محمدصادق رهبانی
دانشجوی کارشناسی، مهندسی طبیعت، دانشکده منابع‌طبیعی، دانشگاه تهران
rohbani.mohammad@ut.ac.ir

تغییرات اقلیمی و پیامدهای بین‌المللی آن (قسمت اول)

چکیده

تغییر اقلیم ناشی از فعالیت‌های انسان پدیده‌ای نهادینه شده است. در جوامع علمی پرسش دیگر این نیست که آیا تغییر اقلیم رخ خواهد داد یا نه، بلکه این است که روند این تغییر چقدر است، چه آثاری دارد و چه چاره‌ای برای آن متصور است. محرک مهم‌تر تغییر اقلیم افزایش میزان کربن دی‌اکسید در اتمسفر است که عمدتا در نتیجه احتراق سوخت‌های فسیلی تولید می‌شود.

بسیاری از مردم، با مشاهده عظمت این چالش، از یافتن راه‌حل ناامید می‌شوند. تغییرات اقلیمی در جهان اکنون به وقوع پیوسته است. افزایش خشکسالی، جاری‌شدن سیل و آتش‌سوزی در جنگل‌ها تنها برخی از حوادث شدید تغییرات اقلیمی است، که جهان آن را تجربه کرده است و همچنان با آن روبرو خواهد بود. دولت‌ها و سازمان‌ها برای سازگاری با این شرایط، بایستی آماده شوند. تغییر اقلیم در مجموع نزدیک به ۱ تریلیون دلار هزینه در برخواهد داشت. در عین حال، امید چندانی نیز به توقف افزایش دمای کره‌ی زمین نیست. به نظر می‌رسد که هدف برای محدودکردن این افزایش به دمای کمتر از ۲ درجه سلسیوس، محقق نخواهد شد.

در این مقاله تلاش شده است که با ارزیابی علل وقوع تغییرات اقلیمی و عواملی که منجر به تشدید آن می‌شود، بررسی جامعی از پیامدهای بین‌المللی آن و راهکارهای مناسب جهت کنترل و بهبود شرایط صورت گیرد. همچنین لازم به ذکر است که این مقاله مروری به شیوه توصیفی-تحلیلی گردآوری شده است.

کلمات کلیدی: تغییرات اقلیمی، کربن دی‌اکسید (CO_2)، گازهای گلخانه‌ای، آب‌وهوا.

