

آشنایی با مفاهیم تغییر اقلیم

● دکتر علیرضا مساح بوانی - عضو هیأت علمی دانشگاه تهران

مقدمه

رشد صنایع و کارخانه‌ها از آغاز انقلاب صنعتی و به تبع آن افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی از یکسو و تخریب جنگل‌ها و تغییر کاربری اراضی کشاورزی از سوی دیگر باعث افزایش گازهای گلخانه‌ای مخصوصاً گاز CO₂ در چند دهه اخیر شده به گونه‌ای که غلظت این گاز از ۲۸۰ ppm در سال ۱۷۵۰ به ۳۷۹ ppm در سال ۲۰۰۵، ۳۸۵ ppm در سال ۲۰۰۹، ۳۸۸ ppm در سال ۲۰۱۰ و ۳۹۰ ppm در سال ۲۰۱۱ افزایش یافته است (Carter et al. ۲۰۰۷). تحقیقات نشان می‌دهد که در صورت ادامه روند کنونی مصرف سوخت‌های فسیلی، غلظت این گاز تا قبل از پایان قرن ۲۱م می‌تواند به بیش از ۶۰۰ ppm برسد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزایش گازهای گلخانه‌ای باعث افزایش دمای میانگین اتمسفر کره زمین در چند دهه اخیر شده که از این رو به گرمایش جهانی (Global Warming) شهرت یافته است. افزایش گازهای گلخانه‌ای نه تنها باعث افزایش دمای کره زمین شده بلکه تغییراتی را نیز در دیگر متغیرهای اقلیمی بوجود آورده است. به طور کل به تمامی تغییرات به وجود آمده در متغیرهای اقلیمی که ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای باشد تغییر اقلیم (Climate Change) اطلاق می‌شود.

تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که پدیده تغییر اقلیم در دوره‌های گذشته تأثیرات گسترده‌ای را بر سیستم‌های اقلیم کره زمین داشته است. این تأثیرات عبارتند از: تأثیر بر جو (شامل؛ تغییر در نوع، میزان و زمان بارش، تغییر در سرعت باد، تغییر در میزان بخار آب موجود در جو و ابرها، تغییر در پدیده‌های ال نینو، مانسون، تغییر در وقایع حدی مانند سیلاب و خشکسالی و ...).

تأثیر بر هیدروسفر (شامل؛ تغییر در کمیت و کیفیت آب‌های سطحی، تغییر در کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی، افزایش سطح آب دریاها، نفوذ آب‌های شور به سفره‌های آب زیرزمینی در مناطق ساحلی و...)، تأثیر بر یخ کره (شامل؛ تغییرات در میزان یخ موجود در کره زمین، تغییر در میزان یخچال‌های موجود، تغییر در میزان پوشش برف کره زمین و ...) و تأثیر بر بیوسفر (شامل؛ تغییر در نیاز آبی و عملکرد گیاهان زراعی، تغییر در حیات وحش کره زمین، تغییر در میزان فرسایش و...) (IPCC ۲۰۰۷a).

بدون شک در دوره‌های آتی فعالیت‌های بشری افزایش یافته و به واسطه آن میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز در اتمسفر افزایش خواهد یافت. این افزایش باعث تشدید تغییرات در متغیرهای اقلیمی کره زمین خواهد گردید. از طرف دیگر باید توجه داشت که حتی اگر انتشار تمامی گازهای گلخانه‌ای هم اکنون متوقف شود، به دلیل زمان ماندگاری بالای گازهای گلخانه‌ای که از قبل در اتمسفر کره زمین انتشار یافته‌اند، بشر در قرن ۲۱ با تغییر در متغیرهای اقلیمی روبه‌رو خواهد شد. به هر حال تشدید تغییرات پارامترهای اقلیمی در دوره‌های آتی، می‌تواند تأثیرات منفی زیادی را بر سیستم‌های مختلف از جمله منابع آب، محیط زیست، صنعت، بهداشت، کشاورزی و کلیه سیستم‌هایی که در کنش با سیستم اقلیم می‌باشند، بگذارد. بنابر این با توجه به آثار مخربی که این پدیده می‌تواند در دوره‌های آتی بر سیستم‌های مختلف بر جای بگذارد. لازم است تا پیش از وقوع، اثرات منفی این پدیده بر سیستم مورد نظر شناخته شده و راهکارهای مقابله با اثرات منفی آن در پروژه‌ها لحاظ گردد (مساح بوانی ۱۳۸۵).

