عبدالله سیف
دانشگاه اصفهان
شماره مقاله: ۴۰۴

نظریه پسخوراندها و نوسانات اقلیمی با تأکید بر نقش مکانیزم پسخوراند گازهای گلخانه‌ای

Abdollah Seif

University of Isfahan

Theory of Feedbacks and Climatical Fluctuations with the Emphasis on the Role of Feedback Mechanism in Greenhouse Gases

The earth is considered as an element from cosmic systems and a member of solar system that ruling of various dynamical, physical and therodynamical rules are dominant on each part of it. Utilization from a samll part of electromagnetic waves of sun (half of one milliardth) has supplied thousands of more minor systems for the earth that climatic system between them has a very complex attitude.

Climatic sub-systems exchange together various elements and factors in different forms in a series of various levels with direct or reversed effects. These exchanges existed also in the past times, and the outcome of such exchanges has been climatic fluctuations that some of the climatologists attribute its reason to the algebraic or stochastic factors ruling on the cosmos, atmosphere and the earth.

This eassay tries to test the theory that the various internal feedback factors are responsible for the short - term climatic fluctuations and some times long - term climatic flutuations on the virtue of having rule and modern climatological methods (physics, dynamics, synoptics, systemical and modelling), and by seeking help from climatical scenarios and models, and methods for tracing climatic changes.

Numerous forms of feedback are controlling factor for balancing of elements and materials

(energy, temperature, moisture, albedo, momentum, elements, etc.). With positive and negative effects and its various displays in different spots on the earth surface between sub - systems and the chain of the surfaces involved in climate, and they are responsible for the change of direction in the exchange and balance of sub systems. Such mechanisms not only are regarded as internal controllers of climatic system, but they also regulate, fluctuate and make compatible the various climatical components.

In this essay, a group of greenhouse gases are surveyed including carbon dioxide, ozone, metan, vapour as well as feedback of temperature, ice, albedo, on the strength of direct measurements and models, fluctuation and feedback mechanism, and analyzes the role of anthropogenic factors activities as a positive feedback and destroyer of interactive attitude of involving components with the climate.

مقدّمه

اقلیم به عنوان سیستمی پیچیده شامل مؤلفه‌هایی با ماهیت و عملکردهای متفاوت است. در سطوح گوناگون پیوندی عمیق، ظریف و ناگسستنی بین اجزای مختلف اقلیم وجود دارد. در چنین سیستم باز و پویایی عناصر و عوامل مختلف، تأثیرات مستقیم یا معکوس بر یکدیگر می‌گذارند و نوسانات و تحولات اقلیمی در زمین را کنترل می‌کنند. از جمله ویژگیهای مهم سیستم آب و هوایی (اقلیمی) سلسله‌مندی، نوسان، ناپایداری، میل به تعادل پایا، دینامیکی و ترمودینامیکی است. این ویژگیها عامل اصلی در بروز پسخوراندهای گوناگون و به دنبال آن نوسانات اقلیمی در مقیاس سیاره‌ای، منطقه‌ای که بعضاً علت دوره‌های گرم و سرد شناخته می‌شوند ظهور یافته‌اند. با ظهور انسان ظرفیت و رفتار طبیعی پسخورهای درگیر با محیط دستخوش تغییر شده‌اند. این امر خود واکنشهای غیرقابل پیش‌بینی را در برابر سیستمهای آب و هوایی بدنبال دارد. در این زمینه (میشل، ۱۹۶۸)[1]، (چارنی، ۱۹۷۷)[2]، (کرولی، ۱۹۸۳)[3]، (لامب، ۱۹۸۹)[4]، (هندرسون ـ سلرز، ۱۹۹۶)[5] اشاراتی به فرایندهای پسخور در سیستم اقلیم و مدلها داشته و وجود چنین تأثیراتی را تأیید کرده‌اند. هدف از این تحقیق شناسایی مکانیسم سیستمهای آب و هوایی و عکس‌العمل سایر عناصر درگیر با محیط در برابر نوسان اقلیم و روند موازناتی و مبادلاتی ماده و انرژی در این سناریو می‌باشد. به عبارت دیگر با شناسایی مکانیسمهای مختلف پسخوراند و نتایج رفتاری هر کدام بر سیستم آب و هوا، فرصت ارزیابی،

1- Mitchel 2- Charney 3- Crowley 4- Lamb

5- Henderson , Sellers

پیشگویی و کنترل سیستم آب و هوا مهیا گردیده‌است. می‌توان عکس‌العملهای مثبت و منفی سیستم آب و هوایی را نسبت به تحولات طبیعی ناشی از تأثیر عامل انسان شناسایی کرد.

سیستم آب و هوا

بهترین دیدگاهی که قادر به تبیین رفتار پیچیده و تعاملی عوامل آب و هوایی و نظامهای درگیر با آن است همانا دیدگاه سیستمی است. چراکه نظارت چنین دیدگاهی (سیستم سالاری) در کنار اقلیم‌شناسی فیزیکی، دینامیکی، سینوپتیکی نتایج ارزنده‌ای را در جهت فهم ارتباطات اجزای درونی سیستم و دست دادن فرصتهای ارزیابی و پیشگویی اقلیم در گذشته، حال و آینده و در مجموع فهم کثرت و وحدت در نظام طبیعت به ما خواهد داد. سیستم آب و هوا را مجموعه‌ای از عناصر مرتبط به هم می‌توان تفسیر کرد که از جمله ویژگیهای آن پرتوسانی، پویایی، خودتنظیمی و تعادل‌گرایی است. جدول شماره ۱ پاره‌ای از ویژگیهای این سیستم را نشان می‌دهد.

جدول شماره ۱: ویژگیهای سیستم آب و هوا

اجزای اصلی	قانونمندی	عناصر و مواد مبادلاتی	نوع سیستمها	انواع چرخه‌ها	خصیصه‌های اصلی
هواکره	قوانین ماده	اشکال متعدد مواد	باز و پویا	گازی	تغییر و تبدیل
آب کره	قوانین انرژی و ترمودینامیک	اجامد، مایع، گاز، رسوبی)	گاسکید	شیمیایی	پرتوسانی
یخ کره	قانون گازها	انرژی و اشکال آن	چندسطحی	رسوبی	تعادل گرایی
زیست کره	قانون مومنتوم	تابشی	ساده	بیوژئوشیمیایی	(دینامیکی)
سنگ کره	قانون آنتروپی	گرمایی	پیچیده	مرکب	حساسیت
خاک کره	مکانیسم پسخوراند	شیمیایی	ارگانیکی	ترکیبی	تفاوت زمان پسخ
سرزمینهای دایم یخزده	معادله حرکت	جنبشی	غیرارگانیکی	چرخه‌های مختلط	تفاوت زمان تعادل
	معادله تداوم	پتانسیل	نظام‌گرا		خودگردانی
	معادله رطوبت	حرکت			خودتنظیمی
	قوانین نیوتن و کپلر	رطوبت			پویایی
		ابر			سازگاری
		باد و بارندگی			دارای آنتروپی
		گرمای نهان تبخیر			خودتغییری

شناسایی محیط و محدوده‌های واقعی سیستمهای اقلیمی بسیار دشوار است. چراکه گستردگی محیطش از طرفی سر بر نظامهای کیهانی و از طرف دیگر پا در تار و پود اقصی نقاط سطحی و داخلی زمین دارد. بنابراین در حوزه قلمرو چنین سیستم چند سطحی و مرکبی با معابری پرپیچ و خم و طولانی

و سلسله مراتبی خاص تبادل ماده و انرژی و اطلاعات انجام می‌پذیرد. ناظر چنین تحولاتی، حاکمیت قوانین خاص با ضمانت بیلان یک طرفه انرژی از سوی خورشید به سمت سیستم آب و هوا می‌باشد. بنابراین در تار و پود عالم طبیعت و از جمله زمین و اقلیم تغییر و قانونمندی حکمفرماست. سیستمهای آب و هوایی ضمن تغییر و تحول، از خود عکس‌العملهایی نشان می‌دهند. واکنش آنها به عواملی چون پیچیدگی، میزان ذخیره مواد و انرژی در هر کدام از سطوح، جایگاه سازمانی و سلسله مراتبی زیرسیستمها، تعداد و طول معابر انتقال ماده و انرژی، نوع عکس‌العملها، درجه پاسخ، آستانه‌های تحریک، زمان تعادل[۶]، خودتنظیمی و ثبات بستگی دارد و از نظر مکانی و فضایی به یک نسبت و همسنخ نمی‌باشد. گرچه سیستم اقلیم از جمله سیستمهای باز سازمان‌مند قلمداد می‌شود لیکن گستره‌ای از سیستمهای جزیی‌تر را در خود جای داده‌است که در مجموع به هم متصلند و ضمن قرارگرفتن در طول همدیگر نظامی هدفدار و به هم پیوسته را تشکیل می‌دهند. به عبارت دیگر با داشتن سلسله سطوحی متنوع در یکدیگر فرو رفته‌اند. تعادل‌گرایی (از نوع پایا، دینامیکی و ترمودینامیکی) یکی از شاخصهای بارز سیستم آب و هواست. گرچه سیستمهای اقلیمی دارای نوسانات متعددی هستند ولیکن مکانیسمهای پیچیده‌ای، تعادل‌گرایی را جهت موازنه انرژی بین خورشید، جو، زمین در حول یک میانگین برای سیستم اقلیم تدارک می‌بیند. انتقال انرژی به صورتهای مختلف (گرمای محسوس، گرمای نهان تبخیر، مومنتوم و رطوبت) بین نواحی که با مازاد و یا کمبود انرژی روبه‌رو هستند در قالب گردش عمومی جو صورت می‌گیرد. حالات مختلف موازنه انرژی بین خورشید و زمین و نوسان آن در نهایت دوره‌های گرم و سرد را برای زمین به دنبال خواهد داشت. گرچه سیستمهای اقلیمی فاقد تعادل حقیقی هستند و تعادل آنها نسبی و از نوع پایا و دینامیکی است، لیکن چنین تعادلهایی در حول یک میانگین نوسان دارد و حفظ این حالت نتیجه عملکرد پسخوراندهای منفی است. در مواردی که پسخوراند مثبت گردد تعادل دستخوش نوسان و انحراف می‌شود که مجدداً پسخوراندهای منفی روند سیستم را به حالت اوّلیه باز می‌گردانند. در سیستمهای اقلیمی میزان ضایع شدن انرژی (آنتروپی)[۷] معیاری جهت سنجش

۶- مدت زمانی را که سیستمهای آب و هوایی لازم دارند تا در مقابل بروز یک اختلال یا تشنج به تعادل مجدد دست یابند (این زمان برای اتمسفر ۱۱ روز، لایه مجاور سطح زمین ۲۴ ساعت، یخ پهنه‌ها ۳۰۰۰ سال، یخچالهای کوهستانی ۳۰۰ سال، لایه‌های اختلاط اقیانوس ۷ الی ۸ سال، آبهای عمیق ۳۰۰ سال و ...) (هندرسون - سلرز ۱۹۹۶).