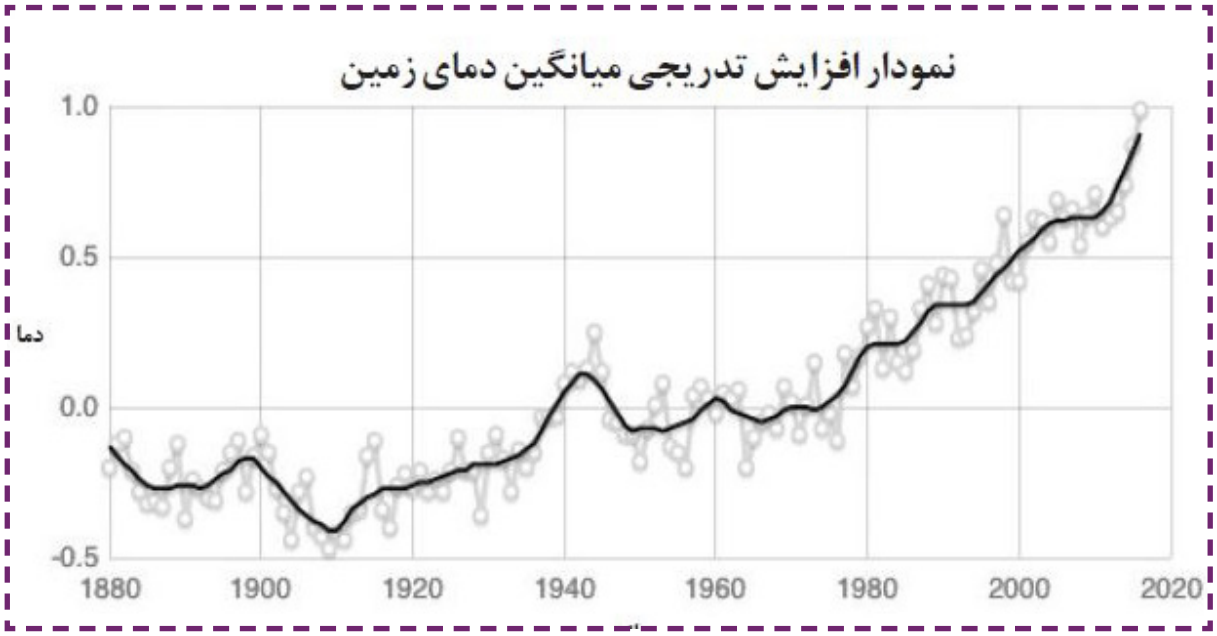
مقدمه

شاید تغییر اقلیم بهترین نمونه برای سرشت نظام‌مند مسائل محیط‌زیستی باشد. برهم کنش اقتصاد، سیاست، انرژی، کشاورزی و ارزش‌های انسانی با جهان طبیعی به تغییر اقلیم انجامیده است. ایجاد تغییراتی در اقتصاد، سیاست، انرژی، کشاورزی و رفتار انسان برای مهار تغییر اقلیم ضرورت دارد.

چندین عامل موجب شده‌اند که اقلیم زمین پذیرای حیات، به صورتی که ما آن را درک می کنیم، شده باشد. این عوامل عبارت‌اند از مقدار انرژی‌ای که زمین از خورشید دریافت می‌کند، توزیع آب در سیاره زمین، موقعیت و توپوگرافی پهنه‌های خشکی، مایل بودن محور زمین، بازتابندگی سطح زمین و محتوای جوزمین. اغلب این عوامل طی هزاران یا میلیون‌ها سال تغییر می‌کنند. فقط دو عامل، نوسانات جزئی شدت تابش خورشیدی و محتوای جو زمین طی دهه‌ها تغییر می‌کنند. از میان این دو عامل، فقط محتوای جو زمین را می‌توان مسئول تغییرات دمایی دانست که دانشمندان تغییر آن را طی چند قرن گذشته شاهد بوده‌اند.

دمای میانگین زمین، براساس اندازه‌گیری‌های روزانه در چند هزار ایستگاه هواشناسی واقع در نقاط مختلف خشکی، همچنین داده‌های دریافتی از بالون‌های هواشناسی، ماهواره‌ها، کشتی‌های اقیانوس پیما و صدها بویه دریایی مجهز به حسگر دما تعیین می‌شود. بنا به گزارش سازمان جو و اقیانوس آمریکا (NOAA) ممکن است دمای زمین در این سال‌ها، به بالاترین میزان خود طی هزاره گذشته رسیده باشد (نتایج دماسنجی در نقاط مختلف سیاره‌ی زمین از اواسط قرن نوزدهم ثبت و جمع‌آوری شد، اما دانشمندان دمای سال‌های پیش از آن را براساس شواهد اقلیمی غیرمستقیمی مانند حلقه‌های رشد درخت، رسوبات دریاچه‌ها و اقیانوس‌ها، استالاگمیت‌ها، حباب‌های کوچک هوا در یخ باستانی و آب سنگ‌های مرجانی برآورد کرده‌اند).

سایر شواهد افزایش دمای زمین را تأیید می‌کنند. در چندین بررسی به طور مستند نشان داده شده است که امروزه، در مقایسه با سال ۱۹۵۹، بهار پدیده شناختی در نیمکره شمالی حدود ۶ روز زودتر فرا می‌رسد و پاییز پنج روز تاخیر دارد.