تغییر اقلیم و پارامترهای موثر بر آن

جو (Atmosphere)، یخ کره (Cryosphere)، زیست کره (Biosphere) و آب کره (Hydrosphere) اجزاء سیستم اقلیم کره زمین را تشکیل می‌دهند. اتمسفر زمین با دارا بودن گازهای مختلف باعث جذب، پخش و انعکاس طول موج‌های مختلف آن شده و پدیده‌های مختلف از جمله میزان درجه حرارت اتمسفر را کنترل می‌کند. در بین این گازها گازهای گلخانه‌ای که شامل بخار آب، دی‌اکسیدکربن (CO₂)، متان (CH₄)، اکسید دو نیتروژن (N₂O) و هالوکربن‌ها (CFC) می‌باشند، از اهمیت ویژه‌ای در کنترل دمای سطحی اتمسفر برخوردار هستند. زیرا نور خورشید که عمدتاً با طول موج کوتاه بوده، از این گازها عبور نموده و به زمین می‌رسند و پس از گرم شدن زمین امواج مادون قرمز که دارای طول موج بلندی می‌باشند از سطح زمین ساطع شده و با این گازها برخورد می‌کنند. این گازها امواج با طول موج بلند (مادون قرمز) را جذب کرده و گرم می‌شوند. این پدیده باعث افزایش درجه حرارت اتمسفر سطحی کره زمین می‌شود که به آن اثر گلخانه‌ای (Greenhouse effect) اطلاق می‌شود (شکل ۱-۲). کریوسفر یا "یخ کره" که در برگرفته یخ‌های موجود در سطح کره زمین است بیشترین نقش را در انعکاس امواج رسیده به سطح زمین (Albedo) ایفا می‌کند. همچنین بیوسفر یا "زیست کره" نیز با انعکاس نور خورشید، تبخیر و تعرق از سطح گیاهان، به عنوان یکی از منابع اصلی تولید و مصرف دی‌اکسیدکربن، نقش مهمی را در میزان انرژی سیستم اقلیم دارا می‌باشد. نهایتاً هیدروسفر یا "آب کره" که شامل دریاها، دریاچه‌ها، رودها و اقیانوس‌های



شکل ۱- گرم شدن کره زمین به دلیل اثر گلخانه‌ای

عامل طبیعی خارجی بر سیستم اقلیم کره زمین تاثیر می‌گذارند. خورشید مهمترین منبع تامین گرمایش زمین می‌باشد. این در حالی است که پس از فعالیت‌های آتشفشانی ذرات معلق بسیاری وارد اتمسفر منطقه شده و با انعکاس نور خورشید مانع از رسیدن نور خورشید به سطوح پایینی اتمسفر شده و سبب می‌شود تا دمای منطقه سرد گردد. به مجموع تغییرات ناشی از عوامل طبیعی خارجی و تغییرات ناشی از نوسانات درونی سیستم، نوسانات طبیعی اقلیم (Natural

هدایت کند. در این حالت آب گرم در سواحل آمریکای جنوبی به سواحل شرقی حرکت می‌کند و دمای این منطقه را بالا می‌برد. یکی دیگر از اثرات ال‌نینو، تغییرات غیرعادی آب و هوای مناطق شرقی و غربی استوای اقیانوس آرام است. تغییراتی که ال‌نینو ایجاد می‌کند محدود به آب و اقیانوس نیست و به اتمسفر و لایه‌های جوی نیز کشیده می‌شود. (IPCC ۲۰۰۷a).