۷- معیاری جهت سنجش بی‌نظمی است و بیانکننده مرتبه و حالتی است که در آن انرژی قادر به انجام کار نیست ←

بی‌نظمی به‌شمار می‌رود و قابل محاسبه است. میزان چنین بی‌نظمی در سیستمهای اقلیمی و سایر سیستمهای محیطی در کنترل سرعت تغییر، مبادلات انرژی و حرارت با سیستمهای مجاور و میزان ذخیره مواد و انرژی در سیستم است. افزایش بی‌نظمی در ارتباط مستقیم با کاهش انرژی در دسترس مستقیم است و طبق قانون دوم ترمودینامیک[۸] میزان آنتروپی در داخل سیستم آب و هوایی همیشه مثبت است، گرچه شدت عملکرد آن دارای نوساناتی در مدارات جغرافیایی و یا لایه‌های مختلف جوی است (پیکستو، ۱۹۹۱)[۹]. در سیستمهای اقلیمی دسته‌ای از فرایندهای غیرقابل برگشت از قبیل تابش خورشیدی و زمینی، ذوب برف و یخ، تبخیر، گرما، مومنتوم، تکاثف، فرسایش باد و ... روند افزایش بی‌نظمی (آنتروپی) را به دنبال دارند (پیکستو، ۱۹۹۱). به عبارت دیگر چنین فرایندهایی سبب کاهش انرژی در سیستم آب و هوا می‌گردند. میزان آنتروپی به دلیل (ماهیت کروی زمین، توزیع ناهمگن تابش، دما، رطوبت، خشکیها و آبها) دارای روند زمانی ـ مکانی مختلفی در عرضهای جغرافیایی و یا لایه‌های جو می‌باشد. جدول شماره ۲ و ۳ آنتروپی و میزان آن را در فرایندهای متفاوت آب و هوایی در اقصی نقاط جو و زمین نشان می‌دهد.

جدول شماره ۲: تولید آنتروپی برحسب (وات بر مترمربع درکلوین) توسط فرایندهای متفاوت آب و هوایی برای سیاره، منطقه استوایی (۱۵ درجه شمالی - جنوبی) و کلاهک قطب شمال (۷۰ درجه نیمکره شمالی) (پیکستو، ۱۹۹۱).

	جذب تابش خورشید	جذب تابش زمین	آزادشدن‌گرمای نهان تبخیر	گرمای محسوس	گرم شدن اصطکاکی	مجموع
سیاره	۲۵۸	۲۴	۲۹۸	۲	۷	۵۸۹
منطقه استوا	۳۳۵	۲۵	۴۳۰	۲	۷	۷۹۹
کلاهک قطبی	۵۶	۱۸	۶۲	۵	۷	۱۴۸

در واقع هنگامی که بی‌نظمی در سیستم به حداکثر خود و انرژی قابل دسترس به سیستم به حداقل میزان خود میل کند آنتروپی ماکزیمم به‌دست آمده و برای کاهش آنتروپی و افزایش نظم در سیستم باید از زیرسیستمی دیگر انرژی وارد شود آنتروپی می‌تواند به دو شکل منفی (پایدارنده) و مثبت (برهم زننده) سیستمها را تحت تأثیر قرار دهد (استراهلر، ۱۹۹۲).

۸- قانون‌دوم نرمودینامیک پیرامون‌توزیع و پخش انرژی است که این توزیع و پخش به‌صورتی برگشت‌ناپذیر تحول می‌یابد.

9- Peixoto

در مجموع آنتروپی خروجی از سیستم و آنتروپی لایه‌های اتمسفر از فرکانس بالایی برخوردار است. بزرگترین منبع آنتروپی براساس محاسبات و جدول شماره ۲ متعلق به جذب تابش خورشید و آزاد شدن گرمای نهان تبخیر در سیستم اقلیم می‌باشد.

جدول شماره ۳: شار آنتروپی (وات بر مترمربع درکلوین) در مرزهای اتمسفر، منطقه استوایی (۱۵ درجه شمالی ـ جنوبی) و کلاهک قطب شمال (۷۰ درجه نیمکره شمالی) (پیکستو، ۱۹۹۱).

	مرزهای جانبی	قسمت بالا	قسمت پایین	مجموع
سیاره	.....	-۸۸۴	۲۷۸	-۶۰۶
منطقه استوا	-۱۵۶	-۹۲۵	۲۵۶	-۸۲۵
کلاهک قطبی	۲۶۷	-۷۴۷	۳۰۵	۱۷۵

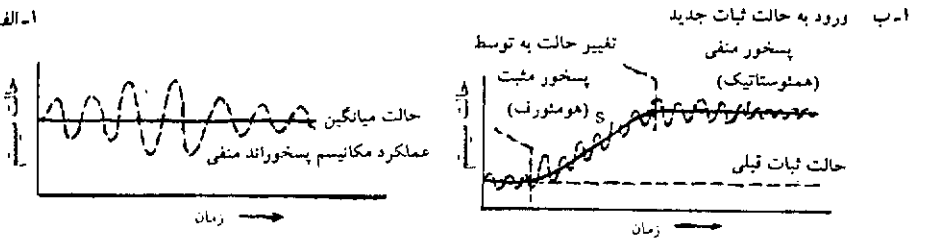
مفهوم پسخوراند

در این مقاله سعی شده از میان سلسله قوانین حاکم بر نظامهای آب و هوایی، بر مکانیسم پسخوراند تأکید شود. اگرچه سایر قوانین ترمودینامیکی و فیزیکی در این مکانیسم مستتر می‌باشد. در این جا به تشریح مفهوم و انواع رفتار مکانیسم پسخوراندها در سیستمهای اقلیمی اشاره می‌شود.

هرگاه خروجی یک سیستم مجدداً به خدمت ورودی سیستم درآید، به‌نحوی که خروجی بعدی را تشدید یا تضعیف نماید، چنین مکانیسمی را پسخوراند نامند. پسخوراند می‌تواند مربوط به انرژی، مواد و اطلاعات باشد. در یک تقسیم‌بندی اوّلیه پسخوراندها از نظر موقعیت به دو دسته تقسیم می‌شوند: پسخورهای بیرونی اقلیم (وابسته به واکنشهای برون‌سیاره‌ای از جمله تغییرات مداری زمین و سایر علل نجومی و کیهانی) و پسخورهای درونی اقلیم که وابسته به واکنشهای درون سیاره‌ای می‌باشد. تأکید ما نیز در این مقاله بیشتر بر عملکرد پسخورهای درونی اقلیم است. پسخوراند از نظر عملکرد به دو نوع مثبت (ناپایدار) و منفی (پایدار) تقسیم می‌شود.

پسخوراند منفی سیستم را در حالتی پایدار و شرایطی میانگین نگه می‌دارد و فرایند خودگردانی و ثبات را به سیستمهای باز ارزانی می‌دارد. (نمودار شماره ۱ـ الف). پسخوراند مثبت باعث تغییراتی در سیستم می‌شود و آن را از حالت ثبات خارج نموده و جهت روند مبادلاتی انرژی و ... را در سیستم تغییر می‌دهد. بنابراین خاصیت پسخور مثبت تغییردهندگی و برهم زنندگی می‌باشد و در نهایت به سیستم حالت قهقرایی و حاکم نمودن فرایندها و تغییرات غیرقابل برگشت می‌دهد (نمودار شماره ۱ـ ب).

مکانیسمهای پسخور منفی قادرند تغییرات سیستم را که ناشی از عملکرد پسخور مثبت می‌باشد کاهش دهند. لذا از آنها به‌عنوان مکانیسمهای کنترل‌کننده یاد می‌شود. اثر این مکانیسم (پسخور منفی) بازگرداندن سیستم‌به حالت اوّلیه‌است که چنین وضعیتی در نمودار شماره۱ (قسمت ب) به خوبی نشان داده‌شده‌است.



نمودار شماره ۱:الف) سیستم بازی که با گذشت زمان یک حالت ثابت (میانگین) دارد پسخور منفی نوسانات رادراطراف‌حالت‌ثابت تنظیم‌می‌کند(در شرایط میانگین نگه‌می‌دارد) ب)پسخور مثبت حالت قدیم سیستم را در وضعیت جدیدقرارمی‌دهدکه‌مجدداً توسط عملکردپسخوردمثبت ثبات‌به‌سیستم بازمی‌گردد (هاریسون، ۱۹۹۶).

اثر عملکرد پسخوراندها به صورت مجزا می‌تواند بسیار قوی باشد ولی مکانیسم پسخوراند در سیستمهای آب و هوایی غالباً به صورت ترکیبی و پیچیده عمل می‌کند (هندرسون ـ سلرز، ۱۹۹۶). همین پیچیدگی منجر به تعدیل، تضعیف یا تقویت در داخل سیستم آب و هوا شده‌است. درجه پیچیدگی و طول معابر پسخورها نیز در کنترل ماهیت و اندرکنش مؤلفه‌های سیستمهای آب و هوایی می‌باشد. با این وصف عملکرد عناصر متفاوت در مبادلات سطوح پسخوراند سبب حاکمیت نوعی واکنش خاص و غلبه نوعی پسخوراند شاخص در مقیاس سیاره‌ای، منطقه‌ای می‌گردد.