دمای میانگین کره‌ی زمین

علل تغییر اقلیم زمین

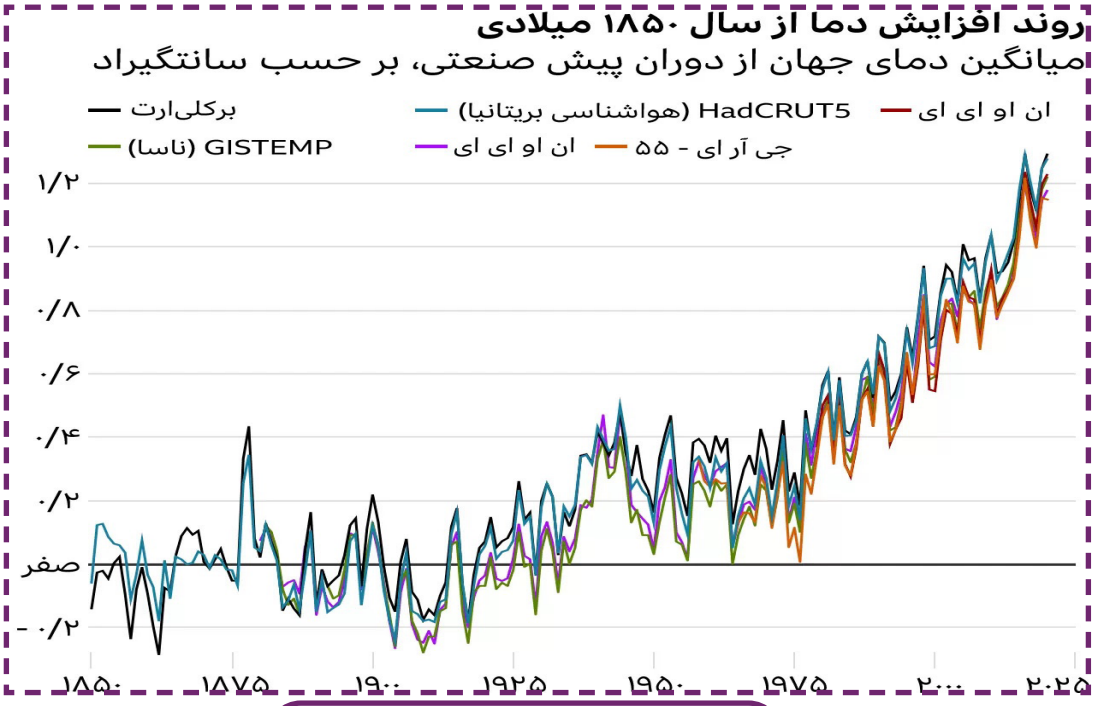
کربن دی‌اکسید (CO_2) و بعضی گازهای کم مقدار دیگر، شامل متان (CH_4) ، نیترو اکسید (N_2O) و کلروفلوئوروکربن‌ها (CFCs)، همچنین ازون زیرین‌سپهر، در نتیجه فعالیت‌های انسان در جو انباشته می‌شوند. ازون زیرین‌سپهر نیز افزایش یافته است. اگرچه برآوردها متفاوت است، احتمالا حدود ٪۵۰ نسبت به نیمه قرن هجدهم بیشتر شده است.

همه این‌ها گاز گلخانه‌ای هستند، یا گازهایی‌اند که گرمای خورشید را جذب می‌کنند و باعث افزایش دمای جو زمین می‌شوند. گازهای گلخانه‌ای دیگر، اما با مقادیر کمتر، عبارت‌اند از کربن تتراکلرید، متیل کلروفورم، کلرودی فلوئورومتان، گوگرد هگزافلوئورید، تری فلوئورو متیل، گوگرد پنتافلوئورید، فلوئوروفورم و پرفلوئورواتان.

غلظت کربن دی‌اکسید در اتمسفر، از حدود ۲۸۸ قسمت در میلیون (ppm) در تقریبا ۲۰۰ سال پیش (قبل از شروع انقلاب صنعتی) به ۴۰۰ ppm در سال ۲۰۱۴ افزایش یافت. مصرف سوخت‌های فسیلی حاوی کربن (زغال‌سنگ، نفت و گاز طبیعی) بخش عمده‌ای از سهم انسان در تولید کربن دی‌اکسید را تشکیل می‌دهد. تغییر کاربری زمین، مثلا قطع یا سوزاندن درختان جنگل‌های گرمسیری نیز موجب رها شدن کربن دی‌اکسید و افزایش غلظت این گاز در جو می‌شود.