از طرف دیگر تابش‌های خورشیدی و بعضاً فعالیت‌های آتشفشانی به عنوان دو

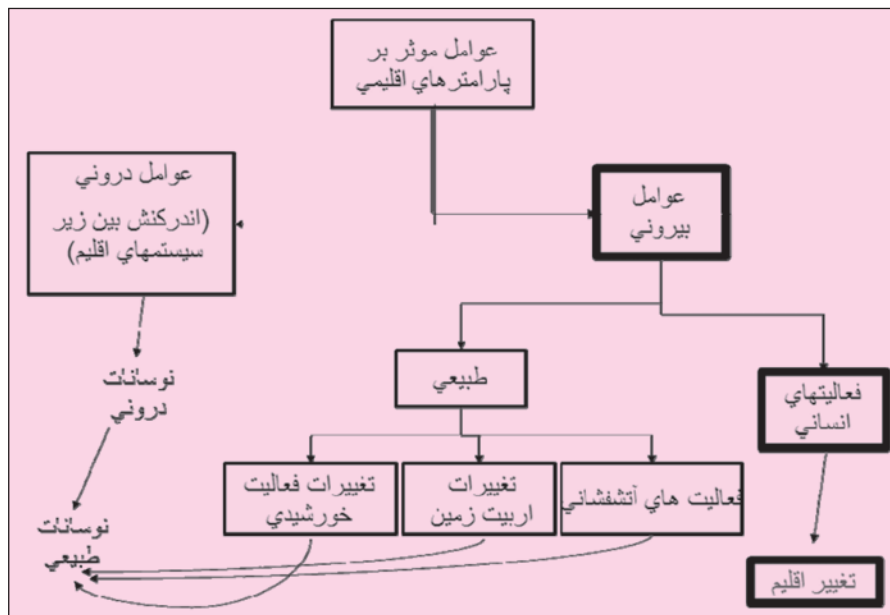
کره زمین می‌باشد نقش بسزایی را در جذب دی‌اکسیدکربن موجود در اتمسفر داشته و به لحاظ گرمایشی دارای اینرسی گرمایی بالایی می‌باشد (IPCC ۲۰۰۷a).

عوامل مختلفی باعث برهم خوردن شرایط حاکم بر اجزاء مختلف سیستم اقلیم کره زمین می‌شود که می‌تواند تاثیراتی را بر اجزاء دیگر بگذارد. این عوامل به دو بخش عوامل داخلی ناشی از کنش‌های متقابل بین اجزاء سیستم اقلیم و عوامل خارجی طبیعی ناشی از تابش خورشیدی، فعالیت‌های آتشفشانی و افزایش غیر طبیعی گازهای گلخانه‌ای (Greenhouse Gases) قابل تقسیم می‌باشند (شکل ۲-۲).

به تغییرات به وجود آمده در سیستم اقلیم کره زمین که نتیجه واکنش‌های درونی بین اجزاء سیستم اقلیم می‌باشد، نوسانات درونی سیستم اقلیم (Internal climate variability) اطلاق می‌شود که از آن جمله می‌توان به پدیده El-Nino اشاره کرد. (پدیده ال‌نینو نوسانات سیستم اتمسفری در شرق بخش استوایی اقیانوس آرام است که معمولاً بر آب و هوای سراسر جهان اثرات قابل توجهی دارد. در شرایط عادی و زمانی که ال‌نینو وجود ندارد، سطح آب اقیانوس به دلیل تابش نور آفتاب گرم‌تر از اعماق آن است. در بخش استوایی اقیانوس آرام، باد از شرق به غرب می‌وزد. وزش باد باعث حرکت آب در سطح اقیانوس می‌شود و با باقی ماندن آب در معرض خورشید گرمای بیشتری به آن جذب می‌شود. در این شرایط در شرق اقیانوس آرام در سواحل آمریکای شمالی شارشی در جریان‌های عمق و سطح آب ایجاد می‌شود. این شارش باعث می‌شود تا آب سردتر که غنی و پر از اکسیژن و مواد غذایی است جایگزین آب گرم سطحی شود. نفوذ جریان سرد و غنی به سطح آب که محل زندگی اکثر آبزیان است باعث افزایش تعداد آن‌ها در محل‌های صید ماهی‌گیران می‌شود. تحت تاثیر ال‌نینو همه چیز برعکس می‌شود. ال‌نینو باعث می‌شود که باد از غرب اقیانوس آرام، آب‌های سطحی گرم را به سمت شرق

جدول ۱- مقدار GWP و طول عمر گازهای گلخانه‌ای (IPCC ۲۰۰۷C)

فرمول شیمیایی گاز	زمان ماندگاری (سال)	مقدار GWP در افق‌های زمانی مختلف		
		سال ۲۰	سال ۱۰۰	سال ۵۰۰
CO ₂	۳۰ تا ۹۵	۱	۱	۱
CH ₄	۱۲	۷۲	۲۵	۷/۶
N ₂ O	۱۱۴	۲۸۹	۲۹۸	۱۵۳
CCL ₂ F ₂	۱۰۰	۱۱۰۰۰	۱۰۹۰۰	۵۲۰۰
CHCLF ₂	۱۲	۵۱۶۰	۱۸۱۰	۵۴۹
CF ₄	۵۰۰۰۰	۵۲۱۰	۷۳۹۰	۱۱۲۰۰
C ₂ F ₆	۱۰۰۰۰	۸۶۳۰	۱۲۲۰۰	۱۸۲۰۰
SF ₆	۳۲۰۰	۱۶۳۰۰	۲۲۸۰۰	۳۲۶۰۰
NF ₃	۷۴۰	۱۲۳۰۰	۱۷۲۰۰	۲۰۷۰۰



شکل ۲- مفاهیم تغییر اقلیم، نوسانات درونی و نوسانات طبیعی اقلیم (مساح بوانی ۱۳۸۵)

بگونه‌ای که سوزاندن سوخت‌های فسیلی، جنگل‌زدایی و تغییرات کاربری اراضی باعث افزایش گاز CO_2 ، گازهای خارج شده از معده حیوانات، استفاده از کودهای حیوانی و کشت برنج باعث افزایش گاز CH_4 ، استفاده از کلروفلوروکربن‌ها در سیستم‌های یخچال‌ها و اطفاء حریق کشاورزی باعث افزایش گازهای $CFCs$ ، و نهایتاً فعالیت‌های کشاورزی مانند استفاده از کودها باعث افزایش گاز N_2O شده است. شکل ۲-۳ درصد هر کدام از گازهای گلخانه‌ای موجود در اتمسفر نسبت به کل و همچنین سهم هر یک از فعالیت‌های بشری در تولید گازهای گلخانه‌ای را در سال ۲۰۰۰ نشان می‌دهد. به

طبیعی (فعالیت‌های بشری) تقسیم می‌شوند. گرچه مقدار گازهای گلخانه‌ای تولید شده از منابع طبیعی تقریباً ۲۰ برابر فعالیت‌های انسانی است، اما تا قبل از انقلاب صنعتی (۱۷۵۰ میلادی) این گازها به وسیله منابع طبیعی مصرف‌کننده گازهای گلخانه‌ای (اقیانوس‌ها و جنگل‌ها، جذب توسط باکتری‌های موجود در خاک و انجام واکنش‌های شیمیایی در جو) متعادل شده و برای مدت ده هزار سال (از انتهای آخرین دوره یخچالی تا انقلاب صنعتی) مقدار آن در حد $270 ppm$ ثابت باقی‌مانده است. پس از انقلاب صنعتی، فعالیت‌های بشری باعث افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو کره زمین شده است.

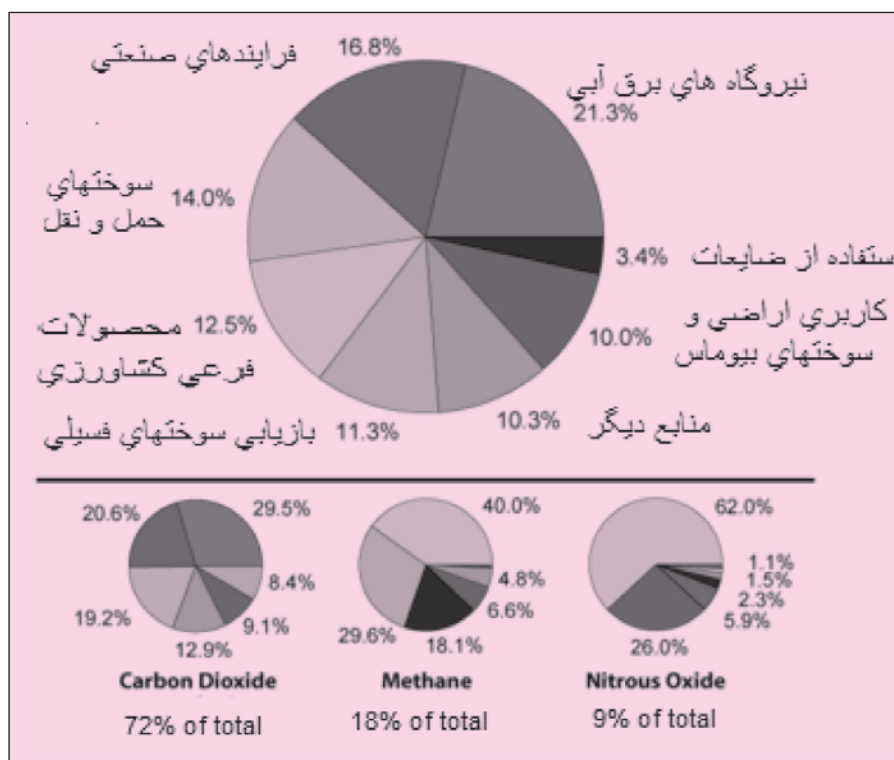
(Climate Variability) اطلاق می‌گردد. در بین عوامل ذکر شده تنها عاملی که به صورت غیر طبیعی بر سیستم اقلیم کره زمین تاثیر می‌گذارد، افزایش گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. بررسی وضعیت انتشار این گازها نشان می‌دهد که پس از انقلاب صنعتی در نیمه قرن ۱۸، بدلیل افزایش روزافزون صنایع و به واسطه آن افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی، توازن مقادیر گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر زمین برهم خورده و مقادیر آن به خصوص میزان گاز دی‌اکسیدکربن افزایش یافته است. این افزایش سبب می‌شود تا امواج مادون قرمز ساطع شده از زمین بیش از پیش توسط گازهای گلخانه‌ای جذب شده و باعث گرمتر شدن اتمسفر کره زمین شود. گرمتر شدن کره زمین نیز بنوبه خود بر وضعیت اجزاء دیگر سیستم اقلیم تاثیر گذاشته و پدیده تغییر اقلیم (Climate Change) را موجب می‌گردد. شکل ۲-۲ مفاهیم تغییر اقلیم (Climate Change)، نوسانات درونی اقلیم (Internal climate variability) و نوسانات طبیعی اقلیم (Natural Climate Variability) را نشان می‌دهد (مساح بوانی ۱۳۸۵).

منابع تولیدکننده گازهای گلخانه‌ای

منابع تولیدکننده گازهای گلخانه‌ای به دو دسته منابع طبیعی (مرداب و اقیانوس‌ها، فرایندهای میکروبی در خاک و آب و واکنش‌های فتوشیمیایی در جو) و منابع غیر

جدول ۲- خلاصه‌ای از مشخصات ۴ سناریوی شاخص SRES در سال ۲۱۰۰ (Carter et al. ۲۰۰۷)

خصوصیت سناریو	۱۹۹۰	A۱	A۲	B۱	B۲
جمعیت (بیلیون نفر)	۵/۲۵۲	۷/۱	۱۵/۱	۷/۰	۱۰/۴
غلظت CO_2 (ppmv)	۳۵۴	۶۸۰	۸۳۴	۵۴۷	۶۰۱
تغییر متوسط دمای میانگین کره زمین ($^{\circ}C$)	-	۲/۵ (۱/۷-۳/۷)	۳/۱ (۲/۱-۴/۴)	۲/۰ (۱/۴-۳/۰)	۲/۱ (۱/۵-۳/۱)
افزایش جهانی سطح آب دریا (cm)	-	۵۸ (۲۳-۱۰۱)	۶۲ (۲۷-۱۰۷)	۵۰ (۱۹-۹۰)	۵۲ (۲۰-۹۳)
GDP جهانی (\$۱۰۱۲)	۲۱	۵۵۰	۲۴۳	۳۲۸	۲۳۵



شکل ۳- سهم بخشهای مختلف در تولید سالانه گازهای گلخانه‌ای (۲۰۰۷C IPCC)

عنوان مثال در تولید کربن، سهم نیروگاه‌های برق آبی ۲۹٪، سهم فرایندهای صنعتی ۲۰٪، سهم سوخت‌های حمل و نقل ۱۹٪، سهم تغییر کاربری اراضی ۱۰٪ و سهم دیگر منابع ۲۰٪ می‌باشد. بر این اساس سهم فعالیت‌های انسانی در تولید گازهای CH_4 و N_2O قابل استنتاج می‌باشد. با توجه به این شکل از کل گازهای گلخانه‌ای موجود در جو گاز CO_2 بیشترین سهم (۷۲ درصد) را داراست. در این راستا گاز متان با ۱۸ درصد و گاز N_2O با ۹ درصد مقام‌های بعدی را به خود اختصاص داده‌اند. (نقش گازهای CFCs نیز حدود ۱ درصد است که در شکل نشان داده نشده است). این در حالی است که نیروگاه‌های برق آبی با ۲۱ درصد بیشترین سهم را در تولید کل گازهای گلخانه‌ای داشته است. همچنین سهم تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از کشاورزی نیز ۱۲ درصد برآورد گردیده است (IPCC ۲۰۰۷C).

نکته‌ای که باید به آن توجه داشت میزان تاثیرگذاری هر یک از گازهای گلخانه‌ای بر افزایش دمای کره زمین است. این میزان با افزایش دما (Global Warming Potential (GWP) سنجیده می‌شود. جدول ۱-۲ مقدار GWP گازهای گلخانه‌ای مختلف را به همراه زمان ماندگاری آنها در اتمسفر نشان می‌دهد. طبق این جدول کمترین مقدار GWP مربوط به گاز CO_2 و برابر ۱ است. این در حالی است که بیشترین تاثیر گازهای گلخانه‌ای مربوط به گاز SF_6 و برابر ۲۲۸۰۰ است. باید توجه داشت که گرچه تاثیر گازهای دیگر بر افزایش دمای کره زمین بسیار بیشتر از گاز CO_2 است ولی با توجه به شکل ۲-۳ میزان انتشار این گازها در اتمسفر بسیار کمتر از گاز CO_2 می‌باشد (IPCC ۲۰۰۷C).

سناریوهای اقلیمی و غیر اقلیمی (سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای)

با توجه به آن‌چه در قسمت قبل آمد، هرگونه تغییر در میزان غلظت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر زمین، باعث برهم خوردن تعادل بین

غیراقلیمی حاوی اطلاعاتی از وضعیت اقتصادی- اجتماعی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر کره زمین است که به آن سناریوی انتشار (emission scenario) نیز گفته می‌شود.

هیئت بین دول تغییر اقلیم (IPCC Intergovernmental Panel of Climate Change)، که در سال ۱۹۸۸ به وسیله سازمان هواشنجی جهان (WMO World Meteorological Organization) و برنامه محیط زیست سازمان ملل (UNEP United Nation Environmental Program) تأسیس شد، وظیفه شناخت تمام جنبه‌های پدیده تغییر اقلیم را در مقیاس جهانی عهده‌دار است و سری اولیه سناریوهای انتشار را در سال ۱۹۹۲ با نام IS۹۲a-IS۹۲f ارائه کرد. در این سناریوها مقادیر گازهای گلخانه‌ای با نرخ ثابت تا سال ۲۱۰۰ افزایش می‌یابد. در سال ۱۹۹۶، IPCC سری جدید سناریوهای انتشار را به منظور بهروز کردن و جایگزینی

اجزاء سیستم اقلیم کره زمین می‌گردد. اما این که در آینده چه مقدار از این گازها توسط جوامع بشری وارد اتمسفر زمین شده و به تبع آن چه وضعیتی برای سیستم اقلیم کره زمین رخ خواهد داد، معین و قطعی نیست. لذا به صورت کاملاً غیر قطعی و تحت سناریوهای مختلفی ارایه شده است. این سناریوها در دو بخش مجزای سناریوهای غیر اقلیمی و سناریوهای اقلیمی قابل تفکیک هستند که در ادامه شرح بیشتری از آنها ارایه می‌شود.

۱- سناریوهای غیر اقلیمی (Non-Climatic Scenario)

فعالیت‌های اقتصادی جوامع و متعاقب آن رشد صنایع و کارخانه‌ها و تغییرات کاربری اراضی از عوامل اصلی افزایش گازهای گلخانه‌ای می‌باشند. از این رو برای داشتن برآوردی از میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی، لازم است تا در ابتدا وضعیت اقتصادی - اجتماعی کره زمین در دوره‌های آتی بررسی گردد. به طور کلی یک سناریوی

جدول: ۳- مشخصات ۷ مدل AOGCM مربوط به گزارش سوم (IPCC-TAR)

CCSR	NCAR	GFDL-R۳۰	CGCM۲	CSIRO	HadCM۳	ECHAM۴	
۵/۶*۵/۶	۴/۵*۷/۵	۴/۵*۷/۵	۳/۷*۳/۷	۳/۲*۵/۶	۲/۵*۳/۷۵	۲/۸*۲/۸	دقت مکانی AGCM (درجه) (طول*عرض)
۲/۸*۲/۸	۱*۱	۴/۵*۳/۷۵	۱/۸*۱/۸	۳/۲*۵/۶	۲/۵*۳/۷۵	۲/۸*۲/۸	دقت مکانی OGCM (درجه) (عرض*طول)
:CO۲ ۱۸۹۰-۱۹۸۹ :SO۴ ۱۸۹۰-۱۹۸۹	:CO۲ ۱۹۰۱-۱۹۸۹ :SO۴ ۱۹۰۱-۱۹۸۹	:CO۲ ۱۷۶۶-۱۹۸۹ :SO۴ ۱۹۰۱-۱۹۸۹	:CO۲ ۱۹۰۰-۱۹۸۹ :SO۴ ۱۸۶۰-۱۹۸۹	:CO۲ ۱۸۸۱-۱۹۸۹ :SO۴ ۱۸۶۰-۱۹۸۹	:CO۲ ۱۸۶۰-۱۹۸۹ :SO۴ ۱۸۶۰-۱۹۸۹	:CO۲ ۱۸۶۰-۱۹۸۹ :SO۴ ۱۸۶۰-۱۹۸۹	دوره شبیه‌سازی گازهای گلخانه