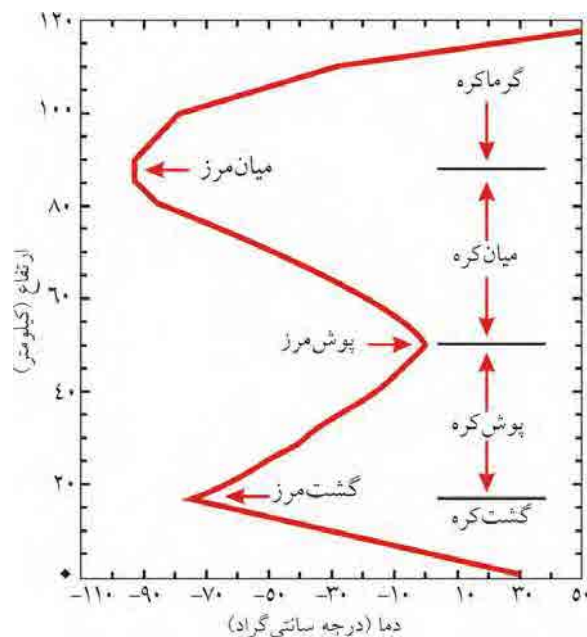
هواکره همواره در حرکت است و سبب آن تابش بیشتر خورشید در استوا و تابش کمتر آن در عرض‌های جغرافیایی بالاتر است. جریان‌های جوی، آب‌های اقیانوس‌ها را به حرکت در می‌آورند و همراه هم، گرما و انرژی را از مناطق استوایی به مناطق قطبی شمال و جنوب انتقال می‌دهند.

هواکره مولفه‌های دیگر اقلیم، سرماکره، سنگ‌کره، آب‌کره و زیست‌کره را به هم ربط می‌دهد. نظام بادها، بخار آب برخاسته از اقیانوس‌ها را به خشکی‌ها منتقل می‌کند و توزیع برف و باران را سبب می‌شود.

لایه‌های هواکره

لایه‌های جو از نظر دینامیک، دما و اجزای سازنده آنها به شرح زیر طبقه‌بندی می‌شوند. گشت‌کره^۱ از سطح زمین آغاز می‌شود و تا ارتفاع تقریبی ۷ کیلومتر در قطب‌ها و ۱۷ کیلومتر در استوا ادامه می‌یابد. ۸۰٪ جرم کل جو در گشت‌کره متمرکز است. گشت‌کره در سطح زمین گرم است و با افزایش ارتفاع، دمای آن با آهنگ ۶,۵ درجه سانتی‌گراد در کیلومتر کاهش می‌یابد (شکل ۱ - ۲). این سرد شدن را به طور آشکار می‌توان در قله‌های همیشه پوشیده از برف مشاهده کرد. توجیه سرد شدن گشت‌کره با ارتفاع به شرح زیر است: در سطح زمین نزدیک به نیمی از تابش خورشید را اقیانوس‌ها و خشکی‌ها جذب می‌کنند و نیم دیگر به فضا برگردانده می‌شود (شکل ۲ - ۲). قسمتی از این انرژی جذب شده دوباره به صورت تابش فروسرخ گرمایی بازتابانده می‌شود. این تابش گرمایی، لایه‌های نزدیک به زمین گشت‌کره را گرم می‌کند.

1. troposphere



شکل ۱-۲ نمودار
 تغییرات دمای لایه‌های
 گوناگون جو با
 افزایش ارتفاع.
 برگرفته از Mathez

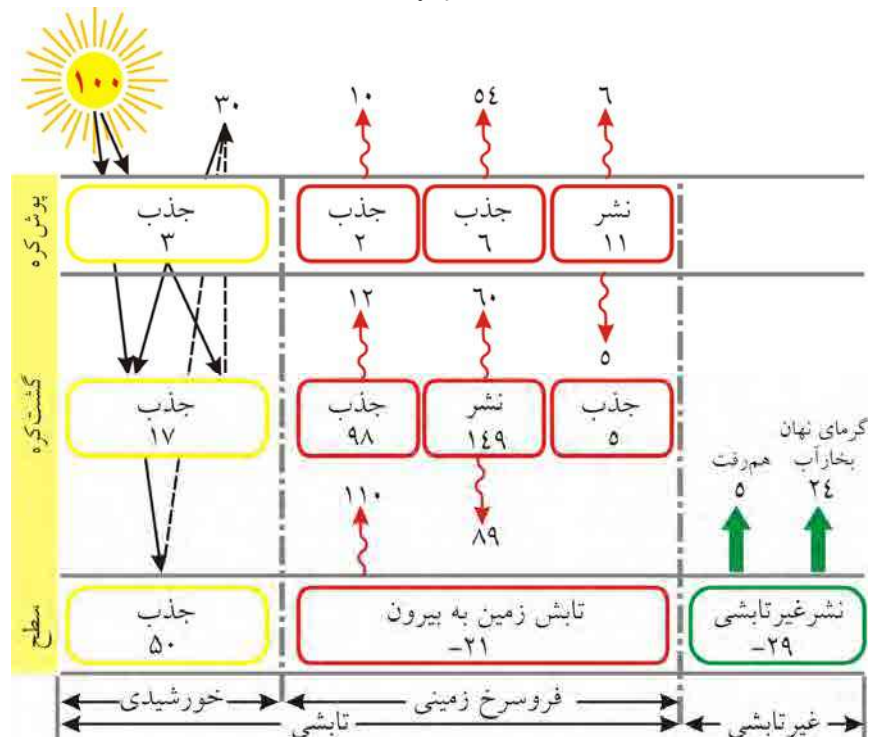
وجه تمایز این لایه با لایه‌های دیگر هواکره، تمرکز تقریباً همه بخار آب جو در آن است. به همین علت بسیاری از پدیده‌های جوی که با رطوبت ارتباط دارند، مانند تشکیل مه و ابر، بارش باران و برف، وقوع رعد و برق، که عوامل تعیین‌کننده وضعیت‌های هواشناختی به شمار می‌آیند، تنها در این لایه روی می‌دهند.

گشت مرز^۱ مرز بین گشت کره و پوش کره است. دما در گشت مرز به ۶۰- تا ۷۰- درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد و در بالاتر از آن دوباره افزایش می‌یابد.

پوش کره^۲ یک لایه گرم است. از گشت مرز شروع می‌شود و تا ارتفاع ۵۰ کیلومتری ادامه دارد. در این لایه دما با افزایش ارتفاع با آهنگ ۲/۲ درجه سانتی‌گراد در کیلومتر افزایش می‌یابد. سبب افزایش دما، جذب بیشتر تابش خورشیدی در پوش کره است. در پوش کره ابر به ندرت دیده می‌شود. تنها در شرایط ویژه ممکن است ابرهای کوهستانی به نام ابرهای مرواریدی در ارتفاع ۲۱ تا ۲۹ کیلومتری سطح زمین ظاهر شوند. علت تشکیل آنها حرکات موجی شکل هوا از روی موانع زمینی است.

1. tropopause

2. stratosphere



شکل ۲-۲ جذب انرژی خورشید توسط زمین و مبادله آن بین سطح زمین، گشت کره، و پوش کره. از کل تابش خورشیدی که به زمین می رسد نزدیک به ۵۰ درصد توسط سطح و ۲۰ درصد توسط گشت کره و پوش کره جذب می شود. ۳۰ درصد باقی مانده به فضا بازتابیده می شود. تابش فروسرخ زمینی توسط گازهای گلخانه ای در گشت کره جذب می شود. گشت کره به نوبه خود تابش فروسرخ را از پایین به سطح زمین و از بالا به پوش کره منتقل می کند و قسمتی از فروسرخ رسیده به پوش کره توسط ازن که گاز گلخانه ای است، جذب می شود. گرمای نهان بخار آب نیز که به هنگام تشکیل ابر و بارش آزاد می شود از طریق حرکات همرفتی به هواکره منتقل می شود. عددهای آمده در شکل برحسب درصد دریافت تابش خورشیدی (۳۴۲ وات بر متر مربع) هستند. برگرفته از Mathez

از ویژگی های مهم دیگر پوش کره وجود ازن در آن است. ازن عمدتاً در ارتفاع ۲۰ تا ۳۰ کیلومتری سطح زمین بر اثر واکنش های مختلف فتوشیمیایی به وجود می آید. ازن پوش کره هم تابش فرابنفش خورشید را از بالا جذب می کند و هم تابش فروسرخ زمین را

از پایین. این فرآیند یکی از عوامل گرم‌کننده پوش کره است. مقدار ازن در پوش کره روند فصلی دارد. حداکثر آن در بهار و حداقل آن در پاییز است.

پوش مرز^۱، مرز بین پوش کره و میان کره است.

میان کره^۲ در بالای لایه گرم و حاوی ازن پوش کره قرار دارد. میان کره از پوش مرز آغاز شده و تا ۸۰ الی ۸۵ کیلومتری از سطح زمین ادامه می‌یابد. در این لایه، به خاطر چگالی بسیار کم هوا، جذب تابش فرابنفش خورشیدی کاهش می‌یابد. به همین سبب دما نیز با افزایش ارتفاع با آهنگ ۳ درجه سانتی‌گراد در هر ۱۰۰ متر، کم می‌شود. اگر بخار آب به میان کره راه یابد بر اثر سرما منجمد می‌شود و ابرهای شب تاب را پدید می‌آورد. این ابرها در تابستان و در عرض‌های شمالی تر دیده می‌شوند. شهاب‌ها نیز در این لایه می‌سوزند. **میان مرز^۳** مرز بالایی میان کره است و با دمای متوسط ۱۰۰- درجه سانتی‌گراد سردترین نقطه کره زمین است.

گرماکره^۴. دما در این لایه با افزایش ارتفاع با آهنگ تقریبی ۴/۵ درجه سانتی‌گراد در هر ۱۰ کیلومتر افزایش می‌یابد تا به **گرمامرز^۵**، بالاترین لایه هواکره، برسد. دما در گرماکره به علت جذب تابش خورشید و بمباران توسط باد خورشیدی زیاد می‌شود. از گرمامرز به بالا دما ثابت می‌ماند. دما در این لایه می‌تواند به ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد هم برسد. ولی از آنجا که گرماکره بسیار رقیق است و تعداد مولکول‌های هوا در واحد حجم بسیار کم است، این به معنای داغ بودن نیست. دماسنج‌های متعارف که با جذب گرما، دما را اندازه می‌گیرند، این دماها را نمی‌توانند ثبت کنند. این دما برای سفینه‌های فضایی و فضاانوردان نیز محسوس نیست.

ترکیب شیمیایی هواکره

سه گاز نیتروژن، اکسیژن و آرگن حدود ۹۹/۹۶ درصد حجم هوا را تشکیل می‌دهند. ۴ صدم درصد باقیمانده را کربن دی‌اکسید، متان، ازن، بخار آب، نیتروژن اکسید و غیره تشکیل می‌دهد. مقدار بخارآبی را که جو می‌تواند نگاه دارد متغیر است و به دما بستگی دارد. با افزایش ارتفاع و کاهش دما، رطوبت به شدت کاهش می‌یابد. به همین سبب هوای سرد

-
- | | | | |
|----------------|---------------|--------------|-----------------|
| 1. stratopause | 2. mesosphere | 3. mesopause | 4. thermosphere |
| 5. thermopause | | | |

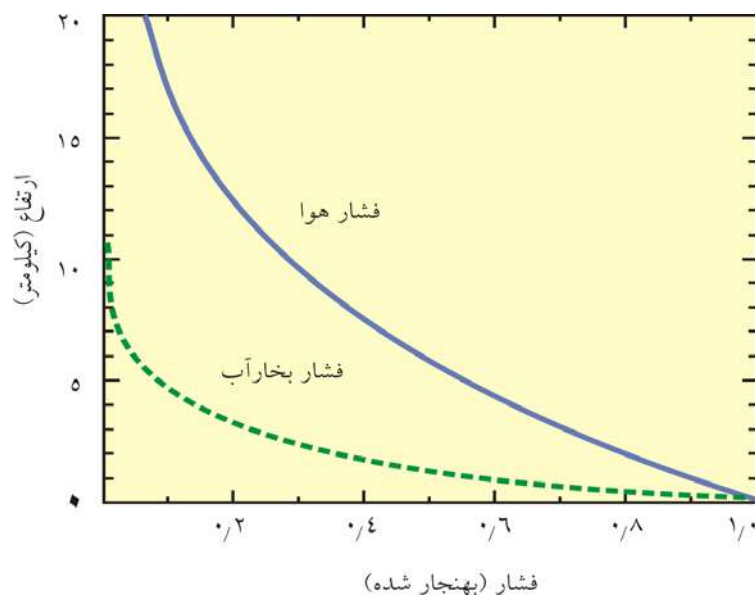
مناطق قطبی و کوهستان‌ها بسیار خشک‌تر از هوای گرم استواست. خورشید منبع اصلی انرژی زمین است. بخشی از تابش خورشید در هواکره و قسمت عمده آن در سطح زمین و اقیانوس‌ها جذب می‌شود. زمین و اقیانوس گرم به نوبه خود در طول موج‌های میکرومتری تابش می‌کنند، هوای اطراف را گرم می‌کنند، و نظام بادها را به وجود می‌آورند. دمای هوا از نظر توزیع مکانی و زمانی متغیر است. در سطور آینده به این تغییرات به اجمال اشاره می‌شود.

فشار هوا

بنا به تعریف، فشار هوا در یک نقطه عبارت از نیرویی است که هوا به واحد سطح در آن نقطه وارد می‌کند. فشار هوا در سطح دریا برابر با وزن ۷۶ سانتی‌مترجیوه، تقریباً معادل یک کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع است. این مقدار را یک اتمسفر نیز می‌خوانند. دو عامل دما و چگالی بر میزان فشار هوا مؤثر هستند. با افزایش دما سرعت مولکول‌های هوا زیاد می‌شود و فشار هوا بالا می‌رود. همچنین با افزایش چگالی تعداد مولکول‌های هوا در واحد حجم افزایش یافته و باز سبب بالا رفتن فشار هوا می‌شوند.

فشار هوا ثابت نیست و بر اثر جریان‌های جوی، تغییرات شبانه‌روزی و فصلی دارد. تغییرات شبانه‌روزی فشار هوا در نواحی مجاور خط استوا دو کمینه و دو بیشینه دارد. فشار از ساعت ۴ تا ۱۰ صبح بالا می‌رود و از ۱۰ تا ۱۶ به تدریج پایین می‌آید. دوباره از ۱۶ تا ۲۲ افزایش و از ۲۲ تا ۴ کاهش می‌یابد.

از نقطه نظر فصلی به تقریب می‌توان گفت، فشار متوسط هوا در زمستان بیشتر از تابستان است. شرایط محلی ممکن است این وضع را تغییر دهند. تنها قاعده کلی که می‌توان گفت این است که در قاره‌ها فشار در زمستان بالا است و در تابستان پایین می‌آید. در اقیانوس‌ها عکس این حالت اتفاق می‌افتد. فشار در هر نقطه از هواکره چیزی جز وزن هوای بالا سر آن نقطه نیست. بنابراین فشار هوا با افزایش ارتفاع کم می‌شود (شکل ۳ - ۲). آهنگ کاهش فشار هوا با ارتفاع زیاد می‌شود. در جدول ۲ - ۲ کاهش فشار بر حسب ارتفاع نشان داده شده است. تغییر فشار هوا با ارتفاع چنان دقیق است که می‌توان با اندازه‌گیری یکی، دیگری را نتیجه گرفت. ارتفاع‌سنج‌ها بر همین مبنا ساخته می‌شوند.



شکل ۲-۳ تغییرات فشار هوا و بخار آب با ارتفاع. فشار در سطح دریا «یک» گرفته شده است. برگرفته از Mathez

نظام بادهای

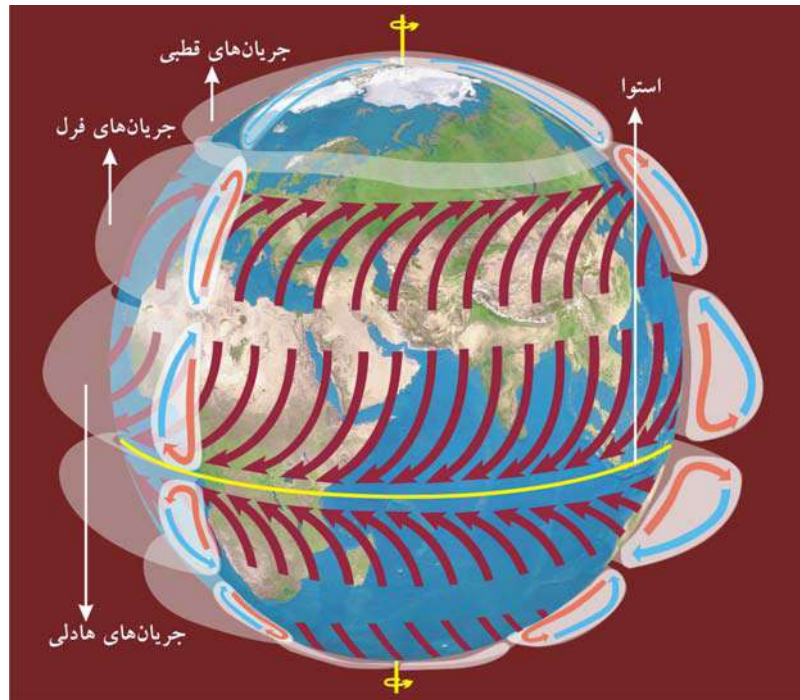
برابر قانون حرکت نیوتن، جرمی که نیرو به آن وارد شود شتاب می‌گیرد و به حرکت در می‌آید. در مورد هوا سه نیروی عمده سبب حرکت می‌شوند و نظام بادهای جهان را به وجود می‌آورند:

- نیروی گرادیان فشار که بر اثر اختلاف فشار بین دو نقطه به وجود می‌آید و سبب حرکت هوا از نقطه‌ای با فشار زیاد به نقطه‌ای با فشار کم می‌شود.
- نیروی کوریولیس که به سبب دوران زمین به دور خود به وجود می‌آید (قاب ۱-۲).
- نیروی گرانروی (چسبندگی یا اصطکاک) که همیشه در خلاف جهت جریان هوا عمل می‌کند و سبب کندی جریان می‌شود.

اگر تنها نیروی گرادیان فشار در تشکیل بادهای دخالت داشت، باید با گذر زمان سرعت بادهای تا وقتی که اختلاف فشار وجود داشت، افزایش می‌یافت. ولی مشاهدات نشان می‌دهند که بادهای، علی‌رغم اختلاف فشار، پرسرعت‌تر نمی‌شوند. نیروی گرانروی

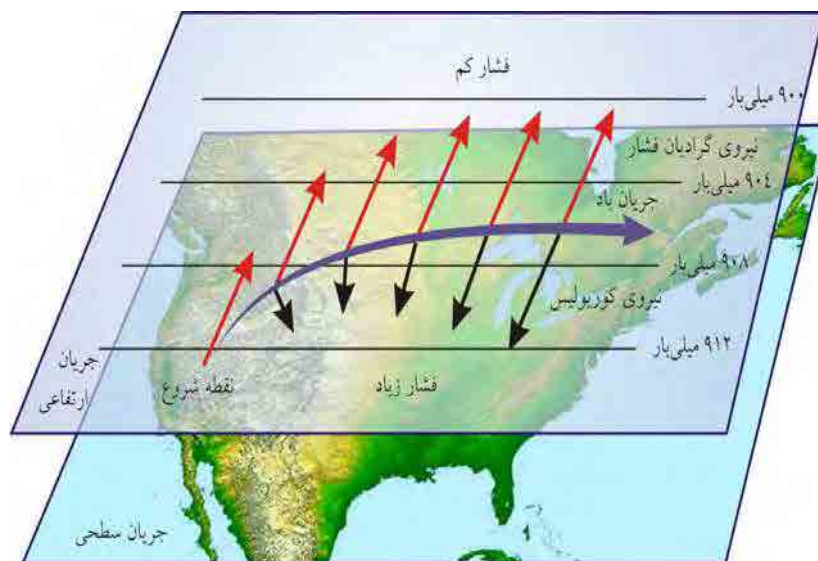
جدول ۲-۲ تغییرات فشار و دمای هوا برحسب ارتفاع از سطح دریا. فشار هوا در هر ۵ کیلومتر نصف می‌شود. یک اتمسفر برابر ۱۰۱۳/۲۵ میلی‌بار است. برگرفته از *Lutgens*

ارتفاع (کیلومتر)	فشار (میلی‌بار)	دما (درجه سانتی‌گراد)
۰٫۰	۱۰۳۳٫۲	۱۵
۰٫۵	۹۵۴٫۶	۱۲
۱	۸۹۸٫۸	۹
۱٫۵	۸۴۵	۵
۲	۷۹۵	۲
۲٫۵	۷۴۶٫۹	-۱
۳	۷۰۱٫۲	-۴
۳٫۵	۶۵۷٫۸	-۸
۴	۶۱۶٫۶	-۱۱
۵	۵۴۰٫۴	-۱۷
۶	۴۷۲٫۲	-۲۴
۷	۴۱۱	-۳۰
۸	۳۵۶٫۵	-۳۷
۹	۳۰۸	-۴۳
۱۰	۲۶۵	-۵۰
۱۲	۱۹۴	-۵۶
۱۴	۱۴۱٫۷	-۵۶
۱۶	۱۰۳٫۵	-۵۶
۱۸	۷۵٫۶۵	-۵۶
۲۰	۵۵٫۲۹	-۵۶
۲۵	۲۵٫۴۹	-۵۱
۳۰	۱۱٫۹۷	-۴۶
۳۵	۵٫۷۵	-۳۶
۴۰	۲٫۸۷	-۲۲
۵۰	۰٫۷۹۸	-۲



شکل ۴ - ۲ شمای کلی از الگوی بادهای سطحی جهان. برگرفته از Mathez

سرعت آنها را کاهش می‌دهد. گران‌روی با کاهش چگالی هوا کاهش می‌یابد، و در حد فاصل زمین و هوا به خاطر جامد بودن سطح زمین و چگال بودن آب اقیانوس‌ها بیشتر می‌شود. به همین سبب سرعت بادهای سطحی بسیار کمتر از سرعت بادهای مرتفع است. با شروع حرکت هوا، نیروهای کوریولیس آنها را در نیم‌کره شمالی به سمت راست، و در نیم‌کره جنوبی به سمت چپ منحرف می‌کنند. اندازه نیروی کوریولیس متناسب با سرعت جریان هوا است. به همین سبب بادهای پرسرعت مرتفع، شرقی - غربی‌تر از بادهای کم-سرعت سطحی‌اند. نیروی کوریولیس سبب می‌شود گرادیان فشار هوا تعدیل شود و حالت نسبتاً پایدار به وجود آید (شکل ۵ - ۲). هنگامی که این دو نیرو (گرادیان فشار و کوریولیس) به تعادل برسند، جریان هوا با سرعت ثابت در راستای خطوط هم‌فشار به حرکت ادامه می‌دهد.



شکل ۵-۲ اثر گرادیان فشار و نیروی کوریولیس بر جریان هوا. در ارتفاع بالا فشار از استوا به قطب کم می‌شود و هوا میل به حرکت از استوا به قطب دارد. ولی در نیم‌کره شمالی نیروهای کوریولیس آن را به سمت راست (از غرب به شرق) منحرف می‌کنند. هر اندازه سرعت باد بیشتر باشد نیروی کوریولیس هم بیشتر است و جریان هوا غربی - شرقی تر می‌شود. برگرفته از *Lutgens*

نم هوا

مقدار بخار آب در قسمت‌های مختلف هواکره متفاوت است. قسمت عمده آن از تبخیر آب اقیانوس‌ها و کمی هم از تنفس گیاه و حیوان و تبخیر از زمین‌های مرطوب، فراهم می‌شود.

نم مطلق: جرم بخار آب موجود در واحد حجم یا واحد جرم هوا را نم مطلق می‌گویند. نم مطلق نمی‌تواند از حد معینی بیشتر شود و حالت اشباع به وجود می‌آید. هر قدر هوا گرم‌تر باشد مقدار بخار آب لازم برای اشباع بیشتر است. فشار بخار آب را در حالت اشباع، فشار اشباع می‌نامند.

نم نسبی: عبارت است از نسبت فشار بخار موجود در هوا به فشار اشباع. نم نسبی هم با افزایش و کاهش دما، پایین و بالا می‌شود.

قالب ۱-۲: نیروی کوریولیس

زمین در ۲۴ ساعت یک دور به دور خود می‌چرخد. سرعت خطی دوران در عرض‌های جغرافیایی بالاتر، کمتر از سرعت در عرض‌های پایین‌تر است. به طور مثال تهران با عرض جغرافیایی تقریباً $35^{\circ}30'$ با سرعت خطی 1359 کیلومتر در ساعت از غرب به شرق می‌چرخد. اصفهان با عرض جغرافیایی $32^{\circ}35'$ ، سرعت خطی 1406 کیلومتر در ساعت دارد.

فرض کنید پرتابه‌ای از تهران به سوی اصفهان پرتاب شود و پس از یک ساعت به اصفهان برسد. پرتابه به هنگام رها شدن، سرعت غرب به شرق تهران را دارد، و پس از یک ساعت 1359 کیلومتر به سمت شرق حرکت کرده است، ولی در همین یک ساعت اصفهان 1406 کیلومتر به شرق حرکت کرده است. بنابراین پرتابه با فاصله 47 کیلومتر در سمت راست هدف مورد نظر در اصفهان به زمین فرود خواهد آمد. این توجیه از به هدف نخوردن پرتابه از دید ناظری است که خارج از کره زمین است و حرکت دورانی زمین را ندارد. توجیه ناظری که روی زمین قرار دارد و در حرکت دورانی زمین شریک است، متفاوت خواهد بود. او انحراف پرتابه به سمت راست هدف را به نیرویی (که تنها در دستگاه چرخنده وجود دارد) نسبت خواهد داد. این نیرو به نام کاشف آن، نیروی کوریولیس، نامیده می‌شود. فرمول ریاضی آن:

$$F_{Cor} = 2\omega \times V$$

که در آن ω بردار سرعت زاویه‌ای زمین و V سرعت پرتابه است. نیروی کوریولیس در نیم‌کره شمالی به سمت راست متحرک و در نیم‌کره جنوبی به سمت چپ است و عامل عمده در ایجاد نظام بادهای جریانی‌های اقیانوسی به حساب می‌آید.

مرجع‌ها:

- IPCC. *Climate Change 2007, The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, 2007
- Mathez, E. A. *Climate Change: The Science of Global Warming and Our Energy Future*, Columbia University Press, 2009
- Lutgens, F. K., Tarbuck, E. J. *The Atmosphere*

بخش ۳

اثر گل‌خانه‌ای

تعریف و نامگذاری: شیشه برای طول‌موج‌های کوتاه تابش خورشید، شفاف ولی برای طول‌موج‌های گرمایی زمین، کدر است. در گل‌خانه با دیوارها و سقف شیشه‌ای، نور و گرمای خورشید به درون راه می‌یابد، ولی گرمای درون گل‌خانه به بیرون نمی‌رود و گل‌خانه گرم می‌شود. چنین پدیده‌ای در جو زمین نیز روی می‌دهد. شفافیت جو در طول‌موج‌های مرئی و فرابنفش خورشید و کدورت آن در طول‌موج‌های بلند زمین سبب گرم شدن زمین و لایه‌های زیرین هواکره می‌شود. این پدیده اثر گل‌خانه‌ای نامیده شده است.

تعادل دمایی سطح زمین و لایه‌های زیرین هواکره

در حال حاضر انرژی ورودی به زمین و خروجی از آن تقریباً با هم برابر است، و دمای میانگین سطح زمین در حد ۱۵ درجه سانتی‌گراد تثبیت شده است. اگر سطح زمین به هر دلیل انرژی بیشتری دریافت کند برای برقراری تعادل مجدد لازم است دما به حدی بالا



شکل ۳-۱ گرم شدن زمین به دلیل اثر گل‌خانه‌ای

<http://maps.grida.no/go/graphic/greenhouse-effect>

رود که انرژی تابیده از سطح زمین با انرژی دریافتی آن برابر شود. برعکس، اگر زمین انرژی بیشتری از دست دهد، اقلیم خنک‌تر می‌شود تا دوباره تعادل برقرار شود. میزان انرژی دریافتی از خورشید در بالای جو کم و بیش ثابت است و تنها بر اثر دوری و نزدیکی زمین به خورشید عمدتاً به طور فصلی تغییر می‌کند. ولی انرژی دریافتی در سطح زمین بسته به کدورت و شفافیت جو تغییر می‌کند.

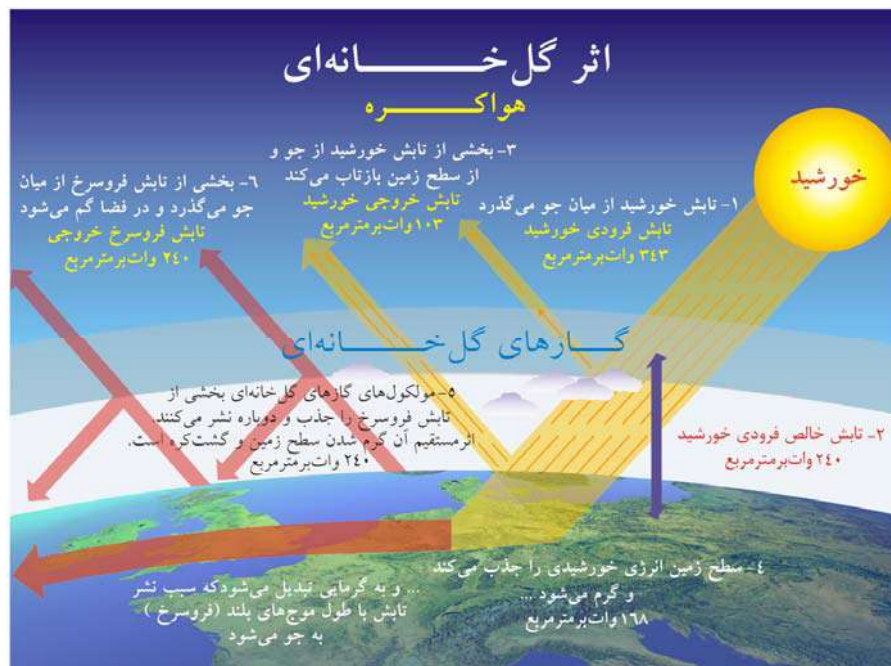
مشخصات مدار زمین به دور خورشید در بازه‌های زمانی طولانی (چند ده هزار تا یکصد هزار سال) تغییر می‌کند (چرخه‌های میلانکوویچ^۱، فصل ۶) و انرژی دریافتی از خورشید نیز کم و زیاد می‌شود. ولی این تغییرات در دوره‌های زمانی بسیار طولانی روی می‌دهند و تأثیر آن بر اقلیم در چند ده و چند صد سال ناچیز است. در مقابل نقش جو و سطح زمین و پهنه اقیانوس‌ها در تغییرات کوتاه‌مدت اقلیم بسیار مهم است. هر تغییر در هر یک از ویژگی‌های این سه مولفه اقلیم سبب کمی و زیادی انرژی دریافتی و نشری زمین می‌شود و اقلیم را تغییر می‌دهد.

جریان‌های همرفتی نیز جابجایی گرما را سبب می‌شوند. هوای گرم و سبک به سمت بالا می‌رود و هوای سرد و سنگین پایین می‌آید و سبب انتقال گرما در جو می‌شود. در جو زمین جریان‌های همرفتی بزرگ مقیاس وجود دارد. در واقع تا ارتفاع ۱۰ کیلومتری از سطح زمین که گشت‌کره نامیده شد، انتقال گرما عمدتاً از طریق همرفت صورت می‌گیرد. تابش خورشید، سطح زمین و هوای نزدیک به آن را گرم می‌کند. هوای گرم بالا می‌رود و

1. Millankovich Cycles

و در حین بالا رفتن منبسط و سرد می‌شود (انبساط بی‌دررو). از سوی دیگر، هوای سرد و سنگین لایه‌های بالاتر پایین می‌آید و همرفت ایجاد می‌شود.

دما در گشت‌کره، در ارتفاعات بین ۵ تا ۱۰ کیلومتر، بین ۳۰- تا ۵۰- درجه سانتی‌گراد است. گازهای گل‌خانه‌ای موجود در هوا، تابش‌های زمینی در طول موج‌های بلند را جذب و سپس گسیل می‌کنند. مقداری از این تابش دوباره گسیل شده، به زمین برمی‌گردد و مقداری دیگر به فضا می‌تابد و از زمین خارج می‌شود. ولی دمای لایه‌های بالای گشت‌کره سردتر از لایه‌های پایین آن است. بنابراین میزان گرمای برگشت داده شده به زمین بیش از گرمای خارج شده از زمین است. نتیجه این که گازهای گل‌خانه‌ای مانند پتویی بر روی زمین عمل می‌کنند و زمین را گرم نگاه می‌دارند (شکل‌های ۱- ۳ و ۲- ۳). محاسبه شده است، اگر همه بخار آب و همه گازهای گل‌خانه‌ای از جو زمین خارج شوند و تنها اکسیژن، نیتروژن و آرگن باقی بمانند، زمین تا دمای ۶- درجه سانتی‌گراد سرد خواهد شد، آب‌ها یخ خواهند زد و حیات بسیار محدود و متفاوت خواهد شد.



شکل ۲- ۳ اثر پوششی گازهای گل‌خانه‌ای

قالب ۱ - ۳: بازخورد^۱

فرایند A بر فرایند B اثر می‌گذارد. عکس‌العمل B روی A را بازخورد از B به A می‌گویند. اگر بازخورد از B به A سبب تشدید عمل A روی B شود بازخورد را مثبت می‌گویند. اگر سبب تضعیف آن شود بازخورد را منفی می‌گویند. مثال: بر اثر گرم شدن زمین (فرایند A) تبخیر از اقیانوس‌ها زیاد می‌شود (فرایند B). ولی بخار آب گاز گل‌خانه‌ای است. افزایش آن در جو سبب گرم شدن بیشتر زمین می‌شود. بنابراین بازخورد بخار آب جو روی گرمایش زمین مثبت است. مثال دیگر: سطوح فوقانی ابرها مانع از رسیدن نور آفتاب به لایه‌های زیرین می‌شود و سطوح پایین ابرها از خروج تابش‌های زمین به فضا جلو می‌گیرد. بنابراین برای گرم شدن زمین (فرایند A) بازخورد از ابرها (فرایند B) از سطوح بالایی منفی و از سطوح پایینی مثبت است.

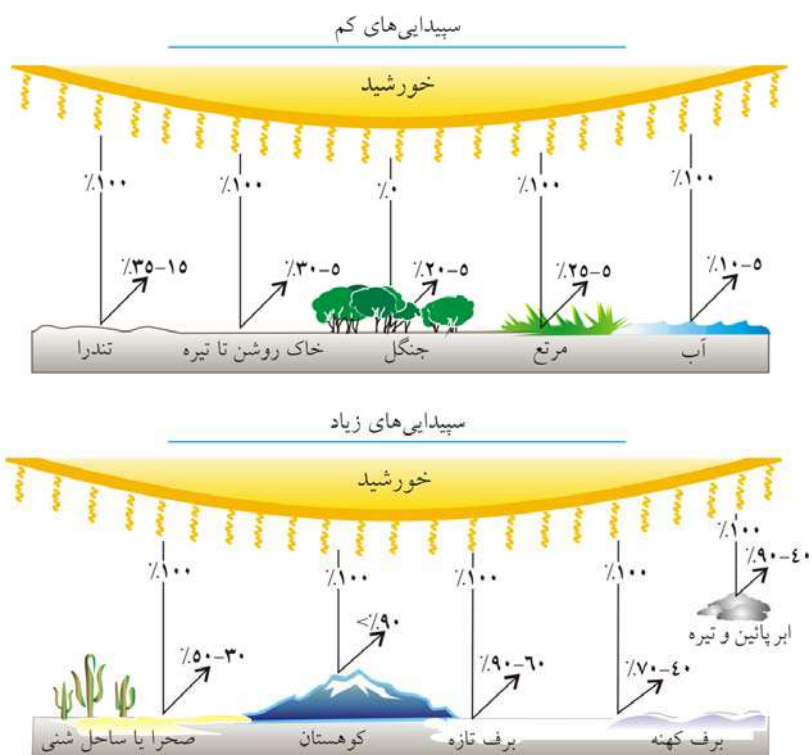
بخار آب و اثر گل‌خانه‌ای افزوده

بخار آب گاز گل‌خانه‌ای است. ولی حضور آن در جو به شدت تحت تاثیر گازهای گل‌خانه‌ای دیگر است. از این رو اثر آن روی گرمایش زمین را به عنوان بازخورد (قالب ۱ - ۳) از گازهای دیگر به حساب می‌آورند. میزان بخار آب موجود در جو زمین با کاهش و افزایش دمای اقیانوس‌ها کم و زیاد می‌شود و نقش انسان در آن ناچیز و غیرمستقیم است. در مقابل میزان کربن دی‌اکسید جو متناسب با فعالیت‌های صنعتی و اجتماعی انسان کم و زیاد می‌شود. تخمین زده شده است تا پایان سده بیست و یکم میزان کربن دی‌اکسید جو به ۵۴۰ در میلیون (۰/۰۵۴۰ درصد) یعنی دو برابر مقدار آن در پیش از انقلاب صنعتی، که ۲۷۰ در میلیون بود، برسد. این افزایش، بدون در نظر گرفتن عوامل دیگر، به تنهایی دمای زمین را ۱/۲ درجه بالا می‌برد. این افزایش دما قابل تحمل است، ولی مسئله به این سادگی تمام نمی‌شود. افزایش کربن دی‌اکسید بازخورد مثبت عوامل دیگر را در پی دارد (قالب ۱ - ۳). در اثر گرم شدن زمین، بخار آب جو و به تناسب ابرها زیاد می‌شوند. کدورت و سپیدایی جو (قالب ۲ - ۳) بالا می‌رود. آب شدن یخ‌های شمالگان و جنوبگان و یخچال‌های طبیعی شدت می‌گیرد. با در نظر گرفتن این بازخوردها تخمین زده شده است که دمای زمین تا ۲/۵ درجه بالا برود. این افزایش دما ناخوشایند است. بازخوردهای مثبت و منفی افزایش کربن دی‌اکسید جو را که به گرم شدن بیشتر زمین می‌انجامد،

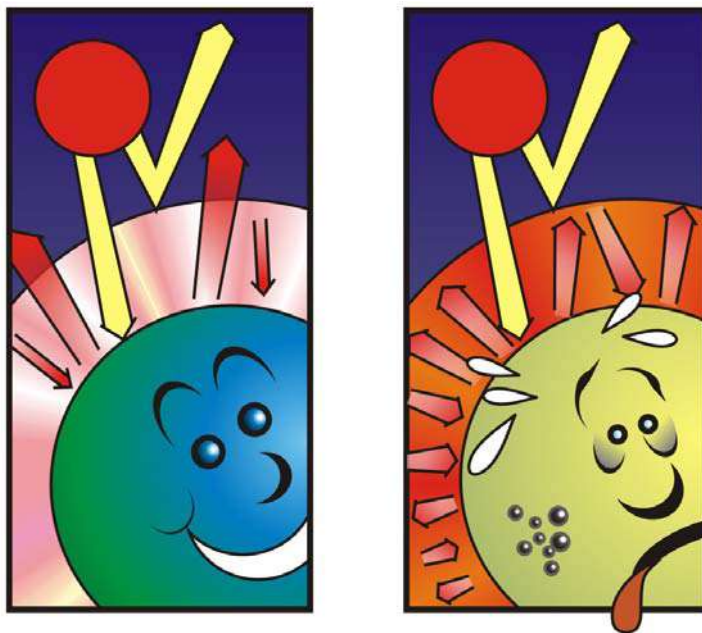
1. feedback

قاب ۲ - ۳: سپیدایی (آلبدو)

اجسام مقداری از تابش‌های نوری و گرمایی را که به آنها می‌تابند، جذب و مقداری را بازتاب می‌کنند. تابشی که از جسم باز می‌گردد ممکن است بازتاب آینه‌وار یا پراکنده باشد. درصد تابشی را که یک جسم باز می‌گرداند سپیدایی آن جسم می‌نامند. جسم سیاه کامل، همه تابش‌ها را در همه طول‌موج‌ها جذب می‌کند، بنابراین سپیدایی آن صفر است. یک آینه خوب تقریباً هر تابشی را باز می‌تاباند، بنابراین سپیدایی‌اش نزدیک به صد درصد است. آب‌های عمیق مقداری از تابش‌های الکترومغناطیسی را آینه‌وار از سطح خود باز می‌تابانند، ولی قسمت عمده آن را که وارد آب می‌شود در خود نگاه می‌دارند. بنابراین سپیدایی اقیانوس‌ها زیاد است. سپیدایی زمین‌های شخم‌زده و مرطوب بسیار کمتر از سپیدایی زمین‌های خشک و صاف است. سپیدایی برف، یخ، ابر، و خاکسترهای آتشفشانی که در جو پخش می‌شوند زیاد است. افزایش سپیدایی در هر بخش از کره زمین به خنک شدن اقلیم کمک می‌کند.



<http://www.plantsneedco2.org/default.aspx?art=document.aspx?category=additional>



شکل ۳-۳ اثر گل‌خانه‌ای طبیعی، قابل تحمل (چپ)، و اثر گل‌خانه‌ای افزوده غیرقابل تحمل (راست)

<http://www.maf.govt.nz/mafnet/rural-nz/sustainable-resource-se/climate/impact-on-industries/>

اثر گل‌خانه‌ای افزوده می‌نامند. در کاریکاتور شکل ۳-۳ زمین خنده‌رو و خنک و زمین تب‌کرده داغ اشاره به اثر گل‌خانه‌ای طبیعی و افزوده دارند. شناسایی همه عوامل دخیل در اقلیم و فهم و محاسبه بازخوردهای مثبت و منفی این عوامل از چالش‌های بسیار بزرگ مطالعات اقلیم است و خاستگاه بخش بزرگی از خطاها در نتیجه‌گیری‌های نهایی است.

گازهای گل‌خانه‌ای

در گرم شدن زمین، گازهای گل‌خانه‌ای دیرزی و مرتبط با فعالیت‌های انسان نقش عمده بازی می‌کنند. میزان این گازها در سال‌های ۱۷۵۰ و ۲۰۰۵ در جدول ۱-۳ آورده شده است. گفته شد که بخار آب نیز گاز گل‌خانه‌ای است. ولی چون مقدار آن در جو بسیار متغیر و به شدت متأثر از عوامل گل‌خانه‌ای دیگر است، به عنوان گاز گل‌خانه‌ای مستقل

جدول ۱-۳ گازهای گل‌خانه‌ای موجود در جو زمین در سال‌های ۱۷۵۰ و ۲۰۰۵.

گاز	مقدار در سال ۱۷۵۰	مقدار در سال ۲۰۰۵
کربن‌دی‌اکسید	۲۸۰ در میلیون	۳۷۰ در میلیون
متان	۰/۷۳۰ در میلیون	۱/۸ در میلیون
نیتروژن‌اکسید	۰/۲۷ در میلیون	۰/۳۲ در میلیون
کلروفلوئوروکربن‌ها	صفر	۰/۰۰۱ در میلیون
ازن	_____	۰-۱۰۰۰ در میلیون (متغیر)
بخار آب	_____	۰-۰/۰۲ درصد (متغیر)

به حساب نمی‌آید و اثر آن به عنوان بازخوردهای عوامل دیگر منظور می‌شود. کربن‌دی‌اکسید مهم‌ترین گاز گل‌خانه‌ای دیرزی است و با گسترش جوامع انسانی و تغییر در الگوهای مصرف در حال افزایش است. ۷۰٪ از اثر گل‌خانه‌ای افزوده از کربن‌دی‌اکسید، و نزدیک به ۲۴٪ آن از متان و ۶٪ باقیمانده از نیتروژن‌اکسید ناشی می‌شود. این ارقام بدون در نظر گرفتن سهم ازن و کلروفلوئوروکربن‌ها ذکر شده‌اند.

گازهای کربن‌دی‌اکسید، متان و نیتروژن‌اکسید به طور طبیعی نیز در جو و زمین به وجود می‌آیند و از بین می‌روند. ولی افزایش غیرعادی فراوانی آنها در ۲۵۰ سال گذشته به سبب فعالیت‌های صنعتی انسان بوده است. کلروفلوئوروکربن‌ها، به عنوان گازهای گل‌خانه‌ای، در طبیعت تولید نمی‌شوند و صرفاً صنعتی هستند. نیتروژن و اکسیژن، مولفه‌های اصلی جو، نسبت به تابش‌های ورودی خورشید (مرئی و فروسرخ) و تابش‌های خروجی زمین (فروسرخ دور و میکرومتری) کم‌وبیش شفاف‌اند و اثر گل‌خانه‌ای محسوسی ندارند.

فراوانی کنونی گازهای گل‌خانه‌ای در جو به تاریخچه نشر و حذف آنها از جو بستگی دارد. گازهای دیرزی، شامل کربن‌دی‌اکسید، نیتروژن‌اکسید و متان، از نظر شیمیایی پایدارند و تا ده‌ها و صدها سال در جو زمین باقی می‌مانند و تأثیر درازمدت بر اقلیم دارند. کربن‌دی‌اکسید عمر مشخصی ندارد و مدام بین جو، اقیانوس و خشکی مبادله می‌شود. حذف آن از جو، بسته به فرایندهای حذف، مقیاس‌های زمانی متفاوت دارد. گازهای کوتاه‌زی، مانند سولفور دی‌اکسید و کربن مونوکسید، از لحاظ شیمیایی فعال‌اند

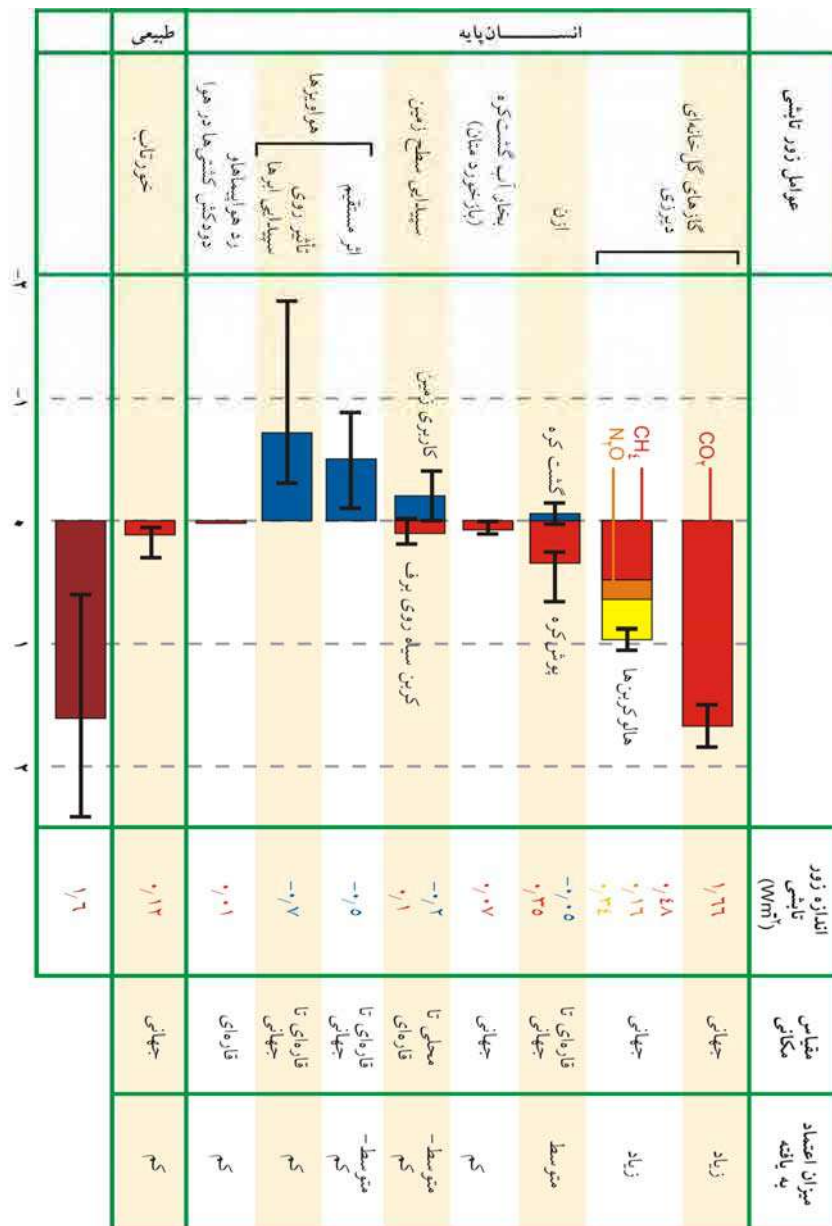
و معمولاً از طریق اکسایش طبیعی از جو حذف می‌شوند و یا توسط باران شسته شده و به زمین برمی‌گردند. به همین سبب فراوانی آنها بسیار متغیر است. ازن یک گاز گل‌خانه‌ای مهم است که در اثر واکنش‌های شیمیایی و فتوشیمیایی گوناگون در سطح زمین و در بالای جو تولید می‌شود و از بین می‌رود. راه‌یابی کلروفلوئوروکربن‌ها به پوش کره به تخریب لایه ازن می‌انجامد. در تغییر اقلیم هر کدام از این دو فرایند نقش دارند. ازن در گشت‌کره، سردکننده و در پوش کره، گرم‌کننده است. به زور تابشی ازن در قاب ۳ - ۳ مراجعه شود.

زور تابشی گازهای گل‌خانه‌ای

هر عامل گرم‌کننده یا خنک‌کننده اقلیم با تابش گرمای معادلی شناخته می‌شود که همان اثر را داشته باشد. این تابش معادل را زور تابشی آن عامل می‌نامند. در (قاب ۳ - ۳) زور تابشی با تفضیل بیشتری تعریف شده است. زور تابشی مثبت و منفی به ترتیب منجر به گرم و سرد شدن جهانی گشت‌کره، سطح زمین، و لایه‌های بالای اقیانوس‌ها می‌شود. واکنش اقلیم جهانی به زور تابشی عوامل مختلف پیچیده است و چگونگی بازخوردهای مثبت و منفی آنها روی همدیگر به خوبی شناخته نیست. میانگین جهانی زورهای تابشی گازهای گل‌خانه‌ای متعارف در جدول ۲ - ۳ آورده شده است.

سال ۱۷۵۰، سال مبنا برای تغییر اقلیم اختیار شده است. زور تابشی عوامل مختلف نیز نسبت به این سال سنجیده می‌شود. به عنوان مثال اگر گفته شود زور تابشی کربن‌دی‌اکسید برابر ۱/۶۶ وات بر مترمربع است به این معناست که حضور کربن‌دی‌اکسید افزوده شده به جو از سال ۱۷۵۰ به این سو، برابر است با تاباندن ۱/۶۶ وات بر مترمربع انرژی گرمایی به بالای هواکره. زور تابشی کل ناشی از گازهای گل‌خانه‌ای دیرزی، در دوره زمانی بعد از ۱۷۵۰، 0.8 ± 1.6 وات بر مترمربع تخمین زده شده است. با مطالعه یخ‌های قطبی متعلق به دوره‌های یخبندان، معلوم شده است که سرعت افزایش زور تابشی ناشی از گازهای گل‌خانه‌ای در این مدت دست‌کم ۶ برابر بیشتر از هر زمان دیگری در دو میلیون سال گذشته است. زور تابشی گازهای گل‌خانه‌ای تنها در چهار دهه گذشته نزدیک به یک وات بر مترمربع زیاد شده است.

برگرفته از گزارش چهارم آی پی سی سی، ۲۰۰۷



قاب ۳ - ۳: زور تابشی عوامل گرم‌کننده و سردکننده اقلیم

مطلب را با مثال آغاز کنیم. کربن‌دی‌اکسید جو در تعیین دمای سطح زمین و گشت‌کره نقش دارد. اگر از جو برداشته شود، زمین خنک می‌شود. به فرض بتوان کربن‌دی‌اکسیدی را که از آغاز صنعتی شدن جهان تاکنون به جو افزوده شده است از آن خارج کرد، ولی برای جلوگیری از خنک شدن سطح زمین و گشت‌کره به قدر کافی بر سطح بالایی جو، انرژی تاباند. توان تابشی لازم در بالای هواکره که اثر گرم‌کنندگی‌اش معادل اثر کربن‌دی‌اکسید افزوده به جو از ۱۷۵۰ به این سو باشد، زور تابشی کربن‌دی‌اکسید نامیده می‌شود. این تعریف را می‌توان تعمیم داد و برای هر عاملی که اثر گرم‌کنندگی یا سردکنندگی بر زمین دارد به کار برد. زور تابشی با واحد وات بر مترمربع سنجیده می‌شود. در صفحات آینده از این پارامتر به فراوانی سخن خواهد رفت.

تغییر در گازهای گل‌خانه‌ای

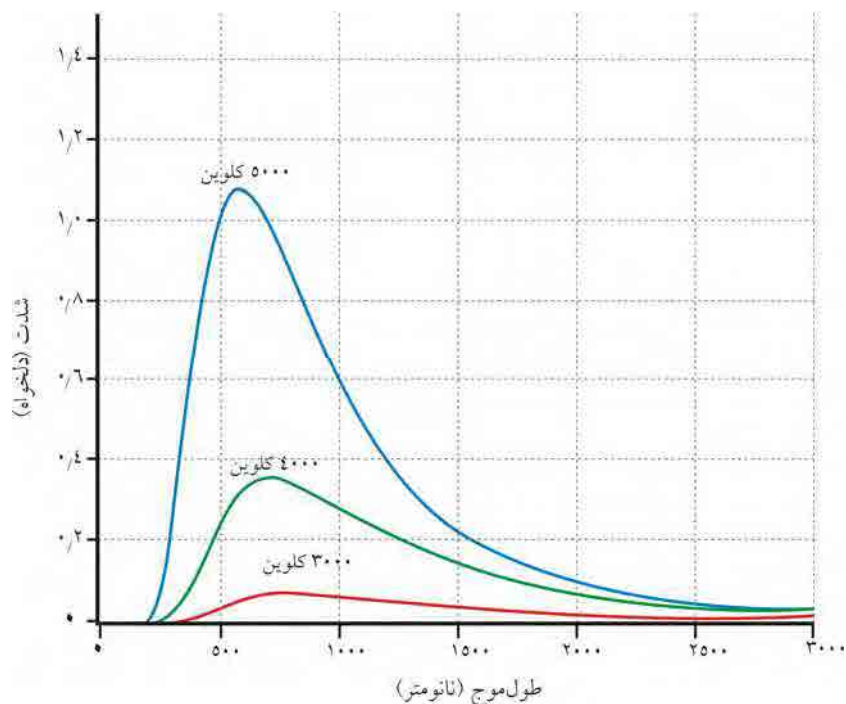
کربن‌دی‌اکسید (CO_2): نمودار فراوانی کربن‌دی‌اکسید جو از ۱۰ هزار سال پیش تا زمان حاضر در شکل ۴ - ۳ نشان داده شده است. مقدار آن از ۲۷۰ در میلیون در پیش از صنعتی شدن به ۳۷۹ در میلیون در ۲۰۰۵ رسیده است. در طول قریب به ۲۵۰ سال نزدیک به ۱۰۰ در میلیون افزایش یافته است. اندازه‌گیری‌های دقیق نشان می‌دهند که در حال حاضر فراوانی کربن‌دی‌اکسید در جو سالانه ۱/۵ در میلیون افزایش می‌یابد. این در حالی است که فراوانی این گاز در طول ۸۰۰۰ سال پیش از عصر صنعتی تنها ۲۰ در میلیون بالا رفته است. با ملاحظه رقم اخیر، قاعدتاً سهم عوامل طبیعی در افزایش کربن‌دی‌اکسید، در ۲۵۰ سال گذشته نباید بیش از یک در میلیون باشد. ۹۹ در میلیون باقی مانده را باید به انسان نسبت داد.

سوزاندن سوخت‌های فسیلی برای گرمایش، کاربردهای خانگی و صنعتی، تولید برق، و حمل‌ونقل منابع اصلی نشر کربن‌دی‌اکسیداند. حدود ۹۵٪ سوخت‌های فسیلی در نیم‌کره شمالی سوزانده می‌شوند، بنابراین میزان کربن‌دی‌اکسید نیز در این نیم‌کره بیشتر است. تغییر در کاربری زمین عامل دیگر افزایش کربن‌دی‌اکسید است. تخریب جنگل‌ها و تبدیل آنها به زمین‌های کشاورزی برای تهیه غذای جمعیت رو به رشد انسانی تأثیر چشم‌گیر در افزایش کربن‌دی‌اکسید در جو داشته است. صنعت سیمان نیز در افزایش کربن‌دی‌اکسید جو نقش مهم دارد. تولید سیمان، کربن محبوس در خاک‌های کربناتی را وارد جو می‌کند.

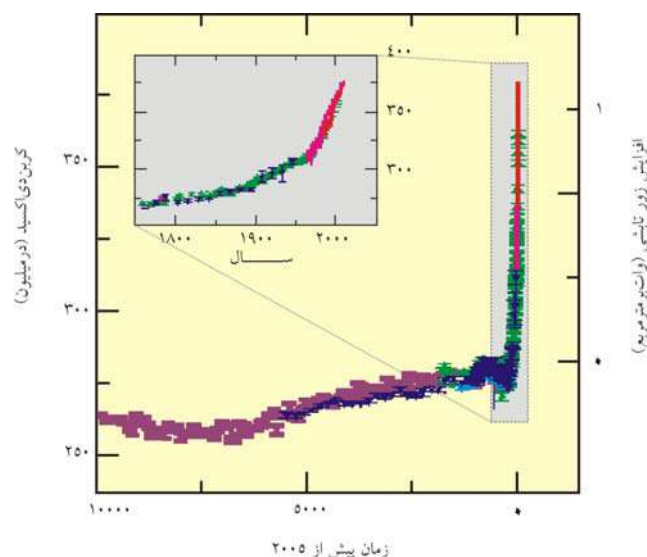
قالب ۴ - ۳: تابش جسم سیاه

بنا به تعریف، جسم سیاه جسمی است که همه تابش‌های الکترومغناطیسی را که به آن می‌تابد جذب کند و هیچ تابشی را بازنگرداند یا از خود عبور ندهد. به همین سبب این جسم وقتی که سرد است سیاه دیده می‌شود دهانهٔ تنگ یک کوزه تقریب خوبی برای یک جسم سیاه ایده‌آل است. احتمال این که تابشی که از راه دهانه وارد کوزه می‌شود، بیرون بیاید بسیار اندک است. به همین خاطر دهانه سیاه دیده می‌شود.

جسم سیاه در هر دمایی در تمام طول‌موج‌های الکترومغناطیسی تابش می‌کند. با افزایش دما، میزان تابش بیشتر می‌شود و بیشینهٔ آن به سمت طول‌موج‌های کوتاه‌تر حرکت می‌کند. مکانیک کوانتومی در آغاز قرن بیستم با بررسی دقیق طیف جسم سیاه شروع شد. در شکل زیر تابش جسم سیاه در چند دمای مختلف نشان داده شده است. دمای کلوین یا دمای مطلق از صفر مطلق (۲۷۳- درجه سانتی‌گراد) سنجیده می‌شود و برابر است با دمای سانتی‌گراد به علاوهٔ ۲۷۳ درجه.



http://en.wikipedia.org/wiki/Black_body



شکل ۴ - ۳ فراوانی کربن دی‌اکسید در جو در ۱۰ هزار سال گذشته و از ۱۷۵۰ به بعد. داده‌های گذشته‌های دور از مغزه‌های یخی و داده‌های چند دهه پایانی از نمونه‌های جوی بدست آمده‌اند. برگرفته از آی‌پی‌سی‌سی، گزارش چهارم، سال ۲۰۰۷.

آب حلال خوبی برای کربن دی‌اکسید است. اقیانوس‌ها مقادیر زیادی از کربن دی‌اکسید هوا را جذب می‌کنند، عمل جذب در چند صد متر لایه‌های بالای اقیانوس‌ها انجام می‌گیرد. برای نفوذ کربن دی‌اکسید به لایه‌های زیرین اقیانوس زمان زیادی لازم است. در کوتاه‌مدت نمی‌توان اقیانوس‌ها را انبار ذخیره کافی برای حبس کربن دی‌اکسید دانست و روی آن حساب کرد.

زور تابشی کربن دی‌اکسید افزوده به جو در ۲۵۰ سال گذشته، $1/66+$ وات بر مترمربع، و از زور تابشی همه عوامل دیگر بیش‌تر است. تنها در دهه ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۵ رشد کربن دی‌اکسید در جو منجر به افزایش ۲۰ درصدی در زور تابشی آن شده است.

از سال ۱۷۵۰ به بعد حدود دوسوم کربن دی‌اکسید افزوده به جو از سوختن سوخت‌های فسیلی و نزدیک به یک‌سوم آن از تغییر در کاربری زمین نشر شده است. نزدیک به ۴۵٪ از این کربن دی‌اکسید در جو باقی مانده، ۳۰٪ توسط اقیانوس‌ها و بقیه توسط زیست‌بوم‌ها جذب شده است. از کربن دی‌اکسید جو، ۵۰٪ در یک دوره ۳۰ ساله حذف شده است. ۳۰٪ آن در طول چند سده آینده حذف خواهد شد و ۲۰٪ باقی مانده

برای چند هزار سال در جو باقی خواهد ماند.

نشر جهانی کربن‌دی‌اکسید از سوخت‌های فسیلی، از میانگین ۶/۴ گیگاتن کربن در سال ۱۹۹۰ به ۷/۲ گیگاتن کربن در فاصله سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ افزایش یافته است. افزایش نشر کربن‌دی‌اکسید به سبب تغییر کاربری زمین در دهه ۱۹۸۰ حدود ۲/۷ - ۰/۵ گیگاتن کربن در سال برآورد شده است.