سوزاندن گیاهان نه تنها موجب رها شدن کربن دی‌اکسید در جو می‌شود، بلکه ظرفیت زیست‌سپهر (بیوسفر) برای حذف و ذخیره‌سازی کربن در ریشه و تنه درخت‌ها از طریق فتوسنتز را نیز کاهش می‌دهد. دانشمندان برآورد می‌کنند که بدون تلاش جسورانه برای کاهش انتشار آلاینده‌های کربنی، طی نیمه دوم قرن ۲۱، غلظت کربن دی‌اکسید در جو به دو برابر میزان آن در قرن هجدهم می‌رسد یا از آن فراتر می‌رود.

با توجه به اینکه این گازها تابش فروسرخ (یعنی گرمای تابیده از خورشید) را جذب می‌کنند، غلظت بالاتر گازهای گلخانه‌ای به گرم‌شدن زمین و تغییر اقلیم منتهی می‌شود. علت این است که جذب گرما بازتابش متعاقب آن به فضا را کند می‌سازد و درنتیجه لایه‌های پایینی جو گرم می‌شوند. ظرفیت گازهای گوناگون برای تأثیر گذاشتن در موازنه انرژی ورودی به جو و خروجی از آن را، **تأثیر تابشی** می‌نامند.



میانگین دمای جهان از دوران پیش صنعتی

بخش عمده گرمای حبس شده در اتمسفر به اقیانوس‌ها منتقل می‌شود و دمای آب اقیانوس را نیز بالا می‌برد، هرچند ظرفیت گرمایی بالای اقیانوس به این معناست که دهه‌ها طول خواهد کشید تا آب اقیانوس به اندازه‌ای گرم شود که بتواند موازنه انرژی را از نو برقرار کند. حبس گرما در جو پدیده‌ای طبیعی است و همین عامل زمین را برای میلیون‌ها گونه قابل سکونت کرده است. اما چون فعالیت‌های انسان موجب افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو می‌شود، اتمسفر و اقیانوس، هر دو به گرم‌شدن ادامه می‌دهند و دمای کلی زمین افزایش خواهد یافت.

کربن دی‌اکسید در افزایش تأثیر تابشی و حبس گرمای ناشی از گازهای گلخانه‌ای، سهمی ۶۰ ٪ دارد. کربن دی‌اکسید و گازهای دیگر جلوی از دست رفتن گرمای ناشی از تابش خورشیدی ورودی را می‌گیرند، درست به همان شیوه‌ای که محفظه شیشه‌ای مانع اتلاف انرژی در گلخانه می‌شود. به همین دلیل حبس طبیعی گرما در جو را غالبا **اثر گلخانه‌ای** می‌نامند و گازهایی که تابش فروسرخ را جذب می‌کنند، گازهای گلخانه‌ای نامیده می‌شوند. بنابراین گازهای گلخانه‌ای که در نتیجه فعالیت‌های انسان در جو انباشته می‌شوند اثر گلخانه‌ای تشدید شده را ایجاد می‌کنند.

میزان سایر گازهای کم مقدار مرتبط با تغییر اقلیم نیز در حال افزایش است. هر بار که رانندگی می‌کنید، احتراق بنزین در موتور خودرو موجب رها شدن گاز کربن دی‌اکسید همراه با سایر گازهای آلاینده می‌شود. تجزیه ماده آلی کربن‌دار توسط باکتری‌های بی‌هوازی در مکان‌های مرطوبی از قبیل شالیزارها، خاک‌چال‌های بهداشتی و دستگاه گوارش گاو و سایر جانوران بزرگ (از جمله انسان) منبع مهم تولید گاز متان است.