فرضاً مکانیسم پسخور دما - یخ - آلبدو در عرضهای بالای دو نیمکره غلبه دارد یا پسخور بین دمای اتمسفر و شوری اقیانوس تنها در مورد جوی که با سطح اقیانوس تماس دارد شدید می‌باشد (هندرسون ـ سلرز، ۱۹۹۶).

گرچه پسخوراندها به عنوان کنترل‌کنندگان درونی سیستم آب و هوا قلمداد می‌شوند لیکن مقیاس عملکردشان در کنترل زمان و مکان می‌باشد. اگر در سیستم هیچ‌گونه پسخوراندی وجود نداشته باشد تغییر دمای سیستم تنها متأثر از تغییر انرژی ورودی خواهد بود. در صورتی‌که عملکرد متنوع پسخورهای مختلف دمای نهایی سیستم را (خروجی سیستم) طبق معادله (۱) تحت تأثیر قرار می‌دهند (هندسون ـ سلرز، ۱۹۹۶).

معادله (۱) $\Delta T_{final} = \Delta T + \Delta T_{feedbacks}$

در این معادله ΔT = تغییرات دمایی سیستم، $\Delta T_{feedbacks}$ = تغییرات دمایی پسخوراندها، ΔT_{final} = تغییرات نهایی دما،

بنابراین در چنین حالتی مقدار درجهٔ حرارت نهایی سیستم با آشفتگیها و عملکرد ترکیبی سایر پسخوراندها در ارتباط می‌باشند. معادله دوم با توجه به فاکتور پسخوراند تدوین شده‌است و عبارت‌است از:

معادله (۲) $\Delta T_{final} = f \ \Delta T$

این فاکتور در ارتباط با مازاد انرژی سیستم می‌باشد و فاکتور f با استفاده از تحلیل بهره یک سیستم الکترونیکی به طریق زیر محاسبه می‌شود.

معادله (۳) $f = \frac{۱}{۱ - \frac{۰}{۱}} \qquad f = ۱ / (۱ - g)$

فاکتور پسخورد (f) ضرب‌پذیر و یا جمع‌پذیر نمی‌باشد، لذا یک پارامتر محسوب نمی‌شود. فاکتور g که یک فاکتور افزاینده می‌باشد به پارامتر λB (آلبدوی کل سیستم آب و هوایی) وابسته است. فاکتور مهم دیگر تحت عنوان فاکتور تغییر شار تابش (ΔQ) از طریق معادله زیر محاسبه می‌شود.

معادله (۴) $C [\delta (\Delta T) / \delta t] + \lambda \Delta T = \Delta Q$

ΔQ = تغییر شار تابش، $\lambda \Delta T$ = تغییر دمای سیستم، $\delta (\Delta T) / \delta t$ = تغییرات دیفرانسیل دما نسبت به زمان، C = ضریب دینامیکی درونی سیستم یا ظرفیت گرمایی سیستم می‌باشد.

این معادله اگرچه در ارتباط با فهم مکانیسم پسخوراند مهم می‌باشد،لیکن به‌عنوان یکی از فاکتورهای مهم در تبیین دقت و تغییر حساسیت مدلهای پیچیده آب و هوایی قلمداد می‌شود.

پارامترهای بعدی که در تبیین حالات متعدد پسخوراند می‌توانند مطرح شوند λB (آلبدوی سیاره زمین)، λ_{total} (مجموع پسخوراندهای مختلف به انضمام آلبدوی زمین می‌باشند).

معادله (۵) $\lambda_B = ۴ \delta T^{۳}_{e} = ۳/۷۵ Wm^{-۲} K^{-۱}$

λ_B = ضریب پسخوراند زمین، δ = ضریب ثابت استفان بولتزمان برابر با $۵/۶۷ \times ۱۰^{-۱۲} W/Cm^{۲}/K$، T_e = دمای مؤثر زمین.

از آن جا که زمین یک جسم سیاه ایده‌آل نیست مقدار ضریب پسخوراندی که از معادله (۵) به‌دست می‌آید نمی‌تواند دقیق باشد. از سوی دیگر پسخوراندهای دیگری نیز در سیستم اقلیم دخالت دارند. بنابراین‌در لاندای کل (λ_{total}) پارامترهایی از قبیل آلبدوی سیاره زمین (λ_B) و مجموع پسخوراندهای مختلف در سیستم آب و هوا دخالت دارند و در مجموع ضریب پسخوراند را در کنترل خواهنداشت.

معادله (۶) $$\lambda_{total} = \lambda_B + \lambda_{water\ vapour} + \lambda_{ice\ -\ albedo}$$

$\lambda_{water\ vapour}$ = پسخوراند بخار آب، $\lambda_{ice\ -\ albedo}$ = پسخوراند آلبدو

بنابراین λ_{total} وابسته به λ_B و هر دو وابسته به فاکتور g می‌باشد.

معادله (۷) $$g = \frac{1 - \lambda_{total}}{\lambda_B}$$

معادله (۸) $$F = \frac{\lambda_B}{\lambda_{total}}$$

برای فهم تغییر درجهٔ حرارت و روابط بین ورودی و خروجی سیستم و ترسیم شکل نموداری پسخوراند از رابطه زیر استفاده می‌شود:

معادله (۹) $$\Delta T = \frac{\Delta Q}{\lambda}$$

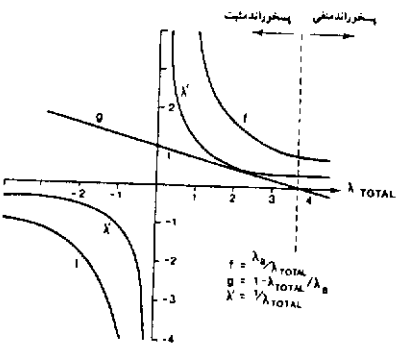
ΔT = ورودی سیستم ΔQ = تغییر شار تابش خروجی λ = ضریب پسخوراند

معادله (۱۰) $$\lambda = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

بنابراین با داشتن مقادیر مختلف λ_{Total} (مجموع پسخوراندهای مختلف) و λ_B (آلبدوی کل سیستم اقلیم) و اعمال پسخوراندهای متعدد، هم‌آرایی متنوعی شکل می‌گیرد. اگرچه پارامترهای مختلف می‌توانند حالات متعدد سیستم را در رابطه با پسخوراند در اشکال مختلف ترسیم نمایند. همارایی نمودار شماره ۲ براساس معادلات (۶ و ۵) و سایر پارامترها ترسیم شده است و تنها دو پسخوراند بخار آب و آلبدوی یخ به همراه λ_B یا آلبدوی زمین در نظر گرفته شده‌است.

برای درک نقش پسخوراندها در تغییرات درونی سیستم به بیان یک نمونه می‌پردازیم. همان‌طور که می‌دانید در شرایط کنونی مقدار آلبدوی یخ ۰/۶ وات بر مترمربع بر کلوین و مقدار آلبدوی بخار آب ۱/۷- وات بر متر مربع بر کلوین است و نیز مقدار کل پسخوراند سیستم ۱/۴۵ وات بر مترمربع کلوین خواهد شد. با توجّه به این که با دو برابر شدن دی‌اکسیدکربن مقدار انرژی برابر ۴/۲ (وات بر مترمربع) برآورد می‌شود، لذا تغییر دمای ناشی از دو برابر شدن دی‌اکسیدکربن برابر با $\Delta T = \frac{۴/۲}{۱/۴۵} = ۲/۹$ خواهد بود (هندرسون ـ سلرز، ۱۹۹۶).

اگرچه هرکدام از انواع پسخوراندهای درگیر با سیستم آب و هوا دارای تأثیرات متفاوت می‌باشند. لذا عکس‌العمل اجزای مختلف درگیر با چنین مکانیسمی تعدد، ترکیب و بعضاً عملکرد پیچیده پسخوراند را به دنبال خواهد داشت.



نمودار شماره ۲:

اقلیم شناسان جهت درک عملکرد سیستم آب و هوا در گذشته، حال و آینده به ساختن انواع مدلهای دینامیکی و ... دست می‌زنند (مدل موازنه انرژی[10]، مدلهای گردش عمومی جو[11] و سایر مدلها). بدیهی است که در این راستا نه تنها عناصر و عوامل مختلف آب و هوایی، بلکه از روابط تعاملی و مکانیسمهای متنوع پسخوراند کمک گرفته شده است تابتوانند صحت، دقت و ظرافت مدلها را جهت پیشگویی و پیش‌بینی بالا ببرند. حال هر چه تعداد مکانیسمهای پسخور بیشتری را در نظر بگیرند مسلماً نتایج دقیق‌تر و مطلوبتری را رقم خواهند زد. خصوصیات متعدد پسخوراند در جدول شماره ۴ تنظیم گردیده‌است. حاصل عملکرد پسخوراندها (مثبت یا منفی) کنترل سیستم، نوسان در عناصر ورودی و خروجی، پایداری و ناپایداری می‌باشد.