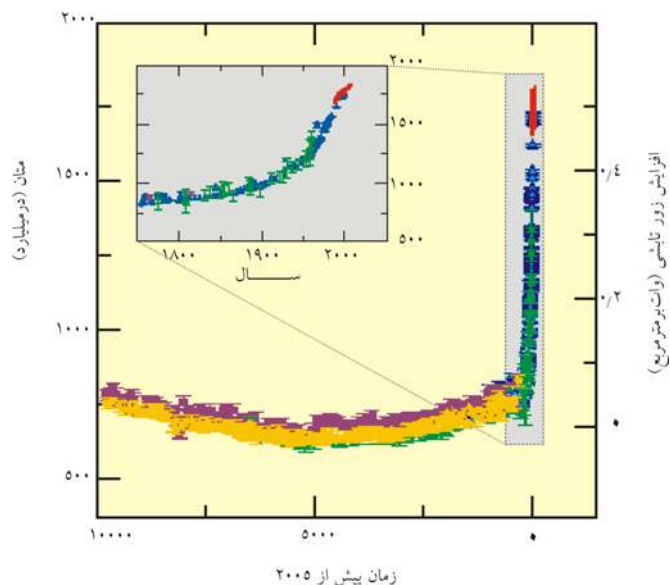
از دهه ۱۹۸۰ فرایندهای طبیعی جذب کربن‌دی‌اکسید توسط زیست‌بوم‌ها و اقیانوس‌ها نزدیک به ۵۰٪ درصد از نشر انسانی را حذف کرده است. فراوانی کربن‌دی‌اکسید حل شده در سطح اقیانوس‌ها تقریباً در همه جا رو به افزایش بوده است.

متان (CH_4): جزء اصلی گاز فسیلی طبیعی است. این گاز از تجزیه مواد آلی در مرداب‌ها هم به وجود می‌آید و به همین سبب به گاز مرداب نیز مشهور است. نمودار تغییرات آن در شکل ۵ - ۳ دیده می‌شود. برابر این شکل، فراوانی متان در جو در ۲۰۰۵ حدود ۱۷۷۴ درمیلیارد، بیش از دو برابر مقدار آن در عصر پیش صنعتی است. از ۱۰ هزار سال پیش تا ۱۷۵۰، از ۵۸۰ تا ۷۳۰ درمیلیارد به آرامی تغییر کرده است. اما در دو و نیم سده گذشته نزدیک به ۱۰۰۰ درمیلیارد افزایش یافته که سریع‌ترین تغییر در ۱۰ هزار سال اخیر است.

در اواخر دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰ آهنگ افزایش از سال به سال دیگر بیش از یک درصد در سال بوده است، اما از اوایل دهه ۱۹۹۰ این آهنگ به طور چشم‌گیری کند شده و در دوره ۶ ساله از ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۵ نزدیک به صفر شده است. کندی آهنگ افزایش متان در سال‌های اخیر به این معناست که میزان نشر متان تقریباً برابر با میزان حذف آن است. حذف متان از طریق اکسایش آن با رادیکال هیدروکسیل انجام می‌گیرد.

زور تابشی متان افزوده به جو در ۲۵۰ سال گذشته، ۰/۴۸ وات بر مترمربع برآورد شده است. در میان گازهای گل‌خانه‌ای، بعد از کربن‌دی‌اکسید، متان در مقام دوم قرار دارد. علی‌رغم فراوانی اندک متان در جو، اثر گل‌خانه‌ای هر ملکول آن تقریباً ۸ برابر اثر گل‌خانه‌ای یک ملکول کربن‌دی‌اکسید است.

منابع نشر و نشت متان به طور عمده زیست‌بوم‌ها هستند: زمین‌های مرطوب، شالیزارها، نشخوار چارپایان و پوسیدن بقایای گیاهان و جانداران. نشت متان از گاز طبیعی فسیلی به هنگام انتقال و مصرف آن نیز قابل توجه است. در حال حاضر میزان نشر متان ناشی از فعالیت‌های انسانی بیش از نشر طبیعی آن است.



شکل ۵ - ۳ فراوانی متان در جو در ۱۰ هزار سال گذشته و از ۱۷۵۰م به بعد. داده‌های گذشته‌های دور از مغزه‌های یخی و داده‌های چند دهه اخیر از نمونه‌های جوی بدست آمده‌اند. آی‌پی‌سی‌سی، گزارش چهارم، سال ۲۰۰۷.

مصرف سوخت‌های فسیلی، به جز نشت گاز از مجتمع‌های تولید و خطوط انتقال گاز طبیعی، نقش چندانی در نشر متان ندارند.

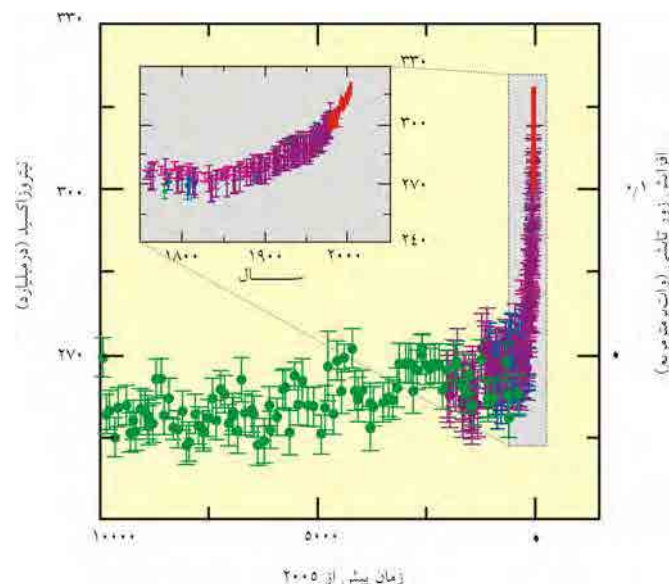
نیتروژاکسید (N_2O): با نام گاز خنده نیز شناخته شده است. این گاز در دمای اتاق بی‌رنگ و غیرقابل اشتعال است. بویی مطبوع و نسبتاً شیرین دارد. نیتروژاکسید در دماهای بالا یک اکساینده قوی است. با ازن واکنش می‌دهد و تنظیم‌کننده اصلی ازن در پوش کره است. گاز نیتروژاکسید به عنوان بی‌هوش‌کننده و ضددرد در جراحی و دندانپزشکی کاربرد دارد. همچنین در صنایع فضایی جهت افزایش قدرت موشک استفاده می‌شود.

نیتروژاکسید جزء آلاینده‌های هوا محسوب می‌شود و منبع طبیعی و انسانی دارد. منبع طبیعی آن فرایندهای میکروبی در زیست‌بوم‌ها، جنگل‌های استوایی مرطوب، خاک و آب است. منبع انسانی آن خاک‌های کشاورزی، کودهای حیوانی، تولید نایلون و سوزاندن سوخت‌های فسیلی است.

برابر شکل ۶ - ۳، تغییر در فراوانی نیتروژاکسید از ۱۰ هزار سال پیش تا آغاز عصر صنعتی بسیار اندک است. در سال ۱۸۰۰ فراوانی آن به حدود ۲۷۰ درمیلیارد و در سال ۲۰۰۵ به ۳۱۹ درمیلیارد می‌رسد. این فراوانی در دهه‌های اخیر تقریباً به طور خطی و با آهنگ ۰/۸ درمیلیارد در سال در حال افزایش است.

زور تابشی نیتروژاکسید افزوده به جو، از آغاز عصر صنعتی به این سو، به ۰/۱۶ وات-برمترمربع رسیده است. فعالیت‌های انسانی، به خصوص توسعه کشاورزی، مصرف کودهای نیتروژن‌دار و تغییر در کاربری زمین، علت اصلی افزایش آن است و نزدیک به ۴۰٪ از کل نشر نیتروژاکسید را تشکیل می‌دهد.

ازن در گشت‌کره، لایه‌هایی پایین جو، از واکنش شیمیایی گازهای پیش‌ران و از جرقه‌های الکتریکی و جوش کاری صنعتی حاصل می‌شود. کوتاه‌عمر و گرم‌کننده اقلیم است. فراوانی آن در سال‌های گذشته، به خاطر محدودیت‌های پروتکل مونترال، که مصرف گازهای فلوئوروکربن را منع می‌کند، دستخوش افت و خیز بوده است.



شکل ۶ - ۳ فراوانی نیتروژاکسید در جو در ۱۰ هزار سال گذشته و از ۱۷۵۰ به بعد. داده‌های گذشته‌های دور از مغزه‌های یخی و داده‌های چند دهه اخیر از نمونه‌های جوی بدست آمده‌اند. آی‌پی‌سی‌سی، گزارش چهارم، سال ۲۰۰۷.

فراوانی ازن در گشت‌کره به کیفیت آب‌وهوا بستگی دارد. در روزهای تابستان شدیداً با افزایش دما بالا می‌رود. در شمال شرق آمریکا، به خاطر هوای گرم و ساکن تابستان ۱۹۸۸، فراوانی ازن به بیشترین مقدار در همان سال رسید. در اروپا نیز در تابستان ۲۰۰۳ گرمای تابستان افزایش ازن را در پی داشت.

ازن در لایه‌های پایین جو یک آلاینده ناخوشایند است. خوردگی آن انسان و حیوان را متأثر می‌کند و موجب تخریب فرآورده‌های کشاورزی و بافت گیاهی جنگل‌ها می‌شود. در کشورهای مثل استرالیا، کانادا، ژاپن، هند، مکزیک، آمریکا، و کشورهای اروپایی اثرات مخرب و بزرگ مقیاس ازن در حال گسترش است.

زور تابشی ازن در گشت‌کره ۰/۳۵ وات بر مترمربع تخمین زده شده است و به گرم شدن اقلیم کمک می‌کند.

ازن در پوش کره، لایه بالاتر از گشت‌کره، با کمک تابش فرابنفش خورشید به وجود می‌آید و خنک‌کننده اقلیم است. ازن در پوش کره با جذب تابش فرابنفش خورشید، زیست‌بوم‌ها را از آسیب در امان نگاه می‌دارد. در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ گازهای صنعتی فلوئوروکربن لایه ازن را در نواحی قطبی جو از بین می‌بردند و موجب نگرانی بودند. در حال حاضر پروتکل مونترال مصرف این گازها را محدود کرده و آثاری از ترمیم لایه ازن در فراز قطب جنوب گزارش شده است. با وجود این، میانگین جهانی ازن در پوش کره در سال‌های اخیر ۴٪ کمتر از میزان آن در سال‌های پیش از ۱۹۸۰ است.

زور تابشی ازن پوش کره ۰/۰۵- وات بر مترمربع تخمین زده شده است.

کلروفلوئوروکربن‌ها (CFC) و هیدروکلروفلوئوروکربن‌ها (HCFC): گازهای گل‌خانه‌ای با منشأ صنعتی هستند. در طبیعت تولید نمی‌شوند. این گازها در دماهای کمتر از دمای اتاق بخار می‌شوند و غیرسمی و غیرقابل اشتعال‌اند. در گذشته در صنایع یخچال‌سازی، عایق‌کاری و ساخت افشانه‌ها فراوان به کار می‌رفتند. پیمان مونترال، ۱۹۸۸، تولید و مصرف انواع CFCها و HCFCها را منع کرده است. به نظر می‌رسد بسیاری از امض ۱۱ اکندگان پیمان به امضای خود پای‌بند مانده‌اند و فراوانی جوی CFCها و HCFCها، به دلیل حذف طبیعی، رو به کاهش گذاشته است.

زور تابشی گازهای موضوع پیمان مونترال مولکول به مولکول هزارها برابر بیشتر از

زور تابشی کربن‌دی‌اکسید است. بنابراین مقدار کم آنها هم برای لایه ازن پوش‌کره زیان‌رسان است. زور تابشی گازهای پیمان مونترال ۰/۳۲ وات بر مترمربع ارزیابی شده است.

بخار آب: مهم‌ترین منبع آن تبخیر از دریاها و اقیانوس‌ها است. افزایش آن در گشت‌کره بازخورد مثبت بر گرم شدن زمین دارد. زور تابشی مستقل به بخار آب نسبت نمی‌دهند و نقش آن را در تغییر اقلیم در زور تابشی افزوده عوامل گل‌خانه‌ای دیگر به حساب می‌آورند. نقش انسان صنعتی در نشر بخار آب ناچیز و کم‌تر از ۱٪ تبخیر از اقیانوس‌هاست. بخش عمده این مقدار کم نیز سهم کشاورزی است. بخار آب حاصل از سوزاندن سوخت‌های فسیلی نیز بسیار ناچیز است.

دسته‌بندی آلاینده‌های جو از دیدگاه‌های گوناگون

سوزاندن انواع سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های برق، خودروها و کارخانه‌ها مهم‌ترین منبع آلاینده‌های جو است. خود طبیعت نیز آلاینده‌های جو را می‌آورد. گردوغبار ناشی از طوفان‌های صحرایی، گاز متانی که نشخوارکنندگان به هنگام هضم غذا آزاد می‌کنند، نشر گاز رادن از زمین، آزاد شدن ترکیب‌های آلی فرار از درختان به ویژه درختان کاج، دود و کربن‌مونوکسید حاصل از آتش‌سوزی‌های طبیعی و خاکستر آتشفشان‌ها، همه آلاینده هستند. اکثر آلاینده‌ها گازی هستند، اما ذرات ریز جامد یا مایع معلق در هوا، مانند ذرات غبار، هاگ گیاهان، ذرات ریز آب و یخ در ابرها، خاکسترهای آتشفشانی، و باکتری‌ها نیز هوا را آلوده می‌کنند. بسیاری از فعالیت‌های بشر مانند معدن‌کاری، سوزاندن سوخت‌های فسیلی، حمل‌ونقل، کشاورزی، استفاده از سوخت‌های جامد برای پخت‌وپز و تولید گرما، نیز ذرات معلق تولید می‌کنند. ذرات معلق، با توجه به بزرگی و کوچکی اندازه‌ای که دارند ممکن است زود ته‌نشین شوند یا روزها و ماه‌ها در جو باقی بمانند.

ترکیبات فلئوئورداد در هوا در مقایسه با سایر مواد، آلاینده‌های کمتری دارند، اما از سمی‌ترین آلاینده‌ها به شمار می‌روند. معمولاً به صورت آزاد در طبیعت یافت نمی‌شوند. وقتی با رطوبت هوا ترکیب شوند هواویزهای فلئوئورداد را تشکیل می‌دهند.

در بین آلاینده‌ها، ترکیبات گوگردی و نیتروژنی، باران اسیدی به وجود می‌آورند. باران اسیدی شدیداً موجب تخریب جنگل‌ها و ساختمان‌ها می‌شود و اثرات نامطلوب زیادی روی زیست‌بوم‌های آبی دارد.

قاب ۵ - ۳: اثر گل‌خانه‌ای در جو بهرام و ناهید

بهرام یا مریخ کوچک‌تر از زمین است و جو بسیار نازکی دارد. فشار جو مریخ کمتر از ۱٪ فشار جو زمین است. جو مریخ عمدتاً از کربن‌دی‌اکسید تشکیل شده است و اثر گل‌خانه‌ای بسیار قوی دارد. ناهید یا زهره به خورشید نزدیک‌تر است و جوی بسیار متفاوت از مریخ دارد. ناهید تقریباً هم-اندازه زمین است. فشار جو آن نزدیک به ۱۰۰ برابر فشار جو زمین است. جو ناهید به طور عمده از کربن‌دی‌اکسید تشکیل شده است. ابرهای ضخیم حاوی قطرات سولفوریک‌اسید تقریباً خالص سیاره را پوشانده است و جلوی بخش زیادی از تابش‌های خورشیدی را می‌گیرد.

اثر گل‌خانه‌ای مهارنشدنی

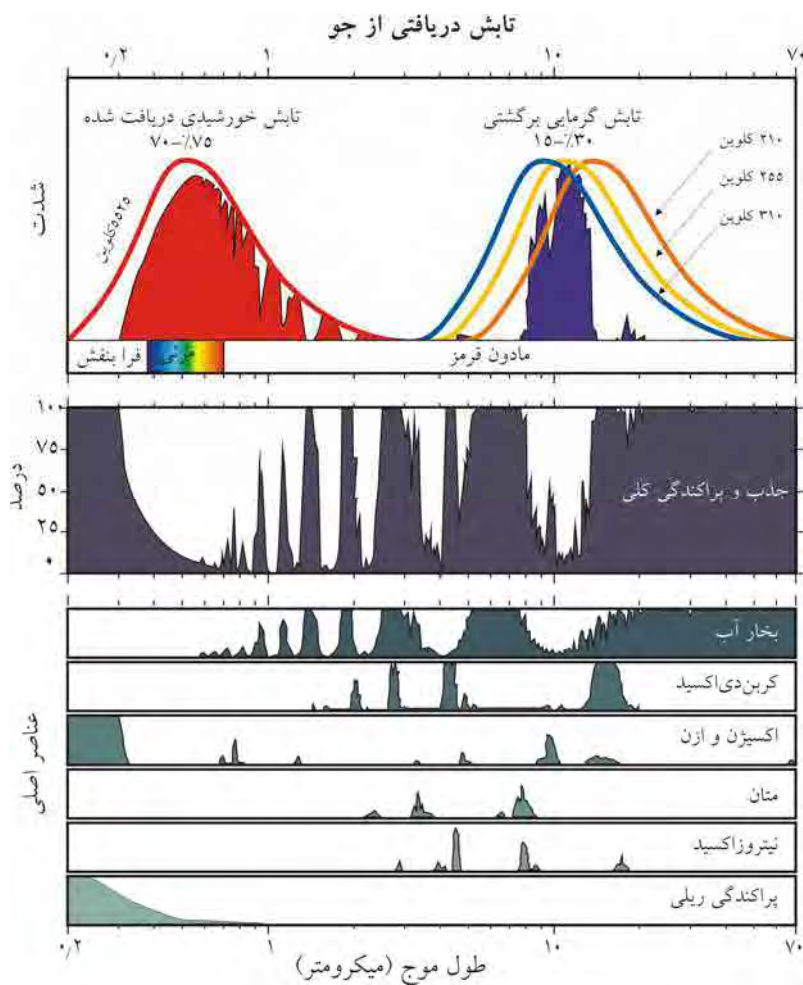
اثر گل‌خانه‌ای در جو سیارات مریخ و ناهید اتفاق می‌افتد. بر اساس مطالعات کاوشگرهای روسی، نور رسیده به سطح ناهید چیزی در حدود نور غروب زمین و بسیار کم است. با وجود این، دمای سطح ناهید حدود ۵۲۵ درجه سانتی‌گراد است. علت این دمای بسیار بالا اثر گل‌خانه‌ای است. جو بسیار ضخیم کربن‌دی‌اکسیددار ناهید بخش بزرگ تابش‌های سطح ناهید را در خود نگاه می‌دارد و سبب گرمی سیاره می‌شود.

رویدادی که در جو ناهید دیده می‌شود مثالی از اثر گل‌خانه‌ای مهارنشدنی است. تاریخ جو ناهید نشان می‌دهد که در ابتدا مقدار زیادی بخارآب در جو ناهید موجود بوده است. اثر گل‌خانه‌ای بخارآب باعث افزایش دمای سطح ناهید و بخار شدن بیشتر آب شده است. این چرخه ادامه یافته و همه آب موجود در ناهید به صورت بخار درآمده است.

زمین سیاره‌ای تقریباً هم‌اندازه ناهید است و ترکیب شیمیایی مشابهی دارد. اثر گل‌خانه‌ای در آن مهار شده است. علت این است که ناهید به خورشید نزدیک‌تر است و انرژی دریافتی آن از خورشید دو برابر زمین است. سطح ناهید وقتی که جو نداشت دمایی در حدود ۵۰ درجه سانتی-گراد داشت. با بالا رفتن دما، آب سطح ناهید جوشید، اما جو آن هیچ‌گاه از بخارآب اشباع نشد. در مقابل زمین که از دمای سردتری شروع کرده بود، در هر مرحله از حیات سیاره، میان آب موجود در سطح زمین و جو تعادل برقرار شد و اثر گل‌خانه‌ای مهار شد.

قاب ۶-۳: مشخصات طیف نوری و جذبی خورشید و جو زمین

نمودار بالا سمت چپ: (۱) طیف تابشی خورشید (منحنی قرمز) برابر با منحنی تابش جسم سیاه با دمای موثر ۵۸۰۰ درجه مطلق است. بیشترین تابش در طول موج‌های مرئی و فروسرخ است. (۲) میزان انرژی دریافت شده از خورشید در سطح زمین (منحنی سیاه با سایه قرمز). خطوط جذبی جو زمین در این منحنی دیده می‌شود. انرژی دریافتی در سطح زمین تنها ۷۰ تا ۷۵ درصد از انرژی تابیده به بالای جو است.



http://en.wikipedia.org/wiki/File:Atmospheric_Transmission.png

نمودار بالا سمت راست: منحنی‌های تابش چند جسم سیاه با دماهای مطلق ۲۱۰، ۲۵۵ و ۳۱۰ درجه مطلق به ترتیب به رنگ‌های نارنجی، زرد، و آبی. خورشید منبع انرژی‌ای است که به زمین می‌رسد. دمای متوسط زمین با توجه به بازتاب از سطح زمین و بدون در نظر گرفتن تغییرات سپیدایی، ۱۸- درجه سانتی‌گراد برابر با ۲۵۵ درجه مطلق است. ولی دمای متوسط زمین در نهایت، به دلیل اثر گل‌خانه‌ای جو تقریباً برابر با ۱۴+ درجه سانتی‌گراد است. از تابش فروسرخ و گرمایی زمین نزدیک به ۱۵ تا ۳۰ درصد از جو عبور کرده و خارج می‌شود. خطوط جذبی گازهای گل‌خانه‌ای روی منحنی سیاهی که سایه آبی دارد آشکار است.

نمودار وسط: طیف جذبی و پراکندگی جو زمین. بخش‌های خاکستری منحنی طول‌موج‌هایی‌اند که جو نسبت به آن‌ها کدر است.

نمودار پایین: طیف جذبی گازهای گل‌خانه‌ای مهم. این گازها طول‌موج‌های ۰/۳ تا ۰/۷ میکرومتر را جذب می‌کنند.

مرجع‌ها:

- IPCC. *Climate Change 2007, The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, 2007
- Houghton, J. *Global Warming, The Complete Briefing*, Fourth Edition, Cambridge University Press, 2009
- Mathez, E. A. *Climate Change: The Science of Global Warming and Our Energy Future*, Columbia University Press, 2009
- <http://cph-theory.persianguig.com/983-ozonshamshire2labe.htm>
- <http://daneshnameh.roshd.ir>

بخش ۴

چرخه‌های کربن و نیتروژن

کربن و اثر آن بر مولفه‌های اقلیم

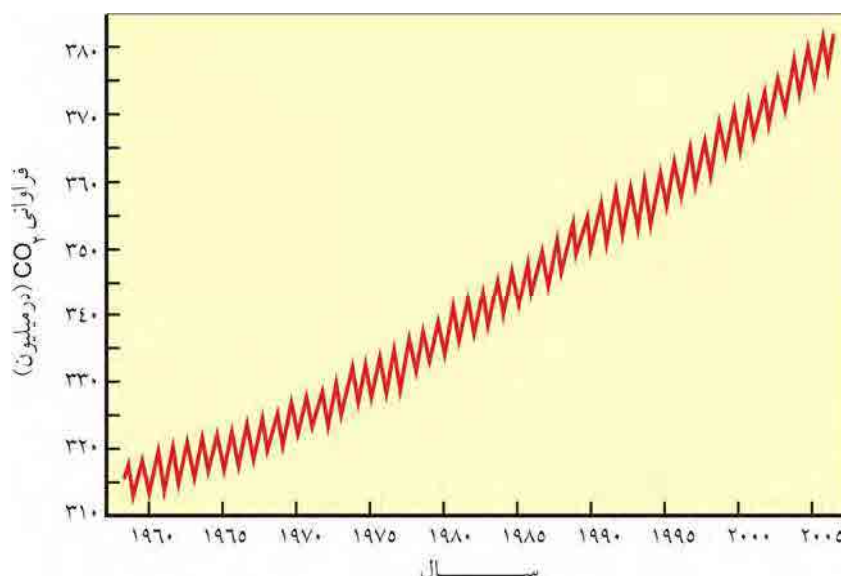
افزایش کربن‌دی‌اکسید در جو علت اصلی گرم شدن زمین است. بنابراین مهم است عواملی که به طور طبیعی و غیرطبیعی در کم و زیاد شدن آن نقش دارند شناخته شوند. کربن‌دی‌اکسید جو از سال ۱۹۵۸ اندازه‌گیری می‌شود. چارلز کیلینگ^۱، اقیانوس‌شناس انستیتو اسکرپس^۲، مبتکر اندازه‌گیری هاست. کیلینگ به هنگام تحقیق روی آتشفشان مانالوآ^۳ در هاوایی دو نتیجه بدست آورد:

- میزان کربن‌دی‌اکسید جو هر ساله در نیمه پاییز به کمترین و در نیمه بهار به بیشترین مقدار خود می‌رسد. دلیل این تغییرات، رشد سریع بهاری و تابستانی گیاهان در نیم کره شمالی است که کربن‌دی‌اکسید جو را تا پاییز کاهش می‌دهند. با شروع زمستان گیاهان از بین می‌روند و کربن گیاهی دوباره به صورت کربن‌دی‌اکسید به جو باز می‌گردد و

1. Charles Keeling

2. Scripps

3. Mauna Loa



شکل ۱ - ۴ منحنی کیلینگ، نمودار تغییرات کربن دی‌اکسید جو، برحسب زمان. دندانه‌ها تغییرات فصلی را نشان می‌دهند. برگرفته از Mathez

در نیمه بهار به بیشترین مقدار می‌رسد. این فرایند را شاید بتوان دم و بازدم زمین در مقیاس جهانی نامید.

- منحنی کیلینگ (شکل ۱ - ۴) مقدار میانگین کربن دی‌اکسید جو را در سال ۱۹۵۸، ۳۱۵ در میلیون و در سال ۲۰۰۶، ۳۸۰ در میلیون نشان می‌دهد. آهنگ افزایش در این سال‌ها ۲ در میلیون در سال است. این آهنگ بسیار سریع‌تر از آهنگ هر پدیده طبیعی است که کربن دی‌اکسید نشر می‌کند و در گزارش‌های اقلیم‌های گذشته سابقه ندارد. نظر پژوهشگران بر این است که مصرف پرشتاب سوخت‌های فسیلی، صنعت سیمان، جنگل‌زدایی و اختصاص بیش از حد زمین به کشاورزی، عامل اصلی افزایش کربن دی‌اکسید در جو است. مطالعات نشان می‌دهند از سال ۱۹۸۰ به این سو، نزدیک به نیمی از کربن حاصل از سوخت‌های فسیلی و حدود یک‌سوم کربن نشر شده از دیگر فعالیت‌های انسانی در جو مانده و بقیه آن در اقیانوس‌ها و زیست‌کره جذب شده است.

ذخایر کربن

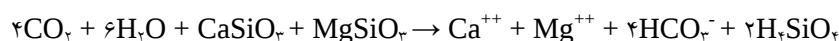
بیش از ۹۹/۹ درصد از کربن کره زمین در سطح و یا در اعماق کم زمین در سنگ‌های آهکی، شیل‌های کربن‌دار (خاک رس سخت) و معادن نفت، گاز و زغال‌سنگ ذخیره شده است. ذخیره مخازن سنگی ۵۰ میلیون گیگاتن برآورد می‌شود. مخازن سطحی، یعنی جو، خاک، اقیانوس و موجودات زنده، ۴۲ هزار گیگاتن کربن در بر دارند. اقیانوس بزرگ‌ترین مخزن سطحی است و ۳۹ هزار گیگاتن کربن را در خود جای می‌دهد.

چرخه کربن

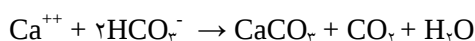
منظور از چرخه، جذب کربن‌دی‌اکسید از هواکره توسط آب‌کره، سنگ‌کره، و زیست‌کره و نشر دوباره آن به هواکره است. موضوع را می‌توان در مقیاس زمانی بلند، از مرتبه صد هزار تا میلیون سال، و در مقیاس زمانی کوتاه، از مرتبه عمر انسان بررسی کرد.

چرخه بلندمدت: دو سازوکار عمده این چرخه عبارتند از:

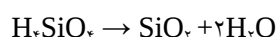
(الف) جذب کربن‌دی‌اکسید از جو طی فرسایش و هوازدگی خاک و سنگ:



کربن‌دی‌اکسید با سیلیکات‌های موجود در سنگ‌ها واکنش می‌دهد و کلسیم، منیزیم، سیلیکا، و بی‌کربنات می‌دهد که همگی در آب محلول‌اند. یون‌های به وجود آمده همراه رودخانه‌ها وارد اقیانوس می‌شوند. موجودات صدف‌دار از یون‌های کلسیم و بی‌کربنات تغذیه می‌کنند و صدف می‌سازند:



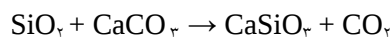
سیلیکای محلول در اقیانوس نیز در صدف گیاهان میکروسکوپی ته‌نشین می‌شود:



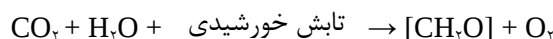
پس از مرگ موجود زنده، صدف‌های کربنات‌دار به صورت لایه‌هایی در کف اقیانوس

جمع شده و به مرور به سنگ‌های آهکی تبدیل می‌شوند. این فرایند میلیون‌ها سال طول می‌کشد.

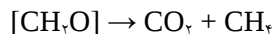
در فاز نشر، در اعماق زمین در شرایط خاصی از دما و فشار ممکن است کانی‌های کربناتی تجزیه شوند و کربن‌دی‌اکسید از پوسته زمین به آرامی خارج شده و دوباره وارد جو شود. تجزیه کانی‌های کربناتی ممکن است از طریق واکنش شیمیایی زیر و در اثر فعالیت‌های آتشفشانی انجام گیرد.



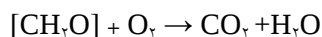
(ب) در فرایند فتوسنتز، گیاهان کربن‌دی‌اکسید را از هوا جذب می‌کنند و به سلولز و مواد آلی دیگر تبدیل می‌کنند:



پس از مرگ گیاهان و دفن بقایای روی هم، زغال‌سنگ و نفت و گاز تولید می‌شود. گاهی نیز گیاهان مرده و دفن شده در دلتای رودخانه‌ها به ترکیبات کربناتی تبدیل می‌شوند. نشر دوباره کربن از این منابع ممکن است به طور طبیعی یا بدست انسان انجام گیرد. فرایندهای اکسایش در سنگ‌های رسوبی غنی از کربن نیز، باعث نشر کربن‌دی‌اکسید در جو می‌شود.



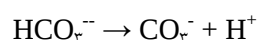
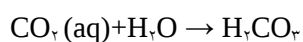
چرخه کوتاه‌مدت: در این چرخه کربن بین اقیانوس، جو، خاک و زیست‌کره می‌گردد، ولی سنگ‌کره در این چرخه نقش ندارد. زمان این چرخه ممکن است چند ماه یا چند ده و چند صد سال باشد. چرخه کوتاه‌مدت چون سریع انجام می‌گیرد، تغییرات ناشی از آن را می‌توان در عرض چند ده تا هزار سال بر روی اقلیم مشاهده کرد. سازوکار جذب، عمدتاً فتوسنتز از طریق گیاهان هوازی و آبزی است. سازوکار نشر، دم و بازدم موجودات زنده، خوردن و خورده شدن، و پوسیدن مواد آلی است که کربن را دوباره به جو یا اقیانوس باز می‌گرداند.



در مقیاس‌های زمانی چند ده تا هزار سال، اقیانوس تنظیم‌کننده اصلی کربن‌دی‌اکسید در جو است. اقیانوس در حدود نیمی از کل کربن‌دی‌اکسید تولید شده از سوخت‌های فسیلی و صنعت سیمان را در سال‌های ۱۸۰۰ تا ۱۹۹۴ و حدود یک‌سوم آن را در سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ در خود حل کرده است. مدل‌های اقلیم حکایت از آن دارند که در سال‌های اخیر ۹۰٪ کربن‌دی‌اکسید حاصل از فعالیت‌های انسان در نهایت وارد اقیانوس شده است.

اسیدی شدن اقیانوس و اثرات آن بر اقلیم و اکوسیستم دریایی

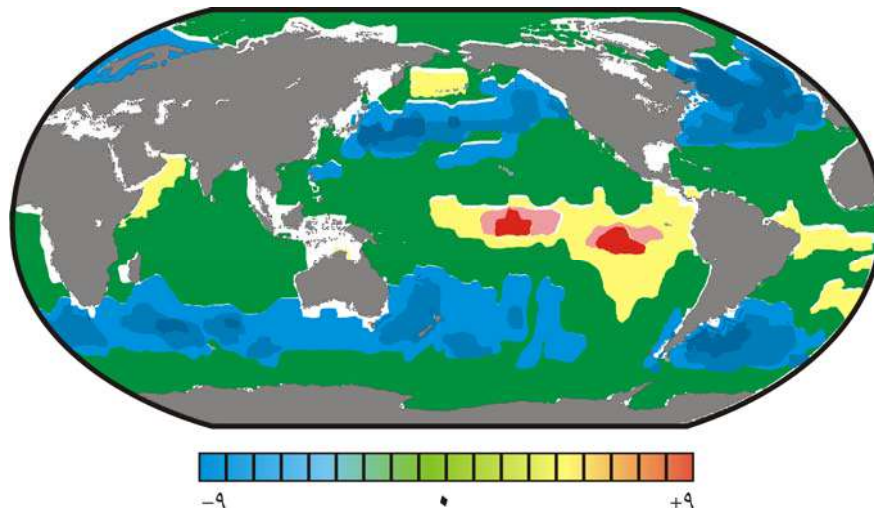
بین جو و اقیانوس، کم‌وبیش تعادل شیمیایی برقرار است، بنابراین وقتی مقدار کربن‌دی‌اکسید در جو کم و زیاد می‌شود مقدار آن در اقیانوس‌ها نیز بالا و پایین می‌رود. جذب کربن‌دی‌اکسید در اقیانوس pH آب را پایین می‌آورد و اقیانوس را اسیدی می‌کند. صدف‌سازی در گیاهان و حیوانات دریایی، به خصوص در کلنی‌های مرجانی، مختل می‌شود. نمونه واکنش شیمیایی ممکن است به شرح زیر باشد:



در دوره‌های پیش از صنعتی شدن pH اقیانوس ۸/۲ بوده است. در آغاز قرن بیست‌ویکم این مقدار به ۸/۰۵ تقلیل پیدا کرده است. پژوهشگران بر این باورند اگر کربن‌دی‌اکسید جو دو برابر شود pH اقیانوس‌ها تا ۷/۹ پایین خواهد آمد. اگرچه این تغییر در pH کوچک به نظر می‌رسد، اما تأثیر عمیقی بر بیوژئوشیمی اقیانوسی و موجودات زنده آن خواهد داشت. با افزایش اسیدیته، پایداری کربنات‌ها، کلسیت، آراگونیت و ...، کاهش می‌یابد و صدف‌سازی در زیست‌بوم‌های دریایی کمتر انجام می‌گیرد. گفته می‌شود اگر نشر کربن‌دی‌اکسید به جو و راه‌یابی آن به اقیانوس به روال کنونی ادامه یابد، باید منتظر بود تا نیمه‌های سده بیست‌ویکم موجود زنده صدف‌داری در اقیانوس‌ها نماند.

چرخه نیتروژن

پیش‌تر گفته شد که نیتروژن‌اکسید یک گاز گل‌خانه‌ای است و بعد از کربن‌دی‌اکسید و متان



شکل ۲ - ۴ تبادل سالانه کربن دی‌اکسید بین اقیانوس و جو. رنگ‌های آبی و سبز نشان‌دهنده جذب کربن دی‌اکسید و رنگ‌های زرد و قرمز نشان‌دهنده آزادسازی آن توسط اقیانوس‌ها است. آزادسازی عمدتاً در منطقه‌های استوایی اقیانوس‌های آرام، اطلس و هند صورت می‌پذیرد. برای رنگ‌های خاکستری و سفید اطلاعات داده نشده است. برگرفته از تاکاشی و همکاران.

در مرتبه سوم اهمیت قرار می‌گیرد. این گاز به هنگام مبادله نیتروژن بین هوا و آب و خاک و زیست‌بوم‌ها به وجود می‌آید و از بین می‌رود. در زیر به بعضی از سازوکارهای این مبادله پرداخته می‌شود.

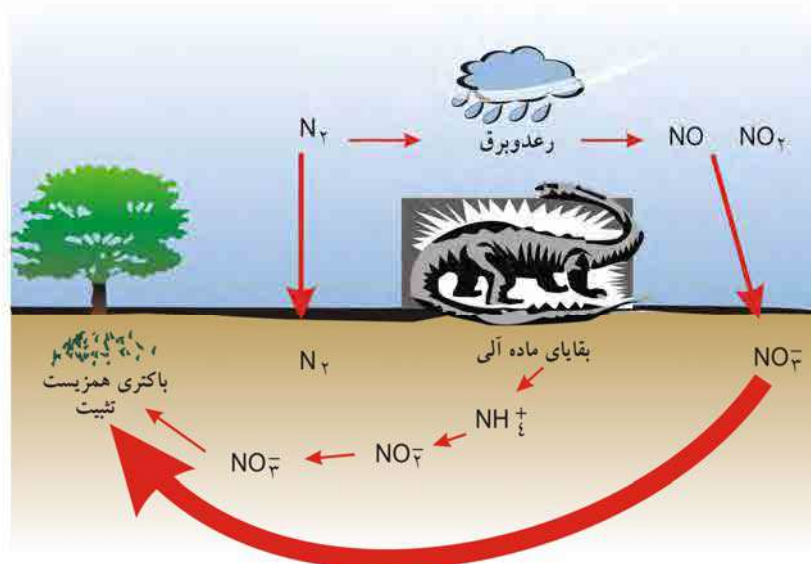
نیتروژن در بدن موجودات زنده در پروتئین‌ها، آنزیم‌ها و اسیدهای نوکلئیک وجود دارد. قند، بعضی ویتامین‌ها، کلسترول و لیپیدها نیتروژن ندارند.

بخشی از نیتروژن موجود در جو با برف و باران به خاک آمده و باکتری‌های هم‌زیست ریزوبیوم آن را به آمونیم تبدیل می‌کنند. این فرآیند را تثبیت نیتروژن می‌گویند. بخشی دیگر، به هنگام رعدوبرق به دو گاز نیتروژن‌اکسید و نیتروژن‌دی‌اکسید تبدیل شده، با باران وارد خاک می‌شود و به ترکیبات نیتروژن‌دار غیرآلی و نترات‌ها تبدیل می‌شود. نترات‌ها، در آب موجود در خاک حل و سپس جذب گیاهان می‌شوند. گیاهان این نترات‌ها را به اسیدهای آمینه و اسیدهای آمینه را به پروتئین تبدیل می‌کنند. بنابراین نیتروژن در خاک به صورت نترات‌های اسیدی با pH کم و آمونیم بازی با pH زیاد حضور دارند. هر دو

ترکیب قابل جذب برای گیاهان هستند. گیاه نیتروژن یونی، مولکولی یا اسیدی را نمی‌تواند به طور مستقیم جذب کند.

هنگامی که جاننداری گیاه را می‌خورد، نیتروژنی را که در آن به صورت پروتئین یا اسید نوکلئیک وجود دارد به بدن خود منتقل و بخشی از آن را به اندام خود تبدیل می‌کند. اندام گیاهان و جانوران پس از مرگ تجزیه می‌شود. باکتری‌ها و قارچ‌ها پروتئین‌های بدن جانداران را به آمونیاک تبدیل می‌کنند. ادرار جانوران نیز پس از مدتی به آمونیاک تجزیه می‌شود. انواع دیگری از باکتری‌های خاک سرانجام آمونیاک را به نیترات تبدیل می‌کنند و به خاک باز می‌گردانند. باکتری‌هایی که خاک را برای رشد گیاهان مناسب می‌کنند باکتری‌های شوره‌گذار نامیده می‌شوند. بعضی باکتری‌ها هم هستند که نیترات خاک را به آمونیاک و حتی به نیتروژن تبدیل می‌کنند. این باکتری‌ها را که سبب کاهش نیترات خاک می‌شوند باکتری‌های شوره‌زا می‌نامند.

در شکل ۳ - ۴ چرخه نیتروژن و جزئیات مبادله آن بین جاندار و محیط‌زیست نشان داده شده است.



شکل ۳ - ۴ چرخه نیتروژن www.cri.ac.ir

مرجع‌ها:

- IPCC. *Climate Change 2007, The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, 2007
- Houghton, J. *Global Warming, The Complete Briefing*, Fourth Edition, Cambridge University Press, 2009
- Mathez, E. A. *Climate Change: The Science of Global Warming and Our Energy Future*, Columbia University Press, 2009
- Geological Survey of Iran (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی): www.gsi.ir
- Climatological Research Institute (پژوهشکده اقلیم‌شناسی): www.cri.ac.ir
- Takahashi, T., R. A. Feely, R. F. Weiss, R. H. Wanninkhof, D. W. Chipman, S. C. Sutherland, and T. T. Takahashi. "Global Air - Sea Flux of CO₂: An Estimate Based on Measurements of Sea - Air pCO₂ Difference." *Proceeding of the National Academy of Science* 94 (1997): 8292-8299

بخش ۵

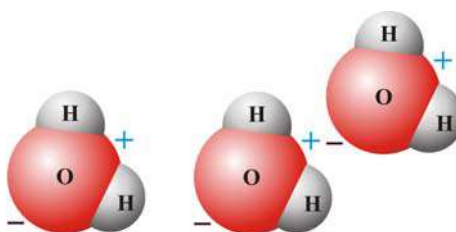
آب کره

آب کره اقیانوس‌ها، دریاها، چشمه‌ها، روان‌آب‌ها، آب‌های زیرزمینی، یخچال‌های کوهستانی و یخ‌های قطبی را شامل می‌شود. آب کره از مؤلفه‌های اصلی اقلیم است و برای بررسی تغییر اقلیم لازم است رفتار و خواص بخش‌های مختلف آن شناخته شود. حیات در روی زمین بر آب مبتنی است. آب بیش از ۷۵٪ اندام‌های موجودات زنده را تشکیل می‌دهد و بیش از ۷۰٪ از مساحت سطح کره زمین را می‌پوشاند. بعضی از مشخصات شیمیایی و ترمودینامیکی آب در قاب ۱ - ۵ آمده است.

آب موجود در کره زمین به ۱۲۸۶ میلیون کیلومتر مکعب بالغ می‌شود. ۹۷٪ آن آب شور اقیانوس‌ها و ۳٪ باقیمانده، آب شیرین است. بخش بزرگ این آب شیرین به صورت برف و یخ در قطب‌های شمال و جنوب، و یخچال‌های کوهستانی انباشته شده است. بخش کوچک آن به صورت آب‌های زیرزمینی و روان‌آب‌ها است. مقدار هریک از این مؤلفه‌ها در شکل ۱ - ۵ نموده شده است.

قاب ۱ - ۵: مشخصه‌های شیمیایی و فیزیکی آب

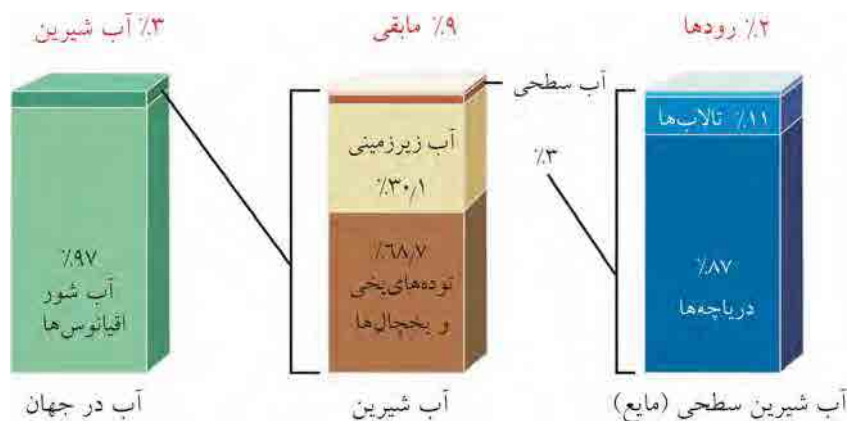
مولکول آب، H_2O ، شامل یک یون اکسیژن و دو یون هیدروژن است که با پیوندهای کووالانسی به هم متصل‌اند. یون اکسیژن بار الکتریکی منفی و یون هیدروژن بار الکتریکی مثبت دارد. مولکول آب یک دوقطبی الکتریکی می‌سازد و دو قطبی بودن آن سبب می‌شود به هنگام یخ زدن آب، مولکول‌های منفرد به یکدیگر بپیوندند و یک ساختار نسبتاً پایدار بسازند. توزیع ناهمگن بار الکتریکی در مولکول آب سبب جفت‌دگی با یون‌های مولکول‌های دیگر می‌شود. به همین خاطر آب بسیاری از مواد را در خود حل می‌کند. آب خالص بی‌رنگ، بی‌بو، و بی‌طعم است. ظرفیت گرمایی، گرماهای نهان انجماد، و تبخیر آن در فشار یک جو به ترتیب ۱ کالری بر گرم، ۸۰ کالری بر گرم، و ۵۴۰ کالری بر گرم است. به هنگام انجماد حجمش زیاد می‌شود. کشش سطحی‌اش زیاد و گران‌روی‌اش کم است. چگالی آب در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد، بیشترین مقدار، یک گرم بر سانتی-مترمکعب و در ۲۵ درجه، ۰/۹۹۸ گرم بر سانتی-مترمکعب است.



مولکول آب: شامل یک یون اکسیژن و دو یون هیدروژن است که با پیوندهای کووالانسی به هم متصل شده‌اند و یک دوقطبی الکتریکی می‌سازند. *اقتباس از Mathez*

آب‌های شیرین

برابر شکل ۱-۵، تنها ۳٪ از آب‌های کره زمین شیرین است، و به ۴۲ میلیون کیلومتر مکعب بالغ می‌شود. از این مقدار کمی بیش از دوسوم یخ و برف و باقی آب‌های زیر و روی زمین است. شکوفایی حیات گیاهی و جانوریِ هوازی تماماً در گرو آب شیرین است. توزیع جهانی آب شیرین در جدول ۱-۵ نشان داده شده است.



شکل ۱ - ۵ تقسیم آب کره زمین به مولفه‌های مختلف.

برف و یخ قطب‌ها و یخچال‌ها

بخش عمده یخ جهان، حدود ۹۰٪، در قطب جنوب و بقیه آن کم و بیش در گرینلند ذخیره شده است. ضخامت متوسط یخ در گرینلند ۱۵۰۰ متر است. در بعضی نقاط آن ضخامت ۴۳۰۰ متر هم دیده شده است.

یخچال‌های کوهستانی ده تا یازده درصد خشکی‌ها را می‌پوشانند. انباشت برف و یخ به هنگام زمستان و ذوب آنها در بهار و تابستان، آب رودخانه‌ها را تنظیم می‌کند و بر سرنوشت مردمی که برای زندگی به این رودخانه‌ها متکی هستند تأثیر می‌گذارد.

از نقطه نظر دیرینه‌شناسی، در عصرهای یخبندان، ذخایر برف و یخ جنوبگان، شمالگان، و یخچال‌ها بیشتر می‌شود و سطح آب اقیانوس‌ها پایین می‌آید. در دوره‌های گرم میان‌یخبندان به دلیل آب شدن یخ‌ها و انبساط گرمایی آب، تراز آب اقیانوس‌ها بالا می‌آید. اگر تمام برف و یخ امروز دنیا آب شود سطح اقیانوس‌ها ۷۰ متر بالا خواهد آمد. در حدود ۳ میلیون سال پیش سطح اقیانوس‌ها ۵ متر بالاتر بود. در آخرین یخبندان که حدود ۲۰ هزار سال پیش پایان یافت بخش بزرگی از نیم‌کره شمالی از یخ و برف پوشیده شد و سطح اقیانوس‌ها ۱۲۲ متر پایین‌تر از سطح فعلی بود. در حالی که در دوره گرم پیش از این یخبندان، ۱۲۵ هزار سال پیش، ۵/۵ متر بالاتر از سطح فعلی بود.

جدول ۱ - ۵ توزیع جهانی آب شیرین سطحی

۲	دریاچه بایکال
%۵	
۲	دریاچه‌های سوپریور، میشیگان، انتاریو، هورن، و ایری
%۵	
۳	دریاچه‌های دیگر
%۷	
۱	تالاب‌ها
%۱	
۲	رودخانه‌ها
%	

روان آب‌ها

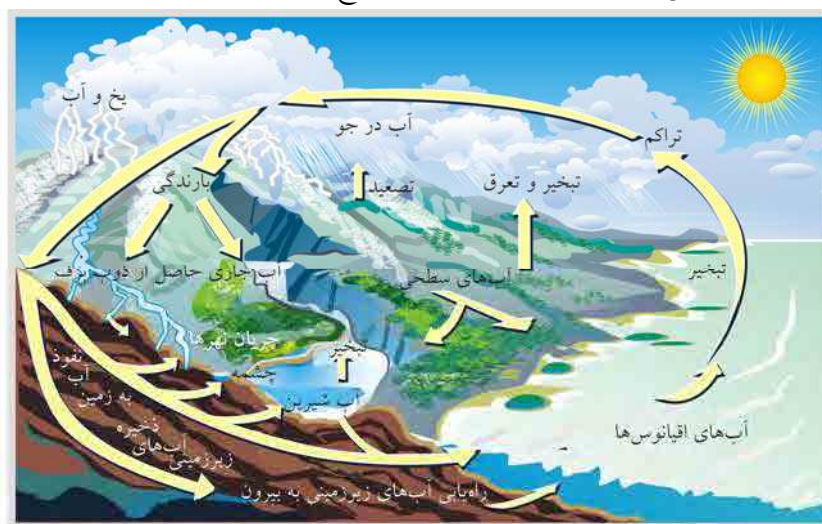
رودخانه‌های بزرگ و کوچک عمدتاً از ذوب یخچال‌ها و برف و یخ زمستانی که در کوهستان‌ها ذخیره شده تغذیه می‌شوند. چشمه‌ها نیز تا اندازه‌ای در تأمین آب رودخانه‌ها نقش دارند.

آب شیرین رودخانه‌ها، زندگی زیست‌بوم‌های گیاهی و حیوانی روی زمین را تضمین می‌کند. رودخانه‌ها آبیاری کشاورزی، تولید برق، حمل و نقل آبی، و در بسیاری موارد حمل آلودگی‌های شهری و صنعتی را ممکن می‌سازند. رودخانه‌ها در بسیاری مناطق در بستر خود نفوذ می‌کنند و مخازن آب‌های زیرزمینی را تغذیه می‌کنند. مقصد نهایی اکثر رودخانه‌ها اقیانوس است و با رسیدن به آن، شوری آب اقیانوس را که بر اثر تبخیر زیاد شده است پایین می‌آورند. روان آب‌های فصلی از بارش‌های فصلی و موضعی پدید می‌آیند و بعضاً به سیلاب و تخریب می‌انجامند.

آب‌های زیرزمینی

تقریباً در همه جای دنیا بخشی از آب باران و برف به سنگ و خاک زیرزمین نفوذ می‌کند. میزان نفوذ به تخلخل و شکاف‌های ریز و درشت لایه‌های زمین بستگی دارد. مثلاً ممکن است آب یک نهر کاملاً در یک غار گم شود، در صورتی که در یخ‌های گرینلند نفوذ آب

به زیرزمین ممکن نیست. بخشی از آب‌های کم‌عمق زیرزمینی ممکن است دوباره نشست کنند و به روان‌آب‌های بزرگ و کوچک پیوندند. بخش دیگری هم ممکن است برای سالیان دراز در سفره‌های عمیق محبوس بمانند. آب‌های فسیلی شمال آفریقا که کشور لیبی از آن بهره‌برداری می‌کند و شبه‌قاره عربستان از این نوع‌اند.



شکل ۲-۵ نمودار چرخه آب، برگرفته از US Geological Survey

آب‌های زیرزمینی الزاماً ساکن نیستند، وقتی سفره‌های زیرزمینی پر شدند آب راهی برای خروج از زیرزمین پیدا می‌کند. جریان‌های زیرزمینی کوه‌های بختیاری که به صورت چشمه‌های بزرگ در آمده‌اند و به رودخانه‌های خوزستان می‌پیوندند در این گروه قرار می‌گیرند. سرعت جریان زیرزمینی به خلل و فرج لایه‌های زمین و تخلخل سنگ‌ها بستگی دارد. آب‌های زیرزمینی، چه به خودی خود بیرون بیایند و چه به دست انسان خارج شوند در زندگی جوامع انسانی نقشی اساسی دارند و در مناطق کم بارانی مانند ایران، عراق، افغانستان، شمال آفریقا، حتی از رودخانه‌های طبیعی هم مهم‌ترند. در زیر چگونگی گردش آب‌های شور و شیرین و تأثیر آن بر اقلیم بررسی می‌شود.

آب‌های شور (اقیانوس‌ها)

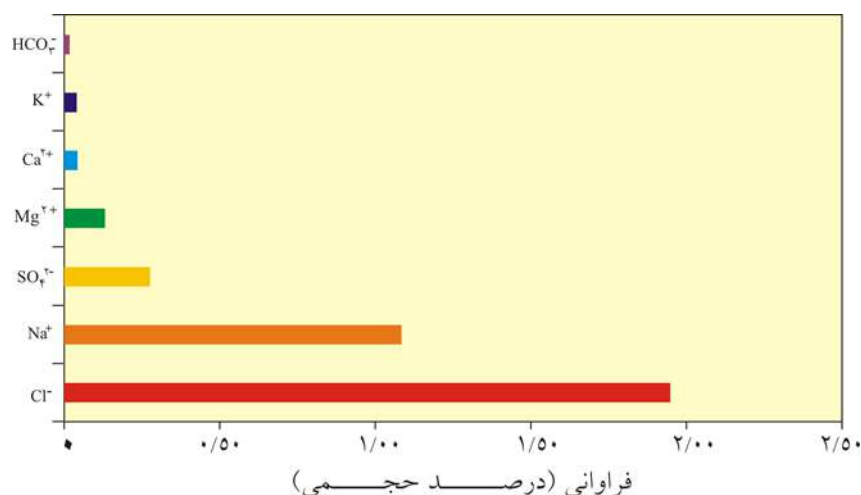
ذخیره آب اقیانوس ها ۱۳۳۸ میلیون کیلومتر مکعب تخمین زده می شود. آب های اقیانوسی بر اثر باد و اختلاف دما، همواره بین استوا و قطب ها و از زیر و رو در حرکت اند. جریان گرم گلف استریم که از دریای کارائیب و سواحل جنوبی آمریکای شمالی شروع می شود و تا سواحل انگلستان و کشورهای اسکندیناوی می رسد نمونه خوب جریان های سطحی اقیانوسی است. سرعت گلف استریم حدود ۹۷ کیلومتر در شبانه روز است و میزان آبی را که جابه جا می کند صد برابر جریان آب تمام رودخانه های جهان است. نوسانات جنوبی ال نینو و نوسانات آتلانتیک شمالی نیز از جریان های اقیانوسی هستند که در شکل دادن به اقلیم نقش بازی می کنند.

اقیانوس ها ۷۰٪ سطح زمین را می پوشانند. ۹۰٪ تبخیر آب از اقیانوس ها انجام می گیرد و قسمت اعظم بارش ها هم بر روی اقیانوس ها است. تقریباً ۱۰ روز طول می کشد تا بخار آبی که از زمین یا اقیانوس برمی خیزد دوباره به زمین برگردد.

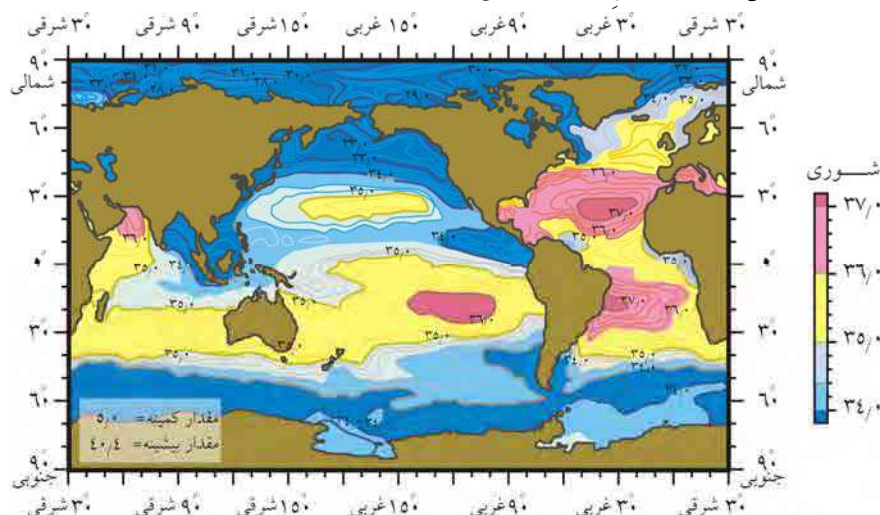
شوری/اقیانوس ها

۹۶/۵٪ وزن اقیانوس ها از مولکول های آب تشکیل شده است. بقیه یون های نمک طعام (سدیم کلراید) و نمک های دیگرند. مقدار این نمک ها در شکل (۳ - ۵) نشان داده شده است. این نمک ها باعث شوری آب اقیانوس ها می شوند. بنا به تعریف میزان شوری، وزن تمام نمک های موجود در یک لیتر آب اقیانوس در هر نقطه است.

شوری آب در سطح اقیانوس ها عمدتاً به تبخیر و میزان بارندگی بستگی دارد و متغیر است. شوری سطحی در مناطق ساحلی تا حد زیادی تحت تأثیر آب های شیرینی است که از رودخانه ها وارد می شوند. در مناطق قطبی میزان شوری به فرایندهای انجماد و ذوب



شکل ۳- ۵ میانگین درصد حجمی نمک‌های آب دریاها. برگرفته از Mathez



شکل ۴- ۵ میانگین شوری اقیانوس‌ها (برحسب گرم‌درلیتر)، در سال ۲۰۰۵. شورترین جاها محل‌هایی هستند که تبخیر بیشترین مقدار و بارش کمترین مقدار را دارد. با نزدیک شدن به قطب‌ها بارش بیشتر و تبخیر کمتر می‌شود، و در نتیجه شوری کم می‌شود. محورهای افقی و عمودی، طول و عرض جغرافیایی را نشان می‌دهند. برگرفته از Mathez

یخ بستگی دارد. در نواحی گرمسیری به خاطر تبخیر زیاد، شوری سطحی اقیانوس‌ها بیش از سایر نقاط است (۳۵ گرم‌درلیتر و بیشتر). کمترین میزان شوری در فصل تابستان در آب‌های شمالگان (۲۹ گرم‌درلیتر) اندازه‌گیری شده است. در سواحل که زهکشی رودخانه‌ای دارند، میزان شوری از صفر تا ۲۰ ممکن است تغییر کند. در اعماق اقیانوس‌ها میزان شوری ۳۵ گرم‌درلیتر است. دما و شوری هر دو بر چگالی آب تأثیر می‌گذارند و چگالی نیز بر سایر ویژگی‌های آب اثر دارد سرعت صوت و هدایت الکتریکی نمونه‌هایی از این ویژگی‌ها هستند.

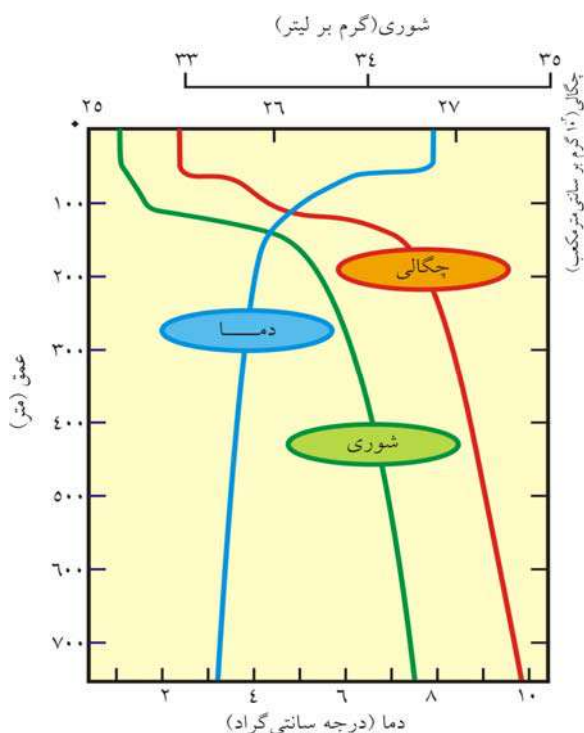
شوری اقیانوس‌ها جا تا جا تغییر می‌کند. در شکل ۴- ۵ این تغییرات برای سال ۲۰۰۵

نشان داده شده است. شورترین جاها (رنگ صورتی) محل‌هایی هستند که بیشترین تبخیر و کمترین بارش را دارند. با نزدیک شدن به قطب‌ها (رنگ آبی) بارش بیشتر و تبخیر کمتر می‌شود و شوری کاهش می‌یابد.

ساختار لایه‌های اقیانوسی

دمای میانگین اقیانوس‌ها $3/6$ درجه سانتی‌گراد و شوری میانگین آنها نزدیک به 26 گرم در لیتر است، ولی لایه‌های سطحی، گرم و کم شورند. چگالی آب با افزایش دما کم، و با افزایش شوری زیاد می‌شود. شکل ۵ - ۵ تغییرات چگالی، دما، و شوری را در چند صد متر بالای اقیانوس‌ها نشان می‌دهد. با افزایش عمق دما کم می‌شود، اما شوری و چگالی افزایش می‌یابند.

لایه‌های اقیانوسی براساس دما و شوری طبقه‌بندی می‌شوند. سه لایه اصلی وجود دارد: لایه آمیخته، لایه ترموکلاین، و لایه عمیق. لایه آمیخته نازک، سطحی، و گرم است. عمق آن از 20 تا 200 متر تغییر می‌کند. میانگین آن حدود 70 متر است. به خاطر ظرفیت گرمایی زیاد آب، تغییر دما با زمان در لایه آمیخته بسیار کند است و سال‌ها طول می‌کشد تا با آب‌های سرد زیرین مخلوط شود. در زیر لایه آمیخته، لایه ترموکلاین قرار دارد. در این ناحیه با افزایش عمق، دما کم و شوری زیاد می‌شود و هر دو افزایش چگالی را سبب



شکل ۵ - ۵ نمایه
چگالی، دما، و شوری
در چند صد متری
لایه‌های بالایی
اقیانوس. با افزایش
عمق، دما کم می‌شود،

و شوری و چگالی

افزایش می‌یابند.

برگرفته از

Denman و Mlyake

می‌شوند. ترموکلاين تقريباً عمق ۵۰۰ تا ۹۰۰ متری اقیانوس‌ها را در بر می‌گیرد. این عمق با توجه به موقعیت مکانی و فصل تغییر می‌کند. در زیر ترموکلاين، ناحیه عمیق قرار دارد. در این ناحیه تغییرات دما و شوری با زیاد شدن عمق بسیار اندک است. ناحیه عمیق حدود ۶۵ درصد از اقیانوس‌ها را تشکیل می‌دهد. عمیق‌ترین و سردترین قسمت آن دمایی در حدود ۲ درجه سانتی‌گراد دارد.

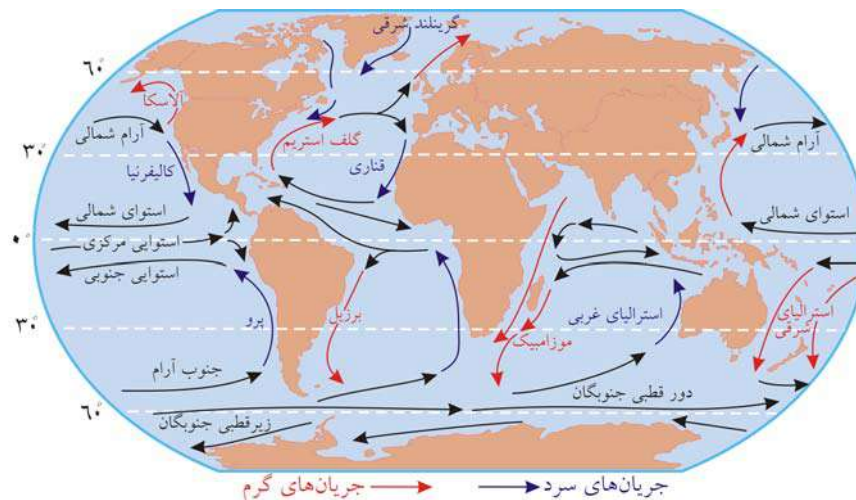
جریان‌های اقیانوسی

آب اقیانوس‌ها در سطح و در عمق همیشه در حرکت است. جریان‌های اقیانوسی غالباً چرخشی‌اند. آب‌ها پس از طی یک چرخه کامل به جای اول برمی‌گردند. باد بوجودآورنده اصلی این جریان‌هاست. جریان‌های اقیانوسی، مانند بادهای، تحت تأثیر نیروی‌های کوریولیس (قاب ۱ - ۲) و نیروهای گرانروی در آب و در حد فاصل آب و هوا، و آب و کناره‌ها هستند. در شکل (۶ - ۵) مهم‌ترین جریان‌های سطحی نشان داده شده‌اند. مهم‌ترین عواملی که جریان‌های اقیانوسی را پدید می‌آورند عبارتند از:

- بادهای گشت‌کره
- تغییرات در چگالی آب
- ناهموازی‌های بستر و سواحل اقیانوس‌ها

از این سه عامل شاید بتوان جریان‌های هوا در لایه‌های زیرین جو را مهم‌ترین دانست. حتی اگر عامل اصلی جریان، اختلاف چگالی آب بین استوا و قطب باشد باز هم این جریان‌های هوایی است که سبب می‌شوند آب‌های گرم، هنگام حرکت از مناطق استوایی به سمت قطب‌ها، از مسیر خود منحرف شوند. ناهموازی‌های اقیانوس‌ها هم تأثیر محلی دارند و عامل اصلی انحراف جریان‌های اقیانوسی هستند. از جمله عوامل ایجادکننده جریان‌های اقیانوسی، بادهای تجاری هستند. منظور از بادهای تجاری، بادهای بزرگ‌مقیاس و نسبتاً دائمی هستند (به نظام بادهای در بخش هواکره رجوع شود). در محدوده بادهای تجاری

جهت جریان‌های سطحی با جهت باد یکی است. برخورد جریان‌ها به سواحل یا برآمدگی‌های زیر آب مسیر آنها را عوض می‌کند. عامل دیگر در ایجاد جریان‌های اقیانوسی، کمی و زیادی در چگالی آب است. آب



شکل ۶ - ۵ جریان‌های اقیانوسی: خطوط قرمز، نشانه جریان‌های آب گرم و خطوط آبی نشانه جریان‌های آب سرد هستند. wikipedia

سنگین مایل به فرو رفتن و آب سبک مایل به رو آمدن است. این امر سبب زیر و رو شدن آب اقیانوس‌ها می‌شود. آب‌های سنگین هم سرد و هم شور هستند. وقتی آب در اقیانوس منجمد شمالی و منجمد جنوبی یخ می‌بندد این دو ویژگی تأثیرگذارتر می‌شوند.

جریان‌های سطحی بزرگ

اقیانوس اطلس: در دو طرف منطقه آرام استوایی در فاصله آفریقا و آمریکای جنوبی بادهای تجاری آب‌های سطحی اقیانوس را به سمت مغرب می‌رانند، در نتیجه دو جریان در طرفین استوا ایجاد می‌شود. این دو جریان را جریان استوایی شمالی و استوایی جنوبی می‌نامند. بین این دو جریان، جریان کم عرض دیگری در جهت غرب به شرق دیده می‌شود. بر اثر انباشت توده عظیمی از آب که جریان استوایی شمالی به سواحل آمریکا

می‌رانند، سطح آب در خلیج مکزیک بالا می‌آید. این بالا آمدن، از عوامل مهم پیدایش جریان گلف استریم است.

اقیانوس آرام: در قسمت شمالی اقیانوس آرام، یک جریان استوایی بین مدار ۹ الی ۲۵ درجه شمالی وجود دارد. این جریان از جنوب مکزیک شروع شده و هر چه در امتداد استوا به سمت غرب می‌رود قوی‌تر می‌شود. سپس در غرب اقیانوس آرام در اثر برخورد با جزایر فیلیپین دو شاخه می‌شود. شاخه شمالی به تبعیت از برآمدگی جزایر ریوکیو تا جنوب ژاپن پیش می‌رود و از آنجا به شرق بر می‌گردد. این شاخه که قوی‌تر از شاخه جنوبی است، جریان کوروشیو نام دارد.

جریان‌ها در اقیانوس آرام جنوبی به علت وجود برجستگی‌ها و جزایر بیشماری که در سر راه قرار دارند به اندازه سایر مناطق منظم نیست و کمتر بررسی شده‌اند.

اقیانوس هند: تأثیر باد بر جریان‌های اقیانوس هند نقش بسزایی دارد. در اقیانوس هند جهت و سرعت جریان‌ها به تبعیت از بادهای موسمی تغییر می‌کند. در زمستان در نیم‌کره شمالی جریانی به سوی غرب از جنوب خلیج بنگال شروع می‌شود، از دریای عمان می‌گذرد و به سواحل سومالی می‌رسد. در نیم‌کره جنوبی، از حدود خط استوا تا شش درجه عرض جنوبی، جریانی مخالف با جریان استوایی از غرب به شرق حرکت می‌کند. این جریان حاصل برگشت جریان قبلی است که در منطقه آرام استوایی جریان دارد.

شمالگان: حرکت آب در حوضه شمالگان مدار بسته‌ای دارد. جهت حرکت آن خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت است. این جریان بزرگ در عرض‌های پایین‌تر به سه جریان کوچک‌تر منشعب می‌شود. یک جریان از طریق دریای برینگ به اقیانوس آرام می‌رسد. دو جریان دیگر به نام‌های جریان گرینلند شرقی و جریان لابرادور به اقیانوس اطلس وارد می‌شوند.

جنوبگان: در اطراف قاره جنوبگان دو جریان گردابی در خلاف جهت یکدیگر در حرکت‌اند. جهت آنها با جهت بادهای غربی و بادهای شرقی مطابقت می‌کند. جریان غربی در مجاورت قاره و جریان شرقی در شمال آن است. منطقه واگرای جنوبگان که در آنجا آب‌های اعماق اقیانوس به سمت بالا می‌آیند، حد فاصل بین این دو جریان‌اند.

جریان‌های عمیق اقیانوسی: آب‌های گرم سطحی، هر مسیری که داشته باشند بالاخره خود را به نواحی قطبی می‌رسانند. پس از آن که در نواحی قطبی سرد و سنگین شدند به اعماق فرو می‌روند و دوباره به سمت استوا، و این بار از زیر جریان می‌یابند. جریان‌های اعماق اقیانوس‌ها هنوز به طور دقیق شناخته نشده‌اند. به نظر می‌رسد در اعماق بسیار زیاد، جریان‌هایی با سرعت خیلی کم وجود داشته باشد، ولی در اعماق کم وجود آنها حتمی است و سرعت‌ها قابل توجه‌اند.

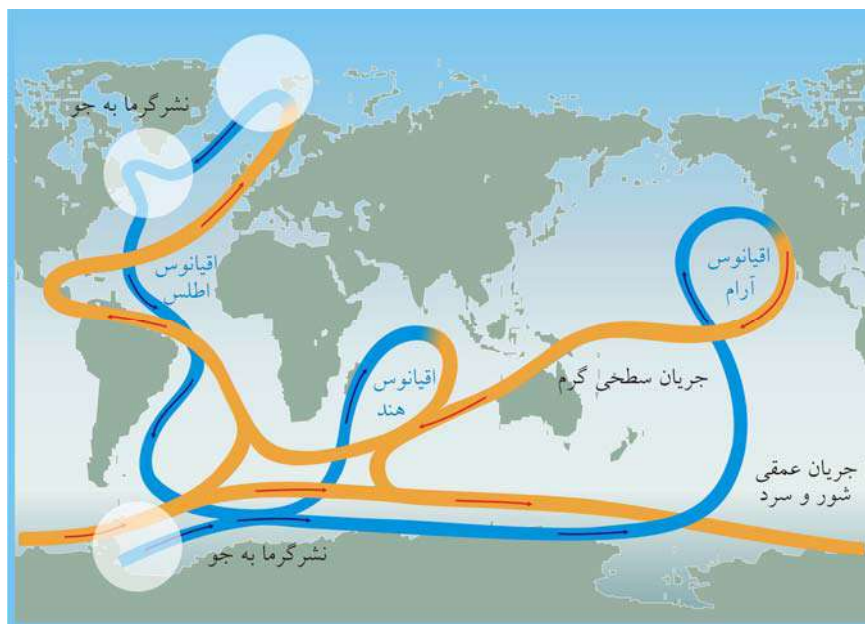
جریان‌های عمقی در بیشتر تنگه‌ها و گذرگاه‌هایی که دریاها را به اقیانوس‌ها یا به یکدیگر متصل می‌کند در خلاف جهت جریان‌های سطحی حرکت می‌کنند. جریان عمقی تنگه جبل الطارق مشهورترین این نوع جریان‌هاست که در زمان جنگ جهانی دوم زیردریایی‌های ایتالیا با خاموش کردن موتور خود از طریق همین جریان بی‌سروصدا وارد اقیانوس اطلس می‌شدند.

جریان‌های ترموهالین^۱: جریان درون اقیانوسی بزرگ که در انتقال آب از پایین به بالا و بالعکس مانند نوار نقاله عمل می‌کند. اصطلاح فنی آن جریان ترموهالین است. جریان‌های ترموهالین به خاطر تفاوت در چگالی آب پدید می‌آیند. با فرو رفتن آب سرد و سنگین در اقیانوس اطلس شمالی و در اطراف جنوبگان شروع می‌شوند و سپس با آب‌های اقیانوس آرام می‌آمیزند و نهایتاً به سطح بازگشته و جایگزین آب فرو رفته می‌شوند (شکل ۷ - ۵). این جریان‌ها آثار پایدار هزاران ساله بر اقلیم جهان دارند.

تغییر در اقیانوس‌ها و تغییر در اقلیم

پیش‌تر گفته شد که گرماهای نهان انجماد و تبخیر آب (به ترتیب ۸۰ کالری بر گرم و ۵۴۰ کالری بر گرم) زیاد است. گرمای ویژه آب نیز از گرمای ویژه هوا و بسیاری مواد دیگر بیشتر است. به همین سبب ظرفیت گرمایی اقیانوس‌ها نزدیک به هزار برابر ظرفیت گرمایی هواکره است. اقیانوس‌ها می‌توانند با تغییری اندک در دمای اقیانوس‌ها، مقدار زیادی گرما آزاد یا جذب می‌شود. بالا بودن گرمای ویژه آب اثرات دیگری هم دارد: اقیانوس‌ها در مقایسه با جو بسیار کند و بسیار کم گرم می‌شوند. به عنوان مثال در قاره‌ها، صحرای لیبی با ۵۸ درجه سانتی‌گراد و جنوبگان با ۸۸- درجه سانتی‌گراد به ترتیب گرم‌ترین و سردترین نقاط دنیا هستند، تفاوت این بیشینه و کمینه ۱۴۶ درجه است. در حالی که در اقیانوس‌ها،

خلیج فارس با ۲۶ درجه سانتی‌گراد و آب‌های قطبی با ۲- درجه سانتی‌گراد گرم‌ترین و



شکل ۷-۵ چرخه ترموهالین. این جریان‌ها با فرورفت آب سرد در اقیانوس اطلس شمالی و دریاهای اطراف جنوبگان شروع می‌شوند. سپس با آب‌های گرم اقیانوس آرام می‌آمیزد و به سطح اقیانوس باز می‌گردد. برگرفته از Mathez

سردترین نقاط اند. بازه تغییرات تنها ۲۸ درجه سانتی‌گراد است. از سال ۱۹۵۵ به این سو معلوم شده است که اقیانوس‌های جهان در حال گرم شدن‌اند. در بازه زمانی سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۳، لایه‌های اقیانوسی از سطح تا عمق ۳۰۰۰ متری، حدود 14.1×10^{22} ژول انرژی جذب کرده‌اند. این رقم برابر زور تابشی ۰.۲ وات بر مترمربع است. در سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳ زور تابشی در لایه کم عمق‌تر صفر تا ۷۰۰ متر حدود 0.18 ± 0.05 وات بر مترمربع برآورد شده است.

اقیانوس‌ها بزرگ‌ترین انبار ذخیره کربن دی‌اکسید هستند. حدود ۹۳٪ کربن دی‌اکسید در اعماق اقیانوس‌ها جذب جلبک‌ها، خزها، گیاهان دریایی و مرجان‌ها می‌شود. در عین حال افزایش کربن دی‌اکسید در جو اثر منفی بر اقیانوس‌ها دارد: آب‌ها اسیدی می‌شوند، و

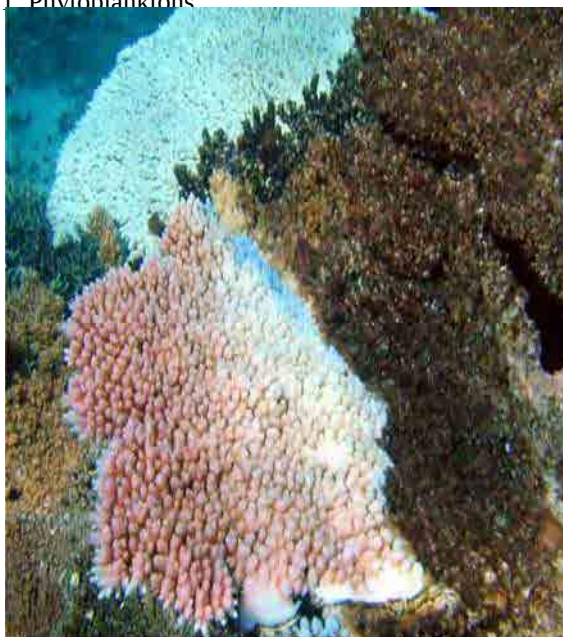
صدف سازی در زیست بوم های دریایی دچار اختلال می شود. مرجان ها معمولاً با نوعی سلول گیاهی هم زیستی دارند. مرجان در مقابل پناهگاهی که به سلول می دهد، از قند فتوسنتز شده توسط سلول بهره می گیرد. اما سلول به دما، شدت نور، و اسیدیته آب حساس است. در دمای بالا امکان هم زیستی پولپ مرجان و سلول گیاهی از بین می رود و سلول به اجبار مرجان را ترک می کند. در این حالت مرجان بی رنگ می شود و تنها اسکلتی سفید و درخشان از آن به جا می ماند و سرانجام می میرد. سفید شدن مرجان ها در سال ۱۳۸۷ در جزیره کیش اتفاق افتاد.

گذشته از سفید شدن، مرجان ها برای ساخت اسکلت خود از کربنات کلسیم استفاده می کنند، وقتی اسیدیته آب زیاد شود کربنات کلسیم با یون هیدروژن موجود در آب واکنش می کند و ساخت اسکلت مرجانی دچار مشکل می شود. اسیدی شدن اقیانوس ها علاوه بر این که باعث شکنندگی اسکلت های مرجانی می شود، آهنگ رشد آنها را نیز کاهش می دهد. این مسئله نگرانی دانشمندان جهان را به دنبال داشته است. تضعیف ساختار و ساختمان کلنی های مرجانی، مأمّن و آشیان هزاران گیاه و جانور دریایی دیگر را در معرض خطر قرار می دهد (شکل ۸ - ۵).

با گرم شدن آب اقیانوس ها، شمار گیاهان تک سلولی فیتوپلانکتون ها^۱ که سرآغاز زنجیره غذایی در دریاها هستند و مهم ترین عامل جذب کربن از جو و دریا محسوب می شوند، رو به کاهش می گذارد. محققان دانشگاه اورگان که وسعت سبزینگی در اقیانوس ها را بررسی می کنند متوجه دو تحول عمده در فیتوپلانکتون ها شده اند: پس از ال نینوی سال های ۹۸ - ۱۹۹۷ که اقیانوس ها در حال سرد شدن بودند، فیتوپلانکتون ها زیاد شدند، اما بین سال های ۲۰۰۴ - ۱۹۹۹ که میانگین دمای آب اقیانوس ها بیشتر شد، مقدار فیتوپلانکتون ها نیز به شدت کم شد. این کاهش در برخی نواحی کره زمین از مرز ۳۰٪ نیز گذشت. کم شدن این گیاهان ریز به این معنی است که در مدت مورد بحث ۱۹۰ میلیون تن کربن کمتر جذب و به مواد آلی تبدیل شده است. فیتوپلانکتون ها تقریباً نیمی از عمل فتوسنتز کل موجودات زنده روی کره زمین را برعهده دارند. این گیاهان ریز، با کمک کربن و نور خورشید مواد آلی تولید کرده و وارد چرخه غذایی اقیانوس ها می کنند. از این نقطه نظر فیتوپلانکتون ها از عوامل کلیدی بقای حیات در کره زمین اند. فیتوپلانکتون ها در لایه های بالایی اقیانوس ها زندگی می کنند و از موادی که همراه با جریان های دریایی از

لایه‌های عمیق بالا می‌آیند تغذیه می‌کنند. اگر آب لایه‌های بالای اقیانوس بیش از حد گرم

1. Phytoplanktons



شکل ۸ - ۵ نمونه‌هایی
از سفید شدن مرجان‌ها.
سلول‌های گیاهی داخل
مرجان با استفاده از
کربن دی‌اکسید، آب و انرژی
خورشید، قند تولید می‌کند.
اما وقتی دما بالا رود امکان
هم‌زیستی مرجان و سلول
از بین می‌رود. سلول گیاهی
مرجان را ترک می‌کند.
در این حالت مرجان
بی‌رنگ شده و می‌میرد
و تنها اسکلتی سفید از
مرجان به جا می‌ماند.

<http://www.google.com/imgres?imgurl=http://aksup.ir/images>

شود و تفاوت چگالی آب‌های سطحی با آب‌های عمیق زیاد شود، جریان‌های دریایی
نمی‌توانند از لایه‌های عمیق آب به بالا برسند و در نتیجه مواد غذایی از عمق اقیانوس به
فیتوپلانکتون‌ها نمی‌رسد و تعداد آنها کاهش می‌یابد.

گلف استریم

پیش‌تر گفته شد که گلف استریم بزرگ‌ترین جریان اقیانوسی گرم و قوی در اقیانوس
اطلس است. از خلیج مکزیک و تنگه فلوریدا خارج می‌شود و از نزدیکی سواحل شرقی
آمریکای شمالی رو به شمال حرکت می‌کند. در عرض ۴۰ درجه شمالی و طول ۳۰ درجه
غربی به دو بخش می‌شود. شاخه شمالی آن به سمت اروپا و شاخه جنوبی آن به سمت
غرب آفریقا می‌رود (شکل ۹ - ۵). رنگ گلف استریم نیلی روشن و از آب‌های مجاور

خود متمایز است.

در قرن ۱۶ برای اولین بار دریانوردی به نام خوان پونس دون لئون متوجه جریان گلف استریم شد. در قرن هفدهم بنجامین فرانکلین اولین اندازه‌گیری‌های دما و سرعت آن را



شکل ۹ - ۵ مسیر جریان گلف استریم، شاخه شمالی آن به سمت اروپا و شاخه جنوبی آن به سمت غرب آفریقا می‌رود.

<http://imgres?imgurl=http://www.natureeducation.org/gulfstreamgif&imgrefurl=http://www.nature->

انجام داد. فرانکلین موفق شد نقشه گلف استریم را رسم کند و به درستی نتیجه گرفت، اگر کشتی‌ها روی این جریان گرم به سوی اروپا حرکت کنند دو هفته زودتر به مقصد می‌رسند.

گلف استریم دارای حرکت چرخشی است. با رسیدن به کرانه‌های کشورهای اسکندیناوی و برگشت از آنجا مسافتی در حدود ۱۹۰۰۰ کیلومتر طی می‌کند. سه سال وقت لازم است تا گلف استریم یک دور کامل بپیچد.

گلف استریم یک جریان آب گرم است. در اقلیم بسیاری از مناطق جهان دگرگونی‌های بزرگ بوجود می‌آورد. برای نمونه بادهایی که در اروپای شمالی از فراز گلف استریم

می گذرند، گرمای آن را به قسمت‌هایی از نروژ، سوئد، و دانمارک می‌رسانند. به همین سبب این کشورها نسبت به سایر نقاط هم عرض خود زمستان معتدل‌تری دارند. از برکت گرمای گلف استریم، بندرهای سواحل نروژ از یخبندان در امان‌اند. از برکت گلف‌استریم آب و هوای زمستانی لندن و پاریس نیز ملایم است.

علت به وجود آمدن گلف استریم سبک بودن آب گرم نسبت به آب سرد است. آب گرم خلیج مکزیک به حالت شناور در روی آب‌های سرد زیرین به طرف شمال اقیانوس اطلس حرکت می‌کند. ولی در طول حرکت خنک می‌شود و به جایی می‌رسد که چگال‌تر از آب‌های زیرین است. بنابراین غرق می‌شود و این بار از لایه‌های زیرین اقیانوس به سمت استوا برمی‌گردد و چرخه را کامل می‌کند.

ال‌نینو^۱

ال‌نینو یک کلمه اسپانیایی به معنای نوزاد پسر است و به جریان‌های آب گرمی که در حوالی کریسمس (زادروز مسیح) در امتداد سواحل اکوادور و پرو ظاهر می‌شوند گفته می‌شود. دمای آب ۲ تا ۴ درجه سانتی‌گراد بالا می‌رود و از یک هفته تا یک ماه یا بیشتر دوام می‌آورد. ال‌نینو هر دو تا هفت سال، و به طور میانگین هر چهار سال یک بار رخ می‌دهد. ال‌نینو یکی از مهم‌ترین و شاخص‌ترین رویدادهایی است که منجر به ظهور ناهنجاری‌های بزرگ آب‌وهوایی در بسیاری از نقاط جهان می‌شود. هواشناسان و اقیانوس‌شناسان جهان در سال‌های اخیر مطالعات زیادی درباره سازوکار ال‌نینو و تأثیر متقابل جو و اقیانوس به هنگام وقوع آن انجام داده‌اند، مجموعه این تغییرات را با علامت اختصاری El Nino یا ENSO^۲ می‌نامند. انسو به معنای نوسانات جنوبی ال‌نینو است که ال‌نینو مولفه اقیانوسی و نوسان جنوبی مولفه جوی آن است.

در طول ۴۰ سال گذشته ۱۰ ال‌نینو ثبت شده است. بدترین آنها در سال‌های ۸۳-۱۹۸۲ و سال‌های ۹۸-۱۹۹۷ بود. ال‌نینوی سال ۹۸-۱۹۹۷ موجب مرگ ۱۶٪ از مرجان‌های دریایی شد. نشانه کلیدی ال‌نینو، افزایش غیرعادی دما در امتداد و دو طرف خط استوا در اقیانوس آرام مرکزی و شرقی است. در این حال دمای سطح دریا حداقل برای چند ماه پیاپی در ۳ تا ۵ نقطه ساحلی به بالاتر از حد معمول می‌رسد و به مدت یک

سال یا بیشتر به همان صورت باقی می ماند. برای برگشت به شرایط عادی منطقه، حداقل تا ژانویه یا مارس آینده زمان لازم است.

1. El Niño 2. Elnino Southern Oscillation

سبب پیدایش ال نینو: گردش واکر یک گردش اتمسفری در صفحه استوا است که با صعود هوا در غرب آرام استوایی و نزول آن در شرق آرام استوایی شکل می گیرد. در این گردش، بادهای سطحی از شرق به غرب و بادهای فوقانی از غرب به شرق به موازات استوا می وزند. گردش واکر به دلیل وجود تغییرات افقی دما در سطح دریا در طول استوا شکل می گیرد و با پدیده انسو ارتباط تنگاتنگ دارد.

تأثیر ال نینو بر محیط و زندگی انسان: به هنگام بروز ال نینو چرخه زیستی در سرتاسر سواحل پرو و اکوادور تحت تأثیر قرار می گیرد. مرگ و میر ماهیان و به خصوص ماهی کولی زیاد می شود. ماهی های ساردین به سمت جنوب مهاجرت می کنند. به دنبال مرگ و میر و مهاجرت ماهیان، میلیون ها پرندۀ دریایی به علت از دست دادن منبع غذایی خود نابود می شوند. لطمه اقتصادی بزرگی به صنایع ماهیگیری و کود مرغ (دریایی) کشورهای پرو و اکوادور وارد می شود. بارندگی های سیل آسا در بخش های خشک سواحل پرو و اکوادور سبب ته نشست های گلی و تخریب خاک این مناطق می شود. همچنین این پدیده رابطه ای قوی با خشک سالی در هند، شرق استرالیا، مالزی، اندونزی و کلاً آسیای جنوب شرقی دارد. مثلاً ال نینوی ۱۹۸۳ - ۱۹۸۲ که شدیدترین رویداد اقلیمی دریایی از این نوع بود، موجب جابه جایی زنجیره باران های استوایی به طرف شرق و مرکز اقیانوس آرام شد. از تبعات این واقعه باران های شدید در حد ۲ متر، و جاری شدن سیل های ویرانگر در جنوب اکوادور و شمال شرق پرو بود.

مرجع ها:

- IPCC. *Climate Change 2007, The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, 2007
- Houghton, J. *Global Warming, The Complete Briefing*, Fourth Edition, Cambridge University Press, 2009
- Mathez, E. A. *Climate Change: The Science of Global Warming and Our Energy Future*, Columbia University Press, 2009
- Denman, K. L., Ana Miyake, J. *Phys. Oceanography* **3**, 185, 1973 (see also Mathez)
- <http://en.wikipedia.org/wiki>
- <http://fa.wikipedia.org/wiki>
- <http://daneshnameh.roshd.ir/mavara/mavara-index.php?page=جریان‌های اقیانوسی>
- <http://ourgreenearth.blogfa.com/cat-9.aspx>
- <http://www.iranew.com/post-157.aspx>
- <http://www.farya.com/id/1422>
- <http://pooldaily.com/Pages/Printable-News-1912.html>
- <http://iscanews.ir/fa/ShowNewsItem.aspx?NewsItemID=344688>
- <http://www.persianpet.org/forum/showthread.php/-439/index.html?p=658>
- <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclefarsi.html#oceans>
- <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html>

بخش ۶

اقلیم‌های دیرینه

سن زمین کمی کمتر از سن خورشید، و نزدیک به ۵ میلیارد سال برآورد شده است. ۴/۳
میلیارد سال اول پیش‌کامبرین^۱ و ۵۷۰ میلیون سال بعدی پیدازیستی^۲ نام دارد. بنا به
تقسیم‌بندی متعارف زمین‌شناسی پیدازیستی شامل سه دوران دیرینه‌زیستی^۳ (۵۷۰ تا ۲۲۵
میلیون سال پیش)، میان‌زیستی^۴ (۲۲۵ تا ۶۵ میلیون سال پیش) و نوزیستی^۵ (۶۵ میلیون
سال اخیر) است. هر دوران به دوره‌های کوچک و هر دوره به تعدادی دوره‌های کوچک‌تر
تقسیم می‌شود.

آخرین دوره زمین‌شناسی، کواترنری^۶ نامیده می‌شود، و ۲ میلیون سال از تاریخ اخیر
زمین را در بر می‌گیرد. کواترنری به دو دور پلیستوسن^۷ (۲ میلیون تا ۱۰ هزار سال پیش) و
هولوسن^۸ (۱۰ هزار سال اخیر) تقسیم می‌شود. در دوره کواترنری وضع زیست‌شناختی
و جغرافیایی زمین مشابه امروز بوده است. انقراض گروه بزرگی از پستانداران و شمار

1. Precambrian
5. Cenozoic

2. Phanerozoic
6. Quaternary

3. Palaeozoic
7. Pleistocene

4. Mesozoic
8. Holocene

زیادی از گونه‌های پرندگان در این دوره رخ داده است. ماموت، ببر خنجر دندان، کرگدن پشم‌دار و نظایر آن‌ها از جمله حیوانات منقرض شده در این دوره هستند. پیدایش انسان نیز در دوره کواترنری بوده است. به همین مناسبت برخی از زمین‌شناسان و دیرینه‌شناسان آن را دوره انسان نیز نامیده‌اند. در کل، این دوره با عقب‌نشینی دریا و پیدایش دوره‌ای یخچال‌ها آغاز می‌شود. از جمله مشخصات دوره کواترنری در ایران خشک شدن دریاچه‌های مرکزی و تشکیل نمک‌زارها و کویرهای ایران است. هم‌چنین آخرین فعالیت آتشفشان‌های سهند، سبلان، دماوند و تفتان در این دوره واقع شده است.

عوامل مؤثر در سامانه اقلیم

این عوامل به دو دسته زمینی و برون‌زمینی تقسیم می‌شوند. توصیف کوتاهی از آن‌ها در زیر آمده است:

الف) عوامل زمینی ریشه در خود کره زمین دارند و در مقیاس‌های زمانی یک سال تا چند صد هزار سال عمل می‌کنند. فرایندهای کوه‌زایی^۱، خشکی‌زایی^۲، آتشفشانی، جریان‌های اقیانوسی، تغییر در ترکیب شیمیایی جو و اقیانوس از این عوامل‌اند.

کوه‌زایی: فرایند زایش کوه‌ها و برجستگی‌های قاره‌هاست. سنگ‌کره از ۱۲ صفحه مجزا تشکیل شده است. موقعیت این صفحات مدام نسبت به هم تغییر می‌کند. زمانی که دو صفحه با هم برخورد کنند، یا یک صفحه زیر صفحه دیگر برود کوه پدید می‌آید. رشته کوه‌های زاگرس در ۱۶ تا ۲۳ میلیون سال پیش، زمانی که صفحه مرکزی ایران و صفحه صلب عربستان به هم برخوردند، تشکیل شد.

کوه‌ها تأثیر مستقیم بر اقلیم دارند. در فرایند هوازدگی، کربن‌دی‌اکسید جو با کانی‌های سنگی واکنش می‌دهد و بی‌کربنات‌ها ساخته می‌شوند. چون کربن‌دی‌اکسید گاز گل‌خانه‌ای است، کاهش آن در جو، زمین را خنک می‌کند. هم‌چنین پوشش برف روی کوه‌های مرتفع سپیدایی زمین را افزایش می‌دهد (قاب ۳ - ۲). فلات تبت، رشته کوه‌های هیمالیا و سیرا^۳ در آمریکا در ۴۰ میلیون سال گذشته اثر خنک‌کنندگی روی زمین داشته‌اند.

1. Orogeny

2. Epeirogeny

3. Sierra

خشکی‌زایی: حرکات عمودی زمین در اثر حرکت صفحه‌های تکتونیکی، فلات‌ها و حوضه‌های اقیانوسی را بوجود می‌آورد. به دلیل دینامیک آهسته درون زمین، قاره‌ها فقط حدود چند سانتی‌متر در سال حرکت می‌کنند. بنابراین تغییر در موقعیت نسبی قاره‌ها و اندازه آن‌ها تنها پس از ده‌ها و صدها میلیون سال نمود پیدا می‌کند. به‌عنوان مثال اگر در زمان به عقب برگردیم، در ۲۵۰ میلیون سال پیش، همه قاره‌ها به هم چسبیده بودند و ابرقاره پانجه‌آ^۱ را تشکیل می‌داده‌اند. طبیعی است که رانش قاره‌ها بر تغییر جریان‌های اقیانوسی اثر بگذارد و اقلیم را تغییر دهد.

فعالیت آتشفشانی: فوران‌های آتشفشانی حجم زیادی از غبار و انواع بخار مانند سولفوردی اکسید، را وارد پوش کره می‌کنند. در پوش کره سولفوردی اکسید سریعاً به هواپیماهای سولفوریک اسید تبدیل می‌شود و بر روند تشکیل ابرها و بارش‌ها اثر می‌گذارد. وجود آلاینده‌های آتشفشانی در جو از یک سو مانع فرار تابش زمین به فضا می‌شوند و اثر گرم‌کنندگی دارند و از سوی دیگر مانع ورود تابش خورشیدی به زمین می‌شوند. روی هم‌رفته هواپیماها ۵ تا ۱۰٪ از تابش ورودی خورشید را کم می‌کنند و گاهی زمین را به مدت یک یا دو سال، تا ۰/۳ درجه خنک می‌کنند (قاب ۱ - ۶).

جریان‌های اقیانوسی: اقیانوس با ظرفیت گرمایی عظیمی که دارد، در تنظیم سامانه اقلیم نقش اساسی دارد. در مورد جریان‌های اقیانوسی به تفصیل در بخش ۵ گفته شده است.

تغییرات در ترکیب شیمیایی جو: مقدار گازهای گل‌خانه‌ای و هواپیماها، در اثر عوامل طبیعی و در دو سده اخیر به خاطر دخالت انسان، تغییر می‌کند. در بخش ۳ کتاب این تغییرات به تفصیل بررسی شده‌اند.

(ب) عوامل برون‌زمینی منشاء کهکشانی و خورشید مداری دارند و در مقیاس‌های زمانی ده سال تا چند صد میلیون سال ممکن است عمل کنند.

عوامل کهکشانی: منظومه شمسی حول مرکز کهکشان می‌چرخد و زمین عضوی از آن است. دوره تناوب این چرخش ۲۴۰ میلیون سال است. در این مدت، تغییرات در محیط

قاب ۱ - ۶: تاثیر فوران‌های آتشفشانی بر فرینه‌های دمايي

ذرات دود و غبارِ معلق در هوا را هوا آویز یا به اختصار هواویز می‌گویند. آتشفشان‌ها خاکستر و سولفوردی‌اکسید به جو فوقانی پرتاب می‌کنند. سولفوردی‌اکسید از طریق واکنش‌های فتوشیمیایی به سولفوریک‌اسید و ذرات سولفات تبدیل می‌شود. هواویزهای آتشفشانی سال‌ها در پوش کره (لایهٔ بالاتر از ارتفاع تقریبی ۱۰ کیلومتر) مانده، در جو پخش می‌شوند. سپیدایی هواویزهای آتشفشانی بسیار بالاست. مانع رسیدن تابش خورشید به لایه‌های پایین هواکره می‌شوند و زمین را خنک می‌کنند.

فوران کوه پیناتوبو در ۱۲ ژوئن ۱۹۹۱ در فیلیپین از بزرگ‌ترین فوران‌های آتشفشانی سده بیستم بود. نزدیک به ۲۰ میلیون تن سولفوردی‌اکسید به جو پرتاب شد. غبار حاصل از این فوران تا چند ماه غروب‌های دیدنی و غیرعادی خورشید را در سرتاسر جهان بوجود آورد (شکل ۱). تابش خورشید در لایه‌های زیرین جو ۲٪ کاهش یافت و میانگین دمای جهان، به مدت دو سال در حدود ۰/۲۵ درجه سانتی‌گراد پایین آمد.

شواهدی نیز وجود دارد که برخی از رخداد‌های غیرمعمول آب‌وهوایی سال‌های ۱۹۹۱ و ۱۹۹۲ (مانند زمستان غیرعادی سرد خاورمیانه و زمستان معتدل اروپای غربی) به غبار این آتشفشان مربوط بوده باشد.



شکل ۱. تصویری از شاتل فضایی از آمریکای جنوبی در ۱۸ اوت ۱۹۹۱. لایهٔ نازک تاریک که دو لایهٔ سرخ و آبی جو را از هم جدا می‌کنند، هواویزهای حاصل از آتشفشان پیناتوبو است.

www.wikipedia.org

آتشفشان مهیب ایافیا لایوکول^۱ در ۱۴ آوریل ۲۰۱۰ در ایسلند روی داد. تنوره‌ای به ارتفاع ۵ کیلومتر در حدود یک هفته خاکستر پراکند. حجم غبار پرتاب شده به جو به ۲۵۰ میلیون مترمکعب

1. Eyjafjallajökull

بالغ شد و ترس از خطر ورود غبار آتشفشانی به موتور هواپیماها و کاهش دید خلبان‌ها برنامه پروازهای اروپای غربی را به مدت یک هفته مختل کرد. نزدیک به ۱۸ هزار پرواز لغو شد. باید منتظر تأثیر آن بر سردی و گرمی هوا در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ بود.



شکل ۲. تصویری از آتشفشان ایافالا در ۲۵ فروردین ۱۳۸۹. فوران از زیر ورقه‌های یخی آغاز می‌شود و ابری از غبار و بخار آب به جو پرتاب می‌کند.

<http://bizarretambourine.blogspot.com/2010/04/volcanoes-revolution/html>

میان‌ستاره‌ای و میان‌سیاره‌ای می‌تواند روی انرژی دریافتی زمین از خورشید تأثیر بگذارد. همچنین تغییرات در نیروی گرانشی همسایه‌های راه‌شیری، مانند ابرهای ماژلان بزرگ و کوچک در ساختار منظومه شمسی و در نتیجه در میزان انرژی دریافتی زمین از خورشید ممکن است بی‌تأثیر نباشد. در حال حاضر شواهد مشاهداتی قابل توجهی که بتوان با تکیه بر آنها نظر داد، وجود ندارد.

عوامل مداری - دوره‌های میلانکوویچ: در نیمه قرن نوزدهم، ۱۸۶۴، جیمز کروئل^۱ نظر داد که یخبندان‌های دور پلیستوسن با تغییرات مدار زمین به دور خورشید مرتبط‌اند. در سال ۱۹۲۲ ایده کروئل توسط میلوتین میلانکوویچ با جزئیات بیشتری شرح داده شد و

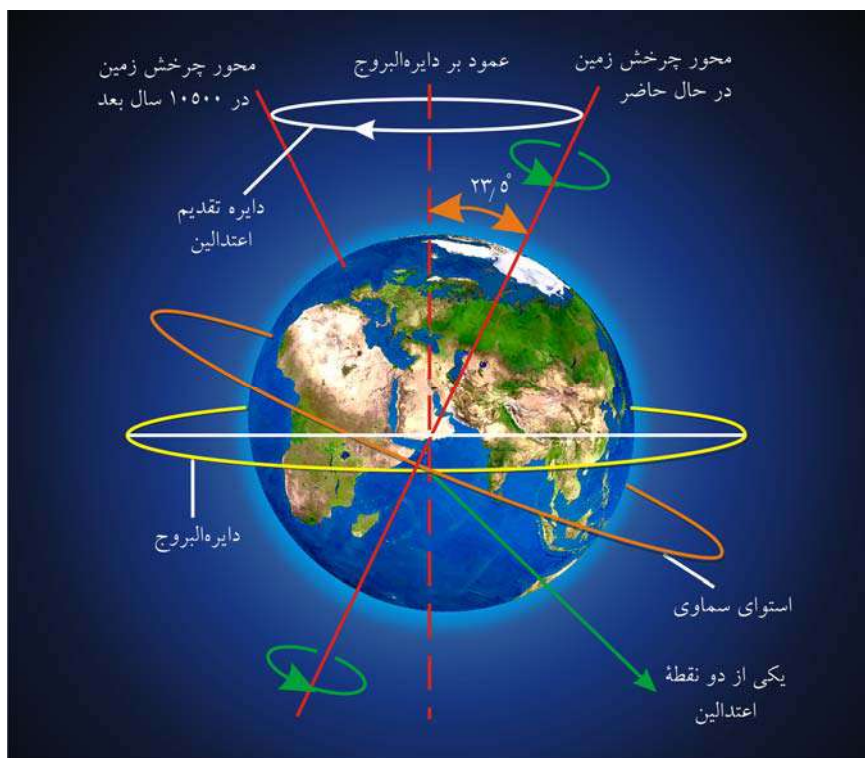
1. James Croll

عنوان نظریهٔ میلانکوویچ به خود گرفت. در بین تغییرات ممکن در مدار زمین سه تغییر مهم عبارتند از تغییر در انحراف محور زمین از راستای عمود بر صفحهٔ مدار زمین، حرکت تقدیمیِ اعتدال‌های بهاری و پاییزی، و تغییر در خروج از مرکز مدار زمین. اثر دوره‌های میلانکوویچ بر میانگین انرژی دریافتی از خورشید، کمتر و بر توزیع مکانی و فصلی آن، بیشتر است. این سه عامل اقلیم را در مقیاس زمانی چند ده‌هزار تا صد هزار سال متأثر می‌کنند.

• **تغییر در انحراف محور زمین:** محور دوران زمین به دور خود با راستای عمود بر مدار زمین به دور خورشید زاویه می‌سازد. اندازه آن در حال حاضر 23.5° درجه است (شکل ۱-۶). این زاویه با دوره تناوب ۴۱ هزار سال بین 21.6° تا 24.5° درجه تغییر می‌کند. این تغییر محور، میانگین تابش دریافتی از خورشید را کم و زیاد نمی‌کند ولی بر توزیع جغرافیایی و فصلی آن اثر می‌گذارد. با افزایش انحراف محور زمین، در نیم‌کرهٔ شمالی در عرض‌های جغرافیایی بالا، تابش خورشیدی در تابستان بیشتر و در زمستان کمتر می‌شود، در عرض‌های جغرافیایی پایین اثر کمتر است. در نیم‌کره جنوبی همین تغییرات در زمستان اتفاق می‌افتد. در شکل ۵ - ۶، منحنی دوم از بالا تغییرات در تابش خورشید به خاطر تغییر در انحراف محور زمین را نشان می‌دهد.

• **تقدیم اعتدالین:** مسیر خورشید در میان ستارگان آسمان اگر از زمین رصد شود یک بیضی است (دیدگاه بطلیمیوسی)، این بیضی را دایره البروج می‌نامند. اگر از خارج از منظومهٔ شمسی به زمین و خورشید نگاه شود همین بیضی مدار زمین دور خورشید است (دیدگاه کپرنیکی و نجوم امروزی). استوای زمین با صفحهٔ دایره البروج موازی نیست و دایره البروج را در دو نقطه قطع می‌کند. در اول بهار، هنگام تحویل سال ایرانی، خورشید در یکی از این دو نقطه است که اعتدال بهاری نامیده می‌شود. در اوایل پاییز خورشید در نقطهٔ مقابل، در اعتدال پاییزی، قرار دارد. به خاطر دوران محور زمین، دو نقطهٔ اعتدال در طول دایره البروج پیش می‌روند. این فرایند را تقدیم اعتدالین می‌نامند (شکل ۱ - ۶). تقدیم اعتدالین دو دورهٔ شبه‌تناوبی ۱۹ هزار و ۲۳ هزار سال؛ با میانگین ۲۱ هزار سال است.

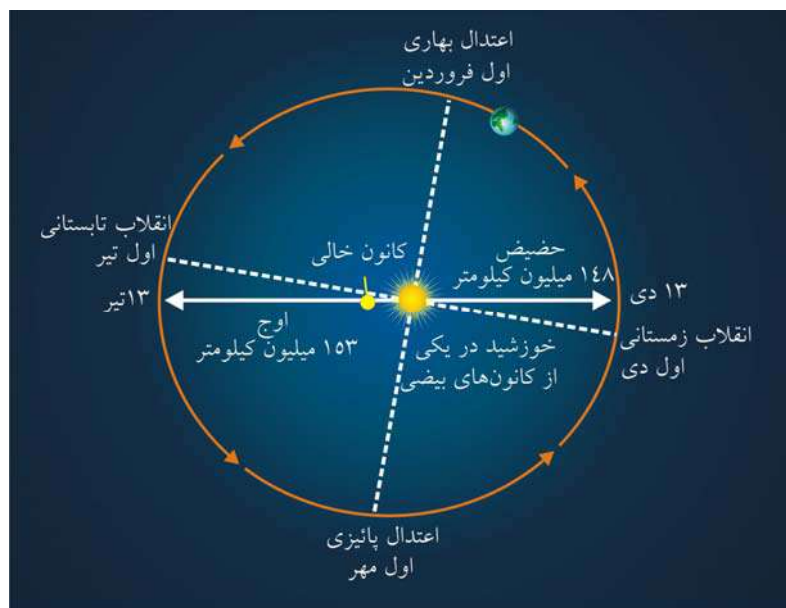
همانند تغییر در انحراف محور زمین، تقدیم اعتدالین نیز خورتاب میانگین سالانه را تغییر نمی‌دهد. ولی توزیع نیم‌کره‌ای و فصلی آن را عوض می‌کند. در حال حاضر در



شکل ۱ - ۶ انحراف محور زمین نسبت به صفحه مدار زمین دور خورشید، مقدار این انحراف در حال حاضر ۲۳/۵ درجه است. در طول ۴۱ هزار سال مقدار آن بین ۲۱/۶ و ۲۴/۵ درجه تغییر می‌کند. http://www.sunflowercosmos.org/gallery/new_gallery_images/1_earth%27s_axial_tilt_0.jpg

تیرماه، شمال محور زمین به طرف خورشید متمایل است و نیم کره شمالی خورتاب بیشتری دریافت می‌کند. در عین حال زمین در اوج مدار و در دورترین فاصله از خورشید است. ده هزار و پانصد سال بعد بر اثر تقدیم اعتدالین، زمین در تیرماه در حضیض و در دی ماه در اوج خواهد بود. بنابراین در نیم کره شمالی تابستان‌ها و زمستان‌ها به ترتیب گرم‌تر و سردتر از امروز خواهند بود، و در نیم کره جنوبی معتدل‌تر از امروز. در شکل ۵ - ۶، منحنی اول از بالا تغییرات در تابش خورشیدی ناشی از تقدیم اعتدالین را نشان می‌دهد.

• **خروج از مرکز:** مدار زمین حول خورشید بیضی است. خروج از مرکز آن، e ،

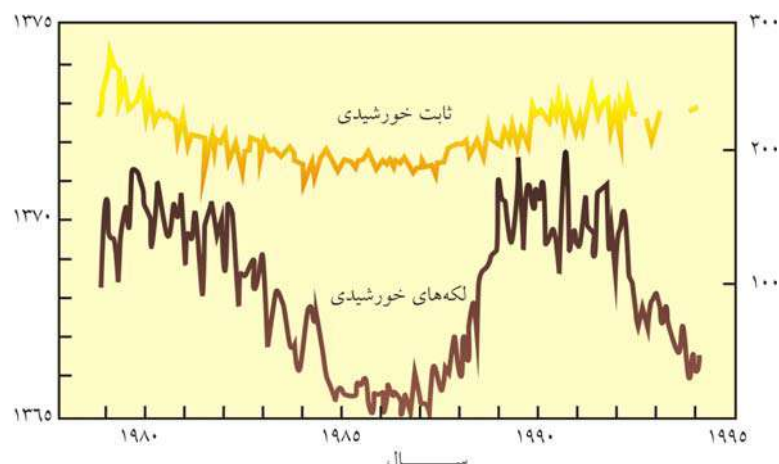


شکل ۲ - ۶ مدار زمین دور خورشید. اوج و حضیض به ترتیب ۱۵۳ میلیون کیلومتر و ۱۴۸ میلیون کیلومتراند. برگرفته از *Ruddiman*

برحسب دورترین و نزدیک‌ترین فاصله زمین از خورشید، به اصطلاح اوج و حضیض خورشید، و به ترتیب x و y ، از رابطه زیر تعریف می‌شود (شکل ۲ - ۶).

$$e = (x - y) / (x + y)$$

خروج از مرکز دایره صفر است. هر اندازه کشیدگی بیضی زیاد شود، خروج از مرکز بزرگ‌تر می‌شود. خروج از مرکز مدار زمین از ۰/۰۵ تا ۰/۰۶ با شبه دوره‌های تناوب ۴۰۰ هزار و ۹۶ هزار سال تغییر می‌کند. مقدار آن در حال حاضر ۰/۰۱۸ است. تغییرات در e میزان کل تابش دریافتی از خورشید را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هر اندازه e بزرگ‌تر باشد تابش در اوج کمتر و در حضیض بیشتر است. اختلاف در خورتاب بین اوج و حضیض، در بیشینه مقدار e ، ممکن است به ۳۰٪ برسد. در شکل ۵ - ۶، منحنی سوم از بالا تغییرات در تابش خورشیدی، ناشی از تغییر در خروج از مرکز مدار زمین، را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶ تغییرات ثابت خورشیدی و لکه‌های خورشیدی، کمینه‌ها و بیشینه‌های یازده ساله در هر دو منحنی آشکار است. برگرفته از Ruddiman

- تغییر در نورافشانی خورشید: لکه‌های سطح خورشید با تناوب تقریباً یازده ساله کم و زیاد می‌شوند. لکه‌ها همراه با طوفان‌های مغناطیسی در خورشید ظاهر می‌شوند. مشاهده‌های ماهواره‌ای نشان می‌دهند به‌هنگام ظهور لکه‌ها، تابش خورشید اندکی زیاد می‌شود. با این‌که دمای لکه‌ها از دمای میانگین سطح خورشید کمتر است، ولی ظاهر شدن لکه‌ها با مشعل‌های درخشان و داغی همراه است که در کل باعث افزایش ثابت خورشیدی^۱ می‌شوند. شکل ۳-۶ تغییرات ثابت خورشیدی و چرخه یازده ساله لکه‌های خورشیدی را نشان می‌دهد. دامنه تغییرات ثابت خورشیدی با پیدا و ناپیدا شدن لکه‌ها کمتر از ۰/۱٪، و معادل ۰/۰۳ درجه تغییر در دمای سطح خورشید است.

اقلیم دوره کواترنری (دو میلیون سال گذشته)

بررسی اقلیم در دوره کواترنری و پیش از آن تنها با استفاده از داده‌های غیرمستقیم از نشان‌گرهای میانجی امکان‌پذیر است. کلاهک‌های یخی قطب‌ها، حلقه‌های درختان،

^۱ ثابت خورشیدی به انرژی تابشی دریافتی از خورشید در تمام طول موج‌ها، در یک مترمربع در بالای جو زمین گفته می‌شود. زمین در فاصله ۱۵۰ میلیون کیلومتری خورشید است. ثابت خورشیدی هم اکنون ۱۳۶۸ وات بر مترمربع است.

رسوبات دریاچه‌ها، پس‌روی و پیش‌روی یخچال‌های طبیعی، پخش گرده گیاهان، ایزوتوپ‌های اکسیژن و هیدروژن و کربن، هوای محبوس در یخ‌های قطبی و لجن‌های دریایی از نشان‌گرهای میانجی شناخته شده هستند.

اطلاعات بدست آمده از یخ‌های گرینلند و جنوبگان اطلاعات ارزشمندی در بر دارند. کلاهک‌های یخی در این دو محل چند هزار متر ضخامت دارند. برف زمان‌های گذشته به تدریج متراکم شده و به صورت یخ به سمت پایین می‌لغزد و در جبهه یخچال‌های قطبی جمع می‌شود. سرانجام لایه‌های پایین به صورت یخ‌های شناور به بیرون راه می‌یابد و یخ‌های ده‌ها و صدها هزار سال پیش در دسترس قرار می‌گیرد. بررسی یخ‌های موجود در اعماق مختلف، اطلاعاتی در مورد شرایط حاکم بر اقلیم در زمان‌های گذشته را فراهم می‌کند.

در حفاری‌هایی که در ایستگاه وستوک^۱ روسیه در جنوبگان انجام شده، از یخ‌های عمق ۳/۵ کیلومتری مغزه‌برداری شده است. یخ موجود در انتهای این حفره به بارش برف در ۴۰۰ هزار سال پیش تعلق دارد. تجزیه و تحلیل حباب‌های هوای موجود در یخ‌ها، شرایط جوی حاکم در زمان تشکیل یخ‌ها را بازگو می‌کنند (شکل ۴ - ۶). ایزوتوپ‌های اکسیژن (قاب ۲ - ۶) و دوتریم نیز درون یخ‌های قطبی وجود دارند. نسبت ایزوتوپ‌ها به دمای متوسط سطح زمین و به دماهای تبخیر و چگالش بخار در ابرها، بستگی دارد.



شکل ۴ - ۶ حباب‌های هوا در یخ‌های گرینلند. حباب‌ها به همراه حلقه‌های درختان، رسوب دریاها و دریاچه‌ها و مرجان‌ها اطلاعاتی از اقلیم گذشته دارند. دانستن این که اقلیم گذشته چگونه و چرا تغییر کرده است به دانستن سازوکار اقلیم زمان حال و آینده کمک می‌کند. برگرفته از Mathez

قاب ۲ - ۶: بازسازی اقلیم دیرینه با استفاده از داده‌های ایزوتوپی اکسیژن

اکسیژن سه ایزوتوپ پایدار ^{16}O ، ^{17}O و ^{18}O دارد. فراوانی آنها در جو زمین به ترتیب: 99.759% ، 0.037% و 0.204% است. نسبت فراوانی ^{18}O به ^{16}O در طبیعت، ۱ به ۵۰۰، به قدر کافی بزرگ است که قابل اندازه‌گیری باشد. به هنگام تبخیر آب از اقیانوس‌ها، ^{16}O به خاطر سبکی آسان‌تر تبخیر می‌شود. بنابراین بخار آب جو و به تبع آن، برف و یخ کلاهک‌های قطبی ^{18}O کمتری، در مقایسه با آب اقیانوس‌ها دارند. پارامتری که کمی و زیادی ^{18}O را در یک نمونه آب، یخ، یا بخار آب نشان می‌دهد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{نمونه}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{استاندارد}}} - 1 \right) \times 1000$$

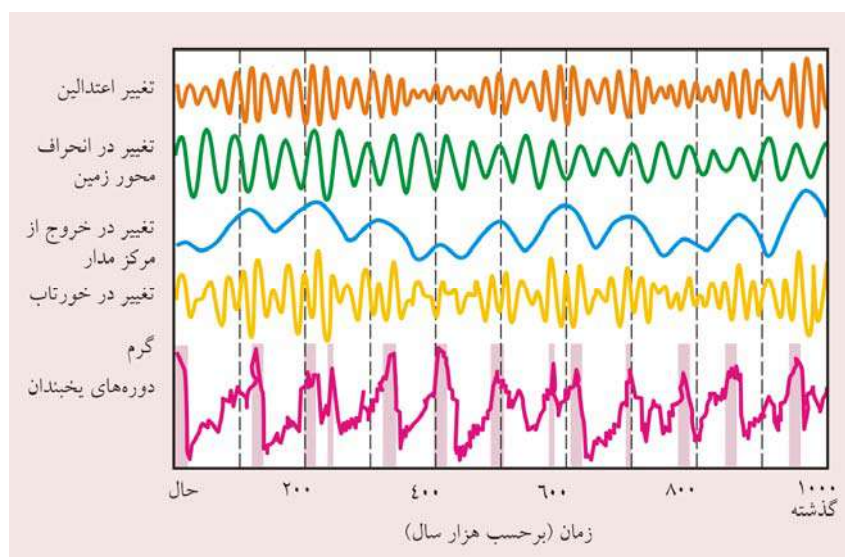
که در آن زیرنگاشت استاندارد اشاره به نسبت $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ در آب متوسط اقیانوس دارد. این نسبت استاندارد در سال ۱۹۸۶ توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی برابر $10^{-3} \times 20052$ اعلان شده است و به نام استاندارد وین^۱ شناخته می‌شود.

کمی $\delta^{18}\text{O}$ ، مثلاً در یکی از لایه‌های کلاهک قطبی به معنای زیادی آن در آب اقیانوس در زمان تشکیل آن لایه یخی است. دانستن آن می‌تواند میزان یخ موجود در لایه مورد نظر را بدهد. $\delta^{18}\text{O}$ لایه‌های یخ مستقیماً از نمونه‌های یخی بدست می‌آید. $\delta^{18}\text{O}$ آب اقیانوس‌ها در زمان‌های پیشین از بررسی بازمانده‌های مرجان‌ها و فسیل‌های پلانکتون‌ها و جانوران کوچک دریایی در کف دریاها بدست می‌آید. تاریخ‌گذاری رسوبات دریایی و مرجان‌ها، به نوبه خود، به کمک کربن ^{14}C انجام می‌گیرد. مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ در یخ‌ها و رسوبات دریایی به دمای آب دریا نیز بستگی دارد. بنابراین بررسی داده‌های $\delta^{18}\text{O}$ اطلاعاتی در مورد دمای سطحی دریاهای گذشته نیز بدست می‌دهد.

1. Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW)

اقلیم دور پلیستوسن (دو میلیون تا ۱۰ هزار سال گذشته)

دور پلیستوسن عموماً دور یخبندان‌ها و میان‌یخبندان‌هاست که در فواصل زمانی نسبتاً منظم (از مرتبه ۱۰۰ تا ۱۲۰ هزار سال) ظاهر شده و از بین رفته‌اند. در شکل ۵ - ۶، منحنی پنجم از بالا، توالی این دوره‌های سرد و گرم را در یک میلیون سال گذشته نشان می‌دهد. برای گذشته‌های دورتر از میلیون سال اطلاعات قابل اعتماد وجود ندارد. شروع و



شکل ۵-۶ تغییر در خورتاب ناشی از دوره‌های میلانکوویچ در عرض جغرافیایی ۶۵ درجه شمالی، در یک میلیون سال گذشته. سه نمودار اول از بالا، به ترتیب اثرات تقدیم اعتدالین، انحراف محور زمین، و تغییر در خروج از مرکز مدار زمین را نشان می‌دهند. نمودار چهارم ترکیب سه اثر یاد شده است. نمودار پنجم، منحنی تغییرات دما، از نشان‌گرهای میانجی، در اقلیم دور پلیستوسن است. در این نمودار فاصله‌های زمانی سفید، از مرتبه ۱۰۰ هزار سال، یخبندان‌ها هستند. فاصله‌های سایه خورده رنگی، از مرتبه ده بیست هزار سال، دوره‌های گرم میان‌یخبندان‌ها هستند. بین بیشینه‌ها و کمینه‌های نمودارهای چهارم و پنجم همبستگی معنادار وجود دارد.

http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Milankovitch_Variations_png

گسترش یخبندان‌ها کند و طولانی است، ولی پایان آن‌ها سریع است. میان‌یخبندان‌ها عموماً کوتاه‌مدت‌اند.

نحوه تشکیل یخبندان‌ها به اجمال به شرح زیر است: بر اثر سرد شدن دوره‌ای زمین و بازخوردهای مثبت و منفی آن روی عوامل دیگری که به‌خوبی معلوم نیستند، برف و یخ به تدریج در مناطق قطبی و عرض‌های جغرافیایی بالا انباشته می‌شود. سطح آب دریاها پایین می‌رود. رویدنی‌های چوبی در عرض‌های جغرافیایی بالا به تدریج کم می‌شوند و جای خود را به تندرها می‌دهند. جریان‌های اقیانوسی به‌خاطر تغییر در شوری آب محدود و بعضاً مختل می‌شوند. زمانی که انباشت یخ از حد گذشت، ورقه‌های یخی بر اثر فشار به

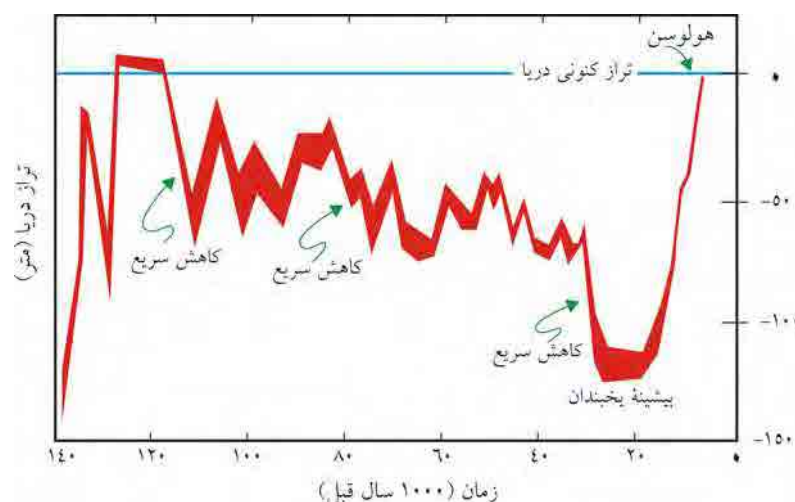
بستر خود به راه می‌افتند و احیاناً شکسته شده و در اقیانوس‌ها به حرکت در می‌آید. این مرحله کم و بیش پایان یخبندان و آغاز دوره گرم است. سطح دریاها شروع به بالا آمدن می‌کند. بر اثر آب شدن یخ‌های شناور، شوری سطح دریاها کم می‌شود و جریان‌های اقیانوسی گسترش می‌یابند. یخبندان جای خود را به میان‌یخبندان می‌دهد.