فرایندهای صنعتی مختلف، تغییر کاربری اراضی و مصرف کودها موجب تولید نیترواکسید می شود. سی‌اف‌سی‌ها مبردهایی‌اند که از یخچال‌ها و کولرهای گازی قدیمی و معیوب به داخل جو نشت می‌کنند. انتشار سی‌اف‌سی‌ها کاهش یافته است، اما مدت بسیار طولانی انتشار آن‌ها در گذشته (از منابع گوناگون از جمله افشانه‌ها و عایق‌های اسفنجی) به این معناست که این مواد همچنان در تغییر اقلیم در آینده سهم خواهند داشت.

طی دهه گذشته، غلظت سی‌اف‌سی‌ها در جو رو به کاهش گذاشته است. بخار آب، که آن هم یکی از گازهای گلخانه‌ای است، بازخورد مثبتی به اقلیم وارد می‌کند که گرم‌شدن زمین را تشدید می‌کند. دماهای بالاتر موجب تبخیر بیشتر آب اقیانوس و افزایش غلظت بخار آب در جو می‌شود که به نوبه خود، موجب گرم‌تر شدن هوا و بالا رفتن دمای آب اقیانوس و تبخیر بیشتر آب خواهد شد.

اگرچه روند فعلی مصرف سوخت‌های فسیلی و جنگل‌زدایی بالاست و موجب می‌شود میزان کربن دی‌اکسید در جو به شدت افزایش یابد، دانشمندان عقیده دارند که روند گرم‌شدن زمین کندتر از آن خواهد بود که افزایش کربن دی‌اکسید ممکن است نشان دهد.

دلیل این است که افزایش دمای آب اقیانوس، در مقایسه با افزایش دمای هوا، به گرمای بیشتری نیاز دارد؛ به علاوه، جو کاملا مخلوط است، اما آب اقیانوس لایه‌بندی شده است، به طوری که مدت بیشتری طول می‌کشد تا اقیانوس گرما را جذب کند. به همین سبب، اقلیم شناسان پیش‌بینی می‌کنند که اقیانوس‌ها در قرن ۲۱ با شدتی بیشتر از قرن ۲۰ گرم شوند و داده‌های اخیر مربوط به دمای سطح اقیانوس موید این پیش‌بینی است.