زمین و سیستم آب و هوا از گذشته‌های دور تا به حال پسخوراندهای متعدد و متنوعی را تجربه نموده‌است، لیکن ماهیت، نوع عملکرد و نتیجه آن را می‌توان به علل و عوامل مختلفی نسبت داد. بنابراین ارتباطات پیچیده بین متغیرهای آب و هوایی و زیرسیستمهای درگیر با محیط سبب شده است که چنین روابط ظریفی به آسانی ملموس نباشد. چه بسا بسیاری از پسخوراندهای درگیر با محیط و آب و هواکه تا به حال ناشناخته باقی مانده‌است. سیمای ظهور، عملکرد و نتایج مکانیسم یک پسخوراند به علل مختلفی (از جمله ماهیت و حساسیت و فرایندهای کنترل‌کننده در هر ناحیه و ...) متفاوت می‌باشد. به عنوان مثال مکانیسم آلبدو و پسخوراندهایش بر روی یخ پهنه‌های قاره‌ای، اقیانوسی، شنزارها، آب و ... نه تنها متفاوت می‌باشد، بلکه نتایج مختلفی را در مکانهای متعدد به دنبال خواهد داشت. به عبارت دیگر زمانی که صحبت از پسخوراند و در ارتباط با آلبدو می‌شود در مکانهای مختلف ماهیت اجزا و نتایج این پسخور یکسان نمی‌باشد. نمونه‌ای از پسخوراند مثبت آلبدو ـ یخ، دما در نمودار شماره ۳ آورده شده‌است. نکته دیگر آنکه مکانیسمهای عملکرد پسخور به‌صورت مثبت نمی‌توانند تا بی‌نهایت ادامه یابد و منجر به شرایطی شوند که تاکنون روی زمین مشاهده نشده‌است، بلکه مکانیسم پسخور منفی و روابط تعاملی بین سیستمهای مختلف از طرفی سرعت و جهت این مکانیسمها راکنترل می‌کنند

10- EBM (Energy Balance Models) 11- GCM (General Circulation Models)

و از طرف دیگر خودتنظیمی و تعادل نسبی را به سیستم آب و هوا ارزانی می‌دارند. شواهدی در دست است که دورانهای بحرانی و آرامش حاکم بر زمین، مکانیسم عمل پسخوراندها را تشدید یا تضعیف می‌نموده‌است (کرولی، ۱۹۸۳)[۱۲] و در طی این ادوار امکان ایجاد یا تغییر مسیر یا از بین رفتن چند فرایند پسخورکننده وجود داشته و به دنبال آن در مقیاس منطقه‌ای و یا سیاره‌ای نوساناتی بر اقلیم و سیستم زمین اعمال می‌شده‌است. در نتیجه بین پسخور مثبت و منفی در سیستم اقلیم به‌طور متوسط موازنه وجود دارد.

زمین از گذشته تاکنون میزبان ترکیبات و عناصر متعددی بوده‌است بسیاری از این ترکیبات را هزاران مرتبه با ضمانت جریان یکطرفه انرژی از بستر محیطها و مؤلفه‌های مختلف (آب‌کره، زیست‌کره، خاک‌کره، یخ‌کره، سنگ‌کره، زمینهای دایماً یخ زده و...) به‌صورت چرخه‌ای (گازی، مایع، رسوبی، جامد، شیمیایی، بیوژئوشیمیایی و...) از خود عبور داده‌است. بنابراین ماهیت عناصری که وارد مدار پسخوراند می‌شود متفاوت و متعدد می‌باشند. (از قبیل پسخورهای کیهانی، پسخورهای تابشی، پسخورهای زیستی، پسخورهای ترموهالینی و...) تا به حال ۳۰۰۰ نوع ترکیب اتمسفری شناخته شده‌است و نزدیک به ۲۰ گاز اتمسفر دارای خاصیت گلخانه‌ای است، که برخی از آنها از صادرات جدید انسانی به اتمسفر قلمداد می‌شوند. در این جا برآنیم که پسخورهای ملموس‌تر دروتی سیستم اقلیم را تشریح نماییم.

دی‌اکسیدکربن و پسخوراندهایش (گازی، آب و هوایی، زیستی، آنتروپوژنیکی)

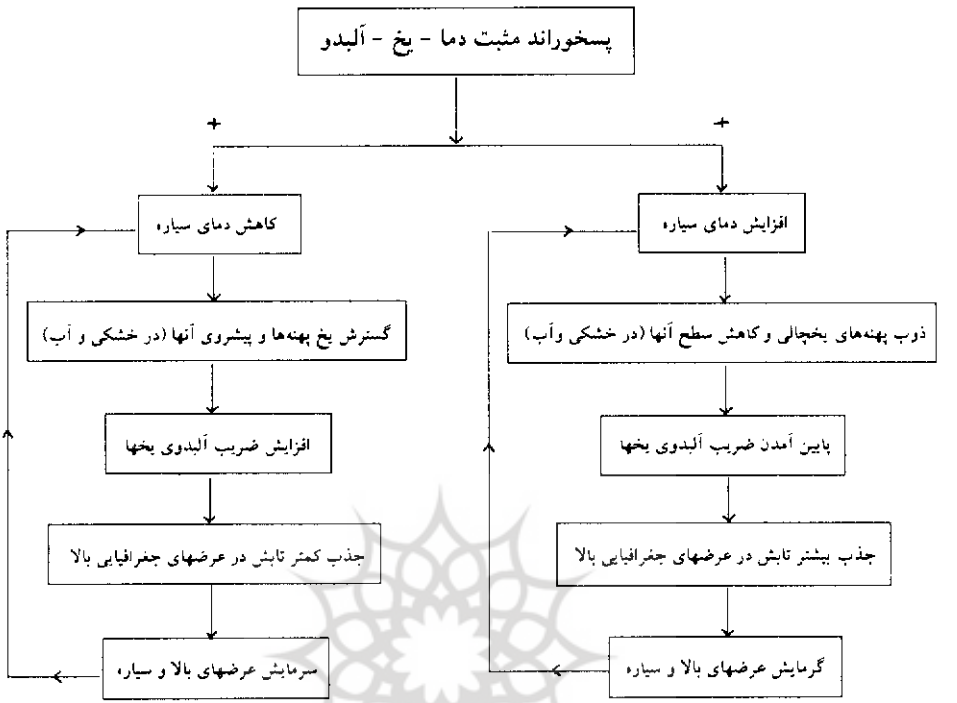
کربن به اشکال مختلف (دی‌اکسیدکربن، متان، منواکسیدکربن، کربناتها، ترکیبات آلی و ...) از معدود گازهای اتمسفری است که در مدار پسخوراندهای متعددی از قبیل گازی، زیستی، آب و هوایی، شیمیایی، آنتروپوژنیکی شرکت دارد. این عنصر که بین مؤلفه‌های مختلف سیستم آب و هوا و زمین (اقیانوس، زیست‌کره، سنگ‌کره، خاک‌کره و ...) در مبادلات مختلف به چرخه درمی‌آید و نسبت ذخیره‌اش بین زیرسیستمهای درگیر با آب و هوا و زمین مساوی توزیع نگردیده است، دارای غلظتی برابر با ۰/۰۳ درصد در اتمسفر (معادل ۷۰۰ میلیارد تن) است. این در حالی است که در اقیانوس و خاک‌کره به ترتیب ۵۰ و ۴۰ برابر ذخیره اتمسفر، کربن نهفته داریم. بنابراین تبادلات دی‌اکسیدکربن بین اتمسفر، اقیانوس، اکوسیستمهای گیاهی، سیستم خاک و صادرات انسانی به صورت مکانیسمهای پسخوراند و رفتار تعاملی صورت می‌پذیرد.

12- Crowley

جدول شماره (۴) : مکانیسم پسخوراندها، مقیاس، نوع، سطح عملکرد، عوامل کنترل کننده و نتایج حاصل از حاکمیت آنها

(تهیه و تنظیم : عبداله سیف، ۱۳۷۵)

انواع پسخوراندها	محیط انجام پسخوراند	سطح عملکرد پسخوراند	مقیاس عملکرد پسخوراند	نوع عملکرد پسخوراندها	عوامل کنترل‌کننده شدت عملکرد پسخوراند	نتایج حاصل از شناخت مکانیسم پسخوراند
پسخوراندهای بیرونی اقلیم	گاز با گاز	اقیانوس با اتمسفر	سیاره‌ای	مثبت یا برهم‌زننده	تفاوت در حساسیت سیستمهای عرضهای مختلف	- پسخوراندها مسؤول نوسانات اقلیمی
پسخوراندهای درونی اقلیم	جامد با گاز	اتمسفر با بیوسفر	منطقه‌ای	منفی یا پایدارنده	ـ اختلاف زمان پاسخ، زمان تعادل، زمان تأخیر پارامترهای درگیر با پسخوراند	ـ تسهیل فهم روابط پیچیده سلسله سطوح سیستم اب‌وهوا
پسخوراندهای بیوفیزیکی	گاز با مایع	اتمسفر با پدوسفر	محلی		ـ تعدد سطوح عملکرد و طول معیار موازنه‌ای پسخوراندها	ـ تعریف استراتژی مقابله با محیط در راستای توسعه پایدار
پسخوراندهای گازی	نمک	اتمسفر با کرایوسفر			ـ تعداد و نوع عناصر به کار گرفته در مکانیسم پسخوراند	بالابردن ضریب دقت و صحت مدلها (RCE.BM.GCM....)
پسخوراندهای شیمیایی	آلبدو	اتمسفر با لیتوسفر			ـ تفاوت در ماهیت زیرسیستمها درگیر با اقلیم (اتمسفر، بیوسفر، هیدروسفر ...)	ـ فهم بهتر رفتار سیستم زمین در گذشته، حال و آینده در ترکیب با مدل
پسخوراندهای آب‌وهوایی	دما	سطوح داخلی سیستمهای جداگانه			ـ میزان ذخیره، فرزی و مواد و عناصر دو هر کدام از زیرسیستمهای پسخورشونده	ـ درک میزان حساسیت، ناپایداری، برنوسانی، بی‌ثباتی حلقه‌های پسخور
پسخوراندهای زیستی	ابر					ـ شناخت رابطه عملکرد پسخوراندها با عرضهای جغرافیایی
پسخوراندهای دینامیکی	تولید	ترکیب سطوح با یکدیگر				ـ شناخت ویژگیهای سیستمهای باز و کاسکید
پسخوراندهای ترمودینامیکی	تجزیه	سطوح خارجی با کیهانی				ـ شناخت روابط و قانونمندیهای آن
پسخوراندهای ترموهالینی	تنفس					ـ پسخور منفی نقش کنترل‌کننده، پایدارنده، تنظیم‌کننده، بازگرداننده به حالت اولیه
پسخوراندهای آنتروپوژنیکی	تابش					ـ پسخور مثبت نقش برهم زننده، قهقراءدهنده
پسخوراندهای ترکیبی	یخ					ـ پسخور منفی فرایند خودگردانی را به سیستمهای بازار ژنی می‌دارد
.....	شتزار					ـ ترکیبی عمل نمودن پسخوراندها با یکدیگر (وجود موازنه بین پسخورهای مثبت و منفی در یک حالت میانگین)
	مردابها					**ـ پسخور منفی سیستم را در یک حالت ثبات و میانگین نگه می‌دارد.**
	آتشفشانها					
	هوا ویزه‌ها					
	دره‌ها					



نمودار شماره ۳: نمونه‌ای از عملکرد پسخوراند دما - یخ - آلبدو را در دو حالت به صورت مثبت نشان می‌دهد.

اهمیت مخازن ذخیره‌کننده کربن در ارتباط با مکانیسمهای پسخوراند و گرمایش جهانی می‌بایست به‌طور جدی‌تری مورد توجه قرار گیرد. تأثیرات CO_2 از طریق مکانیسم پسخوراند بر اقلیم وابسته به سرعت مبادله، درصد ذخیره در مؤلفه‌های اقلیم و زمین، دوره حیات اتمسفری، میزان غلظت، باندهای جذبی اتمسفری، زمان تعادل، زمان پاسخ و ... است و دارای روند تغییرات زمانی - مکانی در مقیاس شبانه‌روز، فصل، سال و بلندمدت در سیستمهای درگیر با آب و هوا و بطور اخص در اتمسفر می‌باشد. برخورداری CO_2 از خاصیت بالای گلخانه‌ای به همراه باندهای جذبی متفاوت حدود ۵۰ درصد اثر گلخانه‌ای را به خود اختصاص می‌دهد. به عبارت دیگر دی‌اکسیدکربن در برابر ورودی انرژی کوتاه موج خورشید شفاف و غیرحساس است و در مقابل جریان تابش موج بلند زمین‌تاب حساس می‌باشد و آنها را جذب نموده و دمای لایه‌های پایین اتمسفر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. حیات

اتمسفری CO2، ۵۰ الی ۲۰۰ سال می‌باشد، لیکن دارای زمان پاسخ بسیار طولانی است. بنابراین در کشاکش مبادله و ذخیره در مؤلفه‌های درگیر با اقلیم، نوسانات و تحولات اقلیمی و زیست محیطی را سبب می‌شود. از این‌رو نوسانات اقلیمی را می‌توان معلول تغییر غلظت این گاز مخصوصاً در اتمسفر دانست. به عبارت دیگر مبادله کربن در طول تاریخ زمین بین زیرسیستمهای مذکور وجود داشته است. سرعت مبادلات کربن در کنترل دوره‌های بحرانی و آرامش زمین و بعضاً سایر علل تغییرات اقلیمی بوده‌است و هرگاه موجودی و غلظت CO2 در اتمسفر بالا می‌رفته، گرمایش سیاره‌ای را به دنبال داشته‌است.

(دلماس، ۱۹۸۱)، (پلاس، ۱۹۸۱) و (فایور، ۱۹۹۳) با آنالیز حبابهای هوای محبوس در مغزه‌های یخی قطب جنوب و سایر نقاط دنیا (گرینلند، قطب شمال و ...) متفق‌القولند که در طی ادوار گذشته تغییرات اقلیم همسو با تغییرات CO2 بوده‌است و دوره‌های سرد مقارن با کاهش و دوره‌های گرم مقارن با افزایش CO2 موجود در جو بوده‌است. آنان اظهار می‌دارند که در طی دوره‌های یخبندان در ۲۰ هزار سال گذشته سطح دی اکسید کربن ۳۰ الی ۵۰ درصد کمتر از سطح قبل از انقلاب صنعتی بوده‌است (گودی، ۱۹۹۲)[13]. نمودار شماره ۴ روند تغییرات دو عنصر گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن و متان را با دمای زمین نشان می‌دهند. در این نمودار روند تغییرات دو عنصر گلخانه‌ای با دمای زمین مقایسه شده‌است. چنانچه مشاهده می‌شود این تغییرات دارای همسویی یکسانی است. این در حالی است که جدول شماره ۵ مقایسه روند تغییرات غلظت CO2 از ۱۶۰ هزار سال گذشته را تا سال ۲۱۰۰ میلادی با استناد بر تحلیل مغزه‌های یخی و سنجشهای مستقیم و مدلها نشان می‌دهد.

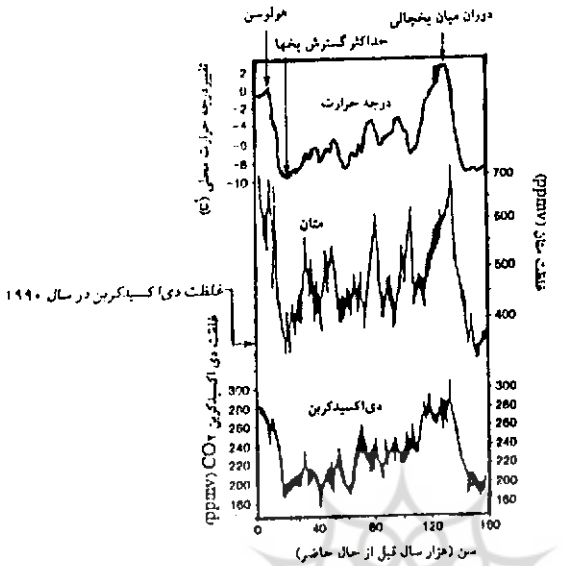
براین اساس از ۱۶۰ هزار سال گذشته تا سال ۱۸۵۰ میلادی میزان نوسانات غلظت CO2، ۹۰ پی . پی . ام بوده است، در حالی که از ۱۸۵۰ میلادی تا ۱۹۹۵، حدود ۷۳ پی . پی . ام به غلظت آن اضافه شده‌است. این امر خود ناشی از انقلاب صنعتی و صادرات آنتروپوژنیکی سوختهای فسیلی به جو می‌باشد. این روند افزایشی با استناد به سناریوها و مدلهای اقلیمی تا سال ۲۱۰۰ به حدود ۶۰۰ پی .پی. ام خواهد رسید. یعنی از سال ۱۸۵۰ تا ۲۱۰۰ میلادی انسان ۳۲۰ پی. پی. ام غلظت CO2 اتمسفر را افزایش خواهد داد.

در نتیجه با چنین رویداد عظیمی عملکرد CO2 به شدت وارد مدار پسخوراند مثبت شده‌است.

13- Goudie

نمودار شماره ۴: تحلیل هوای محبوس شده در مغزه یخی قاره قطب‌جنوب را نشان می‌دهد.

غلظتهای متان و دی‌اکسیدکربن ارتباط نزدیکی با حرارتهای محلی در طول ۱۶۰۰۰۰ سال گذشته تا به حال داشته‌اند. در ضمن غلظت دی‌اکسیدکربن در سال ۱۹۹۰ اشاره شده‌است. درجه حرارتها به توسط اندازه‌گیری قسمت دیتریوم در یخ ترسیم گردیده‌اند (گودی، ۱۹۹۲).



جدول شماره ۵: مقایسهٔ تغییرات روند غلظت CO2 را از ۱۶۰ هزار سال گذشته تا سال ۲۱۰۰ میلادی (سیف، ۱۳۷۶)

سال	۱۶۰ (هزارسال پیش)	۱۸۵۰ م	۱۹۹۵ م	۲۰۵۰ م	۲۱۰۰ م
غلظت CO2 به واحد PPM	۱۹۰	۲۸۰	۳۵۳	۴۸۰	۶۰۰
میزان نوسان غلظت ppm	۹۰	۷۳	۲۴۷	۳۲۰	

از یک طرف دمای زمین بالا می‌رود و از طرف دیگر پتانسیل و ذخایر CO2 در اقیانوسها، دریاها، باتلاقها، پرمافروست، خاک و اکوسیستمهای گیاهی تحریک می‌شود و مجدداً روند نوسانات به توسط کنترل کنندگان درونی سیستمها (پسخورهای منفی) تنظیم می‌گردد. در راستای این تعادل مجدد بشر تاوان گرانبهایی را از نظر اقتصادی، اجتماعی، زیست محیطی، سکونتگاهی و ... خواهد پرداخت. نمودارهای شماره ۵ و ۶ پسخوراند CO2 را در ارتباط باگرمایش جهانی و به شکل مثبت نشان می‌دهد. دراین دو نمودارچگونگی تأثیر افزایش CO2 بر واکنش و رفتار بخار آب، سیستم خاک، بیوسفر و... نشان‌داده شده‌است.نقش CO2 در سایرپسخوراندهاازجمله پسخورهای‌زیستی،تابشی و... نیز مشهود است.

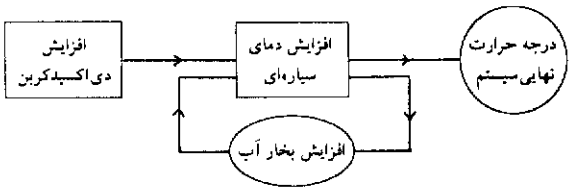
پسخوراند متان CH4

متان یکی از گازهای سبک است و به عنوان یک گاز گلخانه‌ای شناخته می‌شود که در روند گرمایش جهانی در جذب امواج بلند زمینی دخالت دارد. این گاز با جایگاهی متفاوت (مقداری در جو، مقداری در پرمافروست و خاک و ...) تحت تأثیر فعالیتهای شیمیایی جو از جمله هیدروکسیل قرار می‌گیرد و افزایش آن منجر به کاهش تراکم هیدروکسیل HO می‌شود و بالعکس، کاهش آن، افزایش هیدروکسیل را بدنبال دارد. مدلها روند افزایشی این گاز را قبل از انقلاب صنعتی تا به حال نشان می‌دهند. غلظت این گاز در قبل از انقلاب صنعتی ۰/۸ ppmv و در حال حاضر ۱/۷۴ ppmv می‌باشد. منابع تولید این گاز سخت تحت تأثیر فعالیتهای طبیعی و انسانی قرار می‌گیرد (مردابها، شالیزارها، سوزاندن بیوماس، فعالیت موریانه‌ها، ذوب پرمافروست، فعالیت باکتریهای بدون هوازی در اکوسیستمهای آبی و ...). اگرچه دوره حیات اتمسفری این گاز حدوداً ۱۰ سال است، لیکن در روند افزایش گرم شدن زمین مؤثر می‌باشد و کلاً در پسخوراند شیمیایی، آب و هوایی و پسخوراندهای آنتروپوژنیکی قرار دارد. رابطه غلظت متان با دوره‌های سرد و گرم چنین تبیین می‌شود که طی دورانهای یخچالی سرزمینهای مرطوب از جمله مردابها و باتلاقها واقع در عرضهای بالا که مخزن اصلی گاز متان هستند توسط یخها و پرمافروست پوشش داده‌می‌شوند و در دوره‌های بین‌یخچالی، روند گرما افزایش می‌یابد و تنفس خاک و باتلاقها و توربزارها و نیز ذوب یخها و پرمافروست را سبب می‌گردد، در نتیجه متان آزاد می‌شود.

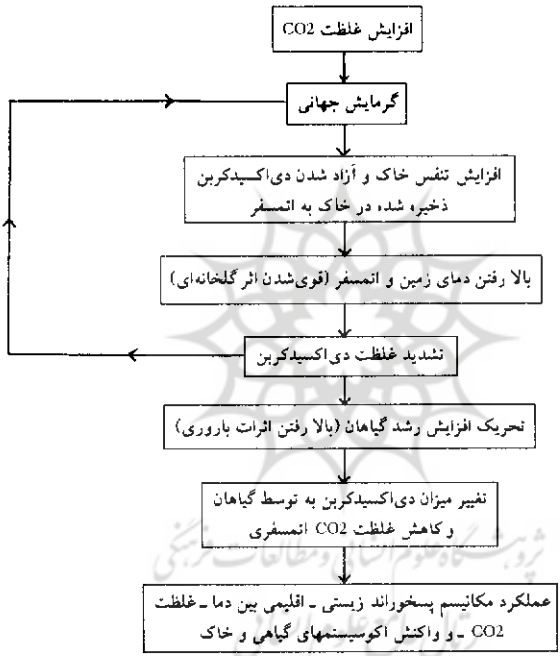
پسخوراند شیمیایی هیدروکسیل (HO)

اگرچه تولیدات هیدروکسیل وابسته به واکنشهای پیچیده جو و ازن تروپوسفر است، لیکن بسیاری از فعل و انفعالات اتمسفری به نحوی به واکنشهای هیدروکسیل وابسته‌اند.

هیدروکسیل (HO) به عنوان یک پالاینده قوی جوی و از جمله گازهایی بشمار می‌آید که هم در پسخوراند شیمیایی و اقلیمی و هم به عنوان یک گاز گلخانه‌ای مطرح است. هیدروکسیل (HO) در چرخه‌های متعدد شیمیایی وارد می‌شود. از طرفی میزان عکس‌العمل این گاز در مقابل منواکسید و متان می‌باشد. هرگاه غلظت هیدروکسیل (HO) در ترکیبات کم شود در مقابل غلظت CO (منواکسید) و CH4 (متان) زیاد می‌شود. بنابراین به نحوی کنترل متان به عنوان یک گاز گلخانه‌ای با غلظت هیدروکسیل به صورت معکوس قابل بررسی است. از طرفی پاره‌ای عناصر و ترکیبات اتمسفری در جو از قبیل CO، SO2، NO، CH2 بر غلظت هیدروکسیل اثر می‌گذارند. با این همه از متان به عنوان یک گاز گلخانه‌ای که بر روند گرمازایی زمین بسیار مؤثر است یاد می‌شود.



نمودار شماره ۵ :



نمودار شماره ۶:

نمودارهای فوق نمونه‌هایی از حلقه‌های پسخوراند CO2 را در رابطه با گرمایش جهانی نشان می‌دهد.

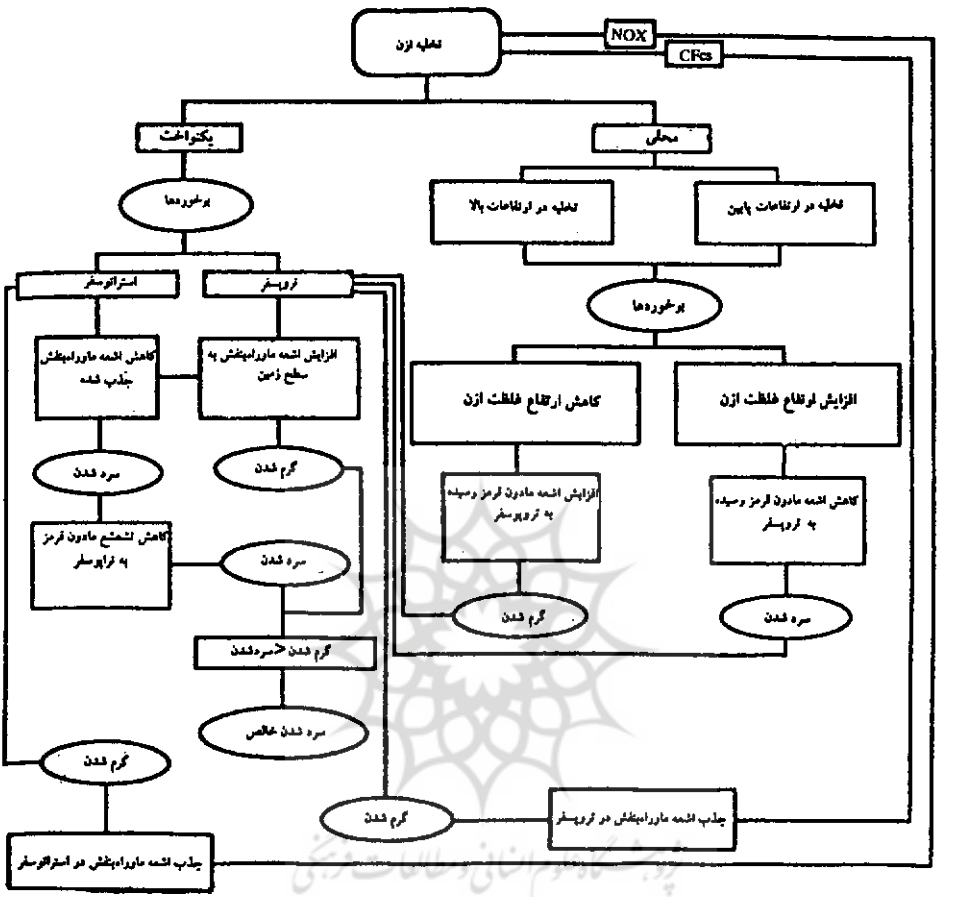
پسخوراند شیمیایی - آب و هوایی ازن O3

ازن یکی دیگر از عناصر مهم در لایه تروپوسفر (۱۰٪) و استراتوسفر (۹۰٪) است. لذا محدوده عملکرد آن در ارتفاعات فوقانی جو بین ۱۵ الی ۵۰کیلومتر می‌باشد و سیستمهای سینوپتیک با اعمال حرکات صعودی و نزولی ازن را بین تروپوسفر و استراتوسفر پخش و جابه‌جا می‌کنند.

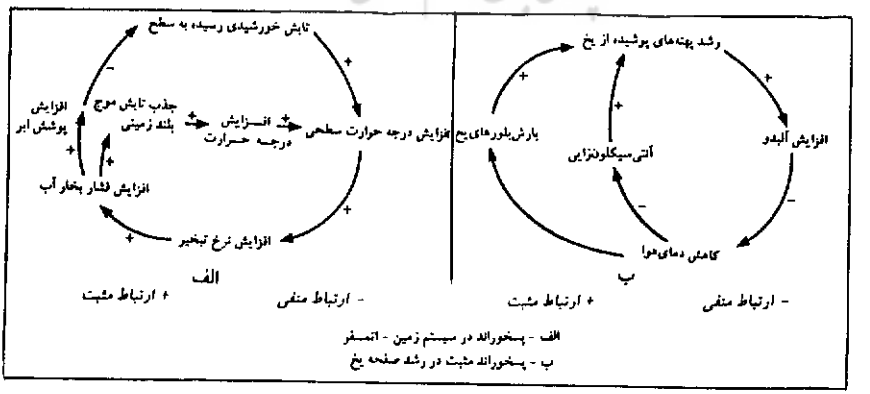
ازن دارای تغییرات مکانی - زمانی است. (حداکثر در بهار و حداقل در پاییز، و از نظر مکانی حداقل در استوا و حداکثر در عرضهای بالا). اهمیت ازن در باند جذبی تابش موج کوتاه خورشیدی (ماوراء بنفش ۲۸ ـ ۰/۲) و ایجاد لایهٔ حفاظتی و در لایهٔ استراتوسفر دارای پسخوراند مثبت است. نمودار شماره ۷ تغییرات تابش و درجه حرارت ناشی از تخلیه لایه ازن را نشان می‌دهد. کاهش ازن در جو از یک سو سبب رسیدن تابش بیشتر به سطح زمین و گرمتر شدن هوای سطوح پایین جو و از طرف دیگر سبب سردتر شدن اتمسفر بالایی یا استراتوسفر می‌شود. کاهش بالقوه لایه ازن استراتوسفر می‌رود تا در آینده ساختار بیولوژیک و شاید آب و هوایی کره زمین را به کلی تغییر دهد. بنابراین مقدار کل ازن و توزیع عمودی آن را فرایندهای فتوشیمیایی، تابشی و دینامیکی کنترل می‌کند. نتیجه آن که ازن تروپوسفری بیشتر از نظر اثرات گلخانه‌ای و ازن استراتوسفری بیشتر از نظر جذب اشعه ماوراءبنفش اهمیت دارد. ازن تحت واکنشهای خاص توسط نیترواکسید (N_2O) و کلروفلئورورها (CFCs) و متان (CH_4) از بین می‌رود. نتیجه نهایی آن که ازن تروپوسفر با میزان ۱۰ درصد از کل ازن دارای پسخوراند آب و هوایی و ازن استراتوسفری با میزان ۹۰ درصد از کل ازن دارای پسخوراند شیمیایی می‌باشد. کلروفلئورکربورها (CFCs) نیزاز جمله گازهایی هستند که در حیات اتمسفری بالا و اثرات گلخانه‌ای (پسخوراندهای گازی و آب و هوایی و ...) و پسخوراندهای شیمیایی (کاهش دهنده‌ازن استراتوسفری) نقش مهمی ایفا می‌کنند. این گاز بواسطه تولید گسترده و نیز کندی تخلیه آن روند افزایش گرمای جهانی را متأثر می‌سازند.

اثرات گلخانه‌ای بخار آب (پسخوراند گازی)

یکی از گازهای مهم گلخانه‌ای که از خاصیت جذب تابشهای بلند زمینی برخوردار می‌باشد، بخار آب است. گرچه این پارامتر دارای تغییرات مکانی - زمانی می‌باشد، لیکن شدت عملکرد گاز گلخانه‌ای بخار آب را دما و نوسانات دمایی کنترل می‌کنند. از آن جا که بخار آب دارای باند جذبی خاصی در مقابل تابش زمینی (در باند مادون قرمز) دارا می‌باشد، لذا دارای تأثیرات مکانی ـ زمانی زیادی بر روی دما و گرمایش جهانی است. به موجب عمل پسخوراند بخار آب، افزایش دمای جهانی و اتمسفر پایینی منجر به افزایش میزان تبخیر در سطح اقیانوسها می‌شود و به دلیل برخورداری از خاصیت گلخانه‌ای هرگونه افزایش در غلظت اتمسفری آن گرمای آب و هوا را وسعت می‌بخشد. در مجموع می‌توان گفت نقش این گاز گلخانه‌ای، مدار پسخوراند مثبت را دنبال می‌کند و دارای روند افزایشی می‌باشد. نمودار شماره ۸ نمونه‌هایی از چنین پسخورهایی را نشان می‌دهد.



نمودار شماره ۷: تغییرات تابش و درجه حرارت ناشی از تخلیه ازن استراتوسفری



نمودار شماره ۸: (هاریسون، ۱۹۹۶)

چنانچه‌دما کاهش یابدبخارآب‌کمتری درجو نگه‌داشته‌می‌شود،لذااثرات گلخانه‌ای بخارآب کاهش می‌یابد.

پسخوراند ابرها (پسخوراند مثبت و منفی)

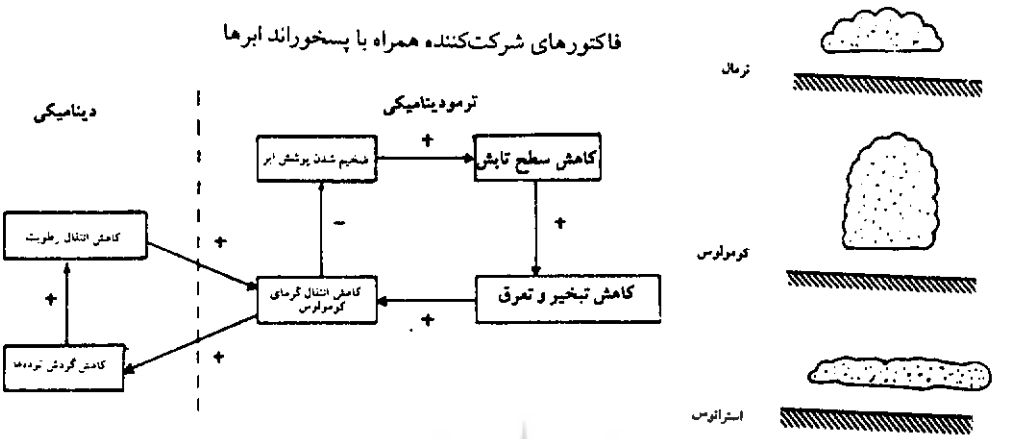
یکی از عناصر اتمسفری با خاصیت گلخانه‌ای که از مکانیسمهای مختلف و پیچیده‌ای برخوردارند ابرها می‌باشند. این پارامترها نه تنها در آلبدوی زمین سهیم می‌باشند (۲۶٪ انرژی را ساطع می‌کنند) بلکه دارای باند جذبی بوده و باعث بالا رفتن دمای اتمسفر می‌گردند. بنابراین ارزیابی پسخوراندهای ابرها را عواملی از قبیل دمای تشکیل ابر، ارتفاع ابر، میزان رطوبت ابر، نوع ابر، دوره حیات ابر، اندازه ذرات ابر و ... ، با مشکل و پیچیدگی روبه‌رو می‌سازند. ابرها هم جاذب بسیار خوب تابش مادون قرمز و هم بازتابنده مؤثر انرژی خورشیدی محسوب می‌شوند، لیکن ماهیت متفاوتی دارند. بنابراین ابرها از پسخوراندهای مثبت و منفی برخوردارند و در ضمن فرایندهای دینامیکی و ترمودینامیکی در پسخوراند ابرها شرکت دارند. بین افزایش دما و میزان ابرناکی رابطه وجود دارد، در واقع پسخوراند بخار آب و اثرات آن در پسخوراند ابرها مستتر می‌باشد. جهت تبیین اثرات پسخوراند ابرها آنها را به ابرهای بالایی و پایینی یا میانی تقسیم می‌کنند. در واقع ضخامت، سطح پوشش، ارتفاع و ... سبب می‌شود که پسخوراندهای مختلفی توسط ابرها به وجود آید.

ـ ابرهای بالایی (سیروسها)

این ابرها در قسمتهای بالایی و میانی تروپوسفر قرار دارند. ضخامت کم و دمای پایین سبب شده از آلبدوی پایینی برخوردار شوند. در ضمن نسبت به تابش موج کوتاه خورشید شفاف می‌باشند. لیکن امواج بلند اتمسفر پایینی و زمینی را جذب نموده و از خود خاصیت گلخانه‌ای بروز می‌دهند. بنابراین مکانیسم پسخوراند مثبت بر این‌گونه ابرها حاکم است و باعث افزایش دمای اتمسفر پایینی و سطح زمین می‌شوند. نهایتاً جاذب تابش مادون قرمز زمینی می‌باشند.

ـ ابرهای میانی و پایینی (استراتوس)

مشخصه این ابرها ضخامت زیاد، سطح کم و آلبدوی بالاست. این ویژگیها برودت محیطی را به دنبال دارد. یعنی اثر ابرناکی افزایش می‌یابد و منجر به یک سرمای کلی می‌شود. در نتیجه از پسخوراند منفی برخوردار است. دمای چنین ابرهایی اختلاف کمتری با مجاور سطح زمین دارند. در نتیجه به دلیل تراکم و پوشش از مکانیسم انعکاس بالایی برخوردارند. ابرها بویژه ابرهای میانی از نوع استراتوسها تابش را سریعتر از اقیانوسها و خشکیها منعکس می‌کنند. نهایةً دفع کننده تابش هستند. بنابراین در طی حاکمیت دوره‌های سرد و گرم بر زمین تراکم، غلظت، ارتفاع و ... ابرها و در نتیجه عملکرد پسخوراندهایش متفاوت بوده‌است. نمودار شماره ۹ این وضعیت را به وضوح نشان می‌دهد.



نمودار شماره ۹: پسخوراند دینامیکی و ترمودینامیکی ابرها و جهت آنها در ارتباط با تغییر در مقدار انتقال گرمای ابر کومولوس (سلرز، ۱۹۸۶).

پسخوراندهای آتشفشانها و هواویزه‌ها

به دلیل روابط نزدیک بین فعالیت آتشفشانی و توزیع هواویزه‌ها، هر دو را باهم بررسی می‌کنیم. هواویزه‌ها با منشاءهای مختلف (کیهانی، زمینی، انسانی)[۱۴] تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم بر سرمایش یا گرمایش منطقه‌ای و سیاره‌ای دارند. به‌عبارت دیگر هواویزه‌ها بسته به ابعاد و مکان استقرارشان در اتمسفر، گاهی به طور مستقیم باعث انعکاس اشعه‌های خورشیدی به فضا می‌شوند و نقش سرمایش ایفا می‌کنند (برخی ذرات مانند دود که رنگ سیاه دارند دارای تأثیرات گرمایشی می‌باشند). گاهی بطور غیرمستقیم به عنوان هسته‌های تراکم ابر عمل می‌کنند که منجر به تشکیل قطرات ریز بخار و فعال نمودن پسخورهای ابرها و بخار آب می‌گردند. هواویزه‌ها از جمله ترکیبات فعال محسوب می‌شوند که اقلیم را تحت تأثیر قرار می‌دهند. آتشفشانها نیز باعث ورود مقادیر عظیمی از عناصر و گاز به داخل اتمسفر می‌شوند. چنین هواویزه‌هایی بر توان تابش و در نهایت سرمایش و گرمایش اتمسفر تأثیر می‌گذارند. بسته به شدت انفجارات گاهی ذرات تنها وارد تروپوسفر می‌شوند (۵ الی ۸ کیلومتری) و

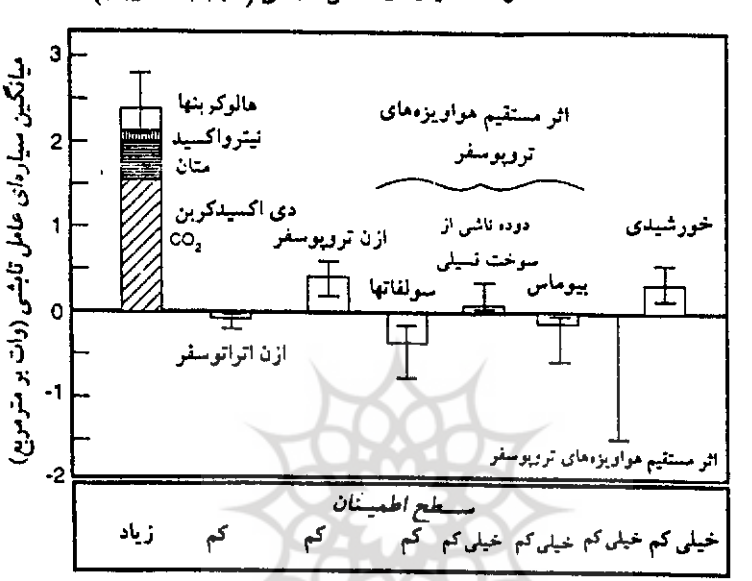
۱۴- منشاء هواویزه‌ها: ۱- تصادم شهاب سنگهاکه باعث افزایش هواویزه‌های لایه‌های بالایی‌تروپوسفرواستراتوسفر می‌شوند. ۲- فعالیت داخلی زمین بخاطرانفجار آتشفشانها. ۳- درارتباط بافعالیتهای انسان (سوخت فسیلی، بیوماس و ...

گاهی به لایه‌های فوقانی تروپوسفر و لایه‌های تحتانی استراتوسفر (۵ الی ۱۲۵ کیلومتری) نفوذ می‌کنند. البته تأثیر ذراتی که به لایه‌های فوقانی‌تر می‌رسند به دلیل عدم برخورداری کمتر از تظاهرات عمودی و افقی اتمسفر بر اقلیم زیاد می‌باشد، چراکه زمان تمرکز آنها بالاست. البته ابعاد ذرات نیز مهم‌می‌باشد. زمان سکونت ذراتی که بین ۲ الی ۵ میکرون قطر دارند، برای یک سال و ذراتی که بین ۰/۵ الی ۱ میکرون قطر دارند بیش از ۱۲ سال می‌باشد . بنابراین هواویزه‌ها قسمت مرئی طیف الکترومغناطیس را جذب و گاهی در عملکردی غیرجذبی آلبدوی اتمسفر را افزایش و میزان تشعشع خورشید را کاهش می‌دهند. بنابراین عملکرد ذرات هواویزه‌ها بسته به ابعاد، جایگاه، نوع و شیمی ذرات دارای تأثیرات متفاوت (سرمایشی و گرمایشی) در مقیاسهای زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت بر اقلیم می‌باشند. بسیاری از اقلیم‌شناسان اعتقاد دارند که فعالیتهای آتشفشانی سرمایش زمین را به دنبال دارند. البته فرایندهای شیمیایی، فتوشیمیایی و بعضاً دینامیکی جو، غلظت و تأثیرات چنین مکانیسمهایی را در ابعاد مکانی زمانی تحت تأثیر قرار می‌دهند. می‌توان گفت که شیمی جو، معابر و شدت عملکرد پسخورهای درونی و بیرونی سیستم آب و هوا را بشدت در کنترل دارند و جو منطقه ترانزیت و جفت و جورکننده رابطه بین زیرسیستمهای اقلیمی در اقصی نقاط سیاره زمین با منظومهٔ شمسی و کیهان است. (مانتی، ۱۹۸۲) رابطه فعالیتهای آتشفشانی با کاهش ازن را بررسی می‌کند. در جایی دیگر به رابطه فعالیتهای آتشفشانی با افزایش کلر و سایر گازهای گلخانه‌ای از جمله CO_2 توجه کرده‌است. بنابراین تأثیرات گازهای گلخانه‌ای بر سایر ترکیبات و عناصر می‌توانند افزاینده و یا کاهنده باشد.

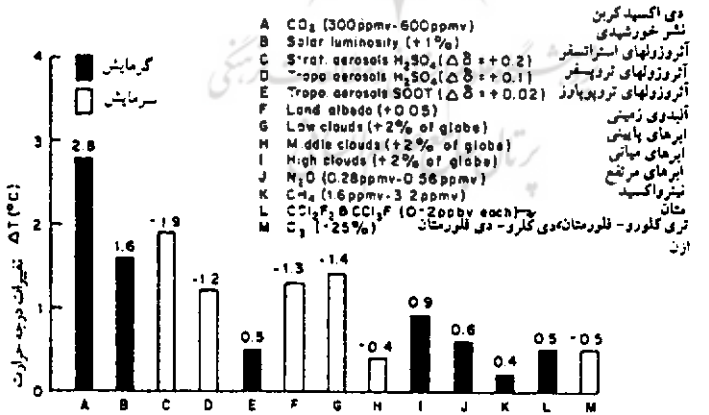
پسخوراندهای انسانی

با توجّه به سطور گذشته و شواهد موجود، در بستر طبیعت عملکرد انواع پسخوراند، قدمتی طولانی دارد و نظامهای آب و هوایی را از گذشته‌های دور تا به حال تحت تأثیر قرار داده‌است. لیکن در گذشته سهم سیستمهای محیطی در تولید و کنترل مکانیسمهای پسخوراند، بیشتر بوده است (پسخوراندهای بیرونی و درونی سیستم اقلیم). با ورود انسان به عرصه طبیعت ظرفیت پسخوراندها و روابط تعاملی سیستمهای درگیر با محیط برهم خورده و انسان فاکتورهای درونی سیستم اقلیم را از طرق مختلف از جمله مصرف سوختهای فسیلی، جنگل‌زدایی، سوخت بیوماس، بیابان‌زایی، فرسایش خاک، تغییر لندیوز و سطح زمین، احداث سازه‌های آبی، شهرنشینی، افزایش جمعیت و ... تحت تأثیر قرار داده‌است. به عبارت دیگر عملکرد انسان ظرفیت و مدار عملیاتی پسخورها و روابط تعاملی سیستمهای درگیر با اقلیم را برهم زده‌است. در نتیجه پسخورهای درونی، سیستم اقلیم را وارد روندی غیرطبیعی نموده‌اند که‌این امر سبب تحریک عملکرد پسخورهای مثبت درکوتاه‌مدت و در مقیاس منطقه‌ای ـ سیاره‌ای شده است. نمودارهای شماره (۱۰ - الف)

و (۱۰ - ب) ضمن به تصویر کشیدن اثرات سرمایشی و گرمایشی دسته‌ای از گازهای گلخانه‌ای تأثیر هر کدام را نیز بسته به موقعیت و جایگاه اتمسفری بر میزان کمی درجه حرارت و انرژی نشان می‌دهند.



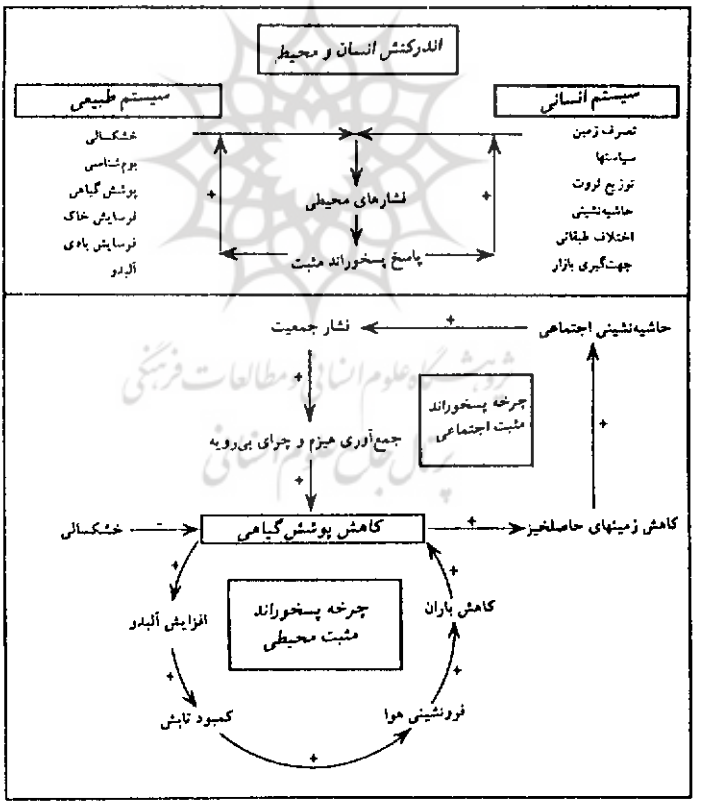
(۱۰-الف): عوامل مؤثربرتعادل تابشی سیاره‌ای از ۱۸۵۰ تا ۱۹۹۰م.براساس ارزیابی مؤسسه علمی IPCC(هندرسون، ۱۹۹۶)



(۱۰ - ب):اثراغتشاشات متعدداقلیمی برمیزان درجه حرارت سطح زمین که توسط یک مدل تک‌بعدی RC پیش‌بینی گردیده‌است (هندرسون، ۱۹۹۶)

نمودار شماره ۱۱ نمونه‌ای از پسخورهای مثبت انسانی را نشان می‌دهد. چون پسخورهای انسانی از نوع مثبت سبب ناپایداری سیستم اقلیم می‌گردد و از طرف دیگر توسعه‌های اخیر در تکنولوژی، ابداعات و نوآوریها نمی‌توانند با سرعت تغییرات محیطی همگام و یکسان باشند و تهدیدات بالقوه را از طرف سیستمهای محیطی خنثی نمایند. این سؤال مطرح است که آیا ابداعات، خود محرک و عامل بازخورد مثبت قلمداد نمی‌شوند؟

از آن جاکه در مقابله با عملکرد انسان (پسخور مثبت) سیستمهای طبیعی و اقلیم در آینده واکنش نشان خواهند داد، لذا لازم است انسانها با شناخت و فهم قوانین حاکم بر طبیعت و با مدیریت صحیح در راستای توسعهٔ پایدار و اجرای طرحهای کنترل سیاره‌ای و انتشار گازهای گلخانه‌ای در حد اپتیمم، سعی در ایجاد نوعی تعادل نمایند.



نمودار شماره ۱۱: نمونه‌ای از پسخورهای مثبت انسانی را نشان می‌دهد (روبرت بنیت، ۱۹۹۱)