شواهد مشاهداتی پیدایی و ناپیدایی دوره‌های سرد و گرم در درجه نخست از تغییرات $\delta^{18}\text{O}$ (قاب ۲ - ۶) بدست می‌آیند. $\delta^{18}\text{O}$ نمونه‌های یخی قطب‌ها و گرینلند اطلاعات خوبی تا ۴۰۰ هزار سال پیش بدست می‌دهند. برای گذشته‌های دورتر از $\delta^{18}\text{O}$ حاصل از بسترهای مرجانی زمان‌های پیشین و اجساد انباشته شده پلانکتون‌ها و آبریان دیگر در کف اقیانوس‌ها استفاده می‌شود.

سبب گرم و سرد شدن زمین قاعدتاً باید در افزایش گازهای گل‌خانه‌ای (در درجه اول کربن‌دی‌اکسید و متان) جستجو شود. نمودار چهارم از بالا در شکل ۵ - ۶، میانگین تغییرات در خورتاب ناشی از چرخه‌های میلانکوویچ است. بین این نمودار و نمودار پنجم، که آمد و رفت یخبندان‌ها را نشان می‌دهد، هم‌بستگی معنی‌داری دیده می‌شود. ولی معلوم شده است که تغییر در خورتاب نمی‌تواند به تنهایی عامل اصلی پیدایی و ناپیدایی یخبندان‌ها شود. لازم است بازخورد مثبت این چرخه‌ها روی زیست‌بوم‌ها (مخصوصاً گسترش جمعیت پلانکتون‌ها در دوره‌های گرم) و به تبع آن تغییر در چرخه‌های کربن و متان به حساب بیاید. در حال حاضر مدل‌های اقلیم توانایی بازسازی اقلیم پلیستوسن را با دقتی که نشان‌گرهای میانجی نشان می‌دهند، ندارند.

اقلیم آخرین یخبندان (۱۲۰ هزار تا ۲۰ هزار سال پیش)

شکل ۶ - ۶ تراز دریا، از ۱۴۰ هزار سال گذشته تا زمان حاضر را نشان می‌دهد. فاصله زمانی ۱۲۰ هزار سال تا ۲۰ هزار سال پیش، آخرین دوره یخبندان است. پایین و بالا رفتن سطح دریا، به ترتیب متناسب با سرد شدن و گرم شدن اقلیم است. سه دوره سریع افت تراز دریا و سرد شدن زمین در ۱۱۵ هزار، ۸۵ هزار، و ۳۰ هزار سال پیش دیده می‌شود. در آخرین دوره، تراز دریاها ۱۲۲ متر پایین‌تر از تراز کنونی بود. دریای برینگ خشکی و دو قاره آمریکا و آسیا به هم پیوسته بودند. جزایر امروزی نزدیک به کناره‌ها به قاره‌ها چسبیده بودند و سطح خشکی‌ها بسیار وسیع بود. گفته شده است دمای زمین بین ۶ تا ۱۰ درجه



شکل ۶-۶ تغییر تراز دریاها در آخرین دوره یخبندان. سه کاهش سریع مهم در ۱۱۵ هزار سال، ۸۵ هزار سال و ۳۰ هزار سال پیش در شکل دیده می‌شوند. پهنای نمودار میزان عدم قطعیت را نشان می‌دهد.

http://web.me.com/uriarte/Earths_Climate/8._Climatic_Variability_during_the.html

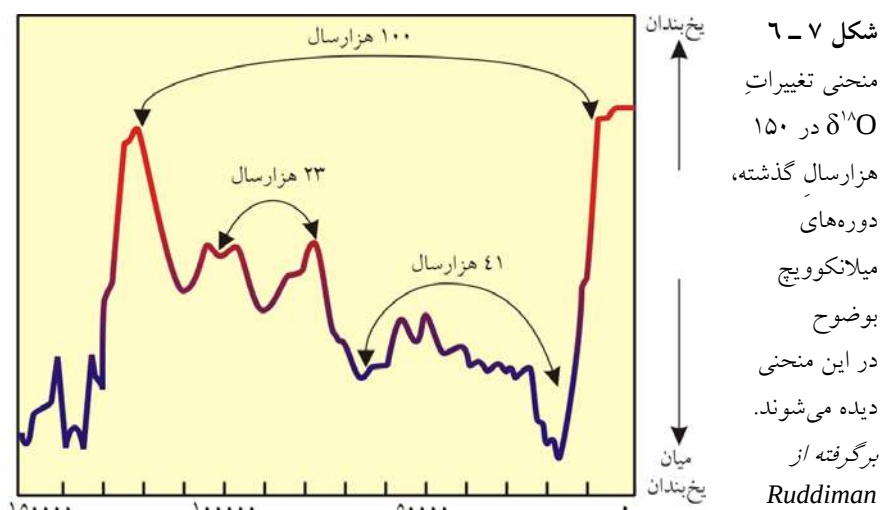
سردتر از حالا بود.

شکل ۷-۶ تغییرات $\delta^{18}\text{O}$ را در ۱۵۰ هزار سال پیش نشان می‌دهد. بین دو شکل ۶-۶ و ۶-۷ هم‌بستگی بسیار خوبی وجود دارد و همدیگر را تأیید می‌کنند. چرخه‌های میلانکوویچ در شکل ۷-۶ علامت‌گذاری شده‌اند. در طول آخرین یخبندان شش دوره نسبتاً سرد (کمینه‌های نمودارهای شکل‌های یاد شده) و چندین دوره گرم‌تر (پیشینه‌های نمودارها) دیده می‌شوند. دوره‌های سرد را رخدادهای هاینریش^۱ می‌گویند. گفته شده است این رخدادها ناشی از شکسته شدن ورقه‌های یخی و شناور شدن مقادیر بسیار زیادی یخ در دریاها و سیر آنها تا مسافت‌های دور بوده است.

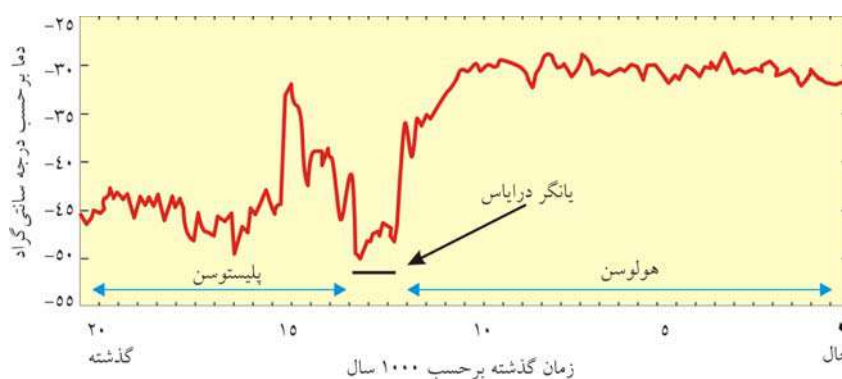
اقلیم هولوسن (ده هزار سال گذشته)

شکل ۸-۶ تغییرات دمای گرینلند مرکزی را در ۲۰ هزار سال گذشته نشان می‌دهد و

1. Heinrich



نمونه‌ای از اقلیم حاکم بر زمین در دور هولوسن (۱۰ هزار سال گذشته) و بخشی از دور پلیستوسن (از دو میلیون تا ۱۰ هزار سال گذشته) است. زمین در ۲۰ هزار سال پیش، پس از ۱۰۰ هزار سال یخبندان گرم شد و ورقه‌های یخی شروع به ذوب شدن کردند. این گرم شدن به مدت تقریباً ۷ هزار سال ادامه یافت، تا این‌که در ۱۲۸۰۰ سال پیش زمین دوباره و



شکل ۶-۸ تغییرات دما در گرینلند میانی در ۲۰ هزار سال گذشته. دوره سرد یانگر درایاس، در فاصله زمانی ۱۲۸۰۰ تا ۱۱۶۰۰ سال پیش، مرز بین دور پلیستوسن و هولوسن است. اقلیم هولوسن (۱۰ هزار سال گذشته) نسبتاً گرم است.

<http://oceanworld.tamu.edu/resources/environment-book/abruptclimatechangeE.html>



شکل ۹ - ۶ گیاه درایاس تندرا.
<http://www.ldeo.columbia.edu>

به طور ناگهانی به شرایط شبه‌یخبندان (یعنی سرد، خشک و بادی) برگشت و برای ۱۲۰۰ سال در این وضعیت باقی ماند. این تغییر ناگهانی اقلیم به نام یانگر درایاس^۱ شناخته می‌شود. نام‌گذاری از گیاهی به نام درایاس تندرا^۲ گرفته شده است که سرمای این دور را دوام آورد و نمونه‌های آن در اسکاندیناوی یافت می‌شود (شکل ۹ - ۶). آثار یانگر درایاس در مغزه‌های یخی گرینلند به خوبی دیده می‌شود. یانگر درایاس مرز بین پلیستوسن و هولوسن است. در این مدت یخ‌های نیم‌کره شمالی تا عرض جغرافیایی ۴۵ درجه گسترش یافت و سرمای شدیدی به خصوص در حوالی قطب شمال حاکم شد. شکل ۷ - ۶ که تغییرات ایزوتوپ ^{18}O موجود در آب‌های سطحی نیم‌کره شمالی را نشان می‌دهد، و شکل ۸ - ۶ که تغییرات دما در گرینلند میانی است، هر دو سرد شدن اطلس شمالی در ۲۰ هزار سال گذشته را نشان می‌دهند.

درباره پیدایش دوره یانگر درایاس گفته می‌شود، در سال‌های بعد از یخبندان آب زیادی در اثر آب شدن ورقه‌های یخی لورن‌تاید^۳ آمریکای شمالی ابتدا به رودخانه می‌سی‌سی‌پی و سپس به خلیج مکزیک سرازیر شد. در اثر ریزش این همه آب به دریا، مقدار زیادی از کربن دی‌اکسید جو در آب اقیانوس حل شد. احتمالاً سردی دوره یانگر درایاس در اثر کاهش کربن دی‌اکسید در جو بوده است.

1. Younger Dryas

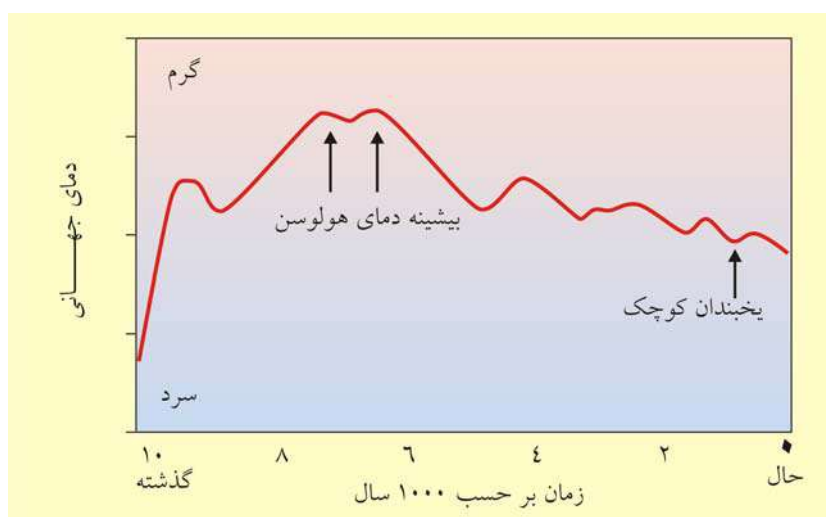
2. Dryas Octopetala

3. Laurentide

هولوسن میانی: دما از هولوسن پایینی تا میانی، ۱۰ هزار تا ۴۵۰۰ سال پیش، نسبت به زمان‌های بعد گرم‌تر بوده است (شکل ۱۰ - ۶). بیشینه دمای هولوسن میانی ۶ تا ۷ هزار سال پیش رخ داده است. پیامد گرمی هولوسن میانی گسترش پوشش گیاهی در عرض‌های جغرافیایی بالاتر و کاهش ارتفاع یخچال‌های کوهستانی بوده است. دمای میانگین هولوسن ۱ تا ۲ درجه گرم‌تر از زمان حاضر بوده است.

افزایش دمای زمین روی الگوی باران‌های موسمی^۱ در آسیا و آفریقا هم تأثیر گذاشته است. بازسازی مسیر رودخانه‌های قدیمی و پوشش‌های گیاهی قدیمی نشان می‌دهد جاهایی که در نیم‌کره شمالی در آخرین یخبندان خشک بودند، در هولوسن میانی بسیار مرطوب و پربارش شدند.

عصر یخبندان کوچک: در فاصله سال‌های ۱۴۵۰ تا ۱۸۹۰ میلادی زمین دوباره به شرایط سردتر برگشت. این بازه زمانی عصر یخبندان کوچک نام دارد. نشان‌گرهای میانجی، در سده‌های ۱۷ و ۱۹، دو دوره اصلی سرما را نشان می‌دهند. در سده‌های ۱۶ و



شکل ۱۰ - ۶ تغییرات دما در دور هولوسن. بیشینه دما در ۶ تا ۷ هزار سال پیش روی داده است. یخبندان کوچک در فاصله ۱۴۵۰ تا ۱۸۹۰ میلادی بوده است. برگرفته از *Buchdahl*

۱۸ میلادی دمای زمین افزایش نسبی داشته است. در زمان‌هایی که یخ در دریا‌های اطلس شمالی گسترش می‌یافت، یخ‌زدگی زمستانی رودخانه‌ها در اروپا، آسیا و آمریکا نیز پیشرفت می‌کرد.

سازوکار اقلیم هولوسن

علت نوسانات صدساله و هزارساله اقلیم هولوسن به طور دقیق معلوم نیست. از سه عامل نام برده شده است: آتشفشان‌ها، تغییرات در خورتاب، و دینامیک جریان‌های اقیانوسی. مطالعه آتشفشان‌های سده‌های گذشته نشان می‌دهد که بعد از هر فوران بزرگ، زمین به طور نسبی خنک شده است. سبب آن افزایش هواویزهای جو است.

بین میزان اسیدی شدن مغزه‌های یخی گرینلند و فعالیت‌های آتشفشانی ارتباط مستقیم وجود دارد. هر اندازه میزان گوگرد در جو بیشتر باشد، بارش‌ها اسیدی‌ترند. بنابراین از روی مغزه‌های یخی می‌توان اطلاعاتی در مورد فوران‌های آتشفشانی بدست آورد. در داده‌های بدست آمده از مغزه‌های یخی، مقادیر زیاد سولفوریک‌اسید به فوران‌های آتشفشانی، و مقادیر کم آن به پاسخ سامانه اقلیم به عوامل دیگر نسبت داده می‌شود (شکل ۱۱ - ۶).

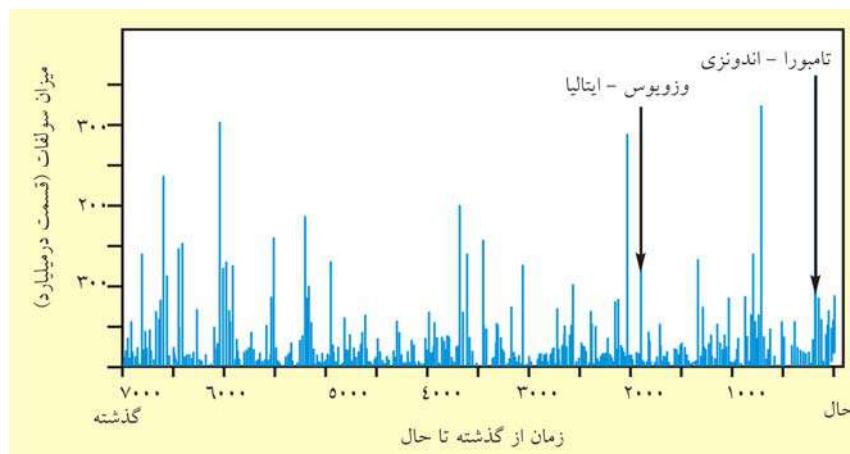
تغییر در تعداد و وسعت لکه‌های خورشیدی، قطر خورشید و کل انرژی تابشی خورشید از عوامل تغییر در تابش خورشیداند. در طول عصر یخبندان کوچک، دو کمینه در فعالیت لکه‌های خورشیدی دیده شده است. کمینه ماندرا^۱ در فاصله سال‌های ۱۷۱۵ - ۱۶۴۵ و کمینه اسپورر^۲ که در فاصله سال‌های ۱۵۳۴ - ۱۴۵۰ روی داده است.

اقلیم در عصر انقلاب صنعتی

ثبت دستگاهی داده‌های هواشناسی کم و بیش از دو سده پیش معمول شده است و هر روز وسیع‌تر و دقیق‌تر می‌شود. شکل ۱۲ - ۶ دمای میانگین زمین را از سال ۱۸۵۰ تا پایان سده بیستم نشان می‌دهد. در طول این دوره دمای سطح زمین و لایه‌های پایین گشت‌کره ۰/۶ درجه افزایش یافته است. روند کلی گرم شدن آشکار است، ولی یکنواخت نیست. دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ میلادی سال‌های گرمی را پشت سر گذاشته‌اند. سال ۱۹۹۸ گرم‌ترین

1. Maunder Minimum

2. Spörer Minimum



شکل ۱۱ - ۶ تغییرات اسیدیته مغزه‌های یخی گرینلند. اثر آتش‌فشان‌های وزویوس^۱، ایتالیا، در ۷۹ و تامبورا^۲، اندونزی، در ۱۸۱۵ آشکارا دیده می‌شود. برگرفته از Mathez

سال و هشت ماه اول این سال گرم‌ترین ماه‌های این دوره است. در دهه‌های ۵۰ و ۶۰ میلادی چند دوره سرمای نسبی دیده می‌شود.

شاخص‌های دیگری همچون تغییر دما در چاهک‌های نمونه‌برداری^۳ و دمای لایه‌های مختلف دریاها، کاهش پوشش برف روی زمین، و آب شدن یخچال‌های طبیعی از دلایل محکم دیگر برای گرم شدن زمین‌اند.

در سی سال گذشته مشاهدات ماهواره‌ای نقش مهمی در گسترش دانش اقلیم و هواشناسی بازی کرده است. مزیت ماهواره‌ها ثبت خودکار و بی‌وقفه داده‌ها با پوشش جهانی آنهاست. ولی از عمر آنها بیست سال بیشتر نمی‌گذرد.

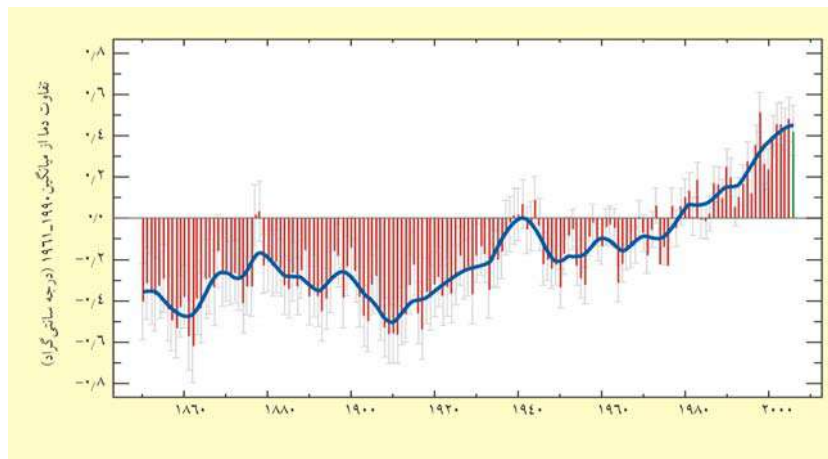
گرم شدن زمین از نظر مکانی یکنواخت نبوده است. برای مثال افزایش دما در خشکی - های نیم‌کره شمالی در عرض‌های جغرافیایی پایین، کمتر، و در عرض‌های جغرافیایی میانی و بالا بیشتر بوده است. برخی از مناطق اقیانوس اطلس شمالی هم با کاهش دما مواجه بوده‌اند. بعضی از تغییرات دمایی منطقه‌ای اخیر با نوسانات جوی - اقیانوسی، مانند نوسان اطلس شمالی^۴ ارتباط داشته‌اند.

1. Vesuvius

2. Tombora

3. Bore holes

4. North Atlantic Oscillation (NAO)



شکل ۱۲- ۶ تغییرات دمای میانگین جهانی سطح زمین در طول ۱۶۰ سال گذشته. دمای میانگین سال‌های ۱۹۶۱-۹۰ مینا گرفته شده است. میله‌های رنگی، متوسط هر سال را نشان می‌دهند؛ خط آبی منحنی سالانه صاف شده برای نشان دادن تغییرات ده ساله است. عدم قطعیت‌ها با ۹۵ درصد اطمینان نشان داده شده‌اند. (قاب ۳- ۶)

http://serc.carleton.edu/images/research_education/corals/hockey_stick.png

قاب ۳- ۶: توضیح شکل ۱۲- ۶

شکل ۱۲- ۶ میانگین دمای سطح زمین و هوای نزدیک به آن را در کل زمین نشان می‌دهد. روی تغییرات محلی و فصلی متوسط‌گیری شده است. بنابراین تغییر چند درجه‌ای در دمای میانگین نشان‌دهنده تغییر قابل ملاحظه‌ای در انرژی گرمایی بدام افتاده در لایه‌های سطحی زمین، اقیانوس‌ها و جو است. تغییرات دمای متوسط از تلفیق گزارش‌های مختلف از دمای سطح زمین و از سطح دریاها به دست آمده‌اند. داده‌های زمینی از ایستگاه‌های هواشناسی موجود در نقاط مختلف و در طول ۱۶۰ سال گذشته گرفته شده‌اند. داده‌های سطح اقیانوس‌ها و دریاها از بررسی ۶۰ میلیون مشاهده گزارش شده کشتی‌های تجاری تخمین زده شده‌اند. برای تلفیق مشاهدات زمینی و دریایی، سطح زمین به مربع‌هایی به طول و عرض جغرافیایی یک درجه در یک درجه تقسیم می‌شود. میانگین زمانی برای هر مربع بدست می‌آید و سپس میانگین میانگین‌های زمانی همه مربع‌ها حساب می‌شود و به عنوان میانگین جغرافیایی برای کل زمین منظور می‌شود.

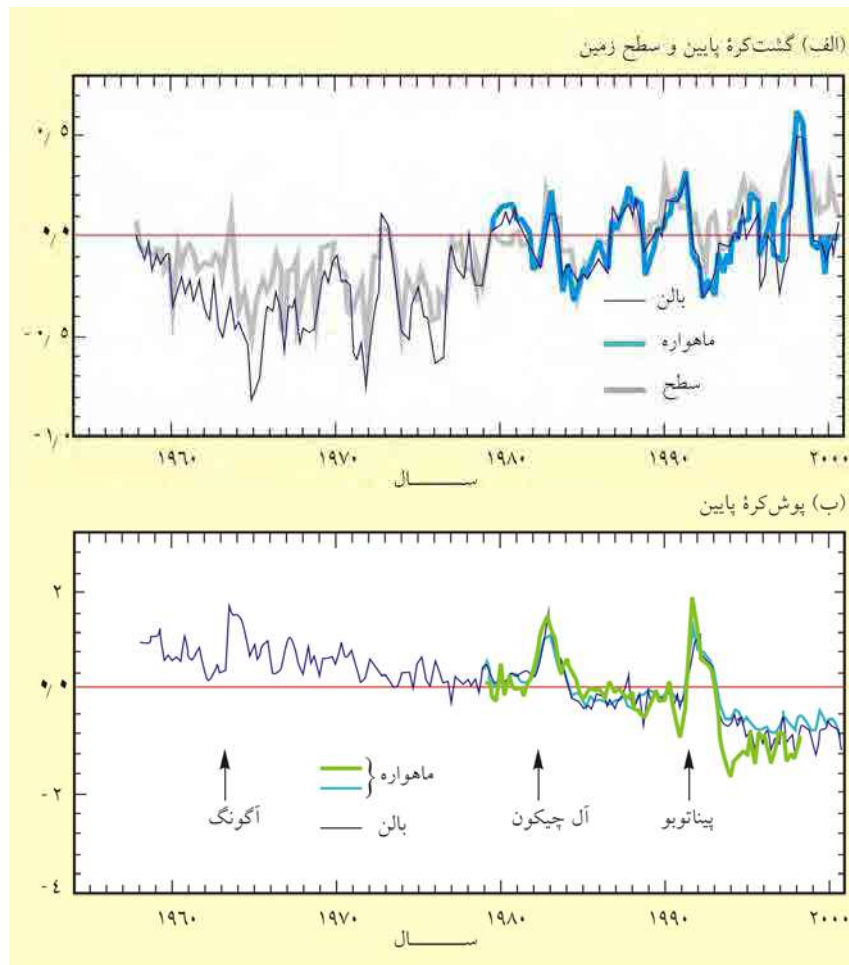
از ویژگی‌های جالب افزایش دما در چند دهه اخیر افزایش کمینه‌های شبانه‌روزی دما به میزان دو برابر بیشینه‌ها است. علت محتمل، علاوه بر افزایش گازهای گل‌خانه‌ای، افزایش پوشش‌های ابری است. افزایش ابر سبب کاهش خورتاب در سطح زمین در ساعات روز و کاهش فرار تابش فروسرخ زمینی در طول شب می‌شود.

انتظار می‌رود افزایش دمای زمین منجر به افزایش جهانی بارندگی شود، در نیم‌کره شمالی افزایش دما در عرض‌های میانی و بالاتر اغلب با افزایش در بارندگی‌ها همراه بوده است. بخشی از گرم‌شدگی مورد بحث می‌تواند طبیعی باشد. ولی به نظر می‌رسد آنچه که در ۵۰ سال گذشته اتفاق افتاده خارج از روال طبیعی است.

گرم شدن مورد بحث، مربوط به سطح زمین و لایه‌های پایین گشت‌کره است. پوش‌کره (ارتفاع ۱۰ - ۳۰ کیلومتری جو) در دو دهه اخیر سرد شده است (شکل ۱۳ - ۶). پژوهشگران سرد شدن پوش‌کره را به کاهش ازن در پوش‌کره و افزایش کربن‌دی‌اکسید در گشت‌کره نسبت می‌دهند، که اولی جذب تابش فرابنفش را در بالا کاهش می‌دهد و دومی از گذر تابش فروسرخ زمینی از پایین به بالا جلو می‌گیرد.

یکی دیگر از منابع اطلاعاتی در بررسی تغییرات اقلیم، تغییر در تراز آب دریاها است. در طول سده گذشته سطح آب دریاها ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر بالا آمده است. انبساط گرمایی آب اقیانوس به دلیل افزایش دمای میانگین زمین (حدود ۷ سانتی‌متر) و آب شدن یخچال‌ها در سده گذشته (حدود ۴ سانتی‌متر) از علت‌های اصلی این بالا آمدگی هستند. سهم آب شدن یخ‌های گرینلند و کلاهک‌های یخی قطب جنوب به‌طور دقیق معلوم نیست، ولی قابل ملاحظه است.

مادام که گازهای گل‌خانه‌ای در جو حضور دارند دمای متوسط زمین به افزایش خود ادامه خواهد داد. به دلیل تغییرات طبیعی، دوره‌هایی از کاهش دما نیز محتمل است. در هر حال به عهده دانشمندان و پژوهشگران است که در سال‌های آینده سهم انسان و عوامل طبیعی را در تغییر اقلیم دقیق‌تر از آن چه که در حال حاضر معلوم است تعیین کنند و پیش‌نگری‌های اقلیم سده حاضر و سده‌های آینده را با دقت بیشتر ترسیم کنند.



شکل ۱۳ - ۶ انحراف دمای میانگین جهانی مشاهده شده از متوسط دمای سال‌های ۱۹۹۰ - ۱۹۷۹ (الف) برای گشت‌کره پایین بر اساس مشاهدات توسط بالن، ماهواره، و اندازه‌گیری‌های زمینی. (ب) برای پوش‌کره پایین توسط بالن و ماهواره. در سال‌هایی که سطح زمین و گشت‌کره گرم می‌شدند، پوش‌کره رو به سردی می‌رفته است. آتشفشان‌های آگونگ^۱، آل‌چیکون^۲ و پیناتوبو سطح زمین و گشت‌کره را خنک و پوش‌کره را گرم کرده‌اند. برگرفته از *Houghton*

1. Agung

2. El Chichon

مرجع‌ها:

- IPCC. *Climate Change 2007, The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, 2007
- Houghton, J. *Global Warming, The Complete Briefing*, Fourth Edition, Cambridge University Press, 2009
- Mathez, E. A. *Climate Change: The Science of Global Warming and Our Energy Future*, Columbia University Press, 2009
- Lutgens, F. K., Tarbuck, E. J. *The Atmosphere* Denman, K. L., Ana Miyake, J. *Phys. Oceanography* 3, 185, 1973 (see also Mathez)
- Buchdahl, J., *Global Climate Change Student Guide*, Manchester Metropolitan University, 1999
- http://web.me.com/uriarte/Earths_Climate/Earths_Climate_History.html
- http://serc.carleton.edu/research_education/corals/climatemain.html
- http://bcs.whfreeman.com/ruddiman/con_index.htm?01
- <http://daneshnameh.roshd.ir>
- <http://geoscience.blogfa.com/8610.aspx>
- <http://www.ldeo.columbia.edu/res/div/ocp/arch/examples.shtml>
- Earth's Climate: Past and Future by William F. Ruddiman
- www.wikipedia.org

بخش ۷

اقلیم سده بیست و یکم

در بخش‌های پیشین چرایی و چگونگی تغییرات اقلیم بررسی شد. در این بخش به پیامدهای تغییر اقلیم و تأثیر آن بر جوامع انسانی و زیست‌بوم‌ها پرداخته می‌شود. کوشش خواهد شد تا آنجا که از شبیه‌سازی‌های مدل‌های اقلیم بر می‌آید، اقلیم محتمل سده ۲۱ و سده‌های دورتر ترسیم شود.

هر گونه داوری درباره اقلیم‌های آینده مستلزم آگاهی از نشر جهانی و منطقه‌ای گازهای گل‌خانه‌ای در آینده است. روند افزایش جمعیت جهان، دانش و فناوری آینده، نوع و میزان انرژی لازم برای توسعه پایدار جوامع آینده، توافق یا عدم توافق بین دولت‌ها برای سازگاری با اقلیم و کاهش آثار ناخواسته آن در آینده، همه بر این آگاهی اثر خواهد گذاشت. سناریوهای محتمل نشر گازهای گل‌خانه‌ای، با در نظر گرفتن همه آنچه که در آینده ممکن است اتفاق بیفتد، توسط آی‌پی‌سی‌سی پیشنهاد شده‌اند. شرح کوتاهی از این سناریوها که به نام سِرِس^۱ شناخته شده‌اند در پیوست ج آمده است. خواندن پیوست ج در

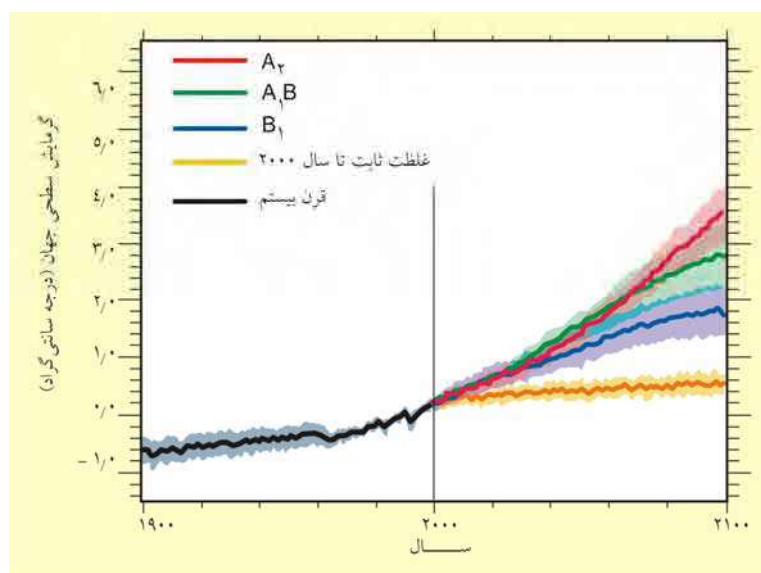
1. SRES (Special Report on Emission Senarios)

این مرحله برای فهم بهتر بقیه مطالب این بخش توصیه می‌شود.

گرمایش زمین در سده ۲۱

در شکل ۱ - ۷ تغییرات دمای میانگین سطح زمین و لایه‌های بالایی اقیانوس‌ها از سال ۱۹۰۰ تا ۲۱۰۰ آمده است. دمای میانگین سال‌های ۱۹۹۹ - ۱۹۸۰ مبنا گرفته شده است. داده‌های سده ۲۰ اندازه‌گیری‌های دستگاهی‌اند. به تدریج که به پایان سده می‌رسیم دقت اندازه‌گیری‌ها بهتر می‌شود. در طول این سده دمای میانگین ۰/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش داشته است.

داده‌های سده ۲۱ از مدل‌های اقلیم برای سناریوهای مختلف نشر به دست آمده‌اند. نظر به تعداد ناشناخته‌های سده‌ای که هنوز در ابتدایش هستیم میزان خطا در پیش‌بینی‌های مدل‌ها قابل توجه است. با توجه به این یادآوری، سناریوهای مختلف نشر آهنگ گرم شدن



شکل ۱ - ۷ منحنی تغییرات دمای سطح زمین. داده‌های سال‌های ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۰ اندازه‌گیری‌های دستگاهی است. منحنی‌های رنگی متعلق به سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۱۰۰، شبیه‌سازی برای سناریوهای مختلف نشر سِرْس‌اند. سایه‌های اطراف منحنی‌ها میزان خطاهاست. برگرفته از آی‌پی‌سی‌سی، گزارش چهارم، ۲۰۰۷.

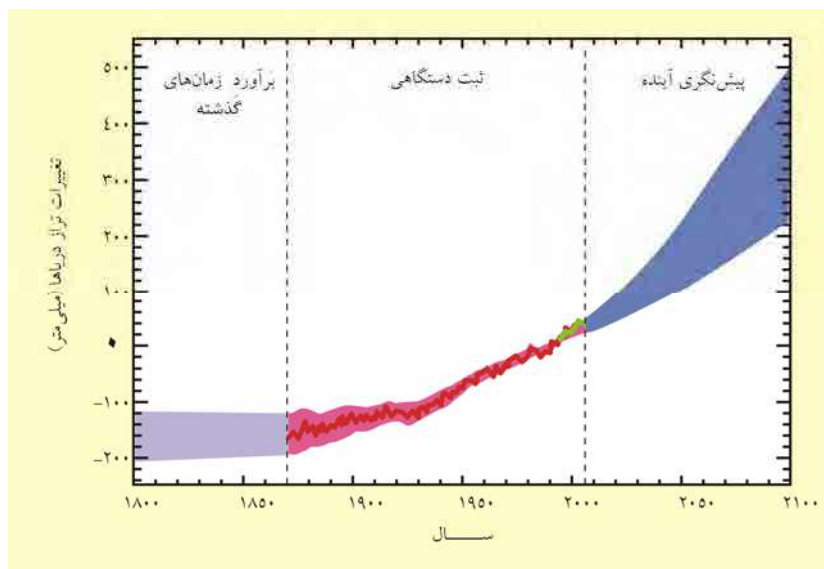
زمین را کم و بیش ۰/۲ درجه در هر ده سال پیش‌بینی می‌کنند. حتی اگر نشر گازهای گل-خانه‌ای و هواویزها در سطح سال ۲۰۰۰ ثابت نگاه داشته شود، باز زمین با آهنگ ۰/۱ درجه در ده سال گرم خواهد شد. جزئیات بیشتر در پیوست ج آمده است.

تراز آب دریاها در سده ۲۱

در شکل ۲ - ۷ بالا آمدگی تراز میانگین آب دریاها از سال ۱۸۰۰ تا ۲۱۰۰ آمده است. تراز میانگین سال‌های ۱۹۹۹ - ۱۹۸۰ مبنای گرفته شده است. داده‌های پیش از ۱۸۷۰ اندازه‌گیری غیرمستقیم از نشان‌گرهای میانجی است. خطای اندازه‌گیری‌ها نسبتاً زیاد است. داده‌های ۱۹۹۵ - ۱۸۷۰ از جزر و مدسنج‌ها است و قابل اعتمادترند. داده‌های ۲۰۰۸ - ۱۹۹۵ داده‌های ماهواره‌ای اند و خطای کمی دارند. روی هم رفته در طول سده بیستم تراز آب دریاها نزدیک به ۲۰۰ میلی‌متر بالا آمده است. انبساط گرمایی آب، آب شدن یخچال‌های کوهستانی و ورقه‌های یخی جنوبگان، و ورود رسوبات رودخانه‌ای به دریاها علل عمده بالا آمدن آب دریاها هستند.

بخش سایه‌دار شکل، مربوط به سده ۲۱، از مدل‌سازی اقلیم آینده برای گروه سناریوهای نشر A۱B سرس است. این گروه از سناریوها دنیای آینده‌ای تجسم می‌کنند که در آن جمعیت جهان در نیمه‌های سده ۲۱ به بیشینه خود برسد و از آن پس شروع به کم شدن کند، فناوری‌های کارآتر و جدیدتر به وجود آیند و مورد استفاده همگان قرار گیرند، همکاری‌های منطقه‌ای و بین‌المللی تحقق یابند و گونه‌ای عدالت اجتماعی و جهانی به وجود آید، و بالاخره در قسمت مربوط به تولید انرژی بین استفاده از منابع فسیلی و غیرفسیلی تعادل وجود داشته باشد (به پیوست ج نگاه شود).

بسته به این که رشد دنیای سده ۲۱ چگونه باشد، سطح دریاها ممکن است بین ۴۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر نسبت به آنچه که در سده ۱۹ و ابتدای سده ۲۰ بوده است بالا آید. بالا آمدگی آب در همه جا یکسان نخواهد بود و اثرات آن در مناطق مختلف به شرایط منطقه بستگی خواهد داشت. انبساط گرمایی حدود ۶۰٪ و ذوب یخ‌های روی خشکی حدود ۲۵٪ در بالا آمدن آب‌ها نقش خواهند داشت. ۱۵٪ باقیمانده ناشی از عوامل دیگری مانند تغییر در خاک‌های یخ‌زده، انباشت رسوبات رودخانه‌ای در دریاها و تغییر در ورقه‌های یخی گرینلند و جنوبگان خواهد بود.



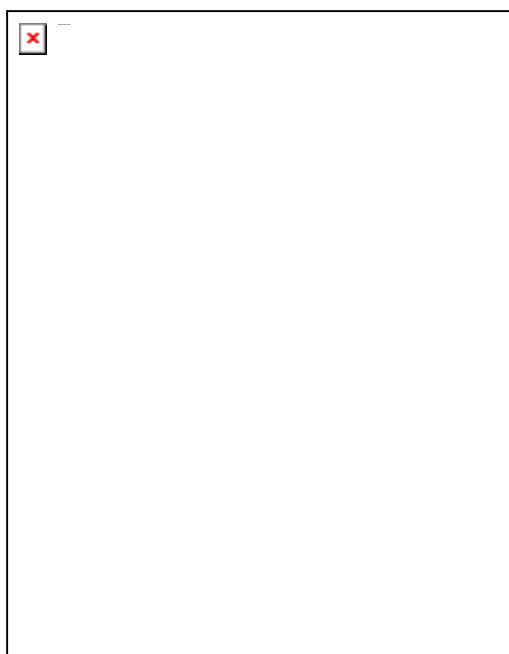
شکل ۲-۷ تغییر تراز میانگین دریاها از ۱۸۰۰ تا ۲۱۰۰. تراز میانگین سال‌های ۱۹۹۹ - ۱۹۸۰ مبنا گرفته شده است. سایه خاکستری سال‌های ۱۸۷۰ - ۱۸۰۰ تخمین از شواهد گذشته است و منحنی قرمز سال‌های ۱۹۹۵ - ۱۸۷۰ اندازه‌گیری‌های دستگاهی است. با گذشت زمان اندازه‌گیری‌ها دقیق‌تر شده و پهنای سایه خطا کمتر شده است. داده‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۸ (رنگ سبز) داده‌های ماهواره‌ای است. سایه آبی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۱۰۰ پیش‌بینی دامنه تغییر تراز دریاها با فرض سناریوهای نشر A1B سرس است. تخمین تراز دریاها پس از سده ۲۱ به شدت به سناریوهای نشر بستگی دارد. تراز دریاها ممکن است تا چند متر بالا برود. برگرفته از آی‌پی‌سی‌سی، گزارش چهارم، ۲۰۰۷.

اقلیم سده‌های ۲۲ و فراتر، در بسیاری از مدل‌های اقلیمی بررسی شده‌اند. سخن از بالا آمدن تراز دریاها تا سه تا چهار متر است. ولی نظر به فراوانی ناشناخته‌های آینده‌های دور، میزان اعتماد به آن پیش‌بینی‌ها اندک است.

بیشتر مردم در سکونت‌گاه‌های بالاتر از سطح دریا زندگی می‌کنند و به طور مستقیم از دریاها و اقیانوس‌ها متأثر نمی‌شوند. ولی به خاطر شرایط مناسب زندگی در نزدیک دریاها و به سبب این که دریاها راه ارتباط جوامع برای سفر و حمل و نقل دریایی هستند، جمعیت قابل توجهی از مردم جهان در مناطق ساحلی زندگی می‌کنند. معمولاً تراکم جمعیت در این

مناطق بالا است. برای مردم این مناطق حتی چند ده سانتی‌متر بالا آمدن سطح دریا می‌تواند مشکلات فراوان بوجود آورد. بعضی مناطق، مانند مناطق دلتایی رودخانه‌های بزرگ، آسیب‌پذیرتر هستند. برای نمونه می‌توان بنگلادش را نام برد. مناطقی که پست و نزدیک به دریا هستند و برای آنها استحکامات دریایی ساخته شده است نیز در معرض آسیب قرار دارند. از نمونه‌های این مناطق می‌توان به سواحل هلند و جزایر کوچک اقیانوس‌های آرام و هند اشاره کرد.

بنگلادش با ۱۲۰ میلیون جمعیت از دلتاهای بزرگ رودخانه‌های گنگ^۱، براهماپوترا^۲ و مگنا^۳ تشکیل شده است. با نیم‌متر بالا آمدن سطح دریا نزدیک به ۱۰ درصد زمین‌های قابل سکنی زیر آب خواهد رفت و ۶ میلیون نفر سکونت‌گاه و زمین‌های کشاورزی خود را از دست خواهند داد. اگر سطح دریا یک متر بالا آید این ارقام به ۲۰ درصد زمین‌ها و ۱۵ میلیون نفر جمعیت بالغ خواهد شد (شکل ۳ - ۷). آوارگی چنین جمعیت‌های بزرگ مشکلات زیادی برای بنگلادش و همسایگانش به وجود خواهد آورد. حفظ سواحل پر پیچ‌وخم بنگلادش در برابر آب‌گرفتگی نشدنی است. بزرگ‌ترین آسیب نیز از بین رفتن



شکل ۳ - ۷ زمین‌های بنگلادش

که با بالا آمدگی سطح دریا

زیر آب خواهند رفت.

کنتورهای ۱، ۲، ۳، و ۵ متر

با خط‌های سیاه نشان داده

شده‌اند. برگرفته از Houghton

سکونت‌گاه‌ها و زمین‌های کشاورزی خواهد بود. برای درک بزرگی فاجعه‌ای که ممکن است روزی روی دهد، یادآوری این نکته کافی است که نیمی از اقتصاد بنگلادش و ۸۵٪ معیشت مردم آن به کشاورزی وابسته است. تأثیر دیگر بالا آمدن سطح دریاها روی حاصل‌خیزی زمین‌های کشاورزی است. با وارد شدن آب دریا به داخل منابع زیرزمینی آب شیرین زمین‌های کشاورزی شور می‌شوند و حاصل‌خیزی افت خواهد کرد. برآوردهای انجام شده نشان می‌دهند نفوذ آب شور دریا در کناره‌های بنگلادش در فصل کاشت و برداشت نزدیک به ۱۵۰ کیلومتر از سواحل آن است.

مورد مشابه منطقه دلتای نیل در مصر است. در اثر بالا آمدن دریا به میزان ۱ متر، نزدیک به ۱۲٪ از زمین‌های قابل کشت این کشور با یک جمعیت ۷ میلیون نفری به زیر آب خواهد رفت. در کشور کهن سال مصر، به طور سنتی از سدهای شنی برای جلوگیری از نفوذ آب دریا به سواحل استفاده می‌کنند. تنها با نیم متر بالا آمدن سطح دریا این سدها از بین خواهند رفت.

به جزء بنگلادش و مصر مناطق آسیب‌پذیر فراوانی در جنوب‌شرقی آسیا و آفریقا وجود دارد. بالا آمدن نیم‌متر سطح دریا در دشت‌های آبرفتی بزرگ و کوچک سواحل شرقی چین مساحتی به وسعت ۴۰ هزار کیلومترمربع (برابر خاک هلند) را زیر آب خواهد برد و بیش از ۳۰ میلیون نفر را از سکونت‌گاه‌های خود بیرون خواهد راند.

منابع آب شیرین در سده ۲۱

پیش‌بینی آب مورد نیاز و در دسترس جوامع انسانی بسته به سناریوهای نشر، متفاوت است و ابهامات قابل توجه در آن وجود دارد. با وجود این، اجماع پژوهشگران بر این است که بارش در عرض‌های شمالی بالا در زمستان، و در مناطقی که بارندگی‌های موسمی دارند، مانند جنوب‌شرقی آسیا در تابستان افزایش می‌یابد. در مقابل در ایران و خاورمیانه، عرض‌های میانی آمریکای شمالی، آفریقای جنوبی، و استرالیا انتظار می‌رود تابستان‌ها خشک‌تر شوند.

گرم شدن زمین افزایش تبخیر از سطح زمین و اقیانوس‌ها را به دنبال خواهد داشت. انتظار می‌رود در مناطق کم باران بخش قابل توجهی از رطوبت زمین تبخیر شود و پوشش‌های گیاهی و آب‌های جاری کم شوند و احیاناً بحران‌های انسانی و زیست‌محیطی

بزرگ به وجود آورد. جریان آب در رودخانه‌ها و جویبارها به تغییرات اقلیم حساس‌اند. حتی کمی تغییر در بارش یا دما ممکن است تأثیر بزرگ بر روان‌آب‌ها داشته باشد.

شدت و فراوانی فرینه‌های اقلیمی در سده ۲۱

علی‌الاصول شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که بیشینه‌ها و کمینه‌های آب‌وهوایی، مانند ترسالی‌ها و خشک‌سالی‌ها، طوفان‌ها و سیل‌ها، گرمی‌ها و سردی‌های سخت، در همه جای کره زمین شدیدتر و فراوان‌تر شوند. به عنوان مثال به نتایج دو نمونه مطالعات منطقه‌ای از انگلستان و بلژیک اشاره می‌شود. بررسی اقلیم منطقه‌ای انگلستان نشان می‌دهد که مناطق جنوب انگلستان در سال ۲۰۵۰ شدیداً مستعد خشک‌سالی‌اند. ولی مناطق شمالی آن به مراتب مرطوب‌تر شده و سیل در آنجا مشکل‌زا خواهد شد. پژوهشگران بلژیک نیز اثر دو برابر شدن فراوانی کربن دی‌اکسید جو را بر روی فاکتورهای هیدرولوژیکی منطقه خود، مانند تبخیر و تعرق، رطوبت خاک، انباشت برف، ذخایر زیرزمینی آب، روان‌آب‌ها در سه حوزه از بلژیک مطالعه کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تبخیر و تعرق افزایش یافته و رطوبت خاک و مقدار ذخیره آب‌های زیرزمینی کاهش یافته است.

به طور کلی، بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در نقاط مختلف دنیا می‌توان به شرح زیر نتیجه گرفت:

- با گرم شدن سطح زمین و لایه‌های پایین جو شرایط هیدرولوژیکی، مانند اندازه و فصل بارش‌ها، تبخیر از زمین‌های مرطوب، تعرق گیاهان، و اندازه روان‌آب‌ها تغییر خواهد کرد. بارش در عرض‌های جغرافیایی بالا زیاد خواهد شد. در عرض‌های جغرافیایی پایین، بسته به موقعیت منطقه، ممکن است ترسالی یا خشک‌سالی به وجود آید. در عرض‌های جغرافیایی متوسط که اقلیم بری دارند و مستعد خشک‌سالی‌اند، وزش بادهای گرم سبب کاهش روان‌آب‌ها و از بین رفتن پوشش گیاهی خواهد شد که نهایتاً یا به بیابان‌زایی خواهد انجامید یا آن را تشدید خواهد کرد. در عرض‌های جغرافیایی پایین، بسته به منطقه، نوسانات آب‌وهوایی ممکن است هجوم حشرات و آفات به کشتزارها و زیست‌بوم‌ها را در پی داشته باشد. شمال شرقی قاره آفریقا به خصوص در مقابل هجوم ملخ آسیب‌پذیر است.
- در چند سال گذشته خشک‌سالی‌های متعدد در مناطق مختلف جهان از جمله در ایران

مشکلات زیادی را برای ساکنان این مناطق به همراه داشته است. در سده ۲۱ تعداد و شدت طوفان‌ها در مناطق مختلف جهان افزایش یافته و خسارت‌های مالی و جانی زیادی به وجود خواهد آورد.

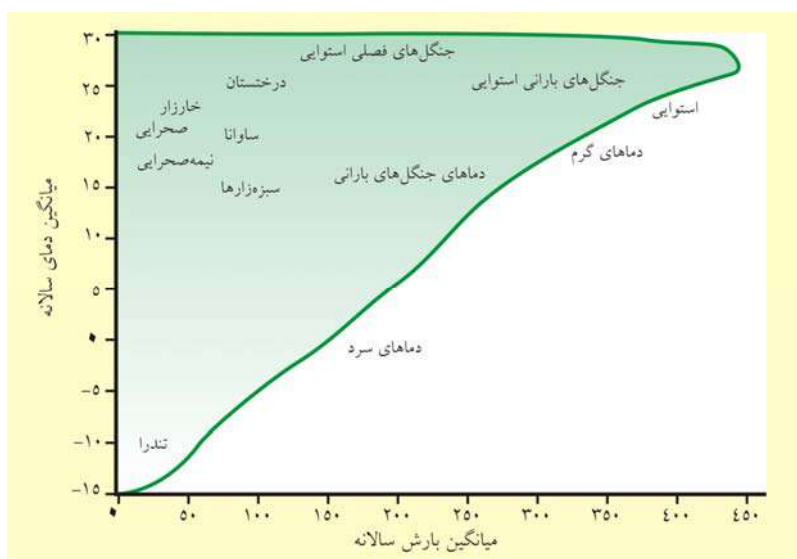
- پژوهشگران بر این باورند که افزایش دمای سطحی اقیانوس‌ها به اندازه نیم درجه سانتی‌گراد، منجر به افزایش ۴۰ درصدی گردبادها و طوفان‌های بزرگ می‌شود. در سده ۲۱ انتظار می‌رود این رخدادها فراوان‌تر و شدیدتر باشند.
- دو دهه پایانی سده بیستم از نظر فرینه‌های اقلیمی قابل توجه‌اند. در پاییز ۱۹۹۸ طوفان ۱۵ میلیون درخت را در جنوب انگلستان شکست. دامنه طوفان به هلند و بلژیک و شمال فرانسه نیز رسید و به عنوان شدیدترین طوفان از سال ۱۷۰۳ به بعد ثبت شد. طوفان گیلبرت در سال ۱۹۸۸ جزایر جامائیکا و سواحل مکزیک را درنوردید. طوفان مریله در اقیانوس آرام در سال ۱۹۹۱ ژاپن را در هم کوفت. طوفان اندرو در سال ۱۹۹۲ در فلوریدا و مناطق جنوبی آمریکای شمالی ویرانی به بار آورد. طوفان میچ در سال ۱۹۹۸ هندوراس و سایر کشورهای آمریکای مرکزی را ویران کرد. پیش‌بینی می‌شود نمونه‌های این رویداد در سده ۲۱ فراوان‌تر و شدیدتر باشند.
- زمین‌های پست ساحل اقیانوس‌ها بیش از سایر مناطق در برابر گردبادهای حاره‌ای آسیب‌پذیرند. مناطقی مانند سواحل جنوب آسیا در مقابل طوفان‌ها و امواج بلند دریا بی‌دفاع‌اند. هر سال به طور متوسط یک طوفان و گردباد تند بنگلادش را می‌کوبد. در طول ۲۵ سال گذشته دو حادثه بزرگ در این کشور اتفاق افتاده است که در آن با آمدن سیل‌های بزرگ زندگی بسیاری از مردم از بین رفته است. طوفان سال ۱۹۷۰ شاید بزرگ‌ترین حادثه طبیعی ویرانی‌آفرین جهان در سال‌های اخیر بوده است. در این طوفان، برابر برآوردها، حدود ۲۵۰ هزار نفر جان خود را از دست دادند. در طوفان آوریل ۱۹۹۱ بیش از ۱۰۰ هزار نفر از مردم این کشور کشته شدند و انسان‌های زیادی آواره و بی‌خانمان شدند. باز بنگلادش و استان اوریسای هند در سال ۱۹۹۹ بلای مشابهی را تجربه کردند. انتظار می‌رود اقلیم سده ۲۱ هنوز ویرانی‌آفرین‌تر باشد.

واکنش زیست‌بوم‌ها

کمتر از ده درصد از خشکی‌های جهان زیر پوشش گیاهی هستند. از این مقدار ۳۰

درصد را جنگل‌های طبیعی و ۱ تا ۲ درصد را جنگل‌های انسان کاشت تشکیل می‌دهند. گوناگونی گیاهان و جانوران که زیست‌بوم‌های محلی را تشکیل می‌دهند شدیداً به آب‌وهوا، نوع خاک، و آب در دسترس حساس‌اند.

تغییرات کوچک در آب‌وهوا در طول زمان ممکن است به تغییرات بزرگ در زیست‌بوم‌ها بینجامد. شرایط زیستی گونه‌ها مختل شوند، رقابت گونه‌ها برای بقا در داخل زیست‌بوم از بین برود و نحوه پراکندگی پوشش گیاهی متأثر شود. در (شکل ۴ - ۷) الگوی انواع زیست‌بوم‌های گیاهی جهان برحسب میزان دما و بارش نشان داده شده است. دسترسی به اطلاعات تاریخی گذشته برای تهیه نقشه‌های پراکندگی پوشش‌های گیاهی آینده مفید است. با تداوم گرم شدن زمین، تغییر در آب‌وهوا در چند دهه و سده آینده اتفاق خواهد افتاد. بیشتر زیست‌بوم‌ها نخواهند توانست با سرعت لازم خود را با این تغییرات سازگار سازند یا از یک منطقه به منطقه مناسب‌تر دیگر مهاجرت کنند. بنابراین بسیاری از گونه‌های زیستی ممکن است از بین بروند. بررسی‌های فسیلی نشان می‌دهند که تندترین آهنگ مهاجرت در گونه‌های گیاهی گذشته حدود یک کیلومتر در سال بوده است.



شکل ۴ - ۷ پراکندگی زیست‌گاه‌های گیاهی جهان برحسب میانگین سالانه دما و بارش. برگرفته

از Houghton

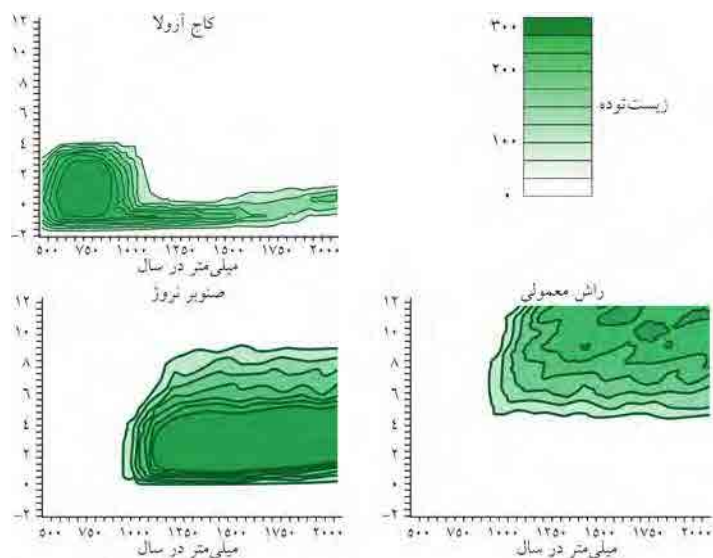
دوره زمانی بین رویش و تولید دانه و متوسط مسافتی که دانه‌ها می‌توانند پراکنده شوند، نشان می‌دهد که بدون دخالت بشر تعداد زیادی از گونه‌ها قادر نخواهند بود خود را با آهنگ تغییر اقلیم برای سده بیست و یکم تطبیق دهند و یا مهاجرت کنند.

حیات گونه‌های گیاهی و جانوری به هم وابسته است. با از بین رفتن یک گونه، گونه‌های دیگر نیز متأثر می‌شوند. مثلاً اگر نوع خاصی از گیاه یک ناحیه که غذای گونه دیگری از گیاه یا جانور است، با گرم شدن زمین از بین برود گونه وابسته به آن نیز دچار مشکل خواهد شد. انتظار می‌رود تغییرات آب‌وهوایی الگوی هجوم آفات به زیست‌بوم‌ها را تغییر دهد. بسته به چگونگی تغییر، بعضی از گونه‌های زیستی در مقابل آفات آسیب‌پذیرتر از گونه‌های دیگر هستند و آسیب خواهند دید.

درختان عمر زیادی می‌کنند و زمان زیادی برای رشد و تکثیر آن‌ها لازم است، بنابراین قادر به پاسخ سریع به تغییرات اقلیم نیستند. بسیاری از آن‌ها به طور شگفت‌آوری به میانگین آب‌وهوایی حساس‌اند و با تغییر این میانگین با مشکل جدی روبرو می‌شوند یا به طور کلی از بین می‌روند. در شکل ۵ - ۷، محصول‌دهی سه‌گونه درخت کاج آرولا، صنوبر نروژی، و راش معمولی برحسب میانگین سالانه دما و بارش شبیه‌سازی شده است. ملاحظه می‌شود که تغییر کوچک یک درجه‌ای در دمای میانگین و یا چند میلی‌متر در بارش سالانه اختلال جدی در رشد و باردهی درخت را سبب می‌شود. گفته می‌شود در اثر تغییرات محتمل در آب‌وهوا در سده بیست و یکم، بخش قابل توجهی از درختان شرایط آب‌وهوایی مناسب خود را از دست خواهند داد. برآورد شده است، با دو برابر شدن کربن-دی‌اکسید جو، بیش از ۶۵ درصد از جنگل‌های شمالی تحت تأثیر قرار گیرند.

کاهش سلامتی در تعداد زیادی از جنگل‌ها در سال‌های اخیر قابل توجه بوده است. مخصوصاً در اروپا و شمال آمریکا باران‌های اسیدی ناشی از صنایع سنگین، مانند نیروگاه‌ها و کارخانه‌ها و وسایل نقلیه، آسیب‌های جدی به وجود آورده‌اند. مطالعات در چند منطقه از کانادا تغییر شرایط آب‌وهوایی را سبب از بین رفتن درختان آن منطقه دانسته است. به طور خاص وجود زمستان‌های گرم و تابستان‌های خشک عامل اصلی شناخته شده‌اند. در ۲۰ سال گذشته، کاهش رشد و از بین رفتن درختان در این نواحی سبب شده است تولید چوب و الوار تا ۱۰٪ کاهش یابد.

به طور خلاصه، گرم شدن زمین روی منابع آب شیرین و شرایط مناسب برای حیات



شکل ۵ - ۷: شبیه‌سازی کنام‌های زیستی برای سه گونه درخت کاج آژولا، صنوبر نروژ، و راش معمولی. محور افقی بارش میانگین سالانه برحسب میلی‌متر و محور عمودی دمای میانگین سالانه برحسب درجه سانتی‌گراد است. رشد سالانه درخت برحسب تن در هکتار با کُد رنگ در گوشه راست بالا نموده شده است.. برگرفته از *Houghton*

آثار مخرب دارد و سبب از بین رفتن گیاهان و جانورانی می‌شود که توان سازگاری یا توان مهاجرت به نقاط دیگر را ندارند. همچنین انتظار می‌رود که گرم شدن زمین موجب افزایش آفت‌ها و تشدید تخریب زیست‌بوم‌ها شود.

نشت متان از کف اقیانوس‌ها

متان گاز گل‌خانه‌ای است. اثر گرم‌کنندگی هر مولکول آن ۲۷ برابر مولکول کربن‌دی‌اکسید است، ولی ماندگاری آن در جو کمتر از ماندگاری کربن‌دی‌اکسید است. متان علاوه بر منابع سطحی در اعماق لایه‌های زمین، در لجن‌زارهای دلتای رودخانه‌ها، مناطق یخ‌زده قطبی و کف اقیانوس‌ها وجود دارد.

سیبری غربی بزرگ‌ترین لجن‌زار دفنی جهان است، ناحیه‌ای به وسعت یک میلیون کیلومترمربع لجن‌زار یخ‌زده است و ۱۱ هزار سال پیش در پایان آخرین یخبندان، تشکیل

شده است. با گرم شدن زمین یخ‌های این ناحیه شروع به ذوب شدن خواهند کرد و مقادیر زیادی متان در چند دهه آینده آزاد خواهد شد. تخمین زده شده است که ۷۰ میلیون تن متان از این طریق وارد جو شود. این اتفاق هم اکنون در شرق سیبری در حال روی دادن است.

در کف اقیانوس‌ها انباشت‌های فراوانی از هیدرات متان یافت می‌شود. بنا به نظر برخی از کارشناسان، متان از طریق گسل‌های کف اقیانوس‌ها مهاجرت می‌کند و هنگام تماس با آب سرد بلوری می‌شود و در کف اقیانوس می‌ماند. متان هیدراته در حدود دماهای نزدیک به صفر درجه سانتی‌گراد پایدار است. در فشار بالا تا دمای ۱۸ درجه سانتی‌گراد نیز پایدار می‌ماند. به طور متوسط متان هیدراته، مرکب از یک مول متان و ۵/۷۵ مول آب است. چگالی متوسط آن حدود ۰/۹ گرم بر سانتی‌مترمکعب است. یک لیتر از هیدرات متان جامد به طور متوسط ۱۶۸ لیتر گاز متان تولید می‌کند. گرم شدن اقیانوس‌ها میلیاردها تن گاز متان را که تا به حال به علت سرد بودن آب در کف اقیانوس‌ها دفن بودند آزاد خواهد کرد. مقادیر عظیم متان نه تنها در کف اقیانوس‌ها بلکه در لایه‌های منجمد زیر یخ‌های قطب شمال نیز یافت می‌شود. در حدود هزار گیگاتن گاز متان زیر لایه‌های منجمد دریاچه‌های قطب شمال محبوس است در صورت ذوب شدن یخ‌های قطبی ممکن است وارد جو شود.

گرمایش زمین و امنیت غذایی

کشاورزی و دامپروری خوب در گرو خاک خوب و آب‌وهوای مناسب است. میزان و توزیع فصلی دما و بارندگی، نوع محصولات هر منطقه و میزان رشد آنها را تعیین می‌کند. توزیع دما و بارندگی با گرم شدن زمین تغییر خواهد کرد و به تبع آن الگوهای تولید نیز باید تغییر کند. اما این تغییرات پیچیده‌اند. برای فراهم آوردن شرایط مناسب برای رشد مطلوب گیاه و دام، دانش، سرمایه و مدیریت روزآمد لازم است، که در بسیاری از جوامع در حال توسعه و کمتر توسعه یافته این شرایط آسان بدست نمی‌آیند.

روش‌هایی برای سازگار کردن رشد محصولات کشاورزی و دامی با تغییر اقلیم تجربه شده است. در سال ۱۹۶۰ دستکاری نژادی روی تعداد زیادی از محصولات گیاهی انقلابی در افزایش رشد آنها به وجود آورد که به انقلاب سبز موسوم شد. در فاصله سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ تولید غذا با آهنگ متوسط ۲/۴٪ در سال رشد کرد و سبب افزایش جمعیت

جهان در یک دوره سی ساله شد. رشد تولید حبوبات حتی بیشتر از ۲/۹٪ در سال بود. با وجود این خبرهای خوش، نگرانی‌های زیادی وجود دارد که خاک‌های قابل کشت جهان در اثر فرسایش و کمی منابع آب شیرین کاهش یابند. همه این مسائل ممکن است کمبود تولیدات کشاورزی و دامی را در آینده در پی داشته باشد.

امروزه با دانستن شرایط مورد نیاز برای گونه‌های متفاوت گیاهی و جانوری و فراهم بودن تکنیک‌های باروری و دستکاری‌های ژنتیکی می‌توان بعضی مشکلات را که در سازگار ساختن گیاه و جانور با شرایط آب‌وهوایی جدید وجود دارد، در گستره وسیعی از جهان از میان برداشت، ولی عمر جنگل‌ها بلند است و ده‌ها تا صد سال و بیشتر بالغ می‌شوند. آهنگ تغییرات اقلیم سریع است. درختان زیادی خود را در آب‌وهوایی دور از آنچه با آن سازگار شده‌اند خواهند یافت و با مشکل رشد و باروری روبرو خواهند شد.

مثالی از سازگاری با تغییر اقلیم عملکرد کشاورزان پرو است. کشت سالانه غلات را چنان تنظیم می‌کنند که با اقلیم پیش‌بینی‌شده آن سال تناسب داشته باشد و محصول خوب بدست آید. اقلیم پرو شدیداً متأثر از حوادث ال‌نینو است. دو محصول عمده آن، برنج و کتان، نسبت به فصل و مقدار بارش حساس‌اند. برنج آب فراوان می‌خواهد، ولی کتان ریشه عمیق دارد و قادر است با بارش کم نیز محصول خوب بدهد. در سال ۱۹۸۳ بعد از ال‌نینوی سال‌های ۱۹۸۲ و ۱۹۸۳ تولید کشاورزی ۱۴٪ کاهش یافت. ولی پیش‌بینی ۱۹۸۷ در ابتدای ال‌نینوی جدید مؤثر افتاد. کشاورزان آن را در برنامه‌ریزی خود به حساب آوردند و تولیدشان در سال ۱۹۸۷ سه درصد افزایش یافت.

در بررسی تأثیر تغییر اقلیم روی دام و گیاه به سه عامل مهم باید توجه داشت: دسترسی به آب، اصلاح نژاد، و تغییر دما. در اثر کم‌آبی، زمین‌های بکر و شبه‌بکر در کشورهای در حال توسعه ممکن است در معرض خطرات زیاد قرار گیرند. اصلاح نژاد در برخی از غلات در حضور کربن‌دی‌اکسید زیادتر به تولید بیشتر کمک کرده است. تغییر دما، به خصوص دماهای بالا کاهش قابل توجه برخی محصولات کشاورزی و دامی را سبب می‌شود.

گرمایش زمین و یخ‌های قطبی و کوهستانی

اثر بلافاصله گرم شدن زمین آب شدن برف و یخ مناطق سردسیری است. کوه‌های یخی

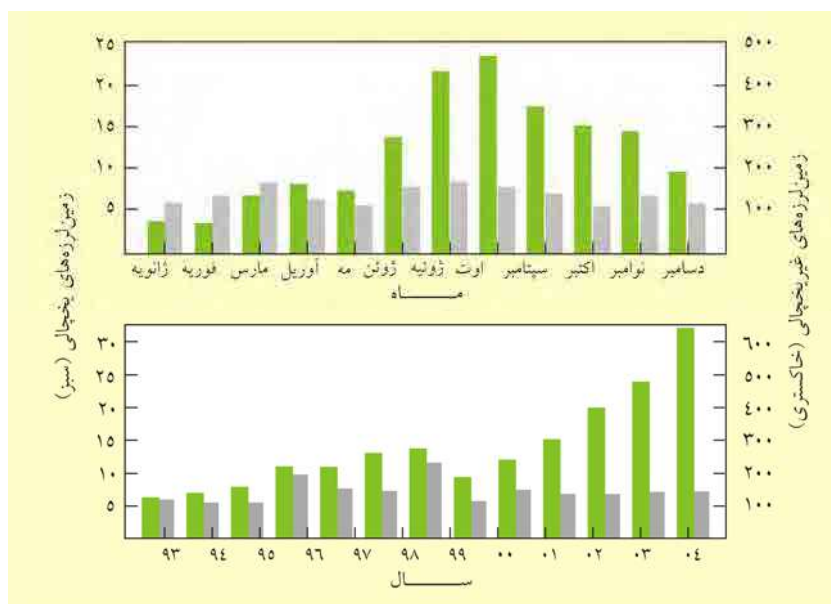
شمالگان، کلاهک‌های یخی گرینلند و جنوبگان و کوهستان‌هایی که دارای برف و یخ دائمی هستند، از جمله این مناطقند. سپیدایی برف و یخ این نواحی و یخ‌های شناور دریاها ۸۰ درصد گرمای خورشید را باز می‌تابانند و دمای آب اقیانوس‌ها را پایین نگاه می‌دارند. با آب شدن آنها این گرما توسط اقیانوس‌ها جذب می‌شود و گرم شدن زمین را سرعت می‌بخشد. در این میان گرینلند و قطب جنوب اهمیت بیشتری دارند.

گرینلند قاره است و ورقه یخی آن حدود ۱/۷ میلیون کیلومترمربع وسعت دارد. اگر تمام این یخ ذوب شود (که البته برای این رخداد سده‌ها وقت لازم است) سطح آب اقیانوس‌ها نزدیک به حدود ۷ متر بالاتر از تراز کنونی خواهد بود. این مقدار بالآآمدگی بزرگ است و می‌تواند جامعه انسانی و زیست‌بوم‌ها را در هزاره سوم و بعدتر با چالش جدی روبرو کند. هم اکنون به دو علت زنگ خطر نواخته شده است.

(الف) ورقه‌های یخی گرینلند وسیع‌اند و در ارتفاعات بالا و سرد قرار دارند. از بین رفتن یخ‌ها هم سپیدایی و هم ارتفاع را کاهش می‌دهد و هر دو عامل نهایتاً به گرم شدن زمین می‌انجامند. طبق محاسبات انجام شده اگر دمای گرینلند ۲/۷ گرم‌تر از سال ۱۹۹۰ شود مقدار سالانه یخ ذوب شده بیشتر از مقدار سالانه بارش برف روی گرینلند خواهد شد. افزایش دما تا ۲/۷ درجه در همه سناریوهای نشر گازهای گل‌خانه‌ای تا پایان سده بیست-ویکم اتفاق خواهد افتاد (به جدول ۱ پیوست ج نگاه کنید).

(ب) شکل دوم جدا شدن ورقه‌های بزرگ یخ و شناور شدن آنها در اقیانوس است. این که قطعات یخی با چه آهنگی جدا شده و در دریا رها می‌شوند با دانش امروزی قابل پیش‌بینی و قابل مدل‌سازی نیست.

افزایش حرکت‌های یخچالی از دیگر پیامدهای گرم شدن زمین در نواحی قطبی است. یخچال‌های بزرگ به علت ذوب لایه‌های زیرین در اثر سنگینی لایه‌های بالا و کاهش اصطکاک به سمت زمین‌های پست‌تر و دره‌ها حرکت می‌کنند. این حرکات باعث ایجاد زلزله‌های یخچالی می‌شود که ممکن است تا چند ده ثانیه طول بکشد. این زلزله‌ها بیشتر در ماه‌های تابستان اتفاق می‌افتند و بیشتر متعلق به سه یخچال بزرگ هل‌هایم^۱، جاکوبس‌هاون^۲، و کانگردلوگسواگ^۳ است. این نام‌ها از بزرگ‌ترین یخچال‌های گرینلنداند.



شکل ۶-۷. آمار زلزله‌های یخچالی در گرینلند از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳، بالا در طول ماه، و پایین در طول سال. برگرفته از Mathez

در سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۱، سالانه ۵ تا ۶ زلزله از این نوع وجود داشته است. این تعداد در سال ۲۰۰۵ به ۳۲ زلزله در سال رسید (شکل ۶-۷).

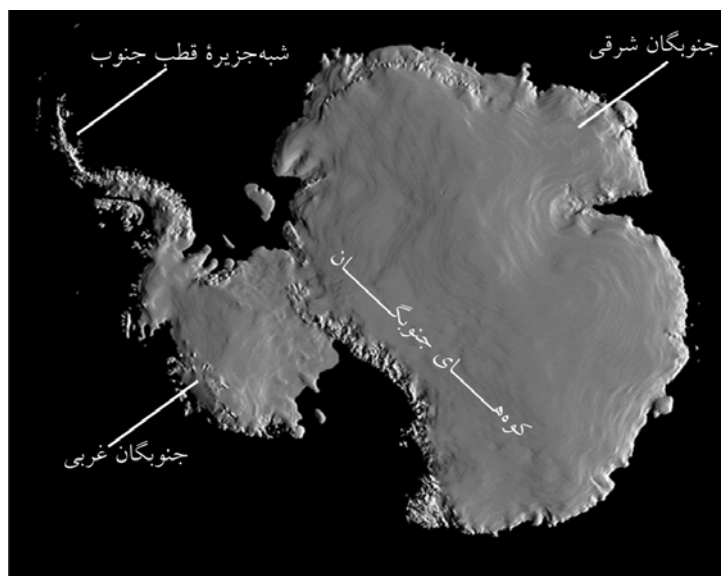
از سال ۱۹۹۲ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برآوردهای بهتری از میزان تغییرات در سطح کره زمین بدست آمده است. با استفاده از تصویرهای راداری از منطقه گرینلند مقدار یخ از دست رفته در سال ۱۹۹۶، 91 ± 31 کیلومتر مکعب، و در سال ۲۰۰۵، 224 ± 40 کیلومتر مکعب برآورد شده است. همچنین معلوم شده است که آهنگ حرکت یخچال از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵ افزایش ۹۵٪ داشته است و یخ از دست رفته بین ۲۴ تا ۴۶ کیلومتر مکعب در سال بوده است. در همین زمان زبانه‌های یخی یخچال‌ها شکسته شده و شروع به عقب نشینی کرده‌اند (شکل ۷-۷).

جنوبگان قاره است و ویژگی خاصی دارد (شکل ۸-۷). دو بخش شرقی و غربی آن از لحاظ ارتفاع نسبت به سطح دریا با هم متفاوت هستند. زمین بخش شرقی بالاتر از سطح دریا و زمین بخش غربی پایین‌تر از سطح دریاست. بنابراین با افزایش دمای اقیانوس، ذوب



شکل ۷-۷ فرونشست یخچال در گرینلند در سال‌های ۱۹۴۲ تا ۲۰۰۶. برگرفته از Mathez

یخ‌های بخش غربی شدیدتر و سریع‌تر خواهد بود. عامل دیگری حساسیت بخش غربی را افزایش می‌دهد. ناحیه شبه‌جزیره‌ای غرب جنوبگان، دماغه مانند به سمت شمال کشیده شده است. دمای آن زیر دمای انجماد آب است. بنابراین انتظار می‌رود افزایش دمای ۲ درجه‌ای نسبت به سال ۱۹۵۰ تأثیر بزرگی بر



شکل ۷-۸ جنوبگان. برگرفته از Mathez

این ناحیه بگذارد. ورقه‌های یخی مانند پایه‌هایی در داخل یخچال‌ها فرو رفته‌اند. چنانچه یک ورقه بر اثر ذوب نسبی نشست کند، یخچال‌ها به سرعت به راه می‌افتند. یکی از این رویدادهای غم‌انگیز در فوریه و مارس ۲۰۰۲ اتفاق افتاد. در آن حادثه ۳۲۵۰ کیلومترمربع از ورقه یخی لارنس بی به طور غیرمنتظره شکست و وارد دریا شد (شکل ۹ - ۷). بعد از این واقعه یخچال‌های نزدیک آن به سرعت وارد دریا شده و شناور شدند.



شکل ۹ - ۷ شکستن ورقه یخی لارنس در فوریه و مارس ۲۰۰۲. برگرفته از Mathez

بنا به بررسی‌های انجام شده، در شبه‌جزیره غرب جنوبگان ۲۴۴ یخچال وجود دارد که تقریباً ۸۷ درصد از کل یخچال‌های این منطقه را تشکیل می‌دهند. این یخچال‌ها در طول سال‌های اخیر در حال نشست بوده‌اند. این امر سبب افزایش سرعت حرکت یخچال‌ها به داخل دریا و از بین رفتن آن‌ها می‌شود. همه این رویدادها از یک سو باعث از بین رفتن یخ‌های قطبی و بالا آمدن سطح دریاها می‌شوند و از سوی دیگر با کم کردن سپیدایی منطقه گرم شدن زمین را سرعت می‌بخشند.

اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای نشان داده است که سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۱ ورقه‌های یخی جنوبگان با آهنگ 0.7 ± 5.5 متر بر سال نازک می‌شوند. این مقدار ۱ تا ۷ درصد ضخامت ورقه‌های یخی است و برابر از بین رفتن 5 ± 45 میلیارد تن یخ در یک دوره ۹ ساله است.

مرجع‌ها:

- IPCC. *Climate Change 2007, The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, 2007
- Houghton, J. *Global Warming, The Complete Briefing*, Fourth Edition, Cambridge University Press, 2009
- Mathez, E. A. *Climate Change: The Science of Global Warming and Our Energy Future*, Columbia University Press, 2009

بخش ۸

مدل‌های اقلیم

(مفاهیم این بخش تا اندازه‌ای فنی‌اند. برای درک آنها به درجه‌ای از مفاهیم فیزیک و ریاضی نیاز است. نخواندن آن تأثیر زیادی در فهم بقیه مطالب کتاب ندارد.)

اقلیم سامانه پیچیده‌ای است. در آن هواکره، آب‌کره، سنگ‌کره، زیست‌کره، و سرماکره با یکدیگر برهم‌کنش دارند. برای پیش‌بینی اقلیم لازم است همه عوامل دخیل با تمام پیچیدگی‌هایشان در نظر گرفته شوند. مدل‌سازی اقلیم از دو جنبه پیشرفت داشته است. از یک سو دانش برهم‌کنش مولفه‌های مختلف اقلیم بر یکدیگر، مانند تشکیل ابرها و جریان‌های اقیانوسی و غیره، پیشرفت کرده و قابل اعتمادتر شده‌اند. از سوی دیگر پیدایش کامپیوترهای سریع و بزرگ، محاسبه اقلیم‌های گذشته و آینده را سریع‌تر و دقیق‌تر کرده است. در مراکز مختلف هواشناسی و اقلیم‌شناسی جهان از مدل‌های اقلیمی متفاوتی استفاده می‌شود. پاسخ‌های مشابهی که مدل‌های مختلف در مراکز متفاوت بدست می‌دهند گواه اعتبار مدل‌ها تلقی می‌شود. در عین حال دانشمندان سعی دارند با در نظر گرفتن اطلاعات بیشتر و استفاده از کامپیوترهای قدرتمندتر مدل‌ها را بهتر سازند.

مدل‌های هواشناسی

اقلیم به میانگین وضعیت آب‌وهوایی در درازمدت، از چند ماه تا چندین صد سال و بیشتر می‌پردازد. در مقابل هواشناسی پیش‌بینی‌های جوی حداکثر چند روزه و چند هفته را بررسی می‌کند. برای ساختن مدل‌های اقلیمی نخست مدل‌های هواشناسی با پارامترهای اولیه مناسب شبیه‌سازی می‌شوند و سپس با دخالت دادن عوامل پیچیده‌کننده و تغییر در پارامترهای اولیه سعی می‌شود مدل برای پیش‌بینی‌های اقلیمی متناسب شود. از این رو نخست مدل‌های هواشناسی به اختصار بررسی می‌شوند.

گام اول: بخش مهم هر مدل مجموعه معادلات فیزیک و شیمی حاکم بر فرایندهای هواشناختی است. اهم این قوانین عبارتند از:

- معادله حرکت افقی سیال (هوا یا آب): حاصل ضرب جرم و شتاب افقی حجمی از سیال با برآیند مولفه‌های افقی نیروی گرادیان فشار، نیروی گرانروی (چسبندگی) و نیروی کوریولیس برابر گذاشته می‌شود.
- معادله تعادل هیدرواستاتیک: از حرکات کند و کوچک مقیاس سیال در امتداد قائم صرف‌نظر می‌شود. بنابراین تفاوت فشار در بالا و پایین هر لایه از سیال برابر با وزن آن لایه گرفته می‌شود.
- معادله پیوستگی (قانون پایستگی جرم): جرم سیالی که در حین حرکت وارد یک حجم می‌شود لازم است با جرم سیالی که از همان حجم خارج می‌شود برابر باشد.
- معادله حالت: این معادله از مفاهیم ترمودینامیکی است و به رابطه بین فشار، چگالی، و دما در هر نقطه از سیال گفته می‌شود. معادله حالت هوای خشک ساده‌ترین معادله حالت است (فشار تقسیم بر چگالی متناسب با دماست). ولی هوای مرطوبی که در آستانه تشکیل ابر است معادله حالت پیچیده‌ای دارد.
- قانون اول ترمودینامیک (قانون پایستگی انرژی): انرژی را نمی‌توان از هیچ به وجود آورد و یا معدوم کرد. تنها می‌توان صورتی از انرژی را به صورت دیگری تبدیل کرد (مانند تبدیل کار به گرما یا برعکس). بنابراین جمع جبری صورت‌های مختلف انرژی‌ای که به حجمی فرضی وارد می‌شوند با جمع جبری آنهایی که خارج می‌شوند باید برابر باشد.
- قانون دوم ترمودینامیک: این قانون به صورت‌های مختلف بیان می‌شود. مثلاً

(۱) بازده هج ماشین گرمایی که گرما بگیرد و کار تحویل دهد نمی‌تواند صددرصد باشد. (۲) گرما نوعی بی‌نظمی به همراه دارد. هر تغییر در هر چیزی به افزایش بی‌نظمی در عالم می‌انجامد.

- قوانین یاد شده معمولاً به صورت معادلات دیفرانسیل نوشته می‌شوند. برای حل آنها لازم است شرایط اولیه معلوم باشند. منظور از شرایط اولیه دانستن دما، چگالی، فشار، سرعت هوا یا آب و ... در یک زمان معین است. با دانستن این شرایط در یک زمان معین می‌توان (علی‌الاصول) شرایط در زمان‌های بعد را بدست آورد.

گام دوم: نظر به پیچیدگی سامانه آب‌وهوا و فراوانی فرایندهای دخیل در آن، حل دقیق و ریاضی معادلات یاد شده ممکن نیست و به حل عددی با یاری کامپیوتر بسنده می‌شود. برای این کار نخست جو و اقیانوس به شکل یک شبکه سه بعدی از نقاط تقسیم می‌شوند (شکل ۱ - ۸). سپس هر کدام از فرایندهای هواشناسی به صورت یک پارامتر در برنامه کامپیوتری گنجانده می‌شوند. به شرح زیر:

- پارامتری کردن فرایندهای مربوط به تبخیر، چگالش، و تشکیل و پراکندگی ابرها و غیره.

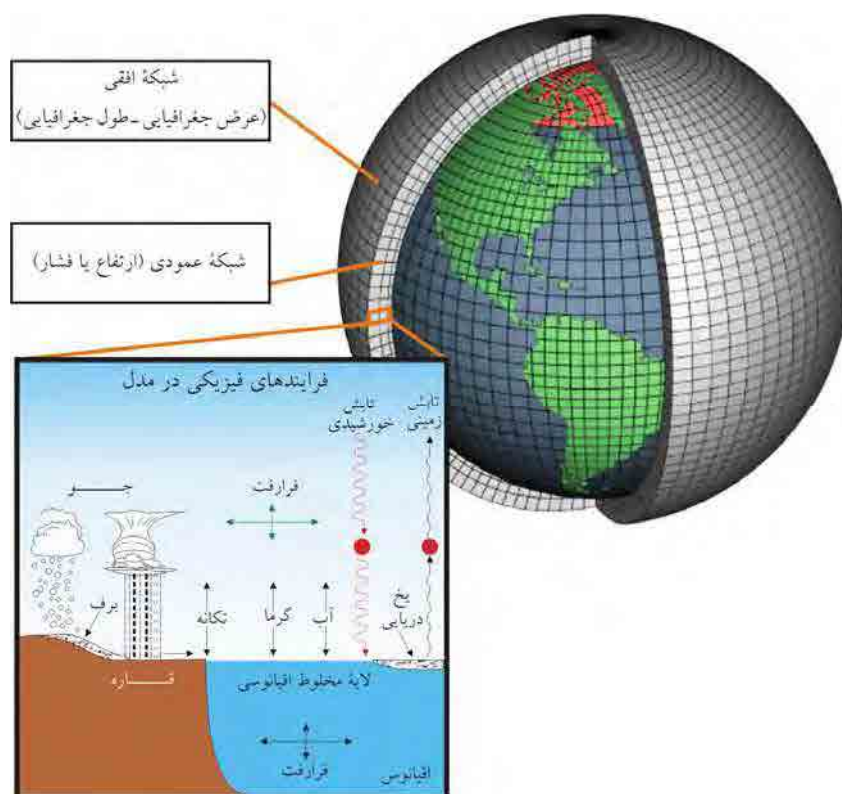
- پارامتری کردن جذب و نشر خورتاب و زمین‌تاب.

- پارامتری کردن فرایندهای هم‌رفتی در هوا و آب.

- پارامتری کردن تبادل تکانه و انرژی بین جو، اقیانوس و خشکی، ناشی از نیروی‌های گرانروی و تبادل گرما و بخار آب.

گام سوم: تعیین شرایط اولیه برای حل معادلاتی که در گام اول ترتیب داده شده است. منظور از شرایط اولیه این است که داده‌های آب‌وهوایی، مانند دما، فشار، چگالی، سرعت باد یا آب و غیره را، که از ایستگاه‌های هواشناسی دور دنیا و احیاناً ماهواره‌ها در یک زمان معین، t ، بدست آمده و معلوم است بر شبکه سه‌بعدی هوا و آب و خشکی که پیش‌تر اشاره شد منطبق کنند.

گام چهارم: بدست آوردن داده‌های هواشناسی در زمان بعد، $t + \Delta t$ ، که باید از معادلات یاد شده و داده‌هایی که در زمان t معلوم شده بود و شرایط اولیه نامیده شد، روی نقاط شبکه محاسبه شوند. این عمل را در زبان ریاضیات برون‌یابی از زمان t به زمان $t + \Delta t$ می‌گویند. به این ترتیب پارامترهای هواشناسی در زمان $t + \Delta t$ بدست می‌آیند.



شکل ۱ - ۸ مدل‌های هواشناسی مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل بر اساس قوانین فیزیک و شیمی هستند. برای اجرای یک مدل، خشکی‌ها، اقیانوس‌ها و جو به یک شبکه سه‌بعدی تقسیم‌بندی شده و معادلات اصلی برای این شبکه حل می‌شود. مدل‌های هواشناسی دما، سرعت باد، خورتاب و زمین‌تاب، انتقال گرما، تابش، رطوبت نسبی، و آب‌شناسی سطحی را در هر قسمت از شبکه محاسبه کرده و برهم‌کنش با نقاط همجوار را برآورد می‌کنند.

celebrating200years.noaa.gov/breakthroughswww.

گام پنجم: قرار دادن داده‌های زمان $t + \Delta t$ به عنوان شرایط اولیه و محاسبه داده‌های جدید برای زمان $t + 2\Delta t$ است. تکرار این کار در نهایت منجر به بدست آمدن وضع آب-وهوا در زمان‌های چند ساعت، و چند روز، و حتی یکی دو ماه بعد می‌شود. دقت پیش-بینی‌ها بستگی به کوچکی Δt و ابعاد شبکه مدل و طول زمان پیش‌بینی‌های مورد نظر دارد. Δt می‌تواند از مرتبه چند دقیقه و ساعت باشد.

به عنوان مثال، مرکز ملی تحقیقات جوی آمریکا از مدل هواشناسی CCSM^۱ استفاده می‌کند. در این مدل، جو با شبکه‌ای از نقاط مشخص می‌شود که در خشکی در راستای افقی ۳۰۰ کیلومتر و در راستای عمودی تقریباً ۱۲ کیلومتر با یکدیگر فاصله دارند. در همین مدل، شبکه نقاط در اقیانوس در راستای افقی تقریباً ۱۱۰ کیلومتر با یکدیگر فاصله دارند. اتفاقاتی که در فواصل کوچک‌تر از این شبکه‌بندی روی می‌دهند، مانند طوفان‌های پراکنده یا گرداب‌های اقیانوسی در شبیه‌سازی‌های این مدل دیده نمی‌شوند. فاصله‌های زمانی، معمولاً در حدود نیم ساعت یا کمتر است.

مدل‌های پیش‌بینی‌های فصلی

با توجه به مطالب گفته شده، انتظار نمی‌رود که پیش‌بینی آب‌وهوا برای مدت‌های طولانی‌تر از چند هفته قابل اعتماد باشند. اما دمای سطح اقیانوس که بر جو اثر می‌گذارد، بسیار کند تغییر می‌کند. بنابراین در بعضی مناطق می‌توان با گنجاندن این متغیر در مدل، آب‌وهوای متوسط را تا چند ماه آینده پیش‌نگری کرد. برای پیش‌نگری‌های فصلی تغییر در دمای سطح زمین و اقیانوس باید پارامتری شوند و در مدل بگنجند.

چون ظرفیت گرمایی اقیانوس زیاد است، ناهنجاری‌ها در دمای سطح اقیانوس معمولاً تا چند ماه دوام دارد. بنابراین در مناطقی که بین آب‌وهوا و الگوی دمای سطح اقیانوس ارتباط تنگاتنگ وجود دارد می‌توان آب‌وهوای میانگین را برای چند هفته و حتی برای چند ماه پیش‌بینی کرد. این نوع پیش‌نگری‌های فصلی در مناطق کم‌بارشی مانند منطقه ساحل در جنوب صحرای آفریقا و شمال شرقی برزیل نیز کاربرد دارند.

در مناطق حاره تبخیر از سطح اقیانوس بیش از سایر نقاط است. در نتیجه بخارآبی که پس از ورود به جو چگال می‌شود، گرمای نهانش را آزاد می‌کند و جریان‌های جوی را شدیداً تحت تأثیر قرار می‌دهد. در مدل‌های هواشناسی فصلی این عامل باید منظور شود.

اعتبار پیش‌نگری‌های فصلی به دقت پیش‌بینی‌های دمای سطح اقیانوس بستگی دارد. برای دانستن دمای سطحی لازم است جریان‌های اقیانوسی و ارتباط تنگاتنگ آنها با جریان‌های جوی معلوم باشد و در مدل آورده شود. بیشترین تغییرات در دمای سطحی اقیانوس‌ها در مناطق استوایی روی می‌دهد، و اقیانوس‌ها نیز در این مناطق از هر جای

1. Community Climate System Model

دیگری بیشتر قابل پیش‌بینی‌اند. به همین خاطر بیشترین کار هم روی دمای سطحی اقیانوس‌ها در مناطق حاره انجام شده است.

ال‌نینو‌ها ناهنجاری در دما و جریان‌های اقیانوسی و بارش‌ها هستند که در مناطق حاره در شرق اقیانوس آرام و تا حد کمتری در عرض‌های جغرافیایی میانی روی می‌دهند. بازتولید و پیش‌بینی توالی ال‌نینو‌های گذشته و آینده می‌تواند آزمونی برای هر مدل هواشناسی باشد. اگر مدلی بتواند این ناهنجاری اقلیمی را شبیه‌سازی کند مدل خوبی خواهد بود. دانشمندان با ترکیب مدل‌های جوی با مدل‌های اقیانوسی در مناطق اقیانوس آرام توانسته‌اند ال‌نینو‌ها را تا یک سال پیش از وقوع آنها پیش‌بینی کنند.

مدل‌های اقلیمی

این مدل‌ها تغییرات آب‌وهوا در بازه‌های زمانی بلند، از چند سال تا چندین ده سال و صد سال را، مد نظر دارند. متغیرهایی که برای توصیف آب‌وهوا به کار می‌روند معمولاً متغیرهایی هستند که به جو مربوط می‌شوند. اما اقلیم مجموعه‌ی جو، خشکی، اقیانوس، سرماکره، زیست‌کره و برهم‌کنش آنها با یکدیگر را با هم در نظر می‌گیرد. نکته‌ی دیگر این که مدل‌های اقلیمی برخلاف مدل‌های هواشناسی رفتار آشوبناک ندارند. بسیاری از فرایندها در سامانه‌ی اقلیم، مانند توالی فصل‌ها، بادهای تجاری، الگوهای آب‌وهوایی هر منطقه و حتی ال‌نینو‌ها، در عین حال که تکرار می‌شوند، به آرامی تغییر می‌کنند، مگر این که عامل یا عوامل خارجیِ پر قدرتی مانند آتشفشان‌ها بر کل سامانه اثر بگذارند و سبب تغییرات سریع شوند.

بنابراین با داشتن یک مدل هواشناسی می‌توان پارامترهای اولیه‌ی آن را تغییر داد و واکنش آب‌وهوا را نسبت به مقادیر جدید پارامترها بررسی کرد. به عنوان مثال می‌توان مقدار گازهای گل‌خانه‌ای جو را زیاد و کم کرد و آب‌وهوای جدید و مآلاً رفتار اقلیم را بدست آورد.

برای اطمینان از درستی مدل می‌توان آن را برای بازسازی اقلیم‌های گذشته به کار برد. معمولاً بازسازی اقلیم ۲۵ سال گذشته برای این منظور مناسب است. مشاهدات ماهواره‌ای زیادی برای این دوره در دسترس است. پس از حصول اطمینان از درستی مدل در بازسازی اقلیم گذشته، شبیه‌سازی اقلیم در آینده‌های چند ده ساله انجام می‌گیرد.

بازخوردها در سامانه اقلیم، پیش‌نگری‌های اقلیم

مدلی دقت و صحت بیشتر دارد که همه عوامل مؤثر در هر یک از مولفه‌های اقلیم و هر آنچه را که به برهم‌کنش بین این مولفه‌ها مربوط می‌شود، در خود بگنجاند. در قاب ۱ - ۳، این برهم‌کنش‌ها بازخورد نامیده شدند و منظور از آنها تأثیری است که تغییر در یکی از مولفه‌ها تغییر جدیدی روی خود مولفه یا مولفه‌های دیگر می‌گذارد. وارد کردن هر یک از این بازخوردها در مدل‌های اقلیم دقت و صحت مدل را افزایش می‌دهد. در زیر مهم‌ترین بازخوردها معرفی می‌شوند.

بازخورد بخار آب

هوای گرم‌تر، آب بیشتری از اقیانوس‌ها و زمین‌های مرطوب بخار می‌کند. بخار آب یک گاز گل‌خانه‌ای قوی است. بنابراین زیاد شدن آن در جو به گرم شدن بیشتر جو می‌انجامد. بنابراین بخار آب روی گرمایش جو و زمین بازخورد مثبت دارد.

بازخورد بخار آب شناخته شده است و در مدل‌های هواشناسی منظور می‌شود. جنبه‌های مختلف این بازخورد که در مدل‌ها وارد می‌شوند عبارتند از: تبخیر آب و چگالش مجدد آن، انتقال گرما از طریق جریان‌های افقی^۱، و جریان‌های قائم هم‌رفتی^۲ (عامل باران-های تند همراه با رعدوبرق) که به سبب تفاوت دما در ارتفاعات به وجود می‌آید.

بازخورد تابشی/ابر

این بازخورد شامل چند فرایند بسیار پیچیده است. ابرها از طرفی تابش خورشید را به فضا باز می‌تابانند و در نتیجه روی گرمایش زمین بازخورد منفی دارند و زمین را خنک می‌کنند. از سوی دیگر به مثابه پتویی روی زمین مانع خروج تابش گرمایی زمین به فضا می‌شوند. خودشان هم تابش گرمایی به سوی زمین می‌فرستند. از این نظر بازخورد مثبت روی گرم شدن زمین دارند. این که کدام یک از این دو وجه غالب باشد به دما و ارتفاع ابر و سپیدایی آن بستگی دارد. بنابراین بسته به این که ابر از مه تشکیل شده باشد یا از ذرات یخ، و بسته به این که این ذرات چه اندازه داشته باشند یکی از این دو بازخورد غالب خواهد شد. معمولاً اگر ارتفاع ابر کم باشد بازخورد منفی غالب است و به سرد شدن زمین کمک می‌کند. اگر ارتفاع ابر زیاد باشد بازخورد مثبت غلبه می‌کند و زمین را گرم‌تر می‌کند.

1. advection

2. convection

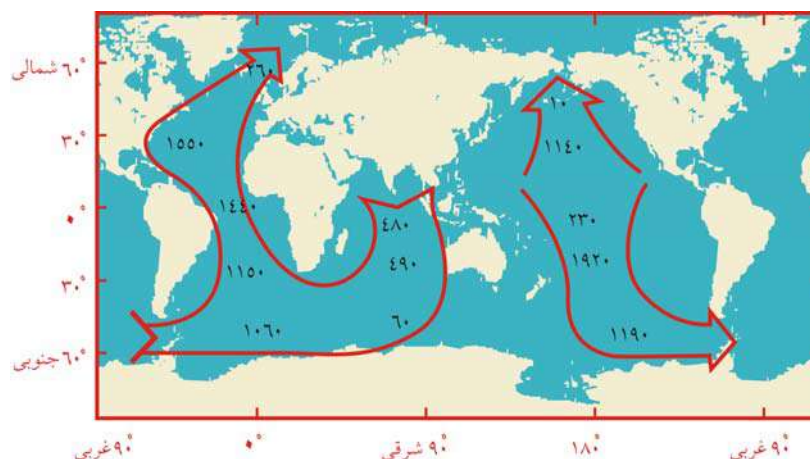
برای وارد کردن بازخورد ابرها در مدل، آنها را دو دسته می‌کنند: *ابرهای لایه‌ای* با اندازه‌های بزرگ‌تر از ابعاد شبکه مدل و *ابرهای هم‌رفتی* با اندازه‌های کوچک‌تر از ابعاد شبکه. در مدل‌های قدیمی هر وقت که رطوبت نسبی از یک حد بحرانی بیشتر می‌شد مدل اجازه می‌داد ابرهای لایه‌ای در سطوحی مشخص به وجود آیند. با این تکنیک پوشش ابری تولید شده در مدل با آنچه که از موارد ثبت‌شده اقلیمی مشاهده شده بود توافق خوبی داشت. مدل‌های کنونی فرایندهای چگالش، انجماد، بارش و تشکیل ابرها را بسیار کامل‌تر از پیش پارامتری می‌کنند. خواص ابرها هم با جزئیات بیشتری در نظر گرفته می‌شوند، مثلاً با لحاظ کردن قطره‌های آب، بلورهای یخ، تعداد و اندازه قطره‌ها. با این کار ویژگی‌های تابشی ابرها با دقت بیشتری منظور می‌شود. در مدل‌های پیچیده‌تر و مفصل‌تر حتی تأثیر هواویزها بر خواص ابرها نیز منظور می‌شود. سهم ابرهای هم‌رفتی نیز در پارامتری کردن هم‌رفت در مدل گنجانده می‌شود.

میزان و مثبت یا منفی بودن بازخورد ابر به فرمول‌بندی مدل و همچنین به شیوه توصیف تشکیل ابر بستگی دارد. بنابراین بازخورد تابشی ابر از مدلی به مدل دیگر فرق می‌کند. حتی علامت این بازخورد در بعضی مثبت و در بعضی دیگر منفی است. رفتار ابرها هم از مدلی به مدل دیگر تفاوت می‌کند. مثلاً در یک مدل ممکن است میزان ابرهای ارتفاعات پایین با افزایش گازهای گل‌خانه‌ای افزایش یابد و در مدلی دیگر کم شود. عدم اطمینان حاصل از همه این عوامل روی حساسیت/اقلیم تأثیر می‌گذارد.

بازخورد جریان‌های اقیانوسی

اقیانوس‌ها نقش بسزایی در اقلیم زمین داشته و دارند. این مخازن عظیم آب و انرژی به سه وجه بر اقلیم اثر می‌گذارند:

- برهم‌کنش بین اقیانوس و جو: تبخیر از اقیانوس و چگالش مجدد بخار آب در جو مقادیر زیادی گرما از اقیانوس به جو منتقل می‌کند و نظام بادهای شکل می‌گیرد. بادهای نوبه خود بر جریان‌های اقیانوسی اثر می‌گذارند.
- ظرفیت گرمایی اقیانوس‌ها بسیار بیشتر از ظرفیت گرمایی جو است. مقدار زیادی گرما لازم است تا دمای اقیانوس اندکی تغییر کند. کل ظرفیت گرمایی جو کمتر از ظرفیت گرمایی سه متر عمق از آب اقیانوس‌هاست. بنابراین در دنیایی که رو به گرم شدن است



شکل ۲ - ۸ تخمینی از انتقال گرما از طریق اقیانوس‌ها به قطب‌ها. ارقام به تراوات‌اند. برگرفته از Houghton

اقیانوس بسیار کندتر از جو گرم می‌شود. این موضوع را در مناطق ساحلی به وضوح می‌توان مشاهده کرد. در مناطق ساحلی تغییرات دما در طول شبانه‌روز بسیار کمتر از مناطق دور از آب است. از این نقطه نظر اقیانوس‌ها نقشی تعیین‌کننده در تثبیت دمای جو دارند.

- جریان‌های اقیانوسی سبب می‌شوند گرما در سرتاسر سامانه اقلیم توزیع شود. مقدار گرمایی که از طریق جریان‌های اقیانوسی از استوا به قطب‌ها منتقل می‌شود، تقریباً برابر با مقداری است که از طریق جو انتقال پیدا می‌کند، اما توزیع آن از یک منطقه به منطقه دیگر متفاوت است (شکل ۲ - ۸). مقدار گرمایی که از طریق اقیانوس اطلس شمالی منتقل می‌شود بیش از ۱۰۰۰ تراوات (10^{15} وات) و بسیار عظیم است. برای تصور این رقم کافی است توجه شود که کل انرژی تجاری تولید شده در سرتاسر جهان حدود ۱۲ تراوات (12×10^{12} وات) است. بنابراین در هر مدل معتبر و مطمئن ساختار و دینامیک اقیانوس باید منظور شود.

در مدل‌های اقلیمی اولیه اقیانوس‌ها خیلی کلی در نظر گرفته می‌شدند، مانند یک نوار به عمق ۵۰ تا ۱۰۰ متر (تقریباً معادل لایه آمیخته اقیانوس) که فقط به سرد و گرم شدن فصلی سطح زمین واکنش نشان می‌داد. در مدل‌های جدید جریان‌های اقیانوسی و ارتباط

آنها با جریان‌های جوی با تفضیل بیشتر در نظر گرفته می‌شوند. فرمول‌بندی دینامیک و فیزیک اقیانوس مشابه جو است، تنها شوری و چگالی آب باید به عنوان عوامل جدید منظور شوند. از سوی دیگر چون فرایندهایی مانند گرداب‌های اقیانوسی در ابعاد کوچک-تری نسبت به مشابه‌شان در جو روی می‌دهند، بنابراین اندازه سلول‌های شبکه در اقیانوس‌ها را باید کوچک‌تر از ابعاد شبکه در جو در نظر گرفت. معمولاً سلول‌های اقیانوسی را نصف سلول‌های جوی در نظر می‌گیرند. اما چون تغییرات اقیانوس‌ها آهسته هستند، بازه‌های زمانی انتگرال‌گیری برای مولفه اقیانوسی بزرگ‌تر در نظر گرفته می‌شوند. در سطح مشترک اقیانوس - جو، گرما و آب و تکانه مبادله می‌شود. آب شیرین باران و برف از شوری اقیانوس می‌کاهد و تبخیر شوری را می‌افزاید. هر دو عامل بر گردش آب در سطح و در اعماق اقیانوس‌ها اثر می‌گذارد و اقلیم را به خصوص در نواحی شمالی اقیانوس اطلس متأثر می‌کند. این بازخورد احتمالاً عامل تغییرات بزرگ اقلیم در گذشته بوده است.

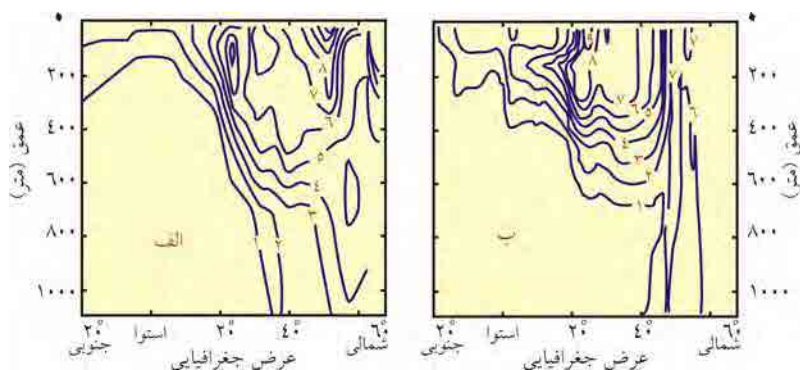
بازخورد از سرماکره

برف و یخ سپیدایی زیادی دارند و تابش خورشید را به خوبی به فضا باز می‌تاباند. با آب شدن آنها میزانی از تابش خورشید که قبلاً بازتابیده می‌شد جذب اقیانوس و خشکی می‌شود. بنابراین ذوب یخ بازخورد مثبت روی گرمایش زمین دارد. یخ در مناطق قطبی، به خصوص در زمستان، سطح بزرگی از دریاها را می‌پوشاند. بادهای و جریان‌های اقیانوسی این یخ‌های شناور را روی دریاها حرکت می‌دهند. بنابراین در هر مدل اقلیمی به هنگام گنجاندن برهم‌کنش سرماکره - دریا لازم است رشد و نابودی و دینامیک یخ منظور شود. یخ‌های روی خشکی‌ها هم باید در نظر گرفته شوند. پوشش یخ روی خشکی‌ها از سال تا سال زیاد تغییر نمی‌کند، بنابراین کافی است به عنوان یک پارامتر ثابت، در نظر گرفته شوند. اما لازم است بالا آمدن سطح آب دریاها به خاطر ذوب یخ‌ها، ولو اندک، در مدل منظور شود.

برهم‌کنش یخ با خشکی هم مهم است. رطوبت و سپیدایی خاک از مهم‌ترین ویژگی‌های خشکی‌ها هستند. مدل‌ها باید تغییرات رطوبت خاک را از طریق بررسی میزان تبخیر و بارندگی لحاظ کنند. سپیدایی به نوع خاک، پوشش برف و رطوبت سطح بستگی دارد و لازم است پارامتری شده و در مدل منظور شوند.

قالب ۱-۸: شبیه‌سازی حرکت تریتم در اقیانوس اطلس

مقایسه بین مشاهده و شبیه‌سازی از روی مدل در مورد توزیع یک نشانگر یکی از راه‌های بررسی اعتبار مولفه اقیانوسی هر مدل است. در طی آزمایش‌های اتمی که در دهه ۱۹۵۰ انجام گرفتند، تریتم رادیواکتیو (یکی از ایزوتوپ‌های هیدروژن) وارد اقیانوس‌ها شد و از طریق جریان‌های اقیانوسی پخش شد. شکل زیر مقایسه‌ای است بین آنچه مشاهدات نشان می‌دهند و آنچه یک مدل اقیانوسی دوازده مرحله‌ای بدست داده است. این مقایسه برای بخشی از شمال غربی اقیانوس اطلس در حدود یک دهه پس از انفجارهای اتمی انجام گرفته است.



توزیع تریتم در قسمتی از شمال غربی اقیانوس اطلس نزدیک به یک دهه پس از انفجارهای اتمی. (الف)

مشاهدات برنامه GEOSECS و (ب) شبیه‌سازی یک مدل اقلیمی. برگرفته از Houghton

این چهار بازخورد نقش مهمی در سامانه اقلیم و به خصوص در اقلیم منطقه‌ای دارند. هر مدلی که تغییرات منطقه‌ای را نشان دهد شامل فرمول‌بندی فرایندهای غیرخطی است، و مدل باید بتواند اثر این بازخوردها را به بهترین وجه ممکن توصیف کند.

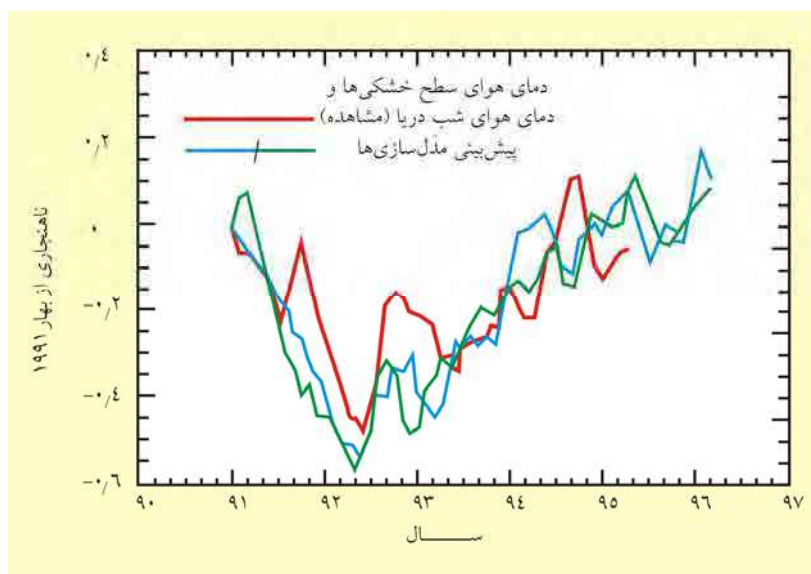
اعتبار مدل‌ها

سه راه برای آزمودن اعتبار یک مدل وجود دارد:

- مدل را برای چند سال گذشته اجرا می‌کنند. اگر نتایج با مشاهدات گذشته هم‌خوانی داشت و توزیع میانگین پارامترهای فصلی، مانند فشار، دما، و میزان بارندگی با

مشاهدات قابل مقایسه بود، مدل معتبر است. مدل‌های فعلی به خوبی از عهده چنین آزمون‌هایی برمی‌آیند.

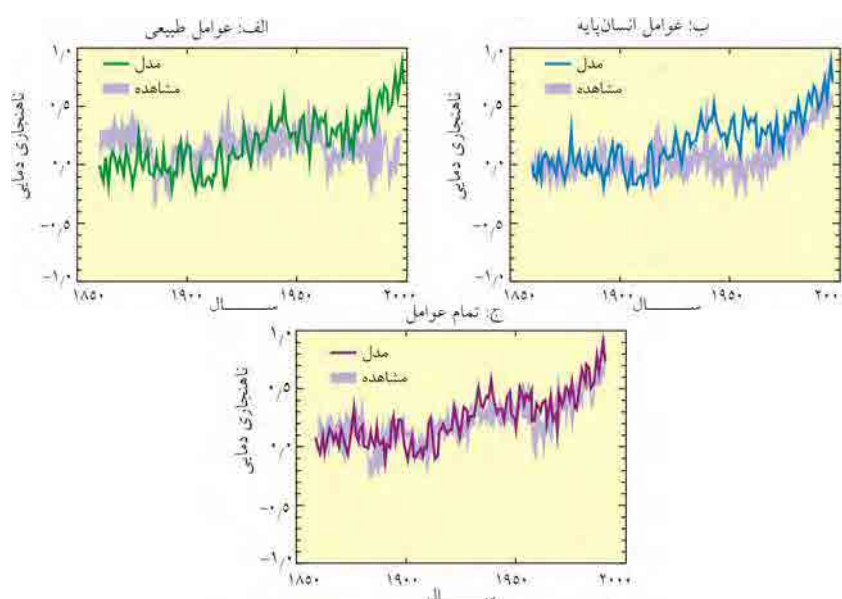
- اقلیم دیرینه را با پارامترهای مربوط به عصرهای دیرین شبیه‌سازی می‌کنند و با مشاهدات اقلیم دیرینه مقایسه می‌کنند. به عنوان مثال ۹۰۰۰ سال پیش مدار زمین به دور خورشید با آنچه امروز است فرق می‌کرد. حضیض (کمترین فاصله زمین - خورشید) که اکنون در دی ماه روی می‌دهد در آن موقع در تیرماه روی می‌داد (به بخش ۶، چرخه‌های ملانکوویچ نگاه کنید). کجی محور زمین نسبت به صفحه مدار زمین هم کمی با مقدار امروزی فرق داشت (به جای 23.5° امروزی، 24° بود). به دلیل این تفاوت‌ها توزیع جغرافیایی و فصلی انرژی دریافتی از خورشید در آن زمان متفاوت از وضع امروزی بود و اقلیم هم با اقلیم امروزی فرق داشت. مدل‌ها این تغییرات را منظور کرده و اقلیم دیرینه را شبیه‌سازی می‌کنند. شبیه‌سازی‌های امروزی با آنچه که نشانگرهای میانجی از اقلیم‌های گذشته نشان می‌دهند به طور کیفی همخوانی دارند.
 - انتظار می‌رود مدل‌ها بتوانند اختلالات بزرگ در اقلیم را پیش‌بینی کنند. پیش‌بینی رویدادهای ال‌نینو و ناهنجاری‌های اقلیمی وابسته به آن تا یک سال پیش از وقوع نشانه خوبی برای بررسی اعتبار مدل‌هاست. فوران‌های آتشفشانی نیز اقلیم را متأثر می‌کنند. یک مدل خوب باید این اثرات را نشان دهد. مدل‌های موجود نشان داده‌اند که در سال ۱۹۹۱ به خاطر غبار آتشفشان کوه پیناتوبو و کم رسیدن تابش خورشید به زمین، باید زمستان در خاورمیانه بسیار سرد و در اروپای غربی معتدل باشد که با آنچه روی داده هماهنگی دارد (شکل ۳ - ۸).
- در شکل ۴ - ۸ سه شبیه‌سازی از دمای میانگین جهانیِ هوای سطح زمین دیده می‌شود. در شبیه‌سازی (الف) تنها عوامل طبیعی دخالت داده شده‌اند. در شبیه‌سازی (ب) تنها عواملی که انسان در آنها دست داشته وارد شده‌اند. در شبیه‌سازی (ج) هر دو مجموعه عوامل طبیعی و انسانی منظور شده‌اند. چنانچه دیده می‌شود شبیه‌سازی (ج) با مشاهدات مطابقت بهتری دارد.
- نکته قابل توجه این است که هم در مشاهده‌ها و هم در شبیه‌سازی‌ها، نوسان‌های کوچکی وجود دارد. پرسیده شده است آیا این نوسانات ناشی از افزایش گازهای گل‌خانه‌ای انسان‌پایه هستند یا طبیعی‌اند. آی‌پی‌سی‌سی سعی کرده است به این سوال جواب دهد.



شکل ۳ - ۸ تغییرات مشاهده شده و پیش‌بینی شده دمای سطح اقیانوس و خشکی در سرتاسر جهان پس از فوران کوه پیناتوبو. پیش‌بینی‌ها بر اساس سه ماه اجرای مدل انجام شده‌اند. برگرفته از Houghton

گزارش ارزیابی اول آی‌پی‌سی‌سی، سال ۱۹۹۰، با احتیاط عنوان کرد با این که گرمایش مشاهده شده با پیش‌نگری‌های مدل‌های اقلیمی به خوبی همخوانی دارد، اما اندازه‌اش با نوسانات طبیعی اقلیمی برابری می‌کند. در آن زمان تغییر اقلیم در اثر فعالیت‌های انسانی مورد قبول همگان نبود. تا سال ۱۹۹۵ شواهد بیشتری بدست آمدند و آی‌پی‌سی‌سی در گزارش ارزیابی دوم خود، سال ۱۹۹۵، باز هم محتاطانه، اما با قاطعیت بیشتر نتیجه گرفت که انسان در تغییر اقلیم دست داشته است. در مطالعاتی که از آن پس انجام گرفته است پژوهشگران نوسانات طبیعی را با تخمین‌ها و مدل‌های بهتری برآورد کرده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که «بسیار نامحتمل است که گرمایش در صد سال گذشته فقط در اثر عوامل طبیعی روی داده باشد».

علاوه بر بررسی میانگین جهانی پارامترهای اقلیم‌شناختی، مطالعات آماری مفصلی هم روی الگوهای همبستگی بر اساس روش‌های بهینه آشکارسازی صورت گرفته است.



شکل ۴ - ۸ مقایسه شبیه‌سازی دمای میانگین سطحی سالانه جهان (منحنی‌های خاکستری) برای سال‌های ۱۸۶۰ تا ۲۰۰۰ و مقایسه آنها با دمای مشاهده شده (منحنی‌های سیاه). (الف) تنها عوامل طبیعی، مانند تابش خورشید و فعالیت‌های آتشفشانی در مدل منظور شده‌اند. (ب) تنها عوامل بشری، مانند گازهای گل‌خانه‌ای انسان‌پایه و هواویزهای سولفاتی منظور شده‌اند. (ج) هر دو دسته عوامل طبیعی و انسانی منظور شده‌اند. پهنای نواری که در منحنی‌های خاکستری دیده می‌شود برهم‌نهی نتایج چهار اجرا از یک مدل است و گستره نوسانات مدل را نشان می‌دهد. تنها در نمودار (ج)، مدل و مشاهده با یکدیگر همخوانی دارند. برگرفته از *Houghton*

آی‌پی‌سی‌سی با ملاحظه این مطالعات در گزارش سوم خود، سال ۲۰۰۱، نتیجه گرفت «قسمت عمده گرمایش مشاهده شده در ۵۰ سال گذشته به دلیل افزایش فراوانی گازهای گل‌خانه‌ای بوده است». بالاخره در گزارش چهارم آی‌پی‌سی‌سی، سال ۲۰۰۷، چنین دیده می‌شود «مشاهدات مربوط به افزایش جهانی دمای میانگین هوا و اقیانوس‌ها، آب شدن وسیع برف‌ها و یخ‌ها، و بالا آمدن جهانی تراز دریاها، حکایت از گرم شدن مسلم نظام اقلیم دارد».

آینده مدل‌های اقلیمی

در گفته‌های بالا اشاره‌ای به نقش زیست‌کره در مدل‌های اقلیم نشده است. با افزایش سرعت و قدرت کامپیوترها این کمبود دیر نخواهد پایید. در آینده شاهد ظهور مدل‌هایی خواهیم بود که همه فرایندهای فیزیکی، شیمیایی، زیستی و دینامیکی جو، اقیانوس، و زیست‌کره را به طور جامع و کامل در بگیرند.

دانش مدل‌سازی اقلیم سریعاً در حال رشد است. مدل‌های کامپیوتری‌ای که تاکنون ساخته و پرداخته شده‌اند بی‌شک از زمره پیچیده‌ترین و مفصل‌ترین محاسباتی هستند که در حوزه علوم طبیعی طراحی شده‌اند. به علاوه مدل‌های اقلیم که تاکنون تنها عوامل فیزیکی و شیمیایی اقلیم را توصیف کرده‌اند اکنون می‌توانند اطلاعات اقتصادی و اجتماعی جوامع را هم در خود بگنجانند. با افزایش توان کامپیوترها به تدریج حساسیت مدل‌ها را هم می‌توان بهتر محک زد.

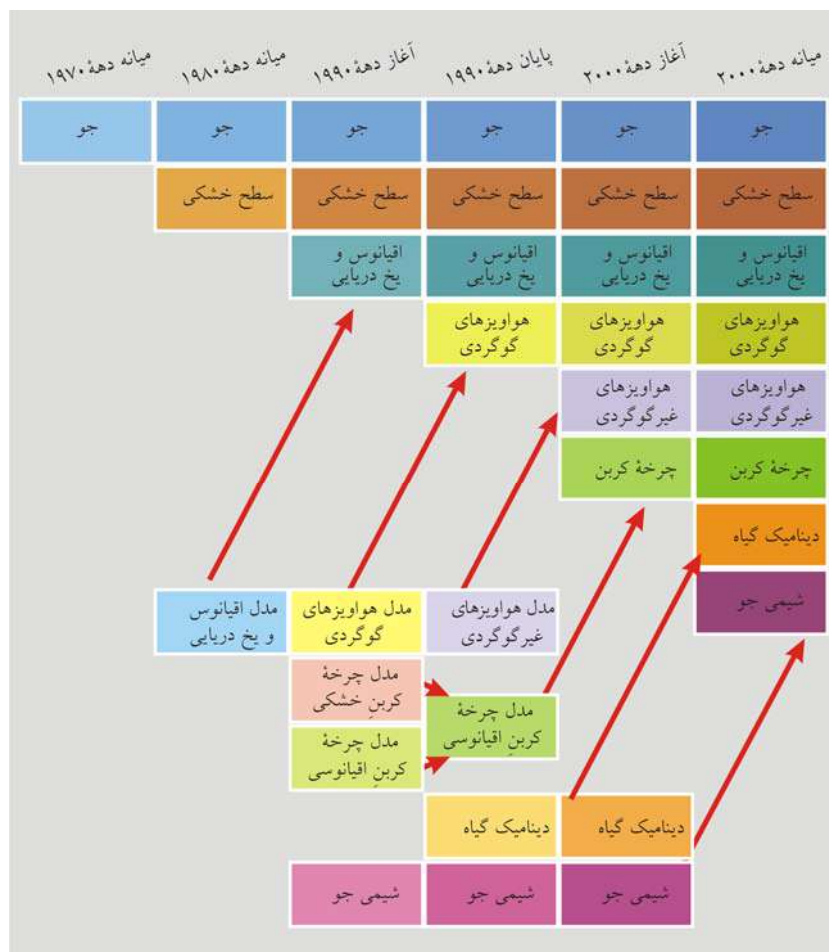
در پروژه خاص بسیار جالبی، از هزاران کاربر کامپیوتر در سرتاسر جهان خواسته می‌شود آخرین مدل‌های پیش‌بینی اقلیم را در خانه، مدرسه و محل کارشان اجرا کنند. هدف این است که با تلفیق و مرتب کردن داده‌ها از هزاران مدلی که اجرا می‌شوند بزرگ‌ترین آزمایش پیش‌نگری اقلیم تحقق یابد.

هنوز کارهای زیادی برای رفع عدم قطعیت‌های مدل‌ها باقی مانده است. اولویت با دانستن بهتر تشکیل و دینامیسم ابرها و برهم‌کنش جو - اقیانوس است. کوچک کردن ابعاد شبکه مدل‌ها از جمله موارد مهمی است که به سرعت و قدرت کامپیوترها بستگی پیدا می‌کند. از سوی دیگر مطالعه و بررسی همه مولفه‌های اقلیم از جنبه علمی می‌تواند به بهتر شدن مدل‌ها کمک کند. انواع برنامه‌های ملی و بین‌المللی برای برآوردن همه این نیازها در دست اقدام‌اند.

جدول صفحه بعد تصویری از تحول و تاریخچه مدل‌های اقلیمی را نشان می‌دهد. در دهه ۱۹۷۰ تنها مدل‌های هواشناسی مطرح بودند. به موازات پیشرفت تکنیک‌های محاسباتی و درک بهتر دانش اقلیم، بر پیچیدگی مدل‌های اقلیم نیز به طور قبل ملاحظه‌ای افزوده شده است.

1. Global Circulation Climate Models

تاریخچه تحول مدل‌های اقلیم برگرفته از www.camelclimatechange.org



مرجع‌ها:

- IPCC. *Climate Change 2007, The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, 2007
- Houghton, J. *Global Warming, The Complete Briefing*, Fourth Edition, Cambridge University Press, 2009
- Mathez, E. A. *Climate Change: The Science of Global Warming and Our Energy Future*, Columbia University Press, 2009

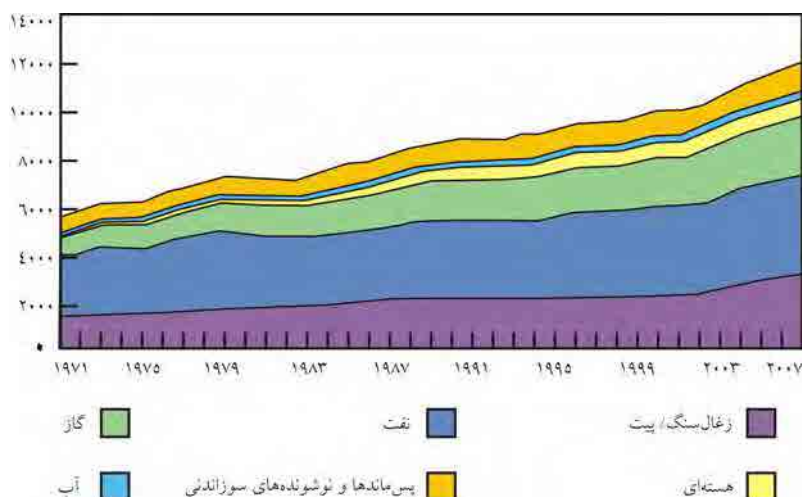
بخش ۹

انرژی و آینده

از آغاز سده بیست و یکم مصرف سوخت‌های فسیلی ۸۰٪ نشر سالانه کربن دی‌اکسید را سبب می‌شود. درصد قابل توجهی هم از جنگل‌زدایی و تغییر در نحوه استفاده از زمین، برای تأمین غذا و مسکن برای جمعیت روزافزون جهان نشر می‌شود. صنعت سیمان نیز در نشر کربن دی‌اکسید نقش قابل توجه دارد. کنترل تغییرات ناخواسته اقلیم در دهه‌ها و سده‌های آینده در گرو تجدیدنظر در نوع انرژی و مصرف بهینه آن و نحوه استفاده از زمین است. لازمه این کار نیز شناخت منابع انرژی، قابلیت دسترسی به آنها، و مسائل دیگری است که در این بخش به اجمال به آنها پرداخته می‌شود.

منابع انرژی

خورشید منشأ بیشتر انرژی‌های در دسترس در روی زمین است. در سوخت‌های فسیلی (زغال‌سنگ، نفت، و گاز) این انرژی از صدها میلیون سال پیش در اعماق زمین ذخیره شده است. انرژی موجود در زیست‌توده‌ها (غذا، چوب، روغن‌ها، ضایعات گیاهی و



شکل ۹-۱. آهنگ رشد مصرف انواع انرژی از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۰۷ برحسب میلیارد تن نفت معادل در سال. برگرفته از گزارش «آمارهای کلیدی جهان»

حیوانی) و آب و باد نیز از خورشید نشأت می‌گیرند. استفاده مستقیم از خورشید به صورت گرما و الکتریسیته فتوولتاییک نیز شناخته شده است. انرژی‌های دسته اخیر را، از این نظر که در فواصل زمانی از یک روز تا چند سال تجدید می‌شوند، انرژی‌های نوشونده خواهیم نامید. انرژی هسته‌ای و انرژی زمین‌گرمایی منشأ خورشیدی ندارند و هر دو ناشی از عناصر رادیواکتیو موجود در زمین به هنگام تکوین آن‌اند.

سابقه استفاده انسان از منابع انرژی

تا یک صد و پنجاه سال پیش، جوامع انسانی انرژی مورد نیاز خود را عمدتاً از منابع سنتی مانند چوب، انواع رویدنی‌ها و ضایعات گیاهی و حیوانی، و نیروی حیوانات فراهم می‌کردند. از ۱۸۶۰ به این سو صنعت توسعه می‌یابد و آهنگ مصرف انرژی در یک بازه زمانی صد ساله تقریباً ۳۰ برابر می‌شود. انرژی مورد نیاز در ابتدا از زغال‌سنگ بود. در دهه ۱۹۵۰ از نفت، و در دهه‌های اخیر از گاز طبیعی بدست می‌آید. شکل ۹-۱ رشد مصرف جهانی انواع انرژی را از ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۷ نشان می‌دهد.

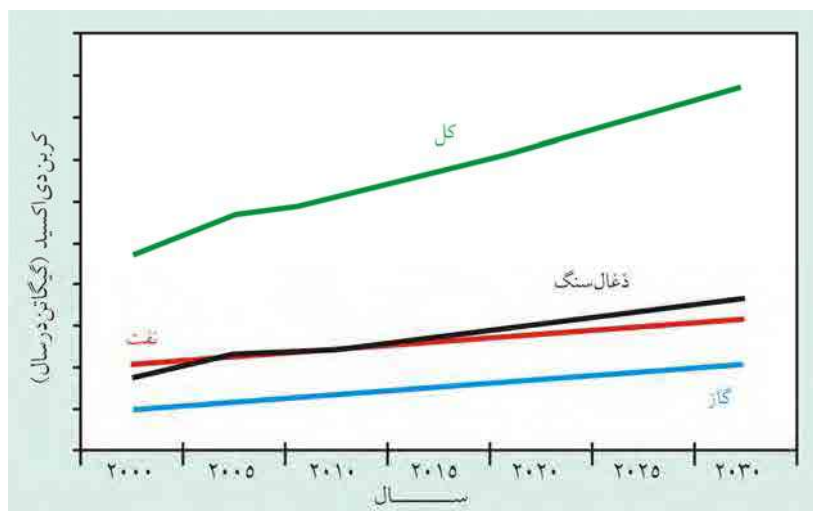
آمار سال ۲۰۰۷ آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)، مصرف جهانی سوخت‌های فسیلی را به شرح زیر نشان می‌دهد: نفت ۳۴٪، زغال‌سنگ ۲۷٪، گاز طبیعی ۲۱٪، که روی هم رفته ۸۲٪ از تولید انرژی کل جهان را در بر می‌گیرند. در سال ۲۰۰۵ نشر کربن دی‌اکسید از این منابع حدود ۲۹ گیگاتن کربن دی‌اکسید بوده است. علاوه بر این مقدار، ۷ گیگاتن دیگر هم، به ترتیب در اثر جنگل‌زدایی، فعالیت‌های کشاورزی، و غیره نشر شده است، که جمعاً به ۳۶ گیگاتن کربن دی‌اکسید در سال بالغ می‌شود.

مصرف انرژی کل جهان در سال ۲۰۰۷، یک هزار و دویست میلیارد تن نفت معادل بوده است. با همه این احوال، نزدیک به یک‌سوم از جمعیت جهان تنها به سوخت‌های سنتی مانند چوب، فضولات حیوانی، و دیگر انواع زیست‌توده‌ها متکی‌اند و در آغاز سده بیست و یکم به هیچ یک از انرژی‌های تجاری یاد شده در بالا دسترسی ندارند.

مهم‌ترین مصرف انرژی برای تولید الکتریسیته است. سهم منابع انرژی در تولید الکتریسیته در سال ۲۰۰۷ بدین قرار است: زغال‌سنگ ۴۲٪، گاز طبیعی ۲۱٪، آب ۱۶٪، نیروی هسته‌ای ۱۳/۵٪، نفت ۵/۶٪ و منابع نو و نوشونده تنها سهم ناچیز ۲/۶٪ را داشته‌اند.

مصرف انرژی و گرمایش زمین

کربن دی‌اکسید بزرگ‌ترین آسیب را به اقلیم می‌رساند. بر اساس گزارش آی‌پی‌سی‌سی، برای آن که افزایش دمای متوسط جهان تا سال ۲۰۵۰ به کمتر از ۳ درجه سانتی‌گراد (نسبت به پیش از آغاز عصر صنعت) محدود شود، لازم است نشر کربن دی‌اکسید در حد سال ۲۰۰۰ (حدود ۲۵ گیگاتن در سال) ثابت بماند یا به کمتر از آن کاهش یابد. اگر مصرف انرژی به رشد فعلی‌اش ادامه دهد و در الگوهای تولید و مصرف آن تغییر قابل ملاحظه رخ ندهد، آهنگ نشر کربن دی‌اکسید از سوخت‌های فسیلی تا سال ۲۰۳۰ بیش از ۵۰٪ رشد خواهد کرد و به ۴۰ گیگاتن کربن دی‌اکسید در سال خواهد رسید و تغییرات بزرگ و ناخوشایندی را در اقلیم سبب خواهد شد (شکل ۲ - ۹). پیش‌بینی می‌شود حتی اگر نشر گازهای گل‌خانه‌ای در سطح سال ۲۰۰۵ ثابت بماند و کم نشود، دمای زمین تا نیمه‌های سده بیست و یکم بیش از ۵ درجه (نسبت به پیش از آغاز عصر صنعت) گرم‌تر خواهد شد.



شکل ۲ - ۹ نشر سالانه کربن دی اکسید از سوخت های فسیلی. برگرفته از Mathez.

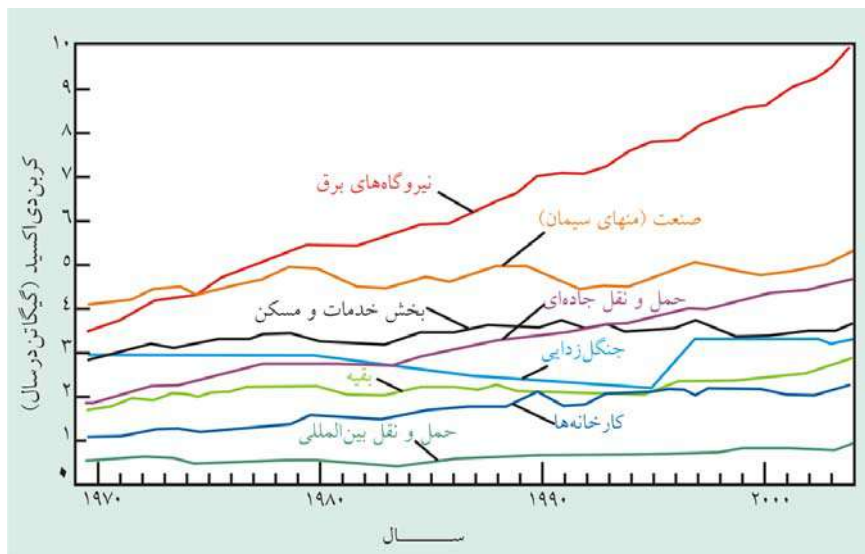
راه های کاهش نشر کربن دی اکسید

برابر شکل ۳ - ۹، در سال های اخیر صنعت برق یک سوم از نشر کربن دی اکسید را سبب می شود. مهم تر این که نشر از این بخش بسیار سریع تر از بخش های دیگر رشد می کند. صنعت حمل و نقل نیز در نشر کربن دی اکسید سهم زیادی دارد. پیش بینی می شود در آینده نزدیک بخش حمل و نقل نیز عمده انرژی اش را از برق تأمین کند. بنابراین اگرچه برای مقابله با تغییرات ناخواسته اقلیم لازم است در همه جبهه ها سیاست کاهش در پیش گرفته شود، اما با توجه به نیاز روزافزون جهان به برق، ضروری است بررسی راه های کاراتر تولید برق و جایگزینی سوخت های فسیلی در آن با انرژی های نو و نوشونده در اولویت قرار گیرد. انرژی های جایگزین کدام اند؟

بررسی شده است، حتی با سرمایه گذاری زیاد روی انرژی زمین گرمایی به زحمت به توان بیش از ۵٪ از نیاز برق کشوری مانند آمریکا را تا سال ۲۰۵۰ برآورده کرد^۱. به نظر می رسد برای بقیه دنیا هم وضع به همین ترتیب باشد. انرژی زیست توده در حال حاضر ۲۰٪ از تولید الکتریسیته آمریکا را برعهده دارد و چندان جای توسعه ندارد. انرژی حاصل

1. The Future of Geothermal Energy (Cambridge, Mass.: MIT, 2006).

<http://geothermal.inel.gov>



شکل ۳-۹. نشر سالانه کربن دی اکسید از بخش های مختلف فعالیت های انسانی. نیروگاه های برق، صنعت (منهای سیمان)، مصارف خانگی و خدماتی، سفر و حمل و نقل جاده ای، جنگل زدایی، پالایشگاه ها، حمل و نقل بین المللی. نشر حاصل از سوزاندن زیست سوخت ها و چوب در بخش جنگل زدایی منظور شده است. برگرفته از Mathez

از امواج و جزرومد دریاها نیز قابل توجه نیست. انرژی آب قابل توجه و تا اندازه ای قابل توسعه است. می ماند انرژی خورشید و باد که هر دو در شروع توسعه مقدماتی هستند.

برق بدون کربن

پیش تر اشاره شد برای تثبیت اقلیم در دمای سه درجه بالاتر از دمای آغاز عصر صنعت، نشر کربن دی اکسید باید تا حد نشر سال ۲۰۰۰ کاهش یابد. چاره اصلی برای رسیدن به این هدف، تولید برق بدون کربن است و باید در فاصله سال های ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ تحقق یابد. رسیدن به این هدف به پنج روش ممکن است: (۱) افزایش بازدهی تولید و مصرف در تمام بخش ها، (۲) کاهش شدت کربن، (۳) بدام اندازی و انبارش کربن، (۴) استفاده از انرژی هسته ای، و (۵) استفاده از هر انرژی نوشونده در دسترس. در زیر به هر یک از این راه چاره ها به اختصار پرداخته می شود:

افزایش بازدهی: بازده بعضی از نیروگاه‌های زغال‌سوز در ۲۰ - ۳۰ سال گذشته از ۳۲٪ به ۴۲٪ افزایش یافته است. فناوری توربین‌های گازی پیشرفت کرده است. بازده نیروگاه‌ها، با سیکل ترکیبی توربین گازی، به ۶۰٪ رسیده است. برای بهره‌وری بیشتر سعی می‌شود گرمای با دمایی پایین حاصل از نیروگاه‌ها هدر نرود. در مواردی که انرژی حاصل از سوخت، هم برای گرمایش محیط و هم برای برق استفاده می‌شود (در ساختمان‌سازی و صنعت) بازده ممکن است تا ۸۰٪ بالا رود. در هر حال به پژوهش و سرمایه‌گذاری بیشتر نیاز است.

کاهش شدت کربن: شدت کربن به میزان نشر کربن‌دی‌اکسید در ازای تولید مقدار معینی انرژی گفته می‌شود و برای سوخت‌های مختلف، متفاوت است. شدت کربن گاز طبیعی، ۲۵٪ کمتر از نفت و ۴۰٪ کمتر از زغال‌سنگ است. بنابراین استفاده از گاز طبیعی، نشر کربن‌دی‌اکسید را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. شدت کربن برای منابعی مانند باد، آب و خورشید بسیار کم است و به مقدار آن در حین تأسیس و تجهیز اسباب و ابزار مورد نیاز محدود می‌شود (مثلاً، در مرحله ساخت سلول‌های خورشیدی به ناچار مقداری کربن‌دی‌اکسید نشر می‌شود). از سال ۱۹۷۰ به این سو میانگین شدت کربن در جهان، کمی کاهش یافته است.

بدام‌اندازی و انبارش کربن: جمع‌آوری و حبس کربن‌دی‌اکسید به دو راه ممکن است: (۱) با برداشتن مستقیم آن از دودکش کارخانه‌ها و نیروگاه‌ها؛ و (۲) با سوزاندن دو مرحله‌ای سوخت‌های فسیلی. در روش دوم سوخت فسیلی به صورت ناقص سوزانده شده و کربن مونوکسید تولید می‌شود. سپس به کمک بخار آب کربن مونوکسید به کربن‌دی‌اکسید و هیدروژن تبدیل می‌شود، $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$. کربن‌دی‌اکسید حاصل به آسانی جدا شده و انبار می‌شود. هیدروژن هم به عنوان یک سوخت ممتاز به مصرف می‌رسد. ولی انتخاب دوم وقتی مؤثر و مشکل‌گشا است که فناوری استفاده از هیدروژن در پیل‌های هیدروژنی تولیدکننده الکتریسیته در مقیاس بزرگ توسعه یابد.

برای حبس کربن‌دی‌اکسید راه‌های مختلفی وجود دارد. می‌توان آن را به چاه‌های متروک نفت و گاز، به مخازن عمیق آب نمک، یا به درزهای معادن زغال‌سنگ تزریق کرد. روش‌های دیگری مانند پمپ کردن کربن‌دی‌اکسید به اعماق اقیانوس هم بررسی شده‌اند.

این روش‌ها بیشتر نظری بوده‌اند تا عملی. در شرایط مناسب، مثلاً وقتی که نیروگاه به مخازن فسیلی نزدیک و هزینه استخراج نسبتاً کم باشد، هزینه بدام‌اندازی کربن، تنها کسر کوچکی از کل هزینه تولید را تشکیل می‌دهد. ظرفیت حبس کربن در ساختارهای زمین زیاد است و حداقل به ۲۰۰۰ گیگاتن کربن‌دی‌اکسید تخمین زده شده است. درباره نشت تدریجی و یا آزاد شدن سریع گاز محبوس به هنگام وقوع زمین‌لرزه، تحقیقات بیشتری لازم است. به دلیل افزایش سریع نیروگاه‌های زغال‌سوز در چند سال گذشته، توجه به فناوری بدام‌اندازی و انبارش کربن‌دی‌اکسید بیشتر و جدی‌تر شده است.

انرژی هسته‌ای: این انرژی بدون کربن است. به جز مقدار نسبتاً کمی به هنگام ساخت، نیروگاه‌های هسته‌ای گاز گل‌خانه‌ای تولید نمی‌کنند. نیروگاه‌های بزرگ هسته‌ای کارآیی زیادی دارند و برای تغذیه شبکه‌های ملی یا شهرهای بزرگ مناسب‌اند. فناوری ساخت و راه‌اندازی آنها شناخته شده است. می‌تواند در کاهش نشر کربن‌دی‌اکسید در کوتاه‌مدت مؤثر باشند. هزینه تولید این انرژی، در مقایسه با هزینه تولید انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی، مورد بحث است. برگشت سرمایه، جابه‌جایی و انبارش ضایعات هسته‌ای، و هزینه برچیدن نیروگاه در پایان عمر آن از مسائل مورد بحث و بعضاً مناقشه‌انگیز است. تخمین‌های سال‌های اخیر نشان می‌دهند که بهای تمام شده برق هسته‌ای و برق حاصل از گاز طبیعی که در آن هزینه‌های بدام‌اندازی و حبس کربن‌دی‌اکسید حساب شده باشد، برابرند. در کوتاه مدت، دو عامل رشد صنعت هسته‌ای را محدود می‌کند: نخست نبود متخصصان واجد مهارت‌های لازم جهت طراحی و ساخت سیستم‌های قدرت هسته‌ای، و دوم کمبود سرمایه و تسهیلات برای ساخت مولفه‌های کلیدی صنعت هسته‌ای. سرنوشت بلندمدت صنعت هسته‌ای در گرو اطمینان مردم از ایمنی آن به هنگام خطر و به هنگام جابه‌جایی و انبارش ضایعات هسته‌ای است. پس از انفجار نیروگاه فوکوشیما در اثر زلزله و سونامی اسفند ۱۳۸۹ در ژاپن، مسئله ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای و اطمینان مردم در سرتاسر جهان مسئله روز مجامع علمی و رسانه‌ای شده است.

بزرگ‌ترین چالش در راه گسترش انرژی هسته‌ای، تکثیر هسته‌ای است. وعده داده شده است که نسل چهارم نیروگاه‌های هسته‌ای، به لحاظ ایمنی، تولید ضایعات، و تکثیر هسته‌ای کارآتر از نسل‌های پیشین باشند. اما احتمال این که نسل جدید پیش از سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ به بازار بیاید کم است.

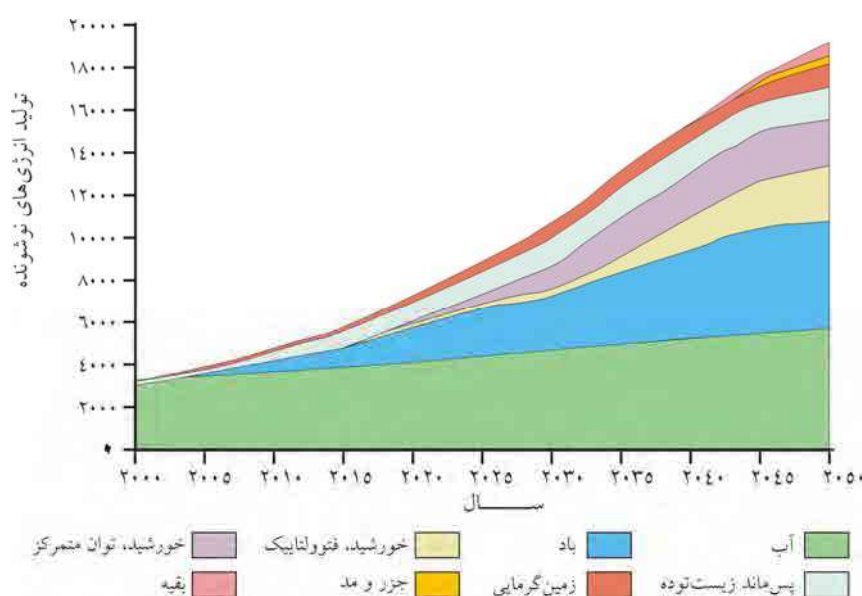
در جوش هسته‌ای، چهار اتم هیدروژن با هم جوش می‌خورند و یک اتم هلیم می‌دهند و مقادیر قابل توجهی انرژی آزاد می‌کنند. جوش هسته‌ای انرژی بدون کربن می‌دهد، ولی برای آینده‌های دور است. فناوری روز برای انجام آسان و کم‌هزینه جوش هسته‌ای کافی نیست.

انرژی‌های نوشونده: منابع آنها شناخته شده‌اند و در دسترس‌اند. خاستگاه همه انرژی‌های نوشونده خورشید است. انرژی میانگین دریافتی از خورشید، در روی زمین حدود ۱۸۰ هزار تراوات (۱۸۰ هزار میلیون میلیون وات) است. این مقدار ۱۲ هزار بار بیشتر از نیاز میانگین انرژی جهان، حدود ۱۵ تراوات، است. به بیان دیگر مقدار انرژی‌ای که در ۴۰ دقیقه از خورشید به زمین می‌رسد برای مصرف یک سال همه جهان کافی است. استفاده صحیح و اقتصادی از این منبع تمام نشدنی، در گروی تجهیز و توسعه فناوری‌های انرژی‌های نوشونده است. راه‌های زیادی برای تبدیل انرژی خورشید به صورت‌های مورد نیاز وجود دارد. نگاهی به مشخصات آنها آموزنده است:

- اگر نور خورشید بوسیله آینه‌های مقعر جمع‌آوری شود، تقریباً تمام آن می‌تواند به صورت انرژی گرمایی قابل استفاده باشد.
- بین ۱٪ تا ۲٪ انرژی خورشید در جو، به انرژی باد تبدیل می‌شود و می‌تواند نیروگاه-های بادی را به راه اندازد.
- حدود ۲۰٪ از انرژی خورشید صرف تبخیر آب از اقیانوس‌ها و زمین‌های مرطوب می‌شود. بخار آب نهایتاً به شکل بارش به زمین بازمی‌گردد و بخشی از آن می‌تواند نیروگاه‌های آبی را به کار بیاندازد. تولید الکتریسیته تجاری از حدود سال ۱۹۰۰ شروع شده است. انرژی آب از ابتدا، سهم مهمی در آن داشته است. نیروگاه‌های برق آبی کنونی حدود ۱۸٪ الکتریسیته دنیا را تولید می‌کنند.
- گیاهان نور خورشید را از طریق فتوسنتز به انرژی تبدیل می‌کنند، در بهترین شرایط بازده فتوسنتز ۱٪ است (قاب ۱ - ۹).
- سلول‌های فتولتاییک (PV) نور خورشید را مستقیماً به برق تبدیل می‌کنند. بازده آنها از ۱۰٪ شروع می‌شود و در مدرن‌ترین سلول‌ها می‌تواند به بیش از ۲۰٪ برسد.
- بالاخره استفاده مستقیم از انرژی خورشید برای گرم کردن ساختمان‌های مسکونی و اداری و تأمین آسان آب گرم مورد نیاز، شناخته شده، پر بازده، و کم هزینه است.

به جز آب، منابع فهرست شده در بالا را نوشونده‌های جدید می‌نامند، استفاده از آنها برای تولید الکتریسیته مستلزم توسعه فناوری‌های خاص و جدید است. در سال ۲۰۰۵ تنها ۴٪ الکتریسیته دنیا از منابع نوشونده نو بدست آمد. بیش از نصف آن از زیست‌توده‌های «مدرن» بود. نصف دیگر بین انرژی‌های خورشید، باد، زمین‌گرمایی، نیروگاه‌های آبی کوچک، و منابع دریایی تقسیم شده بود.

طبق پیش‌بینی سناریوی نقشه آبی آژانس بین‌المللی انرژی^۱ (شکل ۴ - ۹)، منابع نوشونده تا سال ۲۰۵۰، ۴۵٪ کل تولید الکتریسیته دنیا را تأمین خواهند کرد. رشد اصلی در زمینه زیست‌توده مدرن و انرژی‌های فتوولتائیک و انرژی باد خواهد بود. تولید الکتریسیته از این منابع به کمک ماشین‌های مکانیکی برای آب و باد، ماشین‌های گرمایی برای زیست‌توده‌ها و گرمای خورشید، و تبدیل مستقیم نور به الکتریسیته در سلول‌های فتوولتائیک انجام می‌شود.



شکل ۴ - ۹ آهنگ رشد تولید انرژی‌های نوشونده طبق سناریوی نقشه آبی آژانس بین‌المللی انرژی. برگرفته از Houghton.

انرژی آب

آب قدیمی‌ترین منبع انرژی نوشونده است. از دیرباز از آن استفاده شده است و امروزه نیز از نظر اقتصادی با روش‌های دیگر تولید برق رقابت می‌کند. بعضی از نیروگاه‌های برق‌آبی بسیار وسیع‌اند. بزرگ‌ترین آنها روی رودخانه یانگ‌تسه^۱، در چین است. نزدیک به ۱۸ گیگاوات برق تولید می‌کند. دو نیروگاه بزرگ دیگر، یکی در گوری^۲ در ونزوئلا و دیگری در ایتائی‌پو^۳ در مرز بین برزیل و پاراگوئه واقع‌اند. هرکدام بیش از ۱۰ گیگاوات ظرفیت دارند. بر اساس تخمین‌های آژانس بین‌المللی انرژی، بهره‌برداری از انرژی برق‌آبی را می‌توان دو تا سه برابر افزایش داد. بیشترین پتانسیل در آفریقا، آسیا و آمریکای لاتین است.

نیروگاه‌های آبی بزرگ اثرات قابل ملاحظه اجتماعی و زیست‌محیطی دارند. جابه‌جایی جمعیت از محل نیروگاه، از دست رفتن زمین، و به تبع آن گونه‌های گیاهی و جانوری، رسوب در پست‌ترین قسمت‌های رودخانه، نمونه‌هایی از مشکلات است. پیش از دست زدن به هر عملی لازم است این مسائل به دقت بررسی شوند.

منابع برق‌آبی زیادی وجود دارند، که فقط با تولید چند کیلووات، نیاز مزرعه یا دهکده کوچکی را برآورده می‌سازند. مزیت واحدهای کوچک، هزینه سرمایه‌ای نسبتاً کم آن‌هاست. طرح‌های برق‌آبی کوچک بیشتر روی رودخانه‌ها طراحی می‌شوند و در دو دهه اخیر رشد چشم‌گیری داشته‌اند. اما تاکنون تنها ۵٪ از پتانسیل دنیا، که به ۱۵۰ تا ۲۰۰ گیگاوات بالغ می‌شود، مورد بهره‌برداری قرار گرفته است.

انبارش با پمپاژ: در طرح‌های برق‌آبی می‌توان با استفاده از الکتریسیته اضافی در ساعت‌های مصرف کم، آب را از مخازن پایین‌تر به مخازن بالاتر پمپ کرد و سپس در ساعت‌هایی که مصرف بالاست، با فرایند معکوس دوباره الکتریسیته تولید کرد. بازده تبدیل می‌تواند تا ۸۰٪ برسد و زمان پاسخ بیش از چند ثانیه نباشد. در حال حاضر حدود ۱۰۰ گیگاوات ظرفیت برای انبارش با پمپاژ در سراسر دنیا ایجاد شده است. پتانسیل توسعه آینده آن دست‌کم ده برابر این رقم تخمین زده می‌شود.

برخی از کشورها از رودخانه‌های بزرگ خود خوب بهره می‌برند. نروژ ۹۹٪، نپال ۹۵٪، برزیل ۹۳٪، نیوزیلند ۷۸٪، کانادا ۵۸٪، و سوئد ۵۰٪ الکتریسیته خود را از انرژی آب تأمین می‌کنند.

1. Yang Tesse

2. Guri

3. Itaipu

انرژی زیست‌توده

پتانسیل جهانی تولید انرژی از انواع زیست‌توده حدود ۱۰۷ گیگاتن نفت معادل در سال است. استفاده سنتی از زیست‌توده که در حال حاضر در کشورهای در حال توسعه و کمتر توسعه یافته مرسوم است کمتر از ۱٪ آنچه گفته شد است. با در نظر گرفتن اقتصاد تولید و دسترسی به زمین مناسب تخمین زده شده است که حدود ۶٪ از کل این انرژی بتواند از محصولات کشاورزی و دامی به دست آید و نزدیک به ۷۵٪ مصرف فعلی جهان را تأمین کند.

زیست‌توده به معنای کلمه یک منبع نوشونده است، زیرا کربن‌دی‌اکسید حاصل از سوختن آن، به هنگام رشد زیست‌توده جدید، از طریق فتوسنتز (قاب ۱ - ۹) دوباره به کربن تبدیل می‌شود. واژه زیست‌توده نه تنها همه تولیدات کشاورزی و دامی را در بر می‌گیرد، بلکه ضایعات خشک و تر کشاورزی، صنعتی و خانگی را هم شامل می‌شود. همه اینها را می‌توان برای تولید گرما و الکتریسیته به کار برد. بعضی از زیست‌توده‌ها، مانند ذرت و نیشکر، به کار تولید سوخت‌های گازی یا مایع می‌آیند (قاب ۲ - ۹).

مسئله زیست‌توده مهم و جهانی است. برای مناطق روستایی و جمعیت‌های پراکنده بسیار مناسب است. به عنوان مثال در سال ۲۰۰۳ در شمال اتریش ۱۴٪ انرژی مورد نیاز یک جمعیت ۱٫۵ میلیون نفری از زیست‌توده تأمین شده است. برنامه‌ریزی شده، تا سال ۲۰۱۰ این رقم به ۳۰٪ افزایش یابد و پس از آن نیز به رشد چشم‌گیر خود ادامه دهد.

در جهان در حال توسعه بیشتر مردم دسترسی به انرژی مدرن و شبکه برق ندارند. برای آشپزی و گرما به «زیست‌توده سنتی» متکی هستند. حدود ۱۰٪ انرژی دنیا برای عرضه به بیش از یک‌سوم جمعیت جهان از این منابع حاصل می‌شود. ولی لازم است در کارایی و نحوه بهره‌برداری از آنها نوآوری‌های جدی به وجود آید. سوزاندن زیست‌توده در خانه‌ها مشکلات فراوان برای سلامت دارد. سازمان بهداشت جهانی آن را یکی از بزرگ‌ترین علل مرگ‌ومیر، به خصوص در کودکان، معرفی کرده است.

در مناطق روستایی بیشتر پخت‌وپزها هنوز روی آتش باز در زیر سقف خانه انجام می‌گیرد. به این ترتیب، صرف‌نظر از آسیب‌های بهداشتی یاد شده، تنها ۵٪ از گرمای به دست آمده به ظرف پخت می‌رسد. ابداع اجاق‌های خانگی ساده می‌تواند این رقم را به ۲۰٪ و حتی با کمی ابتکار به ۵۰٪ برساند. برای کاهش تقاضای سوخت از چوب باید

قالب ۱ - ۹: فتوسنتز

رشد گیاه آشکارترین نحوه استفاده از انرژی خورشید است. فتوسنتز، یک واکنش شیمیایی به کمک انرژی خورشید است، در طی آن، کربن دی اکسید موجود در هوا و هیدروژن آب با هم ترکیب می-شوند، انواع کربوهیدرات‌ها را می‌سازند و اکسیژن آزاد می‌کنند. انسان و حیوان برای غذا، سلولز، و چوب به فتوسنتز وابسته است. همین فرآیند هم هست که انرژی خورشید را در رُستنی‌ها از صدها میلیون سال پیش، بدام انداخته و سوخت‌های فسیلی را که امروزه استفاده می‌کنیم، به وجود آورده است.

چگونگی فتوسنتز: مولکول‌های دو اتمی و بالاتر به سبب آرایش اتمی، انواع ارتعاش‌های درون مولکولی، و دَوَران‌های مولکولی می‌توانند انرژی داشته باشند. در تقریب اول می‌توان نوشت:

$$E_{\text{مولکول}} = E_{\text{دورانی}} + E_{\text{ارتعاشی}} + E_{\text{آرایش اتمی}}$$

هر کدام از این جملات، به ترتیب آرایش اتمی، ارتعاشی، و دورانی یک مرتبه بزرگی (تقریباً ده برابر) بزرگ‌تر از جمله بعدی است. یک مولکول می‌تواند با جذب یک فوتون از ناحیه طول‌موج‌های مرئی خورشید از تراز پایه انرژی به یک تراز برانگیخته و یا از یک تراز برانگیخته به تراز برانگیخته بالاتر برود. مولکول‌های برانگیخته اگر در اطراف خود، مولکول مناسب دیگری پیدا کنند می‌توانند با آن ترکیب شده و مولکول بزرگ‌تری بسازند. چنین واکنشی در گیاهان انجام می‌گیرد و انواع کربوهیدرات‌ها به وجود می‌آیند. مثلاً برای تشکیل یک مول قند ساده گلوکز $C_6H_{12}O_6$ واکنش زیر صورت می‌پذیرد:



جایگزین‌هایی مانند استفاده از سوخت ضایعات کشاورزی و دامی، متان حاصل از فساد فاضلاب‌ها یا هر ماده آلی دیگر، و اجاق‌های خورشیدی تبلیغ شوند.

امروزه در جوامع پیشرفته به پتانسیل استفاده از ضایعات توجه می‌شود. برای نمونه در انگلستان بیش از ۳۰ میلیون تن ضایعات جامد خانگی در سال تولید می‌شود، نیم تن به ازای هر شهروند. حتی با طرح‌های اندیشیده برای بازیافت بعضی از این ضایعات، باز مقادیر زیادی بدون استفاده باقی خواهد ماند. اگر همه آنها برای تولید انرژی خاکستر شود، تقریباً ۲ گیگاوات الکتریسیته تولید خواهد شد که برابر ۵٪ نیاز انگلستان است. نمونه

دیگر، شهر اویسالا در سوئد است که سیستم گرمایشی وسیعی دارد. پیش از ۱۹۸۰ بیش از ۹۰٪ گرمایش شهر از نفت تأمین می‌شد. تصمیم گرفته شد نفت، با انرژی‌های نوشونده، جایگزین شود. از سال ۱۹۹۳ به این سو ۸۰٪ نیاز گرمایی شهر از سوزاندن ضایعات صنعت چوب و زیست‌توده‌های دیگر فراهم می‌شود.

تولید سالانه زباله در ایران، بنا به آمارهای شهرداری تهران و اتحادیه صنایع بازیافت ایران نزدیک به ۲۰ میلیون تن در سال تخمین زده می‌شود و در حال حاضر تنها ۵٪ آن بازیافت می‌شود.

طبق پیش‌بینی نقشه آبی آژانس بین‌المللی انرژی، استفاده جهانی از زیست‌توده (شامل زیست‌سوخت‌های نو) تا سال ۲۰۵۰ نزدیک به چهار برابر افزایش خواهد یافت و تقریباً یک‌چهارم کل انرژی جهان را شامل خواهد شد. از این نقطه‌نظر زیست‌توده مهم‌ترین منبع انرژی نوشونده است. حدود نیمی از این انرژی نوشونده از پس‌مانده‌های کشاورزی، جنگل، و دیگر ضایعات بدست خواهد آمد، و نیم دیگر از گیاهانی که با هدف تولید انرژی کشت شده‌اند. در صورت اخیر ۱۰٪ کل زمین‌های کشاورزی دنیا مورد نیاز است.

زیست‌سوخت‌ها^۱

زیست‌سوخت نام جدیدی است که در دهه‌های اخیر به نشاسته، شکر، روغن‌های خوراکی و امثال آنها به هنگامی که برای تولید سوخت ماشین به کار می‌روند داده شده است (قاب ۲ - ۹). گندم، ذرت، نیشکر، و روغن نخل منابع عمده زیست‌سوخت‌ها هستند. برزیل در تولید و مصرف زیست‌سوخت‌ها پیش‌آهنگ است. از دهه ۱۹۷۰ اتانول تولید شده از کشتزارهای بزرگ نیشکر را به عنوان سوخت اصلی در حمل‌ونقل و تولید برق استفاده می‌کند. آلاینده‌های محیطی ناشی از تولید و مصرف زیست‌سوخت‌ها بسیار کمتر از آلاینده‌های سوخت‌های فسیلی است. پسماندهای ناشی از تولید زیست‌سوخت‌ها به نوبه خود یک منبع انرژی است و می‌تواند در تولید گرما و برق مورد بهره‌برداری قرار گیرد. پیش از تصمیم در مورد تولید زیست‌توده در مقیاس‌های بزرگ لازم است کارایی و سهم زیست‌سوخت‌ها در کاهش نشر کربن دی‌اکسید به دقت مورد ارزیابی قرار گیرد.

1. biofuel

قاب ۲ - ۹: اتانول، نمونه یک زیست سوخت مایع

اتانول یکی از انواع متداول الکل است. این ماده یک هیدروکربن اکسیژن دار با فرمول شیمیایی C_2H_5OH است. با افزودن اتانول به بنزین، اکسیژن سوخت افزایش می یابد، احتراق کامل تر انجام می گیرد، و کربن منواکسید کمتری نشر می شود. تولید اتانول مثالی است از تبدیل زیست توده به سوخت مایع. ذرت یکی از محصولات اصلی کشاورزی آمریکا است. ساقه و چوب ذرت پس از برداشت، آسیاب و با آب مخلوط می شود. سپس ماده حاصل پخته می شود و به کمک یک آنزیم مناسب به شکر تبدیل می شود. در گام بعدی شکر تخمیر، و به الکل تبدیل می شود و با عمل تقطیر از بقیه مواد جدا می شود. اتانول معمولاً با بنزین بدون سرب مخلوط و مستقیماً در اتومبیل ها مصرف می شود.

برای نمونه در برزیل بنزین را با ۲۵ درصد اتانول مخلوط می کنند. در این کشور ماشین های چندسوختی رواج یافته اند که با بنزین، با اتانول، یا با ترکیبی از این دو کار می کنند. در حال حاضر ۲۴٪ از ماشین های جدیدی که در برزیل تولید می شوند، چندسوختی هستند. پیش بینی می شود این رقم به صد درصد هم برسد.

همچنین لازم است بررسی شود استفاده از زمین برای تولید مواد اولیه زیست سوخت ها تا چه اندازه با زمین برای محصولات غذایی رقابت خواهد کرد، به چه اندازه بر تخریب جنگل های گرمسیری تاثیر خواهد گذاشت، و قیمت جهانی محصولات غذایی را چگونه متأثر خواهد کرد. نکات اخیر، برای نشان دادن بعضی از جنبه های منفی کاربرد این انرژی آورده شده اند. مثال های دیگری می توان به این سیاهه افزود.

زیست سوخت های نسل دوم: از زیست توده های سلولزدار، می توان انرژی گرفت. معده گاو از هضم علف انرژی می گیرد. در مقیاس آزمایشگاهی هم این کار انجام گرفته است. از مواد علفی یا چوبی، از باقیمانده غلات و دیگر تولیدات کشاورزی زیست سوخت گرفته شده است. اخیراً توجه زیادی به تولید وسیع و تجاری زیست سوخت های نسل دوم شده است، به ویژه برای استفاده از ضایعات چوبی یا از علف هایی که در زمین های حاشیه ای می رویند و با محصولات غذایی رقابت نمی کنند. هنوز آغاز راه است و پیش بینی شده است که نسل دوم زیست سوخت ها بتوانند در مقیاس تجاری کارایی داشته باشند.

انرژی باد

استفاده از انرژی باد تاریخ قدیمی دارد. از سال‌های بسیار دور آسیاب‌های بادی دشت‌های سیستان معروف بوده‌اند. تا دویست سال پیش آسیاب‌های بادی در کشورهای اروپا منظره-ای آشنا بودند. در سال ۱۸۰۰ بیش از ۱۰ هزار آسیاب بادی در انگلستان کار می‌کرد. در چند سال گذشته توربین‌های بادی دوباره در کشورهای اروپای غربی، مانند دانمارک، آلمان، انگلستان، اسپانیا، و غرب آمریکای شمالی رونق گرفته‌اند. در پایان سده بیستم، یک توربین سه‌پره‌ای با روتور ۵۰ متری توانست در باد ۱۲ متر بر ثانیه، با توانی برابر ۷۰۰ کیلووات برق تولید کند. توربین‌های بادی روز به روز بزرگ‌تر می‌شوند. هم‌اکنون بزرگ‌ترین آنها با روتوری به قطر ۱۲۰ متر توانی در حدود ۵ تا ۶ مگاوات دارد.

مشکل اصلی توربین‌های بادی، طبیعت نامنظم باد است. تولیدکنندگان بزرگ برای تنظیم توان خروجی مزارع باد را در سطح یک کشور پخش می‌کنند. نگرانی‌های عمومی‌ای در مورد ظاهر ناخوش‌آیند مزارع باد وجود دارد. به همین سبب سعی می‌شود توربین‌های بادی در دریا و اقیانوس به دور از سواحل نصب شوند. باد دریاها، قوی‌تر و منظم‌تر است و موضوع ظاهر ناخوش‌آیند هم منتفی می‌شود. نصب توربین‌های بادی دور از ساحل برای تولید الکتریسیته، در دهه‌های گذشته رشد فزاینده‌ای داشته است.

در سال ۲۰۰۸ بیش از ۱۰۰ گیگاوات برق بادی در سراسر دنیا تولید شد، که نزدیک به ۱٪ تولید الکتریسیته جهان بود. توان بهره‌برداری از باد به مکعب سرعت باد بستگی دارد. توان باد با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه ۸ برابر بیشتر از توان باد با سرعت ۵ متر بر ثانیه است. به همین جهت احداث مزارع باد در مکان‌های بادخیز اروپای غربی رشد سریعی داشته است. در دانمارک امروز تقریباً ۲۰٪ الکتریسیته، از مزارع باد دور از ساحل تأمین می‌شود. دانمارک به شبکه انتقال کشورهای دیگر متصل است. برای تنظیم الکتریسیته به هنگام نوسان‌های باد می‌تواند از این شبکه کمک بگیرد. انگلستان نیز در صدد است تعدادی مزارع باد دور از ساحل بسازد. کشورهای در حال توسعه نیز به دنبال استفاده از انرژی باد هستند. هند با ظرفیت ۸ گیگاوات مقام چهارم را در دنیا دارد. طبق پیش‌بینی سناریوی نقشه آبی تا سال ۲۰۵۰ نزدیک به ۱۲٪ از الکتریسیته جهان از انرژی باد فراهم خواهد شد. انرژی باد به ویژه برای تولید الکتریسیته در مکان‌های دورافتاده‌ای که هزینه انتقال، گران در می‌آید مناسب است. توربین‌های بادی کوچک وسایل ایده‌آلی برای شارژ کردن

باتری‌ها در مکان‌های دورافتاده هستند. برای نمونه، رمه‌داران مغول صد هزار از این باتری-ها را در اختیار دارند. بیش از یک میلیون توربین بادی کوچک برای پمپاژ آب در سرتاسر دنیا وجود دارد.

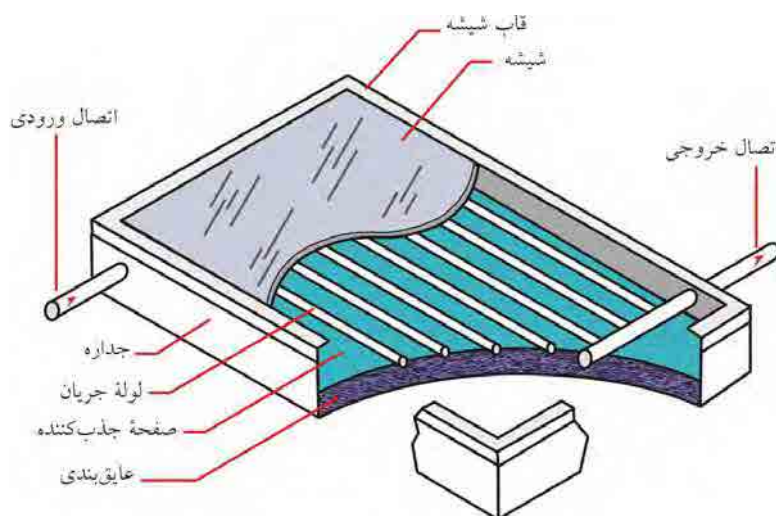
انرژی خورشید

گرمایش خورشیدی: آسان‌ترین راه استفاده از خورشید جذب گرمای آن است. یک سطح سیاه رو به خورشید می‌تواند به ازای هر مترمربع در یک ساعت نزدیک به یک میلیون کالری گرما از خورشید جذب کند. این شیوه به خصوص در کشورهای با آفتاب زیاد، راهی ارزان برای تهیه آب گرم خانگی است. به طور وسیع در استرالیا، ترکیه، ژاپن، و ایالات جنوبی آمریکا به کار گرفته می‌شود. در ایران نیز ساخت صنعتی آب گرم‌کن خورشیدی آغاز شده است. (قاب ۳ - ۹). در کشورهای استوایی خوراک‌پزهای خورشیدی می‌توانند جایگزینی کارآمد، برای اجاق‌هایی که چوب یا سایر سوخت‌های سستی می‌سوزانند باشند. همچنین انرژی گرمای خورشید می‌تواند در زمستان برای گرم کردن منازل و محیط‌های کاری به کار رود و هوای مطبوع و راحت فراهم کند. در حال حاضر از ده‌ها میلیون آب‌گرم‌کن خورشیدی خانگی در سراسر دنیا مورد استفاده‌اند.

برق خورشیدی: به دو روش می‌توان از تابش خورشیدی الکتریسیته به دست آورد: نخست با متمرکز کردن تابش خورشید روی یک مخزن آب و تولید بخار، و سپس راه انداختن یک مولد برق به کمک بخار. دوم تبدیل مستقیم تابش خورشید به الکتریسیته به کمک سلول‌های فتوولتاییک (قاب ۴ - ۹). هر دو روش در دنیا متداول و رو به گسترش‌اند و پتانسیل زیادی برای تولید برق دارند. به عنوان مثال برق مورد نیاز ایران را می‌توان از تاباندن انرژی خورشید به روی ۴۰ کیلومترمربع سلول‌های فتوولتاییک، یا بر مساحت کمتری از تأسیسات انرژی متمرکز خورشیدی، بدست آورد. اما این روش‌ها در حال حاضر از لحاظ هزینه‌های سرمایه‌ای و نگهداری در مقیاس وسیع با روش‌های مرسوم دیگر رقابت نمی‌کنند. هر دو روش نیاز به سرمایه‌گذاری کلان برای تحقیق و توسعه دارند تا بتوانند هزینه‌های تمام شده را قابل رقابت با برق حاصل از روش‌های دیگر کنند.

قاب ۳ - ۹: آب گرم کن خورشیدی

آب گرم کن خورشیدی از یک کلکتور گرما، و یک مخزن ذخیره تشکیل می شود. کلکتورها انواع مختلف دارند. یک کلکتور صفحه ای از یک صفحه و یک لوله که به طور مارپیچ به صفحه چسبیده است تشکیل می شود. صفحه و لوله هر دو تیره رنگ و هادی گرما هستند و در داخل یک قاب سرپوشیده از شیشه قرار می گیرند. دو سر لوله به یک مبدل گرما وصل شده است و داخل لوله و مبدل با یک شاره انتقال دهنده گرما (آب یا آب و ضدیخ و غیره) پر شده است. تابش خورشید جذب صفحه و لوله شده و شاره را گرم می کند. شاره گرم در اثر حرکات همرفتی یا به کمک پمپ الکتریکی به مبدل منتقل می شود و به مصرف نهایی می رسد.



متمرکز کردن انرژی خورشیدی: سه روش برای متمرکز کردن وجود دارد.

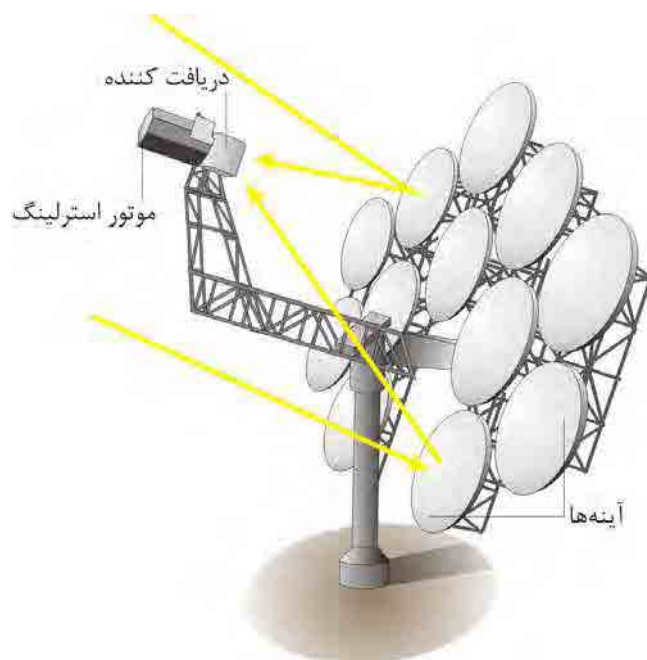
- آرایه خطی از ناوهای آینه مانند با مقطع سهمی، نور خورشید را روی لوله ای در محور سهمی متمرکز می کند. لوله با روغن یا نمک مذاب پر شده است. گرمای متمرکز به شاره درون لوله و از آنجا به توربین مولد برق منتقل می شود (شکل ۵ - ۹). ناوهای می-توانند با شیب مناسب در جهت شمال - جنوب قرار گیرند و در طول روز خورشید را دنبال کنند. در مناطق خشک، از این آرایه ها برای شیرین کردن آب نیز می توان استفاده کرد.



شکل ۵ - ۹ نمونه‌ای از آینه‌های سهمی وار ناودانی. برگرفته از Mathez

- تعداد قابل توجهی از آینه‌های ردیاب خورشید، تابش خورشید را روی کلکتوری در بالای یک برج متمرکز می‌کند، تا روغن یا نمک مذاب درون کلکتور را گرم کند. سپس شاره داغ برای بخار کردن آب و پیش‌راندن توربین بخار به کار می‌رود.
- آرایه‌ای از آینه‌ها بر روی بشقابی که خورشید را دنبال می‌کند، نصب می‌شوند. آینه‌ها انرژی خورشید را روی دریافت‌کننده‌ای متمرکز می‌کنند. انرژی متمرکز به یک موتور استرلینگ منتقل می‌شود (شکل ۶ - ۹).
- در حال حاضر روی سیکل‌های ترکیبی که در آن انرژی خورشیدی و فسیلی تلفیق شده باشند و بتوان در طول شبانه‌روز به طور پیوسته برق تولید کرد پژوهش‌های زیادی انجام می‌گیرد.

سلول‌های فتوولتائیک خورشیدی: از آغاز سفرهای فضایی، از ۵۰ سال پیش، صفحه‌های



شکل ۶ - ۹ سیستم متمرکزکننده انرژی خورشید و موتور استرلینگ برای تولید برق. برگرفته از Houghton

فتوولتاییک برق فضاییها و ماهواره‌ها را فراهم کرده‌اند. در حال حاضر به شیوه‌های مختلف در زندگی روزمره نیز ظاهر می‌شوند ماشین‌های حساب با باتری خورشیدی، و روشنایی اماکن عمومی و روستاهای دور افتاده سال‌هاست که متداول شده‌اند. در حال حاضر بازدهی سلول‌های فتوولتاییک برای تبدیل انرژی خورشیدی به برق بین ۱۰٪ تا ۲۰٪ است. یک پانل به مساحت یک مترمربع که عمود به تابش خورشید باشد، بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ وات توان الکتریکی تولید می‌کند. استفاده از این صفحه‌ها در نمای ساختمان‌ها روز به روز بیشتر می‌شود. ساکنان شهرها با نصب سلول‌های فتوولتاییک در روی بام می‌توانند نیاز انرژی‌شان را تا حد زیادی برطرف کنند. ژاپن اولین کشوری بود که تأسیسات پشت بام را تبلیغ و اجرا کرد و تا پایان سده بیستم ۳۲۰ مگاوات بهره‌برداری کرد. آلمان و ایالات متحده برنامه‌های وسیع پشت بام خورشیدی را دنبال می‌کنند. آلمان ۱۰۰ هزار بام تا سال ۲۰۰۳ و ایالات متحده یک میلیون بام تا سال ۲۰۱۰ برنامه‌ریزی کرده بودند.

هزینه انرژی فتوولتایک در ۲۰ سال گذشته به طور چشم‌گیر کاهش یافته است (قاب ۴ - ۹). تأسیسات فتوولتایک کوچک می‌توانند برق را در مناطق روستایی، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، تأمین کنند. نزدیک به یک سوم جمعیت دنیا دسترسی به شبکه برق ندارند. بیشتر نیاز آنها برای وسایل کم مصرفی مثل روشنایی، رادیو، تلویزیون، یخچال، تهویه و پمپاژ آب است. هزینه تأسیسات فتوولتایک برای این مقاصد اکنون قابل رقابت با دیگر روش‌های تولید است. در ۲۰ سال گذشته بیش از یک میلیون «سیستم خانگی خورشیدی» و فانوس‌های خورشیدی در آسیا، آفریقا و کشورهای آمریکای جنوبی نصب شده‌اند. سیستم‌های خانگی می‌توانند به راحتی توان‌های ۱۵ تا ۱۰۰ وات را فراهم کنند، فانوس‌های خورشیدی کوچک‌تر (حدود ۱۰ وات) می‌توانند روشنایی معابر را تأمین کنند.

قاب ۴ - ۹: سلول خورشیدی فتوولتایک

سلول خورشیدی فتوولتایک (PV) - پی‌وی یک ورقه نازک سیلیکون است که ناخالصی‌های مناسبی در آن وارد شده و پیوند p-n در آن ایجاد شده است. نور خورشید در این پیوند مستقیماً به برق تبدیل می‌شود.

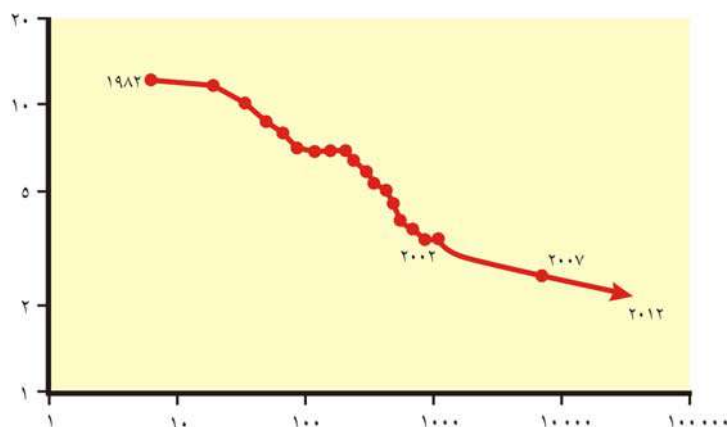
در پربازده‌ترین سلول‌های پی‌وی تک بلور سیلیکون به کار می‌رود. بازده تبدیل انرژی خورشید به برق در آنها ۱۵ تا ۲۰٪ است. سلول‌های آزمایشی با بازدهی بیش از ۲۰٪ هم تولید شده‌اند. سیلیکون بی‌شکل (با بازدهی حدود ۱۰٪) برای تولید انبوه مناسب‌تر از تک بلور سیلیکون است. آلیاژهای دیگری مانند کادمیم تلوراید و دی‌سیلنید مس ایندیم، با خواص فتوولتایک مشابه وجود دارند. کارایی این آلیاژها بیشتر از سیلیکون بی‌شکل است.

برق حاصل از سلول‌های پی‌وی تقریباً با شدت تابش خورشید بر آنها متناسب است. سلول‌های پی‌وی را در قطعه‌های چندتایی (معمولاً ۴۰ سلول در هر قطعه) می‌سازند. این قطعات به نوبه خود می‌توانند در ورقه‌های بزرگ‌تری قرار گیرند، و بسته به نوع کاربرد، در آرایه‌هایی با اندازه‌های مختلف استفاده شوند.

هزینه سلول‌های پی‌وی زیاد است و نیمی از هزینه کل دستگاه را تشکیل می‌دهد. بنابراین بازده بالای تک بلور سیلیکون، با اندازه کوچک‌تر، عامل مهمی در کاهش هزینه محسوب می‌شود. انواع سلول‌های فتوولتایک با موادی به جز سیلیکون تحت آزمایش‌اند. بعضی از آنها از نظر بازدهی و بهای، به آستانه رقابت با سلول‌های سیلیکون نزدیک شده‌اند.

بهای تمام شده عامل اصلی در استفاده از سلول‌های خورشیدی است. بازده بالاتر سلول و تولید انبوه‌تر آن می‌تواند بهای برق خورشیدی را تا سطح قابل رقابت با سایر منابع، پایین بیاورد. در شکل زیر کاهش بهاء، به دنبال افزایش ظرفیت نصب در ۲۵ سال گذشته و پیش‌بینی تا سال ۲۰۱۲ نشان داده شده است.

اگر برق تولید شده به شبکه برق محلی یا سراسری تزریق شود، نیازی به دستگاه‌های پرهزینه انبارش گران‌بها مانند باتری‌ها نخواهد بود، و هزینه‌های سرمایه‌ای به شدت پایین می‌آید. بعضی کشورها برای تولیدکنندگانی که این راه را انتخاب کنند، امتیازات مالی قابل توجه می‌دهند. در ایران تولیدکننده برق از منابع نوشونده می‌تواند برق خود را وارد شبکه برق کشور کند و بهای آن را با بهایی بیشتر از بهای سازمان برق منطقه‌ای دریافت کند. آرایه‌های پی‌وی برای به کار انداختن وسایلی مانند پمپ‌های آب در چراگاه‌ها و انواع ایستگاه‌های اندازه‌گیری و دیده‌بانی در مکان‌های دورافتاده مناسب‌اند.



تولید انبوه و کاهش قیمت پی‌وی در ۲۵ سال گذشته، بخش نقطه‌چین پیش‌بینی آینده است. اطلاعات سال-های ۱۹۸۲ تا ۲۰۰۲ برگرفته از نوشونده‌های شل^۱ و اطلاعات ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۷ برگرفته از چشم‌اندازهای فناوری انرژی^۲ است. برگرفته از *Houghton*

1. Shell Renewables
2. Energy Technology Perspectives, International Energy Agency 2008

انرژی‌های نو و نوشونده نو

تا اینجا درباره منابع انرژی نو و نوشونده‌ای بحث شد که شناخته شده‌اند، قابلیت توسعه دارند و می‌توانند در برآوردن نیاز انرژی جهان نقش بازی کنند. منابع نو و نوشونده کمتر شناخته شده‌ای هم هستند که در مناطقی خاص می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. انرژی زمین گرمایی، انرژی جزرومد، انرژی جریان‌ها و امواج اقیانوسی از این نوع هستند.

انرژی زمین - گرمایی گرمای طبیعی درون زمین است که در اصل از واپاشی عناصر رادیواکتیو با نیم‌عمر بلند، که از هنگام تشکیل زمین در آن موجود بوده‌اند، تولید می‌شود. این انرژی بیشتر به صورت فوران‌های آتشفشانی و کمتر به شکل چشمه‌ها و فوران‌های آب گرم ظاهر می‌شود. دمای پوسته زمین با افزایش عمق زیاد می‌شود. در بعضی مناطق می‌توان از این انرژی، مستقیماً برای مقاصد گرمایی و یا تولید برق بهره‌برداری کرد. مناطق خاصی در دنیا، مانند ایسلند، برای بهره‌برداری از این انرژی ممتازند. انرژی زمین‌گرمایی در حال حاضر سهم کوچکی، در حد ۰/۳ درصد، در تأمین برق کل جهان دارد. نقشه آبی *آژانس بین‌المللی انرژی* پیش‌بینی می‌کند، سهم آن تا سال ۲۰۵۰ ده برابر شود.

انرژی جزرومد: زمین در ۲۴ ساعت یک بار به دور خود می‌چرخد. هر نقطه از آن در شبانه‌روز یک بار نزدیک‌تر به ماه یا خورشید قرار می‌گیرد و بیشتر به سوی آنها کشیده می‌شود و یک بار دورتر می‌شود و کمتر کشیده می‌شود. این تفاوت در نیروی گرانش ماه و خورشید روی آب‌های زمین سبب جزرومد می‌شود. تقریباً در هر ۱۲ ساعت آب اقیانوس‌ها و دریاها یک بار بالا می‌آید و یک بار رها می‌شود. انرژی جنبشی زیادی در جریان‌های جزرومد وجود دارد. ولی استخراج آن پیچیده و پرهزینه است. تنها در سواحل آب‌های بزرگ می‌تواند مقرون به صرفه باشد. مزیت انرژی از جزرومد قابل پیش‌بینی بودن و کم بودن مشکلات زیست‌محیطی آن است.

تحصیل انرژی از جریان‌های جزرومدی در نواحی ساحلی مانند تحصیل انرژی از باد است و به کمک توربین‌های آبی انجام می‌گیرد. سرعت آب کمتر از سرعت باد است، ولی زیاد بودن چگالی آب نسبت به چگالی هوا آن را جبران می‌کند. برای تولید یک توان معین از آب قطر توربین آبی بسیار کوچک‌تر از قطر توربین بادی برای تولید همان توان است. سه نیروگاه بزرگ جزرومدی اکنون در حال کار هستند. نیروگاه یک مگاواتی روی

دریای سفید در روسیه که در سال ۱۹۶۹ تکمیل شده است. نیروگاه ۲۴۰ مگاواتی روی خور رودخانه گرانس در فرانسه در سال ۱۹۶۷ شروع به کار کرده است. سومین نیروگاه بر روی رودخانهی آنابولیس در نوا اسکوتیا در کانادا است که در سال ۱۹۸۴ با توان ماکزیمم ۱۸ مگاوات شروع به تولید الکتریسیته کرده و سالانه ۳۰ تا ۳۵ میلیارد کیلووات ساعت برق تولید می کند. این مکان یکی از ۲۰ نقطه مناسب در ساحل فوندی برای انرژی جزرومد است. اگر چه انرژی جزرومد به دلیل مصرف نکردن سوخت فسیلی، جاذبه زیادی دارد، ولی سرمایه گذاری های کلان می خواهد.

چندین خور در دنیا برای نصب تأسیسات انرژی جزرومد بررسی شده اند. خور سیورن در انگلستان که بزرگ ترین جزرومدهای دنیا در آنجا اتفاق می افتد. پتانسیل ماکزیمم ۸۰۰۰ مگاوات دارد و حداقل ۶٪ نیاز برق انگلستان را می تواند تأمین کند. خورهای دیگری هم در انگلستان هستند که زمان ماکزیمم جزرومد آنها با خور سیورن تفاوت دارد، از این رو می توانند در نبودن قدرت سیورن در تولید برق هم پوشانی داشته باشند، و به طور پیوسته برق عرضه کنند. در سواحل چین جزرومدهای بزرگ رخ می دهد و تأمین درازمدت انرژی بدون کربن از این منبع از برنامه های اولویت دار آن کشور است.

پیشنهاد دیگر برای استفاده از انرژی جزرومد ساختن حوضچه های جزرومد در نواحی کم عمق دور از ساحل است. در جایی که دامنه جزرومد زیاد است. توربین های واقع در دیواره حوضچه ها موقع وارد شدن و خارج شدن آب، برق تولید می کنند. به این ترتیب از بعضی مشکلات زیست محیطی و اقتصادی سدسازی در خورها پرهیز می شود.

انرژی از امواج اقیانوس: در امواج اقیانوس نیز انرژی قابل توجهی وجود دارد. تعدادی دستگاه های ابتکاری، برای تبدیل این انرژی به برق طراحی شده اند. و بعضی از آنها در آستانه تجاری شدن هستند. لیکن به دلیل محیط طوفانی اقیانوس ها، تکنولوژی لازم پیچیده و پرهزینه است. آنچه که برای هر دو انرژی جزرومد و موج بسیار ضروری است، تحقیق و توسعه، و سرمایه گذاری اولیه است.

فناوری در آینده های دورتر

در سطور بالا به آنچه می توان با فناوری موجود، در چند دهه آینده انجام داد، توجه شده است. برای آینده دورتر لازم است به فناوری های جدیدی که ممکن است در سده ۲۱ و

دیرتر به وجود آیند فکر کرد. مطمئناً تصور همه شگفتی‌هایی که آینده خواهد آفرید میسر نخواهد بود.

نظر کلی صاحب‌نظران بر این است، پیل‌های هیدروژنی، که انرژی حاصل از ترکیب هیدروژن و اکسیژن را مستقیماً به برق تبدیل می‌کنند (قاب ۵ - ۹)، نقش اساسی در آینده دراز مدت انرژی خواهند داشت. پیل‌های هیدروژنی می‌توانند بازدهی بالای ۸۰٪ داشته و بدون آلودگی زیست‌محیطی باشند. تنها خروجی آنها برق، گرما، و آب است. پیل‌های هیدروژنی دورنمایی از مولدهای قدرت کوچک با بازدهی بالا ترسیم می‌کنند. آنها می‌توانند در اندازه‌های مختلف نیازهای حمل‌ونقل، مصارف خانگی و تجاری و صنعتی را فراهم آورند. پژوهش‌های زیادی در سال‌های اخیر روی پیل‌های هیدروژنی انجام گرفته است. علی‌رغم وجود مشکلات فنی زیاد، تصور می‌شود پیل‌های هیدروژنی در دهه آینده به طور گسترده مورد استفاده قرار گیرند.

هیدروژن مورد نیاز پیل‌ها را می‌توان از منابع مختلف بدست آورد. آشکارترین منبع نوشونده برای تهیه هیدروژن تجزیه آب، به کمک برق حاصل از سلول‌های خورشیدی یا توربین‌های بادی است. در دنیا زمین‌های زیادی با آفتاب یا باد زیاد وجود دارند که برای مقاصد کشاورزی و سکنی مناسب نیستند و می‌توانند برای این منظور به کار گرفته شوند. در سال‌های اخیر هزینه برق از منابع خورشیدی و بادی به سرعت پایین آمده است (قاب ۴ - ۹) و با پیشرفت فناوری و تولید انبوه این روند ادامه خواهد یافت. سناریوی نقشه‌آبی پیش‌بینی می‌کند که صنعت حمل‌ونقل، تا پیش از ۲۰۵۰، به طور وسیع از پیل‌های هیدروژنی استفاده خواهد کرد.

هیدروژن به دلایل دیگری هم دارای اهمیت است. فضای انبارش کمی می‌خواهد و می‌تواند با خطوط لوله یا کامیون حمل شود. برای کاربردهای عمومی و بزرگ، اصلی‌ترین مشکل فنی، فشارش و انبارش هیدروژن است. سیلندرهای با فشار بالا حجیم و سنگین‌اند و برای حمل‌ونقل جاده‌ای مناسب نیستند. اگر جذابیت سلول‌های هیدروژنی از نظر زیست‌محیطی درک شود، اقتصاد هیدروژن می‌تواند خیلی سریع‌تر از اقتصاد بیشتر انرژی‌هایی که پژوهش‌گران پیش‌بینی کرده‌اند رشد کند.

ایسلند در صف اول توسعه اقتصاد هیدروژنی است و در نظر دارد به طور گسترده سوخت‌های فسیلی را تا سال ۲۰۳۰ - ۲۰۴۰ کنار بگذارد. بیشتر برق ایسلند تاکنون از منابع

قالب ۵ - ۹: پیل هیدروژنی

پیل هیدروژنی یک مبدل انرژی است. انرژی شیمیایی را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. هر سلول پیل از سه جزء آند، کاتد، و الکترولیت تشکیل شده است. در پیل هیدروژن - اکسیژن (به اختصار پیل هیدروژنی) دو گاز هیدروژن و اکسیژن در حضور یک کاتالیزور با هم ترکیب می‌شوند و مستقیماً برق تولید می‌شود. فرآیند دقیقاً عکس فرایند الکترولیز است که در آن به کمک برق، آب به هیدروژن و اکسیژن تجزیه می‌شود.

در شکل زیر یک پیل هیدروژنی نشان داده شده است. در این پیل الکترولیت یک پلیمر جامد است. هیدروژن از طرف چپ الکترولیت و اکسیژن، از طرف راست آن وارد می‌شود. اتم‌های هیدروژن در آند که خود یک کاتالیزور (مانند پلاتین) است، به یون‌های هیدروژن و الکترون شکسته می‌شوند. الکترولیت فقط یون‌های مثبت هیدروژن را از خودش عبور می‌دهد. الکترون‌ها به یک مدار

خارجی هدایت می‌شوند و جریان

برق به وجود می‌آورند. در کاتد

یون‌های هیدروژن که از غشاء

عبور کرده‌اند با اکسیژن هوا و

الکترون‌های بازگشتی ترکیب

می‌شوند. آب و مقداری گرما

تولید می‌شود. ولتاژ خروجی پیل

حدود یک ولت است و جریان

خروجی از آن بستگی به مساحت

سطحی از الکترودها دارند که با

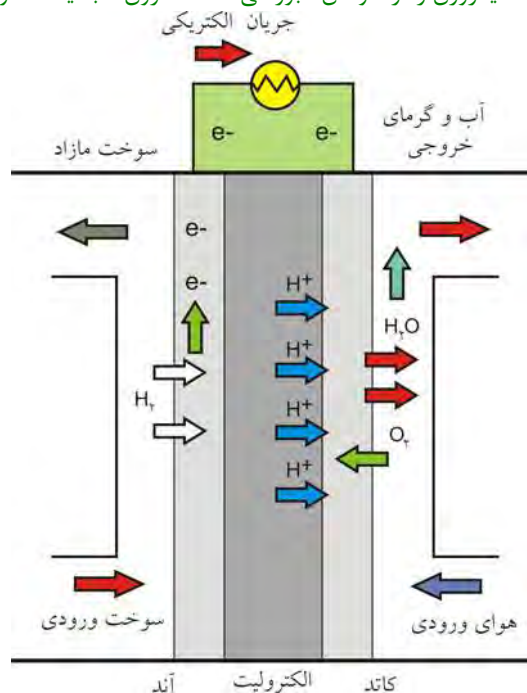
الکترولیت در تماس‌اند. پیل‌های

سوختی که با هیدروژن خالص

کار می‌کنند، کارایی بالایی دارند

و ۴۰ تا ۷۰ درصد انرژی شیمیایی

حاصل از ترکیب اکسیژن و



هیدروژن را به برق تبدیل می‌کنند. پیل‌های هیدروژنی قسمت‌های متحرک ندارند و بی‌سروصدا و پاک‌اند. با وجود این نگرانی‌های جدی درباره ایمنی هیدروژن به عنوان یک سوخت وجود دارد. از نظر آتش‌سوزی، هیدروژن خطرناک‌تر از گاز طبیعی است. مخلوط آن با هوا در گستره وسیعی از فراوانی‌ها، ۴ تا ۷۵ درصد هیدروژن، قابل انفجار است. در صورتی که گاز طبیعی فقط در گستره

فراوانی‌های ۵ تا ۱۵ درصد قابل اشتعال است. به علاوه انرژی لازم برای اشتعال مخلوط هوا و هیدروژن بسیار اندک است (حدود دوصدم میلی‌ژول و نزدیک به ۷٪ مقدار لازم برای شروع اشتعال گاز طبیعی). این انرژی به آسانی با یک جرقه الکتریسته ساکن می‌تواند تامین شود.

آبی و زمین‌گرمایی فراهم شده است. اولین ایستگاه سوخت هیدروژن در ایسلند در آوریل ۲۰۰۳ افتتاح شد و چندین اتوبوس پیل هیدروژنی اولین کاربرانش بودند. برای دوراندیشی‌های طولانی‌تر، نگاهی به هم‌جوشی هسته‌ای نیز ضروری است، فرآیندی که خورشید نیز انرژی‌اش را از آن می‌گیرد (قاب ۶ - ۹). اگر این انرژی بتواند تولید و مهار شود، میزان آن عملاً بی‌حدومرز است.

قاب ۶ - ۹: جوش هسته‌ای

در دماهای بسیار بالا (چند میلیون درجه)، هسته‌های هیدروژن یا یکی از ایزوتوپ‌های آن، دوتریم یا تریتیم، می‌توانند با هم جوش بخورند و تشکیل هلیوم دهند. در این فرایند مقدار زیادی انرژی آزاد می‌شود. انرژی تابشی خورشید از جوش هسته‌ای در دمای ۱۰ تا ۱۵ درجه درون خورشید به وجود می‌آید. برای انجام جوش هسته‌ای در روی زمین دوتریم و تریتیم به کار می‌رود. یک کیلوگرم از این مواد می‌تواند انرژی‌ای برابر ۱ گیگاوات آزاد کند. منبع مواد اولیه آن، که هیدروژن و ایزوتوپ‌های آن باشد، در آب دریاها عملاً تمام نشدنی است. جوش هسته‌ای آلودگی زیست‌محیطی ندارد. برای انجام آن در روی زمین دمای ۱۰۰ میلیون درجه لازم است. برای آنکه پلاسمای داغ دور از دیواره‌های ظرف واکنش نگه داشته شود، آن را در میدان‌های مغناطیسی قوی، که اصطلاحاً بطریقی مغناطیسی نامیده می‌شوند محدود می‌کنند. فناوری تحدید مؤثر پلاسمای داغ هیدروژن در میدان مغناطیسی، از چالش‌های روز است.

هم‌جوشی تا سطح ۱۶ مگاوات به مدت یک ثانیه در روی زمین انجام گرفته است. دلگرمی و اطمینان حاصل از این موفقیت کنسرسیومی از کشورها را گرد هم آورده، تا نیروگاهی به نام ITER (راکتور آزمایشی گرما هسته‌ای بین‌المللی)^۱ با توان ۵۰۰ مگاوات بسازند. هدف، نمایش امکان‌پذیر بودن تجاری این فناوری است. اگر ITER موفقیت‌آمیز باشد، پیش‌بینی می‌شود که اولین نیروگاه تجاری جوش هسته‌ای تا ۳۰ سال آینده شروع به کار کند.

1. International Thermonuclear Experimental Reactor

کوتاه سخن

در این فصل راه‌های معمول تأمین انرژی برای زندگی انسان‌ها و گرداندن چرخ‌های صنعت به اختصار بیان شد. مصرف انرژی‌های فسیلی با آهنگ فعلی و سریع‌تر از آن، مقادیر زیادی گازهای گل‌خانه‌ای نشر خواهد کرد و برای اقلیم قابل تحمل نیست. چنین چیزی با روح مذاکرات کنفرانس سازمان ملل متحد در ریودوژانیرو، ژوئن ۱۹۹۲، برای توسعه پایدار جهان، همراه با حفظ محیط‌زیست، سازگار نیست. در کنفرانس ریو کشورهای جهان برای رویارویی با مشکلات انرژی و محیط‌زیستی متعهد شدند نشر کربن دی‌اکسید را به طور چشم‌گیر کاهش دهند، به طوری که فراوانی آن در جو تا پایان سده بیست‌ویکم در حد معقولی تثبیت شود. آژانس بین‌المللی انرژی (۲۰۰۸) دستیابی به این هدف را چیزی در حد یک انقلاب انرژی در سطح جهانی ارزیابی می‌کند. زمینه‌های کار به شرح زیراند:

- کشورهای توسعه یافته می‌توانند بازده تولید و مصرف انرژی را بدون هزینه اضافی و بعضاً همراه با سود، ۳۰ تا ۵۰٪ بالا برند. لازم است افراد و صنعت به این امر تشویق شوند و انگیزه‌های مالی و مادی داشته باشند.
- در سطح بین‌المللی و در سطح کشورها یک استراتژی بلندمدت انرژی ضرورت دارد. در این استراتژی لازم است ملاحظات اقتصادی در کنار مسائل زیست‌محیطی و اجتماعی با هم دیده شوند، و تولید محلی و مرکزی انرژی و امنیت آن بررسی شود.
- در حال حاضر هیچ فناوری‌ای که جوابگوی همه مشکلات باشد وجود ندارد. بنابراین لازم است همه راه‌های تولید انرژی کم‌کربن بررسی شوند و گسترش یابند. برای تحقق این امر به سرمایه‌گذاری و پژوهش بیشتر نیاز است.
- برای جلوگیری از رشد نشر کربن دی‌اکسید در صنایعی که با سوخت فسیلی کار می‌کنند، لازم است حبس و ذخیره کربن به طور وسیع و هر چه زودتر به عمل آید.
- انرژی از منابع نوشونده، مانند خورشید، باد، و زیست‌توده‌های مدرن، می‌تواند جایگزین انرژی از سوخت‌های فسیلی باشد. تحقق این جایگزینی در مقیاس جهانی، چارچوب اقتصادی مناسب لازم دارد و عزم جهانی فوری می‌طلبد. تمهیدات انگیزاننده این چارچوب می‌تواند جابجایی یارانه‌ها از سوخت‌های فسیلی به منابع نوشونده، مالیات بر نشر کربن و بر مصرف بیش از سهمیه انرژی، ملاحظات زیست‌محیطی و بالاخره

- تجارت کربن، که در سال‌های اخیر به وجود آمده است، باشد.
- برای تثبیت کربن در حد ۴۵۰ در میلیون و جلوگیری از گرمایش بیش از ۲ تا ۳ درجه زمین، لازم است هر چه زودتر از تمام بخش‌های تولید و مصرف انرژی کربن‌زدایی شود.
 - همه کشورها، اعم از توسعه یافته و در حال توسعه، باید به تکنولوژی‌های تولید و مصرف با بازدهی بالا دسترسی داشته باشند. لازمه این امر انتقال تکنولوژی‌های پیشرفته تولید و مصرف از جوامع توسعه یافته به جوامع در حال توسعه است.
- با سیاست «جاری به روال روز»، سازمان بین‌المللی انرژی سرمایه‌گذاری لازم تا سال ۲۰۵۰ را برابر ۲۵۰ هزار میلیارد دلار تخمین زده است. این رقم به ۶٪ تولید ناخالص جهان بالغ می‌شود. برای تحقق اهداف سناریوی نقشه آبی (تثبیت نشر کربن در حد سال ۲۰۰۰) ۴۵ هزار میلیارد دلار دیگر نیز لازم است. در عوض سود حاصل از صرفه‌جویی در مصرف سوخت به ۵۰ هزار میلیارد دلار، یعنی کمی بیش از هزینه اضافی، بالغ خواهد شد.
- برای تحقق اهداف یاد شده در بالا در مقیاس جهانی و با فوریتی که جابه‌جا بر آن تأکید شده لازم است همه کشورها به تناسب امکانات و مسئولیت‌های گذشته و حال خود قیام کنند و با دیگر کشورها هماهنگ باشند. لازم است دولت‌ها سیاست‌های روشن و مصمم و تعهدات غیر قابل نکول در قبال جامعه خود و جامعه جهانی داشته باشند.

مرجع‌ها:

- IPCC. *Climate Change 2007, The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, 2007
- Houghton, J. *Global Warming, The Complete Briefing*, Fourth Edition, Cambridge University Press, 2009
- Mathez, E. A. *Climate Change: The Science of Global Warming and Our Energy Future*, Columbia University Press, 2009

پیوست‌ها

پیوست الف

پانل دولت‌ها برای تغییر اقلیم (آی‌پی‌سی‌سی)

تاریخچه: پانل دولت‌ها برای تغییر اقلیم (آی‌پی‌سی‌سی) در سال ۱۹۸۸ توسط سازمان جهانی هواشناسی^۱ و برنامه محیط‌زیست سازمان ملل^۲ تأسیس شد. برابر قطع‌نامه شماره ۴۳/۵۶ مجمع عمومی سازمان ملل، مورخ دسامبر ۱۹۸۸، وظیفه آی‌پی‌سی‌سی عبارت است از ارزیابی به روز دانش اقلیم، تأثیر اجتماعی - اقتصادی تغییر اقلیم، ارزیابی علمی و جامع‌الاطراف خطرات تغییرات اقلیم ناشی از فعالیت‌های انسان، گزینه‌های سازگاری با تغییر اقلیم، و کاهش آثار ناخواسته تغییر اقلیم. گزارش‌های آی‌پی‌سی‌سی لازم است در برابر سیاست‌های اجرایی متداول دولت‌ها و ملت‌ها بی‌طرف و خنثی باشند و در عین حال نقطه‌نظرات علمی، فنی، و عوامل اجتماعی اقتصادی را نادیده نگیرند.

از زمان تأسیس تا به حال، آی‌پی‌سی‌سی به طور مرتب گزارش ارزیابی^۳ تهیه کرده است. هر کدام از این گزارش‌ها، با توجه به دانش روز، اسناد معتبری برای پژوهشگران،

-
1. World Meteorological Organization (WMO)
 2. United Nations Environment Programme
 3. Assessment Report

سیاست‌گذاران، و دولت‌ها به شمار می‌آیند. گزارش ارزیابی اول در سال ۱۹۹۰ منتشر شد و زمینه را برای تشکیل کنوانسیون چارچوب سازمان ملل برای تغییر اقلیم^۱ آماده کرد. این کنوانسیون یک معاهده کلیدی بین‌المللی برای کاهش گرمایش زمین و مقابله با پیامدهای آن به حساب می‌آید. گزارش ارزیابی دوم در سال ۱۹۹۵ منتشر شد و مآلاً به تنظیم پیمان کیوتو در سال ۱۹۹۷ انجامید. گزارش ارزیابی سوم در سال ۲۰۰۱ و گزارش چهارم در سال ۲۰۰۷ منتشر شدند. گزارش ارزیابی چهارم در همه‌گانی کردن موضوع گرمایش زمین و جلب توجه دانشمندان، عامه و دولت‌ها به تغییر اقلیم چنان مؤثر بود که بنیاد نوبل جایزه صلح سال ۲۰۰۷ را به آی‌پی‌سی‌سی (مشترک با ال‌گور، معاون سابق ریاست جمهوری آمریکا) اعطا کرد.

روش کار آی‌پی‌سی‌سی: آی‌پی‌سی‌سی خودکار علمی نمی‌کند و سیاست علمی برای هیچ کس و هیچ نهادی تجویز نمی‌کند. وظیفه آی‌پی‌سی‌سی خواندن و خلاصه کردن اسناد و مقالات علمی و فنی مربوط به اقلیم از سرتاسر دنیا، ارزیابی بی‌طرفانه آنها و تهیه گزارش ارزیابی است. کار خواندن و خلاصه کردن اسناد علمی و فنی را هزاران پژوهشگر و صاحب‌نظر از سراسر دنیا انجام می‌دهند. در مرحله بعدی صدها نویسنده راهبر پیش‌نویس ارزیابی را تهیه می‌کنند. در مرحله بعدی، ده‌ها نویسنده هماهنگ‌کننده راهبر گزارش نهایی را برای عرضه به مجمع عمومی آی‌پی‌سی‌سی آماده می‌کنند، کار همه این افراد داوطلبانه است.

ساختار مدیریتی آی‌پی‌سی‌سی: چارت سازمانی آی‌پی‌سی‌سی در شکل صفحه بعد نموده شده است. یک دفتر مرکزی، یک دبیرخانه، سه کارگروه، و یک نیروی وظیفه، ساختار آی‌پی‌سی‌سی را تشکیل می‌دهند.

وظیفه دفتر مرکزی هماهنگی و پشتیبانی کار دانشمندان و کارشناسانی است که کارگروه‌ها را تشکیل می‌دهند. کارگروه اول وظیفه ارزیابی مبانی علمی - فیزیکی تغییر اقلیم را بر عهده دارد. کارگروه دوم آثار تغییر اقلیم، سازگاری با آن و آسیب‌پذیری از آن را بررسی می‌کند. کارگروه سوم به راه‌کارهای کاهش آثار ناخواسته اقلیم می‌پردازد. نیروی وظیفه حساب‌نشر و حذف گازهای گل‌خانه‌ای کشورها را به عهده دارد. هر یک از کشورهای عضو، یک دفتر آی‌پی‌سی‌سی در کشور خود دارند. مسئولین آن

1. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)



از طرف همان کشور تعیین می‌شوند. دفتر آی‌پی‌سی‌سی ایران در سازمان محیط‌زیست کشور مستقر است.

مجمع عمومی آی‌پی‌سی‌سی کم و بیش سالی یک بار و با حضور نمایندگان کشورها تشکیل می‌شود. علاوه بر نمایندگان، که حق تصمیم‌گیری دارند، صدها کارشناس و محقق از موسسات تحقیقاتی و نهادهای خصوصی و عمومی و سازمان‌های ناظر نیز در این جلسات شرکت می‌کنند. تصمیم‌های عمده آی‌پی‌سی‌سی در همین جلسات گرفته می‌شود. مثال‌های زیر نمونه‌هایی از این تصمیم‌هاست:

- انتخاب رئیس آی‌پی‌سی‌سی، رئیس دفتر آی‌پی‌سی‌سی و رئیس نیروی وظیفه
- تصویب ساختار و اختیارات نیروهای وظیفه
- تصویب اصول و برنامه کار آی‌پی‌سی‌سی
- تعیین و تصویب حوزه و طرح کلی گزارش‌های آی‌پی‌سی‌سی
- تایید، گزینش، و پذیرش گزارش‌ها

• تعیین و تصویب بودجه

مرجع: مطالب بالا از سایت آی‌پی‌سی‌سی گردآوری شده است. خواننده علاقمند برای جزئیات بیشتر می‌تواند به نشانی www.IPCC.org مراجعه کند.

نقد گزارش ارزیابی چهارم آی‌پی‌سی‌سی

آی‌پی‌سی‌سی علاوه بر اطلاع‌رسانی به دولت‌ها و سیاست‌گذاران، در بالا بردن آگاهی عموم درباره تغییر اقلیم نقش داشته است. اما با افزایش آگاهی دولت‌ها و عامه، موشکافی درباره توازن، دقت و صحت گزارش‌های آی‌پی‌سی‌سی و بی‌طرفی سیاست‌های آن هم افزایش یافته است. این موشکافی‌ها در سال ۲۰۱۰، پس از آن که در گزارش چهارم سال ۲۰۰۷، اشتباهی درباره آب شدن یخچال‌های هیمالیا پیدا شد به اوج رسید. در ادامه این مسئله چند ای‌میل که بین صاحب‌نظران برجسته علوم اقلیم، که بسیاری از آنها در نوشتن گزارش چهارم دست داشتند، رد و بدل شد و به دست مردم افتاد. این ای‌میل‌ها چنین نشان می‌دادند که کوشش‌هایی برای پنهان داشتن بعضی از داده‌های اقلیم صورت گرفته است. دو موضوع یاد شده سبب شد انتقادها بیشتر شود و اعتماد عامه به آنچه که گزارش چهارم در مورد تغییر اقلیم و نقش انسان در آن اعلام کرده بود سست شود. لذا راجندرا پاچائوری، رئیس وقت آی‌پی‌سی‌سی، و بان‌کی‌مون، دبیرکل سازمان ملل، از شورای بین‌آکادمی‌ها^۱ خواستند گزارش ارزیابی چهارم و عملکرد آی‌پی‌سی‌سی را بررسی و نقد کند. کمیته‌ای که از طرف شورای بین‌آکادمی‌ها مامور این کار شد، به نتیجه زیر رسیده است:

روش ارزیابی و یافته‌های آی‌پی‌سی‌سی در کل درست است. با این حال شورا توصیه کرده است، چون دنیا پس از تشکیل آی‌پی‌سی‌سی (۱۹۸۸) تغییر کرده، دانش اقلیم پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته، بحث و جدل‌ها بر سر موضوعات مربوط به اقلیم حادتر شده، و دولت‌ها نسبت به تغییر اقلیم توجه بیشتری نشان می‌دهند، لازم است آی‌پی‌سی‌سی نیز روش و ساختار خود را متناسب با شرایط جدید، روزآمد کند. مشروح توصیه‌های کمیته منتخب شورای بین‌آکادمی‌ها در سایت آی‌پی‌سی‌سی آمده است. توصیه‌ها موارد زیر را شامل می‌شوند:

1. InterAcademy Council (IAC)

- تغییر در ساختار مدیریتی آی پی سی سی
- تجدیدنظر در روش نقد گزارش های علمی
- اتخاذ روش هماهنگ توسط سه کارگروه در بررسی عدم قطعیت ها و موارد تردید
- ایجاد یک کمیته اجرایی از میان راهبران علمی و کسانی که به دولتها و آی پی سی سی وابستگی ندارند و اعطا اختیار تصمیم گیری به آنها.

مطالب این قسمت از گزارش شورای بین آکادمی ها گرفته شده است.

پیوست ب

معاهده‌های بین‌المللی

در دهه ۱۹۷۰ نظر برخی از دانشمندان به تغییرات آب‌وهوا و گرم شدن زمین معطوف شد. به نظر رسید در صورت افزایش کربن‌دی‌اکسید در جو تغییرات وسیعی در اقلیم جهان پدید خواهد آمد و آثار ناخوشایند خواهد داشت. اولین گردهمایی جهانی اقلیم در سال ۱۹۷۹ در ژنو، با حمایت سازمان جهانی هواشناسی، و مشارکت صاحب‌نظرانی با تخصص‌های مختلف برگزار شد و گرم شدن کره زمین به عنوان یک معضل جهانی بررسی شد. بیانیه پایانی گردهمایی دولت‌ها را به پیش‌گیری تغییراتی که انسان در آن دست داشت فراخواند. متعاقب این رویداد، نشست‌های میان‌دولتی بیشتری در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰ برگزار شد. از مهم‌ترین آنها می‌توان گردهمایی تورنتو، ژوئیه ۱۹۸۸، گردهمایی اتاوا، فوریه ۱۹۸۹، گردهمایی و بیانیه هایوگو، کوبه ژاپن ژانویه ۲۰۰۵، معاهده قاهره، دسامبر ۱۹۸۹، گردهمایی برگن، مه ۱۹۹۰ و دومین گردهمایی جهانی آب-وهوا، نوامبر ۱۹۹۰ را نام برد. در زیر به بعضی از این نشست‌ها اشاره می‌شود.

پیمان ریو، ۳ ژوئن ۱۹۹۲، ریو دو ژانیرو، برزیل (عضویت ایران، ۱۳۷۵/۳/۱۳)

نشست‌های دهه هشتاد، ضرورت تدوین معاهده‌ای بین‌المللی برای رویارویی با تغییرات اقلیم را بیش از پیش آشکار کرد. در دسامبر سال ۱۹۹۰، مجمع عمومی سازمان ملل متحد با استناد به گزارش‌های علمی و مباحث مطرح شده در نشست‌های پیشین، کمیته مذاکرات میان دولتی^۱ را برای تدوین کنوانسیون چارچوب سازمان ملل برای تغییر اقلیم تشکیل داد. کمیته مذاکرات، پیش‌نویس کنوانسیون را تهیه کرد و پیش‌نویس در ۹ مه ۱۹۹۲ در مقر سازمان ملل در نیویورک به تصویب رسید. این پیش‌نویس در ژوئن ۱۹۹۲، در اجلاس سران زمین در ریو دو ژانیرو توسط سران و مقام‌های ارشد ۱۵۴ کشور دنیا امضا شد، و از ۲۱ مارس ۱۹۹۴ لازم‌الاجرا شناخته شد. گردهمایی ریو بزرگ‌ترین نشست سران کشورها در زمینه حفظ محیط‌زیست بشمار می‌آید و تا امروز ۱۹۲ کشور پیمان ریو را امضا کرده‌اند. هدف پیمان، تنظیم میزان گازهای گل‌خانه‌ای جو است، به طوری که زیست‌بوم‌های زمین فرصت بازیافتن چرخه طبیعی خود را پیدا کنند.

جمهوری اسلامی ایران در تاریخ ۱۳۷۵/۳/۱۳، با تصویب مجلس شورای اسلامی و تأیید شورای نگهبان به این کنوانسیون پیوست. براساس ماده واحده این قانون، به دولت اجازه داده شد به کنوانسیون تغییرات آب‌وهوا مشتمل بر یک مقدمه و بیست‌وشش ماده و دو ضمیمه ملحق شود. دفتر ملی این کنوانسیون در سازمان حفاظت محیط‌زیست کشور مستقر است.

کنوانسیون وین، ۲۲ مارس ۱۹۸۵، وین، اتریش (عضویت ایران، ۳ اکتبر ۱۹۹۰)

کنوانسیون وین برای حفاظت لایه ازن توسط سازمان ملل متحد و مشارکت کشورهای صنعتی عمده جهان تشکیل شد. این کنوانسیون را ۲۸ کشور، عمدتاً کشورهای توسعه‌یافته، امضا کردند. در این پیمان هیچ سازوکار کنترل‌کننده‌ای برای پایبندی دولت‌ها و کشورها به تعهدات پیش‌بینی نشده است. با این وجود، پیمان وین نقطه عطفی در توجه به اقلیم و محیط‌زیست جهان به شمار می‌رود و نخستین موافقت‌نامه بین‌المللی برای ایجاد زمینه همکاری‌های علمی و فنی کشورها در جهت حفاظت از لایه ازن است. کنوانسیون وین زمینه تشکیل دومین ساختار حقوقی بین‌المللی برای اقدامات حفاظتی از لایه ازن را به

1. Intergovernmental Negotiating Committee (INC)

وجود آورد. تاریخ عضویت ایران در این معاهده ۳ اکتبر ۱۹۹۰ است.

پروتکل مونترال، ۱۶ سپتامبر ۱۹۸۷، مونترال، کانادا، تاریخ لازم‌الاجرا شدن: یکم ژانویه ۱۹۸۹ (عضویت ایران ۱۳ اکتبر ۱۹۹۰)

دقیقاً دو سال پس از کنوانسیون وین، نمایندگان دولت‌ها برای تبادل نظر درباره تعهدات محکم‌تر بین‌المللی در جهت کنترل گازهای کلروفلوروکربن و حفاظت لایه ازن در مونترال گرد هم آمدند. پروتکل مونترال، مکمل کنوانسیون وین است. نخستین اقدام‌های بین‌المللی، برای کنترل مواد آسیب‌رسان به لایه ازن، در آن پیش‌بینی شده است. پروتکل تعهدات متفاوتی را برای کشورهای در حال توسعه و توسعه‌یافته در نظر می‌گیرد و یک موفقیت مهم در صحنه بین‌المللی به شمار می‌رود. براساس این پروتکل، کشورهای پیشرفته ملزم به کاهش نشر کلروفلوروکربن‌ها به میزان ۵۰٪ تا سال ۲۰۰۰ شدند و به کشورهای در حال توسعه یک فرصت ۱۰ ساله داده شد. پروتکل مونترال تاکنون چندین بار اصلاح و تعدیل شده است. تغییرات در اسناد زیر قابل دسترسی است: الحاقیه لندن ۱۹۹۰، الحاقیه کپنهاگ، ۱۹۹۲، تطبیقات وین، ۱۹۹۵، و الحاقیه‌های مونترال، ۱۹۹۷.

کنوانسیون چارچوب سازمان ملل برای تغییر اقلیم، ۹ مه ۱۹۹۲، نیویورک، تاریخ لازم‌الاجرا شدن: ۲۱ مارس ۱۹۹۴ (عضویت ایران: ۱۸ ژوئیه ۱۹۹۶)

این کنوانسیون با هدف ثابت نگاه‌داشتن مقدار گازهای گل‌خانه‌ای در حد جلوگیری از مختل شدن چرخه‌های طبیعی، تشکیل شد. این معاهده در هر کشور دارای مجری ملی است. در ایران دفتر طرح ملی تغییرات آب‌وهوایی، این مسئولیت را بر عهده دارد و با همکاری برنامه عمران ملل متحد و برنامه محیط‌زیست ملل متحد، طرح‌های مشترکی را در خصوص تغییرات اقلیم انجام می‌دهد.

تاکنون سه گردهمایی بین‌المللی برای نحوه اجرای تعهدات کنوانسیون چارچوب در برلن، ۱۹۹۵، در ژنو، ۱۹۹۶ و در کیوتو، ۱۹۹۷، تشکیل شده است.

براساس کنوانسیون چارچوب، کشورهای عضو تشویق می‌شوند برای جمع‌آوری و به اشتراک گذاشتن اطلاعات در مورد کاهش گازهای گل‌خانه‌ای تلاش کنند. هیچ یک از اقدامات کشورهای امضاکننده، که در راستای اهداف پیمان انجام می‌گیرد نباید امنیت

غذایی و توسعه پایدار اجتماعی و اقتصادی آن را با خطر روبرو کند. کشورهای عضو کنوانسیون چارچوب به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- کشورهای عضو پیوست یک و دو: اینها کشورهای صنعتی و توسعه‌یافته هستند و ملزم به کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای خود از جمله کربن دی‌اکسیداند. اگر اعضای پیوست یک، در کشور خود به اهداف مشخص شده کنوانسیون چارچوب نرسند، باید در کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای در جای دیگری از جهان مشارکت و سرمایه‌گذاری کنند.

- کشورهای در حال توسعه، الزامی برای کاهش فوری نشر خود ندارند. فلسفه این امتیاز جلو نگرفتن از توسعه اقتصادی و صنعتی این کشورهاست. الزامات این کنوانسیون به اجمال به شرح زیر است:

- تثبیت میزان گازهای گلخانه‌ای در جو در حد جلوگیری از آسیب به سامانه اقلیم.
- ارائه گزارش‌های دوره‌ای وضعیت‌های ملی تغییر آب‌وهوا به کنوانسیون.
- تنظیم و اجرای برنامه‌های کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای.
- توسعه فناوری برای کاهش نشر در بخش‌های مختلف انرژی، حمل و نقل، جنگل، و پسماندها.
- همکاری در انتقال فناوری به کشورهای دیگر.
- همکاری منطقه‌ای و بین‌المللی در تنظیم برنامه‌های سازگاری با تغییر اقلیم و کاهش آثار آن.
- لحاظ نمودن تغییرات اقلیم در سیاست‌ها و برنامه‌های توسعه هر کشور.

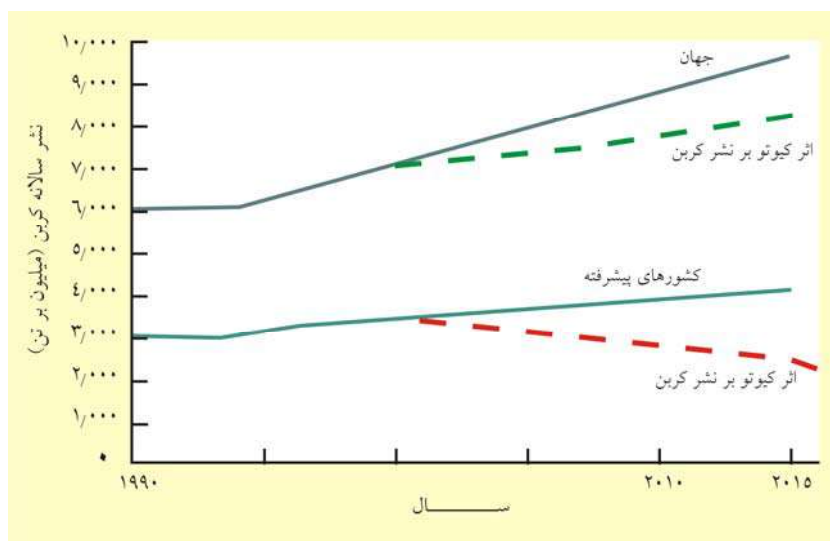
پروتکل کیوتو، ۱۱ دسامبر ۱۹۹۷، کیوتو، ژاپن، تاریخ لازم‌الاجرا شدن: ۹۰ روز پس

از تاریخ پذیرش پروتکل توسط هر کشور، (عضویت ایران، ۲۲ اوت ۲۰۰۵)

در سومین گردهمایی سران کشورها در کیوتو، موافقت‌نامه‌ای با عنوان پروتکل کیوتو به بحث گذاشته شد. هدف از آن تقویت سازوکارهای اجرایی تعهدات کنوانسیون چارچوب بود. بر طبق مفاد پروتکل، امضاکنندگان متعهد می‌شدند برای کاهش تصاعدی گازهای گلخانه‌ای تلاش فراگیر صورت دهند.

تعیین اهداف کمی، برای کاهش نشر گازهای گل‌خانه‌ای در فاصله‌های زمانی مشخص، محور اصلی این نشست بود. شناسایی سیاست‌ها و راه‌های دستیابی به اهداف پروتکل و تداوم اجرای تعهدات از دیگر نکات پروتکل بود. پروتکل از ۱۶ فوریه سال ۲۰۰۵ اجرایی شد. ایران در تاریخ ۲۲ اوت ۲۰۰۵، برابر ۳۱ مرداد ماه ۱۳۸۴ پروتکل را رسماً پذیرفت. بر اساس مفاد پروتکل، کشورهای توسعه‌یافته متعهد هستند نشر گازهای گل‌خانه‌ای خود را طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ به کمتر از نشر سال ۱۹۹۰ برسانند. مقدار نشر مجاز هر کشور در ضمیمه پروتکل آورده شده است. میانگین جهانی کاهش نشر تا سال ۲۰۱۲ برابر ۲٫۵٪ نشر سال ۱۹۹۰ پیش‌بینی شده است. این پروتکل قرار بود از سال ۲۰۰۵ اجرایی شود. ولی امضاکنندگان آن چندان پای‌بند به انجام تعهدات خود نشدند.

از آنجا که بیشتر امضاکنندگان پروتکل از گروه کشورهای توسعه‌یافته و عمدتاً فاقد منابع انرژی بودند، عملاً با مشکل روبرو می‌شدند. با وجود این گروه تاکنون به فناوری‌های پیشرفته و مبتنی بر صرفه‌جویی در مصرف انرژی رو آورده‌اند و سرمایه‌گذاری‌های قابل توجهی انجام داده‌اند. برای تحقق اهداف پروتکل توصیه شده است از راه‌کارهای بازار محور استفاده شود. راهکارها در سه سرفصل عمده تنظیم شده‌اند: سازوکار توسعه



نشر سالانه کربن از ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۵. خطوط بر میزان نشر با آهنگ فعلی. خطوط خط چین میزان نشر در صورت اجرای تعهدات پیمان کیوتو.

پاک^۱، اجرای مشترک^۲، دادوستد نشر^۳.

روح حاکم بر این راه‌کارها، ایجاد انعطاف در شرایط اجرایی کاهش نشر، ایجاد انگیزه در هر یک از دو سوی شمال و جنوب، و ارتقاء همکاری شمال - شمال (اجرای مشترک) است. هدف این است که ثروت و دانش کشورهای توسعه‌یافته به کمک کشورهای در حال توسعه بیاید و کاهش نشر گازهای گل‌خانه‌ای را امکان‌پذیر سازد.

بر اساس پروتکل کیوتو، کشورهای در حال توسعه تعهدی برای کاهش نشر گازهای گل‌خانه‌ای در کشور خود ندارند. کشورهای توسعه‌یافته نیز ملزم به کاهش گازهای گل‌خانه‌ای فقط در کشور خود نیستند. می‌توانند این کار را در کشورهای دیگر انجام دهند و خود را از زیر بار تعهد آزاد کنند. سازوکار توسعه پاک درباره همکاری یک کشور توسعه‌یافته و یک کشور در حال توسعه است. کشور توسعه‌یافته می‌تواند با سرمایه‌گذاری در هر جای دنیا، نشر گازهای گل‌خانه‌ای را کاهش دهد و با ارائه اسناد آن به سازمان ناظر، به پاره‌ای از تعهداتش در قبال پروتکل کیوتو، جامه عمل بپوشاند.

پروتکل کیوتو به همه اهداف خود نرسیده است. بعد از گذشت ۲۰ سال از تشکیل گردهمایی می‌توان دلایل شکست را به شرح زیر دسته‌بندی کرد.

- جاه‌طلبانه و بلندپروازانه بودن اهداف گردهمایی: در جهان تشنه انرژی نمی‌توان به‌سادگی، نشر جهانی را به کمتر از نشر ۲۲ سال پس از آن رسانید (۲۰۱۲ - ۱۹۹۰). توسعه صنعتی نیازمند انرژی است و گاز گل‌خانه‌ای نشر می‌کند. بسیاری از کشورها زیر بار این تعهد بازدارنده صنعت نمی‌روند.
- ایالات متحده آمریکا، چین، هندوستان و روسیه در ابتدا از امضای این پروتکل سرباز زدند. توجه به ارقام زیر، ابعاد مشکل آمریکا را نشان می‌دهد. آمریکا به تنهایی یک‌سوم گازهای گل‌خانه‌ای جهان را نشر می‌کند. هر آمریکایی در سال ۲۰ تن گاز گل‌خانه‌ای به جو می‌فرستد در حالی که هر اروپایی ۱۰ تن، هر چینی ۵ تن، هر هندی ۲ تن و هر آفریقایی تنها یک تن گاز گل‌خانه‌ای نشر می‌کند.
- در کیوتو بحث نشد که به جای سوخت‌های فسیلی که مولد گازهای گل‌خانه‌ای هستند، جهان از چه گزینه دیگری می‌تواند استفاده کند. درست است که منابع تمام‌نشدنی

1. (CDM) Clean Development Mechanism
3. (ET) Emission Trading

2. (JI) Joint Implementation

- انرژی مانند تابش خورشید، وزش باد، امواج اقیانوس‌ها و انرژی زمین‌گرمایی می‌توانند بالقوه جایگزین سوخت‌های فسیلی شوند، ولی استفاده بالفعل از این انرژی‌ها نیازمند فناوری‌هایی است که ساختن و پرداختن آن‌ها نیاز به سرمایه‌گذاری کلان و زمان طولانی دارد.
- کشورهای در حال توسعه که خود را در گرمایش زمین (لااقل به اندازه آمریکا، چین) مقصر نمی‌دانند کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی را مانع پیشرفت‌های صنعتی خود تلقی کرده‌اند و از آن سر باز می‌زنند.

گردهمایی کپنهاگ، ۷ - ۱۱ دسامبر ۲۰۰۹، کپنهاگ، دانمارک

پس از گذشت ۲۰ سال از تشکیل و ناکامی نسبی نشست کیوتو، بار دیگر جهان برای کاهش نشر گازهای گل‌خانه‌ای و نجات کره زمین و زیست‌بوم‌های آن به تکاپو افتاد. ۱۹۰ کشور در کپنهاگ حضور یافتند. بیش از ۱۱۰ کشور را رؤسای جمهور و نخست‌وزیران، نمایندگی کردند و نقطه نظرات خود را گفتند. بان‌کی‌مون، دبیرکل سازمان ملل متحد، از گردهمایی کپنهاگ به عنوان آخرین شانس کره زمین نام برد.

نظر کارشناسان بر این بود، اگر وضع به روال فعلی ادامه یابد، تا ۴۰ سال دیگر دمای زمین ۲ درجه افزایش خواهد یافت. همین افزایش به ظاهر ناچیز موجب آب شدن یخ‌های قطبی، بالا آمدن تراز آب دریاها، غرق شدن بسیاری از شهرهای ساحلی، خشک‌سالی در بسیاری از کشورهای جهان (از جمله ایران)، و کم‌آبی رودخانه‌های آنها (مانند زاینده‌رود) و دریاچه‌ها (مانند ارومیه و پریشان) خواهد شد. با توجه به دیدگاه‌های متفاوت شرکت‌کنندگان در اجلاس کپنهاگ، رسیدن به توافق برای کاهش گازهای گل‌خانه‌ای آسان نبود. اعتبار پیمان کیوتو که از سال ۲۰۰۵ به اجرا درآمده بود، در سال ۲۰۱۲ پایان می‌یابد. پیمان تنها برای کشورهای صنعتی الزام‌آور است و آنها را متعهد می‌کند که تا سال ۲۰۱۲ نشر گازهای گل‌خانه‌ای خود را به ۲/۵٪ نشر سال ۱۹۹۰ برسانند. ولی پیمان کیوتو موفق نبوده است. هدف از اجلاس کپنهاگ، تنظیم و تصویب پیمانی جایگزین بود که شمار بیشتری از کشورها، از جمله آمریکا و چین، به اجرای آن مقید باشند. ولی اجلاس کپنهاگ هم به نتیجه رضایت‌بخش و الزام‌آوری نرسید.

بدینی نسبت به توفیق اجلاس دو هفته‌ای، در تنظیم سندی الزام‌آور برای همه طرف‌ها، صرفاً به هواداران محیط زیست محدود نمی‌شد. حتی میزبان کنفرانس، لالکه راسموسن، نخست‌وزیر دانمارک هم پیش‌بینی می‌کرد اجلاس تنها به تنظیم سندی حاوی دیدگاه‌ها و اهداف بسنده کند و وارد راه‌کارهای مشخص و تعهدآور نشود. و چنین هم شد. شانس نه چندان زیاد اجلاس کپنهاگ برای حصول یک توافق تاریخی، بیشتر به تفاوت دیدگاه‌ها و تضاد منافع کشورهای شرکت‌کننده برمی‌گشت. کشورها مایل بودند در مهار گرمایش زمین و پیشگیری از زیان‌های ناشی از آن هر چه کمتر زیر بار تعهد بروند. کشورهای جهان را، بسته به وجوه اشتراک و افتراق‌شان در تعیین و تنظیم اهداف اجلاس کپنهاگ، می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

گروه‌بندی سه‌گانه

گروه اول کشورهای صنعتی، شامل آمریکا، کانادا، روسیه، استرالیا و ۲۷ کشور عضو اتحادیه اروپا. این کشورها عمدتاً پیشرفت صنعتی و رفاه خود را در دو سده گذشته به دست آورده‌اند. مسئله محیط‌زیست در آن زمان‌ها چندان آشکار و حساسیت‌برانگیز نبود و قید و بندی برای آنها به وجود نیاورد. حال که کارشناسان مصرف انرژی‌های فسیلی در جهان صنعتی در دهه‌های گذشته را عامل اصلی تخریب جو زمین می‌دانند، از این کشورها انتظار می‌رفت متناسب با سهم خود در تصرف در اقلیم، نشر گازهای گل‌خانه‌ای خود را شدیداً کاهش دهند و در تأمین منابع مالی برای جبران زیان در کشورهای فقیر، نقش فعال به عهده بگیرند.

گروه دوم، کشورهایی هستند که اصطلاحاً با عنوان کشورهای در آستانه صنعتی شدن از آنها یاد می‌شود. چین، هند، کره جنوبی، برزیل و بعضی کشورهای صادرکننده نفت از جمله این کشورها هستند. چین در آلوده کردن جو از آمریکا هم پیش‌تر رفته است. سهم برخی دیگر از این کشورها در نشر گازهای گل‌خانه‌ای از برخی از کشورهای اروپایی، مانند بلغارستان و رومانی، نیز فزون‌تر است. کوشش مشترک این گروه جلوگیری از شانه‌خالی کردن کشورهای صنعتی از زیر بار مسئولیت تاریخی‌شان در ترمیم اقلیم زمین بود.

گروه سوم، فقیرترین کشورهای جهان، شماری از کشورهای آفریقایی و برخی از کشورهای جزیره‌ای را شامل می‌شود. تغییرات جوی از هم اکنون اثرات ویران‌کننده بر

زیست بوم‌های آنها می‌گذارد. این کشورها سهم اندکی در تولید گازهای گل‌خانه‌ای داشته‌اند، ولی بیش از دیگران در معرض آسیب‌های ناشی از تغییر اقلیم (سیل، خشک‌سالی، قحطی، گردباد، آب‌شدن یخچال‌های طبیعی، بالا آمدن آب دریاها، جابه‌جایی فصل‌های بارش) هستند. این کشورها، هم از کشورهای صنعتی و هم از کشورهای در حال توسعه، انتظار دارند در ساخت سدها و آبگیرها، آبیاری زمین‌های خشک و کمک به احیای جنگل‌ها، آنها را یاری دهند.

اختلاف در میان کشورهای صنعتی

در میان کشورهای صنعتی بر سر این که هر کدام به چه میزان از نشر گازهای گل‌خانه‌ای خود بکاهد اختلاف است. اینکه پیمان جدید بتواند تعهدات الزام‌آور برای کشورها ایجاد کند نیز مورد تردید است. شورای اقلیم سازمان ملل در تحقیقاتی که انجام داده به این نتیجه رسیده است که محدود کردن گرمایش زمین تا سطح خطرآفرین ۲ درجه و معکوس کردن این روند در دهه‌های آینده، مستلزم یک کاهش ۲۵ تا ۴۰ درصدی در نشر گازهای گل‌خانه‌ای تا سال ۲۰۲۰ است.

اتحادیه اروپا اصرار دارد، برای تعیین سهمیه کاهش نشر برای هر کشور، نشر گازهای گل‌خانه‌ای همان کشور در سال ۱۹۹۰ مبنا قرار گیرد و اجرای پیمان جدید هم برای همه الزام‌آور باشد. اتحادیه اروپا، جدا از عملکرد سایر کشورها قصد دارد گازهای گل‌خانه‌ای خود را تا سال ۲۰۲۰، به ۲۰٪ کمتر از نشر سال ۱۹۹۰ برساند و در صورتی که کشورهای دیگر تعهداتی مشابه به عهده بگیرند، این میزان را تا ۳۰٪ بالا برد.

ژاپن اعلام کرده است که تا سال ۲۰۲۰، نشر گل‌خانه‌ای خود را به ۲۵٪ پایین‌تر از نشر ۱۹۹۰ خواهد رساند. روسیه نیز هدفی مشابه هدف اتحادیه اروپا اعلام کرده است. ولی انجام چنین تعهدی از سوی مسکو، به معنای آن است که می‌تواند نشر گل‌خانه‌ای خود را افزایش دهد. چه از سال ۱۹۹۰ که اتحاد شوروی فرو پاشید، تولیدات صنعتی روسیه مسیر معکوس طی کرده است. بسیاری از صنایع این کشور از کار افتاده یا از دور خارج شده‌اند. این امر سبب شده که نشر گل‌خانه‌ای روسیه در دهه ۱۹۹۰ به طور ناخواسته بسیار کم باشد.

در میان کشورهای صنعتی سخت‌ترین مواضع را آمریکا، کانادا و استرالیا نمایندگی می‌کنند. آنها مایل نیستند در زمینه کاهش گازهای گل‌خانه‌ای، خود را به ارقام و قید

وبندهایی مانند پیمان کیوتو مقید کنند. نخست وزیر استرالیا عملاً با دست‌های خالی به کپنهاگ رفت، زیرا رقیب سیاسی محافظه‌کار او به طرح‌های او در زمینه کاهش گازهای گل‌خانه‌ای رأی نداده بود.

سخن آمریکا این بود که توان اتحادیه اروپا در کاهش شدید گازهای گل‌خانه‌ای خود از آنجا ناشی می‌شود که اتحادیه با به عضویت درآوردن کشورهای اروپای شرقی، فشار چندانی از بابت کاهش یاد شده متحمل نخواهد شد، زیرا اعضای جدید همان کشورهای هستند که قبلاً در اردوگاه شرق بودند و در پی فروپاشی این اردوگاه در ۱۹۹۰، تولیدات صنعتی و مصرف انرژی‌شان سیر قهقراپی پیدا کرده است. از این رو، اتحادیه اروپا می‌تواند نشر گازهای گل‌خانه‌ای در کشورهای صنعتی توان‌مند خود همچون آلمان و فرانسه و ... را تا حدودی با سهمیه این گازها در کشورهای اروپای شرقی طاق بزند. در مقابل، هواداران محیط‌زیست اروپا استدلال می‌کنند آمریکا، تلاش کشورهای اروپایی را، در استقبال از انرژی‌های نوشونده و کاهش هر چه بیشتر مصرف انرژی‌های فسیلی، نادیده می‌گیرد.

پیشنهاد ویژه چین

در این میان کشورهای در آستانه صنعتی شدن، چین، برزیل، کره جنوبی و هند، با ارائه آمار و ارقام در جهت توجیه نقطه‌نظرات خود، در صدد برآمده‌اند که بر فشار به کشورهای صنعتی جهت قبول تعهداتی مشابه آنچه که خود تعهد می‌کنند بیافزایند. چین تولیدکننده بیشترین گاز گل‌خانه‌ای در دنیاست و داوطلب شده است، با حفظ رشد اقتصادی کنونی خود، تا سال ۲۰۲۰ تولید گازهای گل‌خانه‌ای را در ازای هر یک دلار تولید ناخالص ملی، در مقایسه با سال ۲۰۰۵، به نصف کاهش دهد. کارشناسان، نظر ارائه شده از سوی چین را چندان دقیق و قابل اجرا نمی‌دانند.

کنفرانس کن‌کون، مکزیک، ۲۰۱۰

شانزدهمین کنفرانس کشورهای عضو کنوانسیون سازمان ملل برای تغییر اقلیم از ۲۹ نوامبر تا ۱۰ دسامبر ۲۰۱۰ در شهر کن‌کون مکزیک برگزار شد. این کنفرانس به اختصار به سی‌اوی‌۱۶^۱ شناخته شده است. در پی ناکامی کنفرانس ۲۰۰۹ کپنهاگ، انتظارات از

1. 16th Conference of the Parties (COP16)

کنفرانس کن‌کون زیاد نبود. بان‌کی مون پیشتر در اوت ۲۰۱۰ گفته بود شک دارد که کشورهای عضو بتوانند به یک توافق جهانی و جامع دست یابند. تصمیم‌های پایانی کنفرانس به شرح زیر بودند:

- یک صندوق/اقلیم سبز تأسیس شود و تا سال ۲۰۲۰ سالیانه یکصد میلیارد دلار به کشورهای فقیر برای سازگاری با اقلیم و کاهش آثار ناخواسته آن کمک کند. در مورد این که بودجه یکصد میلیارد دلار از کجا تامین شود توافقی به عمل نیامد.
- یک مرکز فناوری/اقلیم و شبکه/اقلیم به وجود آید.
- اظهار امیدواری شد پیمان کیوتو برای یک دوره دوم تمدید شود، ولی توافقی روی چگونگی تمدید انجام نگرفت.
- پذیرفته شد تغییر اقلیم یک مسئله تهدید فوری و برگشت‌ناپذیر برای جوامع انسانی و سیاره زمین است و ضروری است که همه کشورها توجه عاجل به آن داشته باشند.
- پذیرفته شد گرمایش زمین از نقطه نظر علمی درست است، و ارزیابی گزارش چهارم آی‌پی‌سی‌سی که گرمایش مشاهده شده زمین از نیمه سده بیستم به این سو را، به احتمال زیاد ناشی از افزایش گازهای گل‌خانه‌ای انسان‌پایه می‌داند، درست است.
- پذیرفته شد برای تثبیت دمای میانگین جهانی حداکثر تا ۲ درجه بالاتر از دمای جهانی آغاز عصر صنعتی ضرورت دارد که نشر گازهای گل‌خانه‌ای شدیداً کاهش یابد و ضروری است که طرحی نو برای ایجاد جامعه کم‌کربن ریخته شود.
- همچنین از کشورهای توسعه یافته خواسته شد که به کاهش نشر گازهای گل‌خانه‌ای خود برابر آنچه در موافقت‌نامه کپنهاگ توافق کرده‌اند وفادار بمانند. از کشورهای در حال توسعه خواسته شد که برنامه‌ای برای کاهش نشر گاز گل‌خانه‌ای خود را تنظیم و اجرا کنند.

مرجع‌ها:

- www.unfccc.int/2860.php
- www.dw-world.de/dw/article
- خبرنامه اقلیم، شماره ۶۱، بهار ۱۳۸۸، اقلیم‌شناسی ملی مرکز
- 2010 United Nations Climate Change Conference, Wikipedia

پیوست ج

سناریوهای نشر گازهای گلخانه‌ای

تدوین این سناریوها از آی‌پی‌سی‌سی است. نام انگلیسی و مخفف آن در پانویست آمده است. در این نوشته به آنها با مخفف سرس اشاره خواهد شد.

برای مدل‌سازی و پیش‌نگری اقلیم در دهه‌ها و سده‌های آینده لازم است تصویری، ولو کلی و مبهم، از میزان نشر گازهای گلخانه‌ای توسط انسان‌های آینده در دست باشد. داشتن چنین تصویری خود مستلزم فرض‌هایی است که انسان دهه‌های آینده چگونه زندگی خواهد کرد. میزان سواد و بهداشت و امنیت غذا و آب در جوامع مختلف چه خواهد بود، فناوری‌های آینده چه ارمغان‌های پیش‌بینی شده یا نشده‌ای خواهند آورد، جوامع مختلف و دولت‌ها چگونه با هم کنار خواهند آمد، بر سر چه مسائلی توافق خواهند کرد یا قادر به توافق خواهند بود. پرسش‌های یاد شده مشتی نمونه از خروارند. هر فرضی در مورد هر یک از نیامده‌های آینده با هاله‌ای از ناشناختگی پوشیده است. در عین حال برای مدل‌سازی اقلیم‌های آینده گریزی از ترسیم رفتار جوامع آینده نیست. با اذعان به عدم

1. Special Reports on Emission Senarios (SRES)

دقت در هر نوع قضاوتی که در مورد آنچه در آینده اتفاق خواهد افتاد، صاحبان‌نظر کوشیده‌اند در چارچوب فعالیت‌ها و مسئولیت‌های آی‌پی‌سی‌سی، سناریوهای مختلفی برای نشر گازهای گلخانه‌ای توسط انسان آینده ترسیم کنند و راهی برای مدل‌سازی اقلیم‌های آینده در پیش پا بگذارند. در زیر به نمونه‌های عمده این سناریوها اشاره می‌شود.

سناریوی A۱: دنیای آینده‌ای را تجسم می‌کند که رشد اقتصادی سریع داشته باشد، جمعیت در نیمه سده ۲۱ به بیشینه خود برسد و از آن پس کم شود. فناوری‌های جدیدتر و کارآتر هر چه زودتر ظاهر شوند و مورد استفاده همگان قرار گیرند. تحقق سناریوی A۱ در گرو همکاری‌های منطقه‌ای و بین‌المللی، کاهش قابل توجه در اختلاف درآمدها، و تحقق میزانی از عدالت اجتماعی و جهانی است. خانواده سناریوی A۱ بسته به نوع تاکید در فناوری‌های آینده و منابع تامین انرژی به سه شاخه تقسیم می‌شود:

- ♦ شاخه A۱F۱، متکی به سوخت‌های فسیلی
- ♦ شاخه A۱T، متکی به منابع انرژی غیرفسیلی
- ♦ شاخه A۱B، متکی به هر دو نوع انرژی فسیلی و غیرفسیلی با حفظ تعادل.

سناریوی A۲: دنیای آینده ناهمگنی تجسم می‌کند که مشخصه بارز آن حفظ ارزش‌های اجتماعی و فرهنگی، خودکفایی و حفظ هویت اقوام است. در این سناریو جمعیت همیشه در افزایش است. رشد اقتصادی عمدتاً رویکرد منطقه‌ای (در مقابله با رویکرد جهانی) دارد. رشد درآمد فردی و تغییر در فناوری‌ها کندتر و پراکنده‌تر از سناریوهای دیگر است.

سناریوی B۱: دنیای آینده‌ای ترسیم می‌کند که در آن جوامع به هم نزدیک شوند. مانند سناریوی A۱، جمعیت در نیمه سده ۲۱ به بیشینه خود برسد و از آن پس کاهش یابد. ساختار اقتصادی جوامع به سرعت تغییر کند و به سمت اقتصاد متکی به اطلاعات و خدمات برود. فناوری کم‌ماده و کارآ و پاک باشد. سناریوی B۱ بر راه‌حل‌های جهانی برای اقتصاد و پایداری محیط‌زیست که شامل عدالت اجتماعی نیز باشد تاکید می‌گذارد.

سناریوی B۲: دنیای آینده‌ای ترسیم می‌کند که در آن تاکید بر راه‌حل‌های محلی برای

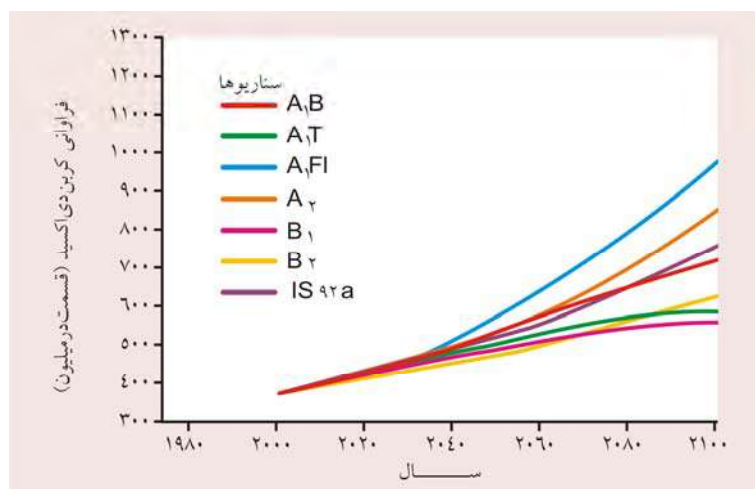
اقتصاد و پایداری اجتماع و محیط‌زیست است. دنیایی است که جمعیت‌اش همیشه زیاد می‌شود، ولی با آهنگی کمتر از سناریوی A۲. توسعه اقتصادی‌اش سرعت کمتری دارد. تحول فناوری‌های متنوع‌تر از سناریوهای B۱ و A۱ است. در عین حال که از محیط‌زیست و عدالت اجتماعی حمایت می‌کند راه‌حل‌های محلی و منطقه‌ای هستند.

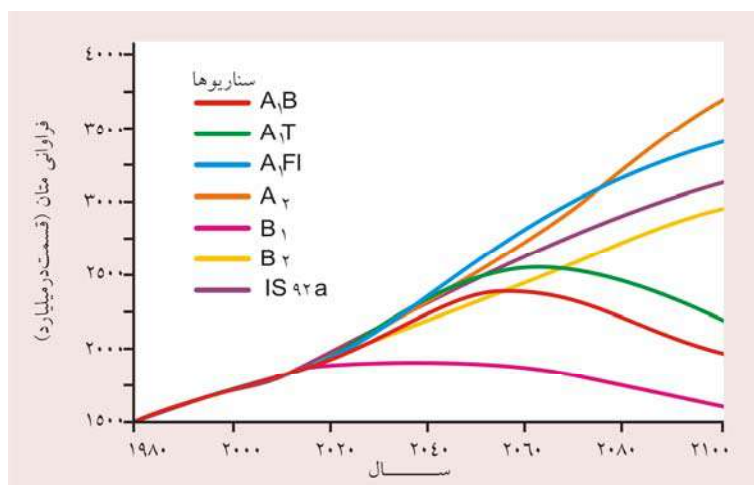
سناریوهای یاد شده نمونه‌ای از ۳۵ سناریوی نشر سرس هستند. توضیح کامل آنها در گزارش چهارم آی‌پی‌سی‌سی آمده است. هیچ کدام از سناریوها ملزم به بکار بستن توصیه‌های کنوانسیون چارچوب سازمان ملل برای تغییرات اقلیم یا الزامات پروتکل کیوتو و غیره نیستند.

انباشت گازهای گلخانه‌ای در جو در سناریوهای مختلف، متفاوت است. در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ همین پیوست، گازهای کربن‌دی‌اکسید، متان، و نیتروژن‌اکسید در طول سده بیست‌ویکم، برای شش سناریو مدل‌سازی شده است. متناسب با این انباشت، تغییرات دمای زمین، بالا آمدن سطح دریاها، میزان آب شدن یخ‌های قطبی، افزایش و کاهش بارندگی‌ها و تغییر در الگوهای بارندگی نیز مدل‌سازی و پیش‌نگری شده‌اند. در بیشتر سناریوها، فراوانی گازهای گلخانه‌ای در طول بیست سال اول سده بیست‌ویکم افزایش می‌یابد. پیش‌نگری افزایش دمای میانگین سطح زمین و بالا آمدن تراز دریاها در شش سناریوی نشر سرس در جدول زیر آمده است. در ستون اول نام سناریوی نشر، در ستون دوم بهترین برآورد افزایش دما در پایان سده ۲۱، در ستون سوم بازه محتمل دما، و در ستون چهارم بازه افزایش سطح دریاها آمده است. به عنوان مثال در سناریوی B۱، با بهترین برآورد، زمین در پایان سده بیست‌ویکم ۱/۸ درجه گرم‌تر خواهد شد. احتمال دارد این گرم شدن بین ۱/۱ تا ۲/۹ درجه هم باشد. افزایش سطح دریاها محتملاً بین ۱۸ تا ۳۸ سانتی‌متر خواهد بود. سال مبنا ۱۷۵۰ است. داده‌های سال ۲۰۰۰ (سطر اول جدول نیز) برای مقایسه آورده شده است. شدیدترین تغییر اقلیم در پایان سده بیست‌ویکم برای سناریوی A۱F۱ ترسیم شده است.

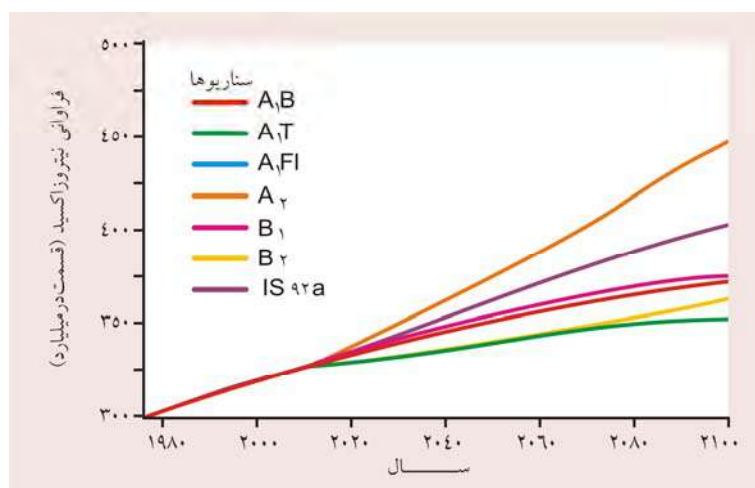
جدول ۱. پیش‌نگری افزایش میانگین دمای سطح زمین و تراز دریاها تا پایان سده ۲۱ نسبت به سال ۱۷۵۰ در شش سناریوی نشر سرس. پیش‌نگری‌ها از تعداد زیادی مدل‌های ساده و بعضاً پیچیده اقلیم بدست آمده‌اند. داده‌های سال ۲۰۰۰ برای مقایسه آورده شده است. برگرفته از گزارش چهارم آی‌پی‌سی‌سی.

سناریو	تغییرات دما (سانتی‌گراد)	بالا آمدگی سطح دریا (متر)
سال ۲۰۰۰	بهترین برآورد	بازه احتمالی
	۰٫۶	بازه احتمالی
B _۱	۱٫۸	۰٫۳ - ۰٫۹
A _۱ T	۲٫۴	۰٫۱۸ - ۰٫۳۸
B _۲	۲٫۴	۰٫۲۰ - ۰٫۴۵
A _۱ B	۲٫۸	۰٫۲۰ - ۰٫۴۳
A _۲	۳٫۴	۰٫۲۱ - ۰٫۴۸
A _۱ F _۱	۴	۰٫۲۳ - ۰٫۵۱
		۰٫۲۶ - ۰٫۵۹





شکل ۲. انباشت گاز متان در جو زمین تا سال ۲۱۰۰ در شش سناریوی سرس.



شکل ۳. انباشت گاز نیتروژن اکسید در جو زمین تا سال ۲۱۰۰ در شش سناریوی سرس.

مرجع‌ها:

شکل‌های ۱ تا ۳ از گزارش چهارم آی‌پی‌سی‌سی گرفته شده است.

IPCC, Climate Change 2007, The Physical Science Basis, Cambridge University Press

پیوست د

منتقدان گرمایش انسان پایه زمین

- مبلغان گرمایش زمین، و این که تغییر اقلیم به خاطر دست کاری بزرگ مقیاس انسان در کره زمین رخ می دهد، بلامنازع نیستند. از ابتدای طرح مسئله در پایان دهه ۱۹۸۰ تا به امروز، کم نبوده اند افراد متعارف یا صاحب نظری که یافته های عینی و مشاهداتی را طور دیگری تفسیر کرده اند، تغییر اقلیم را یک امر طبیعی دانسته اند، و نقشی برای انسان در آن نیافته اند. بیشتر انتقادات متوجه آی پی سی سی و به خصوص گزارش دوم و سوم آن در سال های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۵ است. نظرات صاحب نظران منتقد را می توان به شرح زیر احصا کرد:
- اقلیم زمین از گذشته های دور دوران های گرم و سرد زیاد به خود دیده است. اقلیم کنونی می تواند یک روند طبیعی شناخته شود.
 - نمودار فراوانی مشاهده شده کربن دی اکسید از گذشته های دور با نمودار دمای همان زمان ها همخوانی ندارند، بنابراین کربن دی اکسید نمی تواند عامل گرم کننده اقلیم باشد.
 - به نقش خورشید در تغییر و تحول اقلیم به اندازه کافی بها داده نشده است.
 - کوچک و بزرگ شدن کلاهک یخی جنوبگان که ناسا از فضا عکس برداری و منتشر

- کرده است، خارج از روال طبیعی به نظر نمی‌رسد.
- اقلیم سامانه پیچیده‌ای است و عوامل فراوانی در به وجود آوردن آن دخیل هستند. در مدل‌های پیش‌نگری اقلیم با تغییر هر یک از این عوامل می‌توان هر پاسخ مورد نظر را از آن گرفت. بنابراین مدل‌های اقلیم قابل اعتماد نیستند.
 - در این که زمین گرم می‌شود و در این که میزان کربن‌دی‌اکسید در جو افزوده شده و در حال افزایش است اتفاق نظر نسبی بین متخصصین امر وجود دارد. اختلاف نظر بیشتر در دخالت داشتن یا نداشتن کربن‌دی‌اکسید در گرمایش زمین است.
 - اندازه‌گیری‌های سال ۲۰۰۵ ناسا نشان می‌دهند کلاهک کربن‌دی‌اکسید یخ‌زده قطب جنوب مریخ سه سال متوالی است کوچک می‌شود. این رخداد نشان از گرم شدن مریخ دارد. عامل گرمایش هم‌زمان زمین و مریخ باید در خارج از هر دو سیاره و در خورشید جسته شود، و به فعالیت‌های انسان در روی زمین مربوط نباشد.
 - در جواب ایراد بالا گفته شده است که در روی زمین با وجود انبوهی از مشاهدات هنوز در بین صاحب‌نظران درباره میزان و علت گرمایش زمین اختلاف نظر وجود دارد. چگونه می‌توان با یک گزارش ناسا از مریخ از گرم شدن آن مطمئن شد و علت را در بیرون از مریخ جست.
- در لابه‌لای انتقادات، نظراتی که موضوع را سیاسی بدانند و در تبلیغ آن ائتلاف نظام سرمایه‌داری راست و حامیان محیط‌زیست چپ را ببینند نیز مشاهده می‌شود. خواننده علاقمند می‌تواند به دی‌وی‌دی زیر مراجعه کند:

The Great Global Warming Swindle, WagTV 2007 www.

Mnraentertainment.com

در این فیلم گفته می‌شود در سال‌های ۱۹۸۰، نخست‌وزیر وقت انگلستان بازار انرژی-های فسیلی را بی‌ثبات می‌دید و علاقمند به گسترش نیروگاه‌های هسته‌ای بود. موضوع گرم شدن زمین، به خاطر نشر کربن‌دی‌اکسید، را بهانه گرفت. حامیان محیط‌زیست هم که علی‌الاصول طالب حفظ کره زمین در وضع موجودش هستند، دانسته یا نادانسته از این تز حمایت کردند و موضوع گرمایش زمین در اثر افزایش کربن‌دی‌اکسید به یک موضوع سیاسی تبدیل شد.

در فیلم یاد شده با بیش از ده تن دانشمند و صاحب‌نظر در مباحث اقلیم‌شناسی،

هواشناسی، زمین‌شناسی، محیط‌زیست و غیره مصاحبه شده است. سوال و جواب‌ها با توجه به محدود بودن زمان فیلم کوتاه و گذراست. بیشتر اظهارنظرها در مورد عدم دخالت کربن‌دی‌اکسید در گرمایش زمین است. در تمام فیلم از هیچ موافقی نظر خواسته نشده است. پاسخ فیلم یاد شده را شاید بتوان در گزارش شورای بین‌آکادمی که از طرف سازمان ملل و آی‌پی‌سی‌سی مامور نقدِ نتایج و روش تهیه گزارش چهارم آی‌پی‌سی‌سی شده بود یافت. این نقد به اختصار در پیوست الف آمده است. گزارش شورای بین‌آکادمی تصریح می‌کند که نتایج علمی مندرج در گزارش چهارم معتبر و قابل استناد است، ولی آی‌پی‌سی‌سی در ساختار و نحوه جمع‌آوری و خلاصه کردن اطلاعات کمبودهایی داشته است. مطالب این پیوست عمدتاً از منابع الکترونیکی زیر گردآوری شده است:

- <http://news.nationalgeographic.com/news/2007/02/070228-mars-warming.html>
- <http://www.spaceref.com/news/viewsr.html?pid=29320>
- <http://www.skepticalscience.com/global-warming-on-mars.htm>
- <http://www.nasa.gov/centers/ames/research/2007/marswarming.html>
- <http://edmall.gsfc.nasa.gov/inv99Project.Site/Pages/science-briefs/ed-stickler/ed-irradiance.html>
- <http://www.sciencedaily.com/releases/2003/03/030321075236.htm>
- <http://www.spaceref.com/news/viewsr.html?pid=29320>
- <http://wattsupwiththat.com/2010/12/22/sorces-solar-spectral-surprise-uv-declined-tsi-constant/>

تعریف بعضی از واژه‌های علمی

AOGCM: یکی از مدل‌های اقلیمی معروف است. این مدل می‌تواند با اطمینان بیش از ۸۰٪، نداشت کمی از اقلیم آینده بدست دهد.

آب‌کره: اقیانوس‌ها، دریاها، چشمه‌ها، روان‌آب‌ها، و آب‌های زیرزمینی را شامل می‌شود. آب‌کره از مولفه‌های اصلی اقلیم است و برای بررسی تغییر اقلیم لازم است رفتار و خواص بخش‌های مختلف آن شناخته شود.

اقلیم: به میانگین شرایط آب‌وهوایی یک منطقه در فاصله‌های زمانی طولانی گفته می‌شود. **انبساط گرمایی:** حجم اجسام بر اثر گرم شدن زیاد می‌شود. این پدیده را انبساط گرمایی می‌گویند. میران انبساط گرمایی در اجسام مختلف متفاوت است. به عنوان یک قاعده، میزان انبساط گازها بیشتر از مایعات و انبساط مایعات بیشتر از جامدات است.

بادهای تجاری: به بادهای منظم استوایی گفته می‌شود. از دیرباز برای ملاحان کشتی‌های تجاری شناخته شده بوده‌اند. در محدوده بادهای تجاری جریان‌های اقیانوسی هم با آنها هم‌سو است.

بازخورد: عامل A سبب تشدید یا تضعیف عمل عامل B می‌شود. تاثیر متقابل B روی A را بازخورد از B روی A می‌گویند. اگر بازخورد از B به A اثر A را تشدید کند، بازخورد را مثبت می‌گویند. اگر تضعیف کند بازخورد را منفی می‌گویند.

پلیستوسن: اولین دور از دوره کواترنری است و ۲ میلیون تا ۱۰ هزار سال پیش را شامل می‌شود. پلیستوسن عموماً دور یخبندان‌ها و میان‌یخبندان‌هاست که در فواصل زمانی نسبتاً منظم (از مرتبه ۱۲۰ - ۱۰۰ هزار سال) ظاهر شده و از بین رفته‌اند.

پوش کره: یک لایه گرم است. از گشت‌مرز شروع می‌شود و تا ارتفاع ۵۱ کیلومتری ادامه دارد.

پوش‌مرز: مرز بین پوش کره و میان‌کره است.

پیدازیستی: ۵۷۰ میلیون سال بعد از پیش‌کامبرین، پیدازیستی نام دارد.

پیش‌کامبرین: ۴/۳ میلیارد سال اول از تاریخچه زمین را پیش‌کامبرین می‌نامند.

تعادل گرمایی: در تعادل گرمایی دما در تمام قسمت‌های یک سیستم یکسان است. دو جسم در مجاورت هم اگر بتوانند انرژی مبادله کنند و هر دو به یک دما برسند، با همدیگر به تعادل گرمایی رسیده‌اند.

ثابت خورشیدی: به انرژی تابشی خورشید بر یک مترمربع، در تمام طول‌موج‌ها، در بالای جو زمین گفته می‌شود. ثابت خورشیدی هم اکنون ۱۳۶۸ وات بر مترمربع است.

حساسیت اقلیم: بنا به تعریف عبارت است از افزایش دمای میانگین زمین در ازای دو برابر شدن کربن‌دی‌اکسید جو.

حساسیت گذرا: بنا به تعریف میزان افزایش دمای میانگین زمین در ازای دو برابر شدن لحظه‌ای کربن‌دی‌اکسید جو است.

حساسیت میانگین: افزایش دمای میانگین زمین در ازای دو برابر شدن کربن‌دی‌اکسید در یک بازه زمانی معین است.

خورتاب: به تابش خورشید پس از عبور از جو و رسیدن به جو زمین گفته شده است. خورتاب به عرض جغرافیایی و به زمان بستگی دارد. زمانی که خورشید عمود بر منطقه‌ای بتابد میزان خورتاب بیشینه است و در سایر مناطق با کاهش ارتفاع خورشید میزان خورتاب کم می‌شود.

دیرینه‌زیستی: اولین دورانِ پیدازیستی است و ۵۷۰ تا ۲۲۵ میلیون سال پیش را شامل می‌شود.

راندگی اقلیم: بنا به تعریف عبارت است از تغییر دمای میانگین در بازه‌های زمانی یک‌صد ساله.

زور تابشی: هر عامل گرم‌کننده یا خنک‌کننده اقلیم با تابش گرمای معادلی که همان اثر را داشته باشد، شناخته می‌شود. این تابش معادل را زور تابشی آن عامل می‌نامند. زور تابشی با واحد وات بر متر مربع سنجیده می‌شود.

زیست‌کره: مولفه‌ای از اقلیم است که در آن زندگی وجود دارد و شامل همه زیست‌بوم‌ها، اعم از دریایی و زمینی، و اعم از گیاهی، حیوانی، و انسانی است. از قطب‌ها تا استوا، و از اعماق اقیانوس‌ها تا بلندهای کوه‌ها، هر بخش از کره زمین نوعی از حیات را میزبانی می‌کند.

سپیدایی: هر جسم مقداری از تابش‌های نوری و گرمایی را که به آن می‌تابند، جذب و مقداری را باز می‌گردانند. تابشی که از جسم باز می‌گردد ممکن است بازتاب آینه‌وار یا پراکنده باشد. درصد تابشی را که یک جسم باز می‌گرداند سپیدایی آن جسم می‌نامند.

سرماکره: برف و یخ یخچال‌های کوهستانی و قطب‌ها و زمین‌های یخ‌زده را شامل می‌شود. سرماکره برگردش انرژی و رطوبت در جو و سطح زمین اثر می‌گذارد و با نظام بارش‌ها و جریان‌های اقیانوسی اندرکنش دارد.

سنگ‌کره: لایه سطحی زمین، به ضخامت تقریبی ۱۰۰ کیلومتر که پوسته‌های اقیانوسی و قاره‌ای را در بر می‌گیرد.

ظرفیت گرمایی: ظرفیت گرمایی ویژه یک ماده، مقدار گرمایی است که یک گرم از آن ماده را یک درجه سانتی‌گراد گرم کند.

کواترنری: آخرین دوره زمین‌شناسی، کواترنری نامیده می‌شود، و ۲ میلیون سال از تاریخ اخیر زمین را در بر می‌گیرد. انقراض گروه بزرگی از پستانداران و شمار زیادی از گونه‌های پرندگان در این دوره رخ داده است.

گرماکره: لایه بالاتر از میان کره که دما در آن با افزایش ارتفاع با آهنگ تقریبی ۴/۵ درجه سانتی گراد در هر ۱۰ کیلومتر افزایش می یابد.

گرمای نهان: گرمایی است که یک گرم ماده به هنگام تبدیل از حالتی به حالت دیگر از دست می دهد و یا جذب می کند.

گشت کره: از سطح زمین آغاز می شود و تا ارتفاع تقریبی ۷ کیلومتر در قطب ها و ۱۷ کیلومتر در استوا ادامه می یابد.

گشت مرز: مرز بین گشت کره و پوش کره است.

لکه های خورشیدی: لکه های نسبتاً تاریکی که به تناوب در روی قرص خورشید ظاهر می شوند و از بین می روند. دمای لکه ها کمتر از دمای میانگین سطح خورشید است. لکه ها با تناوب تقریباً یازده ساله کم و زیاد می شوند. و همراه با طوفان های مغناطیسی در خورشید ظاهر می شوند. به هنگام ظهور لکه ها، ثابت خورشیدی اندکی زیاد می شود.

مدل های اقلیمی: مجموعه محاسبات مبتنی بر قواعد فیزیک، شیمی، و ... که بتواند اقلیم های گذشته را بازتولید و اقلیم های آینده را ترسیم کند.

میان زیستی: دومین دوران پیدازیستی است و ۲۲۵ تا ۶۵ میلیون سال پیش را شامل می شود.

میان کره: در بالای لایه گرم و حاوی ازن پوش کره قرار دارد.

میان مرز: مرز بالایی میان کره است.

نشانگر میانجی: به نشانه های بازمانده از زمان های پیشین گفته می شود که نشانی از دما، رطوبت یا مشخصه دیگری از اقلیم گذشته را در خود داشته است. کلاهک های یخی قطب ها، حلقه های درختان، رسوبات دریاچه ها، پس روی و پیش روی یخچال های طبیعی، پخش گرده گیاهان، ایزوتوپ های اکسیژن و هیدروژن و کربن، هوای محبوس در یخ های قطبی و لجن های دریایی از نشانگرهای میانجی شناخته شده هستند.

نوزیستی: سومین دوران پیدازیستی است و ۶۵ میلیون سال اخیر را شامل می شود.

هواکره (جو): لایه‌ای از گازهاست که زمین را در بر می‌گیرد و توسط نیروی گرانش زمین نگاه داشته می‌شود. هواکره شامل لایه‌های مختلفی مانند، گشت کره، پوش کره، میان کره و گرماکره است.

هولوسن: دومین دور از دوره کواترنری است و ۱۰ هزار سال اخیر را شامل می‌شود. اقلیم هولوسن نسبت به پلیستوسن نسبتاً گرم است.

فهرست قاب‌ها

شماره قاب	عنوان قاب	صفحه
۲ - ۱	نیروی کوریولیس	۴۷
۳ - ۱	بازخورد	۵۲
۳ - ۲	سپیدایی (آلبیدو)	۵۳
۳ - ۳	زور تابشی عوامل گرم‌کننده و سردکننده اقلیم	۵۸
۳ - ۴	تابش جسم سیاه	۵۹
۳ - ۵	اثر گل‌خانه‌ای در جو بهرام و ناهید	۶۶
۳ - ۶	مشخصات طیف نثری و جذبی خورشید و جو زمین	۶۷
۵ - ۱	مشخصه‌های شیمیایی و فیزیکی آب	۷۸
۶ - ۱	تأثیر فوران‌های آتشفشانی بر فرینه‌های دمای	۱۰۰
۶ - ۲	بازسازی اقلیم دیرینه با استفاده از داده‌های ایزوتوپی اکسیژن	۱۰۷
۶ - ۳	توضیح شکل ۱۲ - ۶	۱۱۶
۸ - ۱	شبیه‌سازی حرکت تریتم در اقیانوس اطلس	۱۴۹
۹ - ۱	فتوستنز	۱۶۶
۹ - ۲	اتانول، نمونه یک زیست‌سوخت مایع	۱۶۸
۹ - ۳	آب گرم‌کن خورشیدی	۱۷۱
۹ - ۴	سلول خورشیدی فتوولتایک	۱۷۴

واژه‌نامه فارسی به انگلیسی

Carbon storage	انبارش کربن	groundwater	آب زیرزمینی
adiabatic expansion	انبساط بی‌دررو	hydrosphere	آب‌کره
	انحراف محور زمین	volcano	آتشفشان
Earth axis, deviation of		Aragonite	آراگونیت
energy, wind	انرژی، باد	pollutant	آلاینده
geothermal	زمین‌گرمایی	noctilucent cloud	ابر شب‌تاب
fossil	فسیلی	layered cloud	ابر لایه‌ای
new	نو	convective cloud	ابر هم‌رفتی
renewable	نوشونده	Ethanol	اتانول
nuclear	هسته‌ای	greenhouse effect	اثر گل‌خانه‌ای
ENSO	انسو		اثر گل‌خانه‌ای مهارنشده
green revolution	انقلاب سبز	runaway greenhouse effect	
trade winds	بادهای تجاری	amino acid	اسید آمینه
acid rain	باران اسیدی	acidity	اسیدیته
monsoon	باران موسمی	spring equinox	اعتدال بهاری
percipitation	بارش	autumnal equinox	اعتدال پاییزی
feedback	بازخورد	climate	اقلیم
	باکتری‌های شوره‌زدا	climatology	اقلیم‌شناسی
denitrifying bacteria		paleoclimate	اقلیم دیرینه

solar constant	ثابت خورشیدی	vapour	بخار آب
tide	جزر و مد	Carbon capture	بدام‌اندازی
blackbody	جسم سیاه	hydropower	برق‌آبی
reforestation	جنگل‌ترمیمی	desertification	بیابان‌زایی
aforestation	جنگل‌زایی	parameterization	پارامتری کردن
deforestation	جنگل‌زدایی	Scattering, dispersion	پراکندگی
	جنوبگان (قطب جنوب)	Pleistocene	پلیستوسن
Antarctica (South Pole)		oceanic crust	پوسته اقیانوسی
nuclear fussion	جوش هسته‌ای	continental crust	پوسته قاره‌ای
borehole	چاهک نمونه‌برداری	stratosphere	پوش کره
water cycle	چرخه آب	stratopause	پوش مرز
Carbon cycle	چرخه کربن	Phanerozoic	پیدازیستی
Nitrogen cycle	چرخه نیتروژن	Precambrian	پیش‌کامبرین
viscosity	چسبندگی	projection	پیش‌نگری
transient sensitivity	حساسیت گذرا	hydrogen cell	پیل هیدروژنی
	حساسیت میانگین	radiation	تابش
average sensitivity		vapourization	تبخیر
eccentricity	خروج از مرکز	stabilization	تثبیت
drought	خشک‌سالی	sea level	تراز دریا
epeirogeny	خشکی‌زایی	Compound, Sulfur	ترکیب گوگردی
insolation	خورتاب		ترکیب نیتروژن‌دار
aphelion	خورشید، اوج	Compound, Nitrogen	
perihelion	خورشید،	Thermocline	ترموکلاین
zodiacal circle	دایره البروج	Thermohaline	ترموهالین
Deuterium	دوتریم	Tritium	تریتیم
smoke	دود	cloud formation	تشکیل ابرها
Palaeozoic	دیرینه‌زیستی		تعادل هیدرواستاتیک
paleontology	دیرینه‌شناسی	hydrostatic equilibrium	
coal	زغال‌سنگ		تقدیم اعتدالین
Beech	راش	precession of the equinoxes	

Calcite	کلسیت	climate drift	راندگی اقلیم
Quaternary	کواترنری	drift	رانش
marsh gas	گاز مرداب	runoff water	روان آب
viscosity	گران روی	permafrost	زمین یخ‌زده
thermosphere	گرماکره	radiative forcing	زور تابشی
latent heat	گرمای نهان	ecosystem	زیست‌بوم
global warming	گرمایش زمین	biomass	زیست‌توده
troposphere	گشت‌کره	photovoltaic cell	سلول فتوولتاییک
tropopause	گشت‌مرز	lithosphere	سنگ‌کره
Gulf Stream	گلف استریم		سوگیری سیستماتیک
mixed layer	لایه آمیخته	systematic bias	
sunspot	لکه خورشیدی	simulation	شبیه‌سازی
methane hydrates	متان هیدراته		شمالگان (قطب شمال)
coral	مرجان	Arctic (north pole)	
wind farm	مزرعه باد	salinity	شوری
continuity equation	معادله پیوستگی	spruce	صنوبر
equation of state	معادله حالت	radiation spectrum	طیف تابشی
	معاهده‌های بین‌المللی	absorption spectrum	طیف جذبی
International treaties		ultraviolet	فرابنفش
coring	مغزه‌برداری	terrestrial infrared	فروسرخ زمینی
ice cores	مغزه‌های یخی		فرینه (بیشینه و کمینه)
Solar system	منظومه شمسی	extreme (maximum & minimum)	
Mesozoic	میان‌زیستی	saturation pressure	فشار اشباع
mesosphere	میان‌کره	barometric pressure	فشار هوا
proxy	نشانگر میانجی	plateau	فلات
Cenozoic	نوزیستی	technology	فناوری
Nitrate	نیتрат	land use	کاربری زمین
weathering	هوازدگی	mitigation	کاهش اثر
atmosphere	هواکره	opacity	کدورت
aerosol	هواویزها	ice cap	کلاهک یخی

ice age	یخبندان، عصر	methane hydrate	هیدرات‌متان
glacier	یخچال	Hydrocarbons	هیدروکربن
		Holocene	هولوسن

واژه‌نامه انگلیسی به فارسی

absorption spectrum	طیف جذبی	biofuel	زیست‌سوخت
acid rain	باران اسیدی	Biomass	زیست‌توده
acidity	اسیدیته	biosphere	زیست‌کره
adaptation	سازگاری	blackbody	جسم سیاه
adiabatic expansion	انبساط بی‌دررو	borehole	چاهک نمونه‌برداری
aerosol	هواویزها	Calcite	کلسیت
afforestation	جنگل‌زایی	Carbon capture	بدام‌اندازی کربن
albedo	سپیدایی	Carbon cycle	چرخه کربن
amino acid	اسید آمینه	Carbon storage	انبارش کربن
	Antarctica (South Pole)	Cenozoic	نوزیستی
	جنوبگان (قطب جنوب)	climate	اقلیم
aphelion	خورشید، اوج	climate drift	رانندگی اقلیم
Aragonite	آراگونیت	climatology	اقلیم‌شناسی
Arctic	شمالگان	cloud formation	تشکیل ابرها
atmosphere	هواکره	coal	زغال‌سنگ
autumnal equinox	اعتدال پاییزی	compound, Nitrogen	ترکیب نیتروژن‌دار
average sensitivity	حساسیت میانگین	compound, Sulfur	ترکیب گوگردی
barometric pressure	فشار هوا	continental crust	پوسته قاره‌ای
Beech	راش	continuity equation	معادله پیوستگی

convective cloud	ابر هم‌رفتی	groundwater	آب زیرزمینی
coral	مرجان	Gulf Stream	گلف استریم
coring	مغزه‌برداری	Holocene	هولوسن
cryosphere	سرماکره	Hydrocarbons	هیدروکربن
deforestation	جنگل‌زدایی	hydrogen cell	پیل هیدروژنی
denitrifying bacteria	باکتری‌های شوره‌زدا	hydropower	برق‌آبی
		hydrosphere	آب‌کره
desertification	بیابان‌زایی	hydrostatic equilibrium	تعادل هیدروستاتیک
Deuterium	دوتریم		
drift	رائش	ice age	یخبندان، عصر
drought	خشک‌سالی	ice cap	کلاهک یخی
Earth axis, deviation of		ice cores	مغزه‌های یخی
	انحراف محور زمین	insolation	خورتاب
eccentricity	خروج از مرکز	International treaties	معاهده‌های بین‌المللی
ecosystem	زیست‌بوم		
El nino	ال‌نینو	land use	کاربری زمین
electromagnetism	الکترومغناطیس	latent heat	گرمای نهان
ENSO	انسو	layered cloud	ابر لایه‌ای
epeirogeny	خشکی‌زایی	lithosphere	سنگ‌کره
equation of state	معادلهٔ حالت	marsh gas	گاز مرداب (متان)
Ethanol	اتانول	mesosphere	میان‌کره
extreme	فرینه	Mesozoic	میان‌زیستی
feedback	بازخورد	methane hydrate	هیدرات‌متان
fossil energy	انرژی فسیلی	mitigation	کاهش اثر
geothermal energy	انرژی زمین‌گرمایی	mixed layer	لایهٔ آمیخته
		monsoon	باران موسمی
glacier	یخبچال	new energy	انرژی نو
global warming	گرمایش زمین	Nitrate	نترات
green revolution	انقلاب سبز	Nitrogen cycle	چرخه نیتروژن
greenhouse effect	اثر گل‌خانه‌ای	nitryfying bacteria	باکتری‌های شوره-

noctilucous cloud	ابر شب تاب	runaway greenhouse effect	اثر گل‌خانه‌ای مهارنشدنی
nuclear energy	انرژی هسته‌ای	runoff water	روان آب
nuclear fusion	جوش هسته‌ای	salinity	شوری
oceanic crust	پوسته اقیانوسی	saturation pressure	فشار اشباع
opacity	کدورت	Scattering, dispersion	پراکندگی
Orogeny	کوه‌زایی	sea level	تراز دریا
oxidation	اکسایش	simulation	شبیه‌سازی
Palaeozoic	دیرینه‌زیستی	smoke	دود
paleoclimate	اقلیم‌های دیرینه	solar constant	ثابت
paleontology	دیرینه‌شناسی	Solar system	منظومه شمسی
parameterization	پارامتری کردن	spring equinox	اعتدال بهاری
precipitation	بارش	spruce	صنوبر
perihelion	خورشید،	stabilization	تثبیت
permafrost	زمین یخ‌زده	stratopause	پوش‌مرز
Phanerozoic	پیدازیستی	stratosphere	پوش‌کره
photovoltaic cell	سلول	sunspot	لکه خورشیدی
Pine	کاج	systematic bias	سوگیری سیستماتیک
plateau	فلات	technology	فناوری
Pleistocene	پلیستوسن	terrestrial infrared	فروسرخ زمینی
pollutant	آلاینده	Thermocline	ترموکلاین
Precambrian	پیش کامبرین	Thermohaline	ترموهالین
precession of the equinoxes	تقدیم اعتدالین	thermosphere	گرماسفر
projection	پیش‌نگری	tide	جزر و مد
proxy	نشانگر میانجی	trade winds	بادهای تجاری
Quaternary	کواترنری	transient sensitivity	حساسیت گذرا
radiation	تابش	tropopause	گشت‌مرز
radiation spectrum	طیف تابشی	troposphere	گشت‌کره
radiative forcing	زور تابشی	ultraviolet	فرابنفش
renewable energy	انرژی نوشونده		

vapour	بخار آب	weathering	هوازدگی
vapourization	تبخیر	wind energy	انرژی باد
viscosity	گرانروی	wind farm	مزرعه باد
volcano	آتشفشان	zodiacal circle	دایره البروج
water cycle	چرخه آب		

نمایه

اثر گلخانه‌ای مهارنشدنی ۶۶	CFC ۲۴، ۶۴
استاندارد وین ۱۰۷	HCFC ۲۴، ۶۴
اسیدهای آمینه ۷۴	آب شدن یخچال‌های هیمالیا ۱۸۸
اسیدیته ۷۳	آبشناسی سطحی ۱۴۲
اصطکاک ۴۳	آب‌های زیرزمینی ۷۷، ۸۰، ۸۱، ۱۲۷، ۲۱۳
اعتدال‌های بهاری و پاییزی ۱۰۲	آتشفشان مانالوآ ۶۹
اقتصاددانان ۲۸	آراگونیت ۷۳
اقلیم ۱۷، ۱۸، ۲۱ - ۲۳، ۳۳، ۳۴، ۳۸، ۵۰، ۵۳، ۵۴، ۵۶، ۵۸، ۶۳، ۶۴، ۶۹، ۷۳، ۷۷، ۸۱، ۸۲، ۸۸، ۹۸، ۹۹، ۱۰۲، ۱۰۵ - ۱۰۸، ۱۱۰ - ۱۱۲، ۱۱۴، ۱۱۵، ۱۱۷، ۱۲۱ - ۱۲۴، ۱۲۷، ۱۲۸، ۱۳۲، ۱۳۹، ۱۴۰، ۱۴۴ - ۱۵۵، ۱۵۷ - ۱۵۹، ۱۸۱، ۱۸۵، ۱۸۶، ۱۸۸، ۱۹۲ - ۱۹۴، ۱۹۸ - ، ۲۰۰، ۲۰۱، ۲۰۳، ۲۰۵، ۲۰۶، ۲۰۹، ۲۱۰، ۲۱۳، ۲۱۵	آژانس بین‌المللی انرژی ۱۰۷، ۱۵۷، ۱۶۳، ۱۶۴، ۱۶۷، ۱۷۶، ۱۸۱
اقلیم‌شناسی ۲۲، ۲۳، ۳۵، ۷۶، ۱۳۹، ۲۰۱، ۲۱۱	آلاینده‌های هوا ۶۲
اکسایش ۷۲، ۲۱۶	آی‌پی‌سی‌سی ۱۰، ۱۱، ۱۷، ۲۴، ۲۸، ۵۷، ۶۰، ۶۲، ۶۳، ۱۲۱، ۱۲۲، ۱۲۴، ۱۵۰ - ۱۵۲، ۱۵۷، ۱۸۵ - ۱۸۹، ۲۰۱، ۲۰۳ - ۲۰۶، ۲۱۱
	ابرقاره پانجه‌آ ۹۹
	ابرهای شب‌تاب ۴۱
	ابرهای لایه‌ای ۱۴۶
	ابرهای هم‌رفتی ۱۴۶
	اتانول ۱۶۷، ۱۶۸، ۲۱۸

- اکسیژن ۲۴، ۲۶، ۳۲، ۳۷، ۴۱، ۵۵، ۷۸،
۱۰۶، ۱۰۷، ۱۶۶، ۱۶۸، ۱۷۸، ۱۷۹
- اکسایش ۵۶
- الکتریسیته ۲۷، ۱۵۷، ۱۵۸، ۱۶۰، ۱۶۳ -
۱۶۵، ۱۶۷، ۱۶۹، ۱۷۰، ۱۷۷
- الکتریسیته فتوولتاییک ۱۵۶
- النینو ۸۲، ۹۳، ۱۵۰
- انبارش کربن ۱۵۹
- انبساط بی‌دررو، ۵۱
- انتقال گرما ۱۹، ۵۰، ۱۴۲، ۱۴۵، ۱۴۷
- انحراف محور زمین ۱۰۲، ۱۰۳، ۱۰۸
- اندازه‌گیری‌های هواشناسی ۲۳
- انرژی باد ۶، ۱۶۲، ۱۶۳، ۱۶۹
- انرژی زمین‌گرمایی ۲۷
- انرژی فسیلی ۲۵، ۲۷، ۲۰۴
- انرژی نو ۲۷، ۱۷۶
- انرژی هسته‌ای ۱۵۶، ۱۵۹، ۱۶۱
- انسو ۹۳، ۹۴
- انقلاب سبز ۱۳۲
- اوج و حضیض خورشید ۱۰۴
- ایران ۱۲۶، ۱۲۷، ۱۹۲، ۱۹۳، ۱۹۵، ۱۹۷
- ایستگاه وستوک ۱۰۶
- بادهای تجاری ۸۵، ۲۱۶
- باران اسیدی ۶۶
- باران‌های موسمی ۱۱۳
- بارش ۲۲، ۲۶، ۳۱، ۳۳، ۳۹، ۴۰، ۸۳، ۱۰۶،
۱۲۶، ۱۲۷، ۱۲۹، ۱۳۰، ۱۳۱، ۱۳۳، ۱۳۴،
۱۴۶، ۱۶۲، ۱۹۹، ۲۱۴، ۲۱۵
- بازخورد ۳۴، ۵۲، ۱۰۹، ۱۴۵، ۱۴۶، ۱۴۸،
۱۴۹، ۲۱۶
- بازخورد بخار آب ۵۲
- بازخورد تابشی ابر ۱۴۶
- بازخورد جریان‌های اقیانوسی ۱۴۶
- باکتری‌های شوره‌زدا ۷۵
- باکتری‌های شوره‌گذار ۷۵
- بخار آب ۴۹، ۲۹، ۳۸، ۳۹، ۴۰، ۴۱، ۴۶، ۵۱،
۵۲، ۵۴، ۵۵، ۶۵، ۶۶، ۱۰۱، ۱۰۷، ۱۴۱،
۱۴۵، ۱۴۶، ۱۶۰، ۱۶۲
- بدام‌اندازی کربن ۱۶۱
- براهماپوترا ۱۲۵
- برق بدون کربن ۱۵۹
- برق‌آبی ۱۶۲، ۱۶۴
- برنامه محیط‌زیست سازمان ملل ۱۸۵
- بنزین ۱۶۸
- بیابان‌زایی ۱۲۷
- بی‌کربنات ۷۱
- بیوژئوشیمی ۷۳
- پارامترهای هواشناسی ۱۴۱
- پارامتری کردن ۱۴۱، ۱۴۶
- پراکندگی ابرها ۱۴۱
- پراکندگی ۶۸
- پروتکل کیوتو ۱۹۴
- پروتکل مونترال ۱۹۳
- پلیستوسن ۱۰۱، ۱۰۷، ۱۰۸، ۱۱۱، ۱۱۲،
۲۱۷
- پوسته‌های اقیانوسی و قاره‌ای ۲۱، ۲۱۳

- پوش کره ۳۹، ۴۰، ۴۱، ۶۴، ۶۵، ۹۹، ۱۰۰، ۱۱۷، ۱۱۸، ۲۱۵
- پوش مرز ۴۱، ۲۱۵
- پیدازیستی ۹۷
- پیش کامبرین ۲۱۶
- پیش نگری ۲۸، ۱۴۳، ۱۵۳، ۲۰۳، ۲۰۵
- ۲۰۶، ۲۱۰
- پیش نگری های فصلی ۱۴۳
- پیل های هیدروژنی ۱۶۰، ۱۷۸، ۱۷۹
- پیمان ریو ۱۹۲
- پیمان کیوتو ۱۸۶، ۱۹۵، ۱۹۷، ۲۰۰، ۲۰۱
- تابش جسم سیاه ۵۹
- تابش خورشید ۱۹، ۲۱، ۲۴، ۲۹، ۳۸، ۴۱، ۱۰۰، ۱۰۲، ۱۴۵، ۱۴۸، ۱۵۰، ۱۵۲، ۱۷۰
- ۱۷۱، ۱۷۲، ۱۷۳، ۱۷۴
- تابش زمین ۲۱، ۹۹
- تابش فرابنفش خورشید ۲۵
- تابش فروسرخ زمینی ۴۰
- تابش های الکترومغناطیسی ۵۳
- تبخیر ۴۶، ۵۲، ۷۸، ۸۰، ۸۲، ۸۳، ۸۸، ۱۰۶، ۱۲۷، ۱۴۱، ۱۴۳، ۱۴۵، ۱۴۶، ۱۴۸، ۱۶۲
- تبعات ناخواسته تغییر اقلیم ۲۷
- تثبیت اقلیم ۱۵۹
- تراز آب دریاها ۵، ۲۴، ۲۶، ۳۱، ۳۳، ۱۱۷، ۱۲۳
- ترکیبات گوگردی ۶۶
- ترکیبات نیتروژن دار ۷۴
- تریتیم ۱۴۹، ۱۸۰
- تشکیل ابرها ۹۹، ۱۳۹، ۱۴۶
- تعادل هیدرواستاتیک ۱۴۰
- تقدیم اعتدالین ۱۰۲، ۱۰۳
- تولید برق ۵۸، ۸۰، ۱۵۸، ۱۵۹، ۱۶۴، ۱۷۰، ۱۷۳، ۱۷۶، ۱۷۷
- ثابت خورشیدی ۱۰۵
- جامعه شناسان ۲۸
- جریان ترموهالین ۸۸
- جریان گرینلند شرقی ۸۷
- جریان لابرادور ۸۷
- جریان های اقیانوسی ۱۹، ۲۰، ۴۷، ۸۵، ۸۶، ۹۸، ۹۹، ۱۰۸، ۱۰۹، ۱۱۴، ۱۳۹، ۱۴۳، ۱۴۴
- ۱۴۶ - ۱۴۹
- جریان های جوی ۱۹، ۳۸، ۴۲، ۱۴۳، ۱۴۸
- جریان های همرفتی ۵۰
- جزر و مد ۲۷
- جنگل ۲۵، ۲۷، ۵۸، ۶۴، ۶۶، ۱۳۰، ۱۳۳، ۱۶۷، ۱۹۴، ۱۹۹
- جنگل زدایی ۲۸، ۷۰، ۱۵۵، ۱۵۷، ۱۵۹
- جنوبگان، ۲۰، ۳۰، ۵۲، ۷۹، ۸۷، ۸۸، ۸۹، ۱۰۶، ۱۲۳، ۱۳۴، ۱۳۵، ۱۳۶، ۱۳۷، ۲۱۰
- جوش هسته ای، ۱۶۲، ۱۸۰
- جیمز کرول ۱۰۱
- چارلز کیلینگ ۶۹
- چاهک های نمونه برداری ۱۱۵
- چرخه کربن ۷۱
- چسبندگی ۴۳، ۱۴۰
- حباب های هوای محبوس ۲۶

- حرکت تقدیمی ۱۰۲
 حساسیت گذرا ۲۱۵
 حساسیت میانگین ۳۴
 خاکستر آتشفشان‌ها ۶۵
 خاکسترهای آتشفشانی ۵۳
 خروج از مرکز مدار زمین ۱۰۲، ۱۰۴
 خشک‌سالی ۱۲۷، ۱۹۹
 خشکی‌زایی ۹۹
 خنک‌کنندگی ۲۵، ۲۹، ۹۸
 خورتاب ۱۰۲، ۱۰۴، ۱۰۸، ۱۰۹، ۱۱۴، ۱۱۷، ۱۴۱، ۱۴۲، ۲۱۷
 داده‌های رادیوسوندها ۳۰
 داده‌های ماهواره‌ای ۳۰، ۱۲۴
 دایره البروج ۱۰۲
 دشت‌های سیستان ۱۶۹
 دلتایی نیل ۱۲۶
 دوتریم ۱۰۶، ۱۸۰
 دود ۶۵، ۱۰۰
 دولت‌مردان ۹، ۱۰، ۲۸
 دیرینه‌زیستی ۲۱۶
 دیرینه‌شناسی ۷۹
 ذرت ۱۶۵، ۱۶۷، ۱۶۸
 زغال‌سنگ ۲۵، ۷۱، ۷۲، ۱۵۵، ۱۵۶، ۱۵۷، ۱۶۰
 رادیکال هیدروکسیل ۶۱
 راش معمولی ۱۳۱
 راندگی اقلیم ۳۴
 رانش قاره‌ها ۹۹
 رخدادهای هاینریش ۱۱۰
 رصدهای ماهواره‌ای و زمینی ۳۰
 رطوبت نسبی ۱۴۲، ۱۴۶
 روان‌آب‌ها ۲۶، ۷۷، ۸۰، ۱۲۷، ۲۱۳، ۲۱۴
 روش‌های ژئوشیمیایی ۳۲
 روغن‌های خوراکی ۱۶۷
 زمین‌گرمایی ۲۷، ۱۵۶، ۱۵۸، ۱۶۳، ۱۷۶، ۱۸۰
 زمین‌های کشاورزی ۲۵، ۲۷، ۲۸، ۱۶۷
 زمین‌های یخ‌زده ۳۰، ۲۱۳، ۲۱۴
 زور تابشی ۵۶، ۵۷، ۵۸، ۶۱، ۶۴، ۶۵، ۸۹
 ۲۱۶، ۲۱۸
 زور تابشی ۵۶، ۵۸، ۶۰، ۶۳، ۶۵، ۸۹، ۲۱۶
 زهره ۱، ۶۶
 زیست‌بوم ۱۲۹
 زیست‌توده‌ها ۲۷، ۱۵۵، ۱۵۷، ۱۶۳، ۱۶۵
 زیست‌سوخت ۱۶۷
 زیست‌کره ۲۱، ۲۹، ۳۸، ۷۰، ۷۱، ۱۳۹، ۱۴۴، ۱۵۳، ۲۱۳
 ساختار لایه‌های اقیانوسی ۴، ۸۴
 سازگاری ۳، ۹، ۲۷، ۱۲۱، ۱۳۱، ۱۸۵، ۱۸۶، ۱۹۴، ۲۰۱
 سازمان بهداشت جهانی ۱۶۵
 سازمان جهانی هواشناسی ۲۹، ۱۸۵
 سپیدایی ۲۱، ۲۹، ۵۲، ۵۳، ۶۸، ۹۸، ۱۰۰
 ۱۳۴، ۱۳۷، ۱۴۵، ۱۴۸، ۲۱۴
 سرس ۱۲۱، ۱۲۴، ۲۰۳، ۲۰۵ - ۲۰۷
 سرماکره ۲۰

- سلول‌های پی‌وی ۱۷۴
 سلول‌های فتوولتائیک ۱۶۲، ۱۶۳، ۱۷۰،
 ۱۷۲ - ۱۷۴
 سن زمین ۹۷
 سناریوی A۱ ۲۰۴
 سناریوی B۱ ۲۰۴، ۲۰۵
 سناریوی A۲ ۲۰۴، ۲۰۵
 سناریوی B۲ ۲۰۴
 سنگ‌کره ۲۱، ۳۸، ۷۱، ۷۲، ۹۸، ۱۳۹، ۲۱۳
 سنگ‌های آهکی ۷۱
 سوخت هیدروژن ۲۷، ۱۸۰
 سوخت‌های فسیلی ۲۵، ۲۸، ۶۲، ۷۰، ۱۵۵،
 ۱۵۷، ۱۵۸، ۱۶۰، ۱۶۱، ۱۶۶، ۱۶۷، ۱۷۹،
 ۱۸۱، ۱۸۲، ۲۰۴
 سوگیری سیستماتیک ۳۴
 سولفوردی‌اکسید ۹۹، ۱۰۰
 سولفوردی‌اکسید ۵۵
 سولفوریک‌اسید ۹۹، ۱۰۰، ۱۱۴
 سیرا ۹۸
 سیل ۱۲۷، ۱۹۹
 سیلیکا ۷۱
 سیلیکون ۱۷۴
 شبکه سه‌بعدی ۱۴۱، ۱۴۲
 شبیه‌سازی ۳۲، ۱۲۲، ۱۳۰، ۱۴۰، ۱۴۴،
 ۱۴۹، ۱۵۰، ۱۵۲
 شرایط اولیه ۱۴۱، ۱۴۲
 شمالگان ۲۰، ۵۲، ۷۹، ۸۳، ۸۷، ۱۳۴
 شورای بین‌آکادمی‌ها ۱۸۸، ۱۸۹
 شوری ۱۹، ۳۱، ۸۰، ۸۲ - ۸۴، ۱۰۸، ۱۴۸
 صدف‌های کربنات‌دار ۷۱
 صفحه صلب عربستان ۹۸
 صفحه مدار زمین ۱۸، ۱۰۲، ۱۰۳
 صفحه مرکزی ایران ۹۸
 صنعت حمل‌ونقل ۱۵۸، ۱۷۸
 صنعت سیمان ۲۵، ۲۸، ۱۵۵
 صنوبر نروژ ۱۳۱
 طوفان ۱۲۸
 طول‌موج‌های میکرومتری ۴۲
 طیف تابشی خورشید ۶۷
 طیف جذبی ۶۸
 عصر یخبندان کوچک ۱۱۳
 فتوستتر ۷۲، ۹۰، ۱۶۲، ۱۶۵، ۱۶۶
 فرسوخ دور ۵۵
 فرینه‌های اقلیمی ۵، ۳۰، ۱۲۷، ۱۲۸
 فشار اشباع ۴۶
 فشار هوا ۳، ۴۲، ۴۳، ۴۴، ۴۵
 فلات تبت ۹۸
 فناوریِ تحدید ۱۸۰
 فیتوپلانکتون‌ها ۹۰
 قانون ترمودینامیک ۱۴۰
 قراردادهای منطقه‌ای و بین‌المللی ۲۸
 قطب جنوب ۲۰، ۳۴، ۶۴، ۷۹، ۱۱۷، ۱۳۴،
 ۲۱۰، ۲۱۴
 کاهش نشر ۲۷، ۱۵۸، ۱۶۱، ۱۶۷، ۱۹۴،
 ۱۹۵، ۱۹۶، ۱۹۹، ۲۰۱

- کربن ۲۱، ۲۶، ۲۹، ۳۲، ۶۱، ۶۹ - ۷۲، ۹۰،
 ۱۰۶، ۱۰۷، ۱۵۹، ۱۶۰ - ۱۶۲، ۱۶۵، ۱۷۷،
 ۱۸۱، ۱۸۲، ۱۹۵
 کربنات ۷۳
 کربنات کلسیم ۹۰
 کلاهیک‌های یخی ۱۱۷، ۲۰
 کلروفلوئوروکربن ۶۴
 کلسیت ۷۳
 کلسیم ۷۱
 کنفرانس کن‌کون ۲۰۰
 کوآترنری ۲۱۷
 کوریولیس ۱۹، ۴۳، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۸۵، ۱۴۰
 کوه‌زایی ۹۸
 کاج آرولا ۱۳۱
 کاربرد زمین ۵۸، ۶۰، ۶۱
 کربن‌دی‌اکسید، ۲۸، ۲۹، ۳۳، ۳۴، ۵۵، ۵۸،
 ۶۰، ۶۱، ۶۶، ۶۹، ۷۰، ۷۲ - ۷۴، ۱۰۹، ۱۳۰،
 ۲۱۵
 کربن‌مونوکسید ۵۵
 گاز طبیعی ۱۶۰، ۱۶۱، ۱۸۰
 گاز مرداب ۶۱
 گردش واکر ۹۴
 گردهمایی تورنتو ۱۹۱
 گردهمایی کپنهاگ، ۱۹۷
 گرم شدن زمین ۱۷، ۲۶، ۵۰، ۵۲، ۵۴، ۶۵،
 ۶۹، ۱۱۵، ۱۲۳، ۱۲۶، ۱۲۹، ۱۳۴، ۱۳۷،
 ۱۴۵، ۱۹۱، ۲۱۰
 گرماکره ۴۱، ۲۱۵
- گرمای نهان ۴۰، ۲۱۶
 گرمایش خورشیدی ۱۷۰
 گشت‌کره ۳۰، ۳۸، ۳۹، ۴۰، ۵۰، ۵۶، ۵۸
 ۸۵، ۱۱۴، ۱۱۷، ۱۱۸، ۲۱۵
 گشت‌مرز ۳۹، ۲۱۵
 گلف‌استریم ۸۱، ۹۲
 گنگ ۱۲۵
 لایه آمیخته ۸۴
 لایه ترموکلاين ۸۴
 لایه عمیق ۸۴
 لایه مخلوط اقیانوس ۱۴۷
 لکه‌های خورشیدی ۱۰۵، ۱۱۴، ۲۱۷
 متان ۲۴، ۲۵، ۲۸، ۲۹، ۴۱، ۵۵، ۶۱، ۶۲،
 ۷۴، ۱۰۹، ۱۳۱، ۱۳۲، ۱۶۶، ۲۰۵، ۲۰۷
 متان هیدراته، ۱۳۲
 مدل‌های اقلیمی ۲۳، ۳۳، ۳۴، ۱۲۴، ۱۳۹،
 ۱۴۰، ۱۴۴، ۱۴۷، ۱۵۱، ۱۵۳، ۲۱۵
 مدل‌های هواشناسی ۲۳، ۱۴۰، ۱۴۲، ۱۴۳،
 ۱۴۴، ۱۴۵، ۱۵۳
 مرجان ۸۹، ۹۱
 مرجان‌ها، ۲۵، ۸۹، ۹۰، ۹۱، ۱۰۶، ۱۰۷
 مریخ ۶۶
 مزارع باد ۱۶۹
 مشخصات شیمیایی و ترمودینامیکی آب ۷۷
 معادله پیوستگی ۱۴۰
 معادله حالت ۱۴۰
 معاهده‌های بین‌المللی ۶، ۲۵، ۲۸، ۲۱۴
 مغزه‌برداری، ۱۰۶

- مغزه‌های یخی ۶۰، ۶۲، ۶۳، ۱۱۲، ۱۱۴
مگنا ۱۲۵
منابع انرژی نوشونده ۲۷
منابع فسیلی ۲۶، ۱۲۳
منحنی کیلینگ ۷۰
منظومه شمسی ۱۰۱، ۱۰۲
منیزیم ۷۱
موتور استرلینگ ۱۷۲، ۱۷۳
موجودات دریایی صدف‌دار ۲۵
میان‌زیستی ۲۱۷
میان‌کره ۴۱، ۲۱۵
میزان شوری ۸۲
نشاسته ۱۶۷
نشانگرهای میانجی ۲۶، ۳۲، ۱۰۸، ۱۱۳، ۱۲۳، ۱۵۰، ۲۱۴
نشت متان ۵، ۶۱، ۱۳۱
نظام بادها ۳، ۱۹، ۳۸، ۴۲، ۴۳، ۴۷، ۸۵، ۱۴۶
نظام بارش‌ها ۲۰
نفت ۲۵، ۷۱، ۷۲، ۱۵۵، ۱۵۶، ۱۵۷، ۱۶۰، ۱۶۵، ۱۶۷، ۱۹۸
نقشه آبی آژانس بین‌المللی انرژی ۱۶۳
نوزیستی ۹۷
نوسان اطلس شمالی ۱۱۵
نوسانات آتلانتیک شمالی ۸۲
نوسانات جنوبی ال‌نینو ۸۲، ۹۳
نیترات ۷۵
نیتروژن اکسید ۲۴، ۲۵، ۲۸، ۷۳، ۷۴، ۲۰۵، ۲۰۷
نیتروژدی اکسید ۷۴
نیروی گردایان فشار ۴۳
نیروی گرانروی ۴۳، ۱۴۰
نیروی گردایان فشار ۱۴۰
ورقه یخی آموندسن ۳۰
ورقه‌های یخی گرینلند ۳۰، ۱۲۳، ۱۳۴
هوازگی ۹۸
هواکره ۱۸، ۱۹، ۲۶، ۳۷ - ۴۲، ۴۶، ۴۹، ۵۶، ۵۸، ۷۱، ۸۵، ۸۸، ۱۰۰، ۱۳۹، ۱۹۸، ۲۱۳
هواویزها ۲۹
هولوسن ۱۱۰، ۱۱۱، ۱۱۲، ۱۱۳، ۱۱۴، ۲۱۷
هولوسن میانی ۱۱۳
هیدرات‌متان ۱۳۲
هیدروکربن ۱۶۸
هیدروکلروفلئوروکربن‌ها ۶۴
هیدورژن ۲۶
هیمالیا ۹۸، ۱۸۸
یافته‌های مطمئن ۱۰، ۲۸، ۳۰، ۳۳
یانگر درایاس ۱۱۱، ۱۱۲
یخبندان ۲۳، ۳۲، ۵۶، ۷۹، ۱۰۹ - ۱۱۴
یخچال‌های کوهستانی ۳۰، ۷۷، ۷۹، ۱۱۳، ۱۲۳، ۲۱۳

Warmed up Earth

What does the climate of the 21st Century have to offer?

Yousef Sobouti

In the early 1980's global warming, as a consequence of excessive emission of anthropogenic greenhouse gases, became a topic of discussion in academic circles. Pros and cons exchanged heated debates and it is said that some interest groups added fuel to it. However, as more and more scientific evidence surfaced, a sober air prevailed. Expert voices sounded louder, United Nations' Environment Program (UNEP) and the World Meteorological Organization (WMO) expressed interest in the subject, and governments began to consider the aftermath of a warm climate seriously. By 2007 the Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC), a body instituted by UNEP and WMO, concluded that:

Warming of the climate system is now evident from observations of increases in global average air and ocean temperatures, widespread melting of snow and ice, and rising global average sea level.

The book entitled Warmed up Earth is based on a series of lectures presented in the Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), fall 2009. It is written in Farsi and addresses the Farsi speaking communities. The book touches on the following topics:

- The scientific basis of the greenhouse effect and the anthropogenic greenhouse gases
- The consequences of a warmed up climate for bio systems, in general, and for human societies, in particular
- Projection of the changed climate of the 21st Century
- Possible mechanisms of adaptation and mitigation
- The energy issue: reduction and more efficient use of fossil fuels, development of new and renewable energies, etc.
- International conventions and agreements to cope with a changed climate

The book begins with an extensive executive summary, to serve as a quick reference, the policy/decision makers of the Farsi speaking societies.

Warmed up Earth

What does the climate of the 21st Century have to offer?

Yousef Sobouti

Institute for Advanced Studies in Basic Sciences - Zanjan

Co- authors:

Somayeh Abdollahi

Mohammad Javad Banimehdi

Shamsedin Esmaeli

Mandana Farhadian

Zohreh Gaffari

Zeynab Khorami

Zeynab Mokhtari

Parvin Mostafavi

Kazem Najafi

Faezeh Tabatabaee