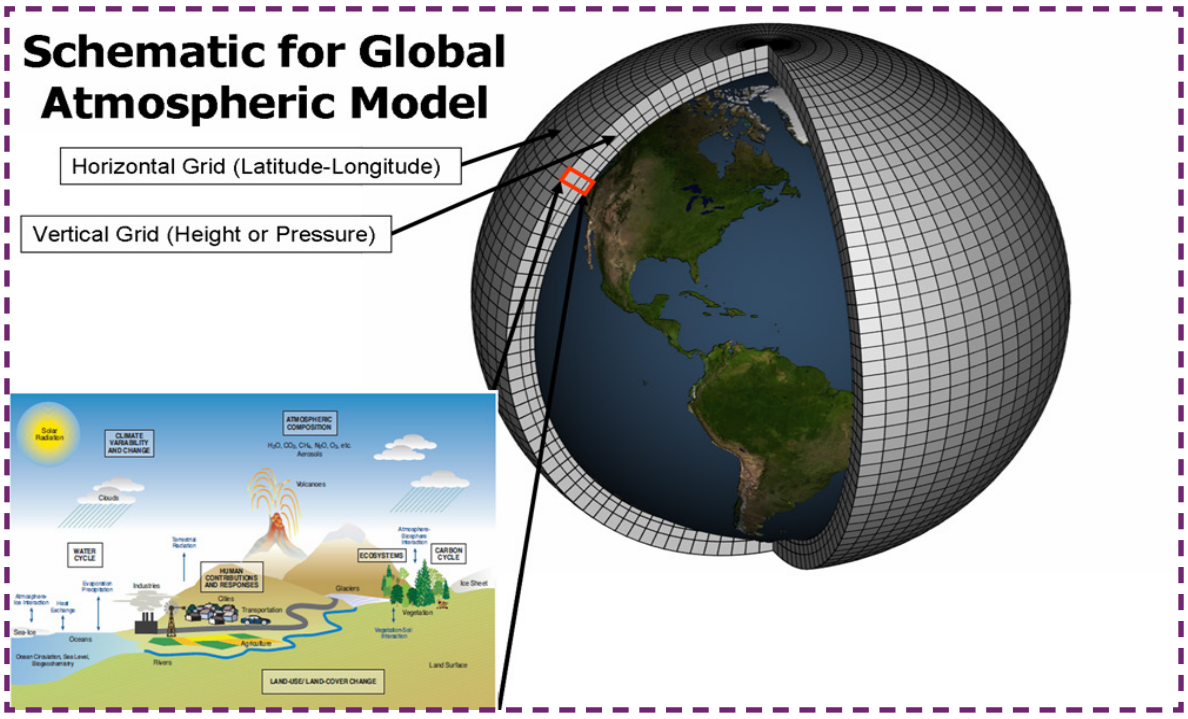
مدل‌سازی اقلیم آینده

بسیاری از عوامل برهم کنش‌کننده، مانند باد، ابرها، جریان‌های اقیانوسی و سپیدایی (بازتاب نسبی)، بر سامانه پیچیده اقلیم اثر می‌گذارند و هر یک تأثیر خاص خود را در آن دارند. برهم کنش‌های بین جو، اقیانوس و خشکی پیچیده‌تر و گسترده‌تر از آن است که بتوان در آزمایشگاه آن‌ها را بازسازی کرد، به همین سبب اقلیم‌شناسان، با استفاده از رایانه‌های قدرتمند، مدل‌های شبیه‌سازی ابداع می‌کنند تا بتوان طرز کار سامانه زمین را روی آن‌ها آزمود.

در این مدل‌ها با بهره‌گیری از قوانین اثبات شده فیزیک، به همراه تقریب‌هایی برای منظور کردن ویژگی‌های کوچک مقیاس اقلیم، آثار فرایندهای در حال رقابت با هم ارائه و از این طریق سامانه اقلیم زمین به صورت عددی توصیف می‌شود. از این مدل‌ها می‌توان برای بررسی تحلیل رویدادهای اقلیمی گذشته و در پیشرفته‌ترین مدل‌ها، برای پیش‌بینی گرم‌شدن آتی زمین و نشان دادن پیامدهای گرم‌شدن زمین بر بیوسفر و سیستم‌های پشتیبان حیات استفاده کرد.

مدل اقلیم فقط به اندازه‌ای خوب است که معرف قوانین و فرایندهای فیزیکی است. در سال‌های اخیر مدل‌های تغییر اقلیم اصلاح شده‌اند و اکنون نمایانگر بسیاری از ویژگی‌های اقلیم فعلی و اقلیم چند قرن گذشته‌اند. اما محدودیت‌های به ویژه در نشان دادن ابرها و تغییراتی که احتمال می‌رود با تغییر اقلیم رخ دهند، همچنان به قوت خود باقی‌اند. اگر تغییر اقلیم زمین به ایجاد ابرهای کم ارتفاع بیشتر منجر شود، این ابرها به صورت بازخورد منفی عمل می‌کنند، بخشی از نور خورشید فرودی را باز می‌تابانند و میزان گرم‌شدن زمین را کاهش می‌دهند.

از طرف دیگر، هرگاه تغییر اقلیم به ایجاد تعداد بیشتری ابر مرتفع و نازک سیروس بینجامد، این ابرها تابش خورشیدی را فقط اندکی بیشتر بازتاب می‌دهند، اما مقدار بسیار بیشتری تابش فروسرخ جذب می‌کنند و گرم‌شدن زمین را شدت می‌بخشند. با انجام پژوهش‌های موردی بیشتر و درک جدیدتری از این عدم قطعیت‌ها و عدم قطعیت‌های دیگر، اعتماد به پیش‌بینی‌های انجام شده براساس این مدل‌ها افزایش می‌یابد.



شمایی از یک مدل اقلیمی

از اغلب مدل‌های اقلیمی برای پیش‌بینی وضعیت اقلیم در چند دهه یا یک قرن آینده استفاده می‌شود. از مدلی که در دانشگاه پرینستون ساخته شد، برای بررسی پیامدهای گرم‌شدن زمین تا پنج قرن آینده استفاده شده است. در شبیه‌سازی مدل فرض شده بود که محدودیت در مورد انتشار آلاینده‌ها در طول زمان اعمال می‌شود. تا غلظت کربن دی‌اکسید در سال ۲۰۵۰ در دو برابر سطح پیشاصنعتی آن تثبیت شود. این مدل سناریویی غلو شده از اقلیمی گرم‌تر ارائه می‌دهد که نسل‌های آینده ناگزیرند در آن زندگی کنند.

مدل‌های اقلیم، انسان‌ها را در موقعیت اخلاقی دشواری قرار می‌دهند. چگونه می‌توان بین عدم قطعیت‌های علمی درباره روند و دامنه تغییر اقلیم، با عدم قطعیت‌های مشابه درباره آثار اقتصادی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای توازن ایجاد کرد؟ هیات بین دولتی تغییر اقلیم سناریوی (کسب وکار طبق معمول) را تعریف کرده است که میزان کربن دی‌اکسید رهاشده طی قرن آینده را، در صورت ادامه توسعه اقتصادی، بدون هیچ‌گونه تلاش برای کاهش انتشار آلاینده‌ها در مقیاس بزرگ برآورد می‌کند. این سناریو پیش‌بینی می‌کند که میزان کربن دی‌اکسید در اتمسفر تا سال ۲۰۵۰ دو برابر خواهد شد.

در این مدل ها تغییرپذیری توان تابشی خروجی خورشید نیز در نظر گرفته می‌شود. خورشید سیستمی پویاست و انرژی‌ای که به زمین می‌رسد با گذشت زمان تغییر می‌کند.

تغییر اقلیم پیش‌بینی ناپذیر و مفرط

دانش فعلی ما درباره اقلیم زمین به اندازه‌ای ناقص است که بدون تردید، گرم‌شدن زمین آثار غیرمنتظره‌ای در پی خواهد داشت. بعضی از این آثار کاملا پیش‌بینی ناپذیرند. بعضی دیگر را از لحاظ مفهومی می‌توان پیش‌بینی کرد، اما نقاط آستانه‌ای و نقاط اوجی وجود دارند و نمی‌دانیم چه زمانی به این نقاط می‌رسیم.

به عنوان مثال از یک نقطه اوج، ممکن است در حرکت نقاله اقیانوسی که گرما را به سرتاسر سیاره‌ی زمین انتقال می‌دهد، وقفه ایجاد شود. نقاله اقیانوسی گرما را از نواحی استوایی به بخش شمالی اقیانوس اطلس منتقل می‌کند. بخشی از این گرما به اتمسفر منتقل می‌شود و به گرم‌شدن اروپا و زمین‌های مجاور آن، تا میزان ۱۰ درجه سانتی‌گراد کمک می‌کند.

وقتی آب اقیانوس اطلس شمالی گرما را به اتمسفر انتقال می‌دهد، خود سرد می‌شود، به عمق می‌رود و به سمت جنوب حرکت می‌کند. آب سردتری که در حال پایین رفتن است، بخشی از کربن دی‌اکسید جو را با خود به عمق اقیانوس می‌برد و در آنجا، از طریق سازوکارهایی که آن‌ها را به طور کامل نمی‌شناسیم، عمده کربن آن جدا و ذخیره (ترسیب) می‌شود.

گرم‌شدن اقلیم، همراه با ذوب‌شدن یخ پهنه‌های آب شیرین گرینلند، ممکن است نقاله اقیانوسی را طی دوره‌ای کوتاه مثلا به اندازه یک دهه، تضعیف یا حتی آن را تعطیل کند. تغییرات ایجاد شده در نقاله اقیانوسی ممکن است موجب سردشدن چشمگیر اروپا، حتی با وجود گرم‌شدن اقلیم در نواحی دیگر، شود. به علاوه، نقاله اقیانوسی تضعیف شده مقدار چشمگیری کربن را در اقیانوس ترسیب نمی‌کند که به حلقه بازخورد مثبت خواهد انجامید؛ ذخیره کمتر کربن دی‌اکسید در اقیانوس به معنای وجود مقدار بیشتری کربن دی‌اکسید در جو است که خود موجب بیشتر گرم‌شدن اتمسفر می‌شود.

در سال ۲۰۱۴ پژوهشگران ناسا نتیجه گرفتند که بخش بزرگی از پهنه یخی غرب جنوبگان در حال درهم شکستن به صورتی ظاهرا برگشت‌ناپذیر، دست کم طی چند دهه آینده است. آبی که لبه پهنه یخی را گرم می‌کند، فقط آن را ذوب نمی‌کند، بلکه کل پهنه یخ را ناپایدار می‌سازد. چون پهنه یخی روی خشکی قرار دارد، هر مقدار از آن که ذوب شود موجب بالا آمدن سطح آب دریا در سراسر جهان می‌شود.

بخش‌هایی از آمریکای شمالی طی سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۱۴ زمستانی داشتند که به طور غیر معمول سرد بود و بسیاری از اقلیم‌شناسان آن را یکی از آثار تغییر اقلیم زمین تعبیر می‌کنند. در فصل زمستان، هوای سرد قطب‌ها ممکن است طبق الگوهای نامنظم به سمت استوا حرکت کند. این پدیده را **تاوه قطبی** می‌نامند. اختلاف دما بین قطب‌ها و استوا تعیین‌کننده مسافتی است که هوای سرد می‌تواند طی کند. طی چند دهه گذشته، قطب‌ها سریع‌تر از استوا گرم شده‌اند و این اختلاف دما کاهش یافته است. در نتیجه تاوه قطبی می‌تواند دما در عرض‌های میانی را به طور چشمگیری کاهش دهد، یعنی همان وضعیتی که شمال آمریکا در ماه‌های ژانویه و فوریه ۲۰۱۴ از سر گذراند.

در این مورد گرم‌شدن کلی اقلیم زمین به سرد شدن غیرعادی و کوتاه مدت زمین در ناحیه‌ای وسیع انجامید. همین نواحی، قبل و بعد از سرمای مفرط ناشی از تاوه قطبی، دمای تابستانی بالا و غیر عادی داشتند. مدت کوتاهی پس از ایجاد تاوه قطبی در شمال آمریکا، دما در ساحل غربی این کشور به میزانی بی سابقه در فصل بهار بالا رفت.

مدل‌های اقلیم برآمدهای قابل انتظار یا با بیشترین احتمال و گستره برآمدهای ممکن را پیش‌بینی می‌کنند، برآمدهایی که معمولا گزارش داده می‌شوند نشان‌دهند گستره‌ای است که مدل‌سازان حس می‌کنند به طور منطقی احتمال دارد شامل برآمد واقعی باشد. گاهی این گستره‌ها شامل بهترین مواردی‌اند که ممکن است تا حدودی مشکل‌ساز باشند و بدترین مواردی که ممکن است اختلالات جدی ایجاد کنند. مثلا افزایش دمای میانگین تابستانی به میزان ۰.۵ درجه سانتی‌گراد در بعضی نواحی ممکن است تفاوتی ایجاد نکند، اما ۴ درجه سانتی‌گراد افزایش دما قطعا پیامدهای جدی دارد.

تغییر اقلیم زمین به طور مستقیم یا غیرمستقیم، بر بسیاری از سیستم‌های فیزیکی و زیستی اثر می‌گذارد افزایش دما، جابه‌جایی زیستگاه‌های گیاهان و جانوران و بالا آمدن سطح آب دریاها. پیش‌بینی پژوهشگرانی که در حوزه اقلیم فعالیت می‌کنند، این است که این تغییرات در آینده ادامه خواهد یافت و انتظار تغییرات جدیدی را نیز دارند. به علاوه، این پژوهشگران در انتظار شگفتی‌هایی نیز هستند، تغییراتی که اطمینان دارند رخ می‌دهد، اما نمی‌توان آن‌ها را پیش‌بینی کرد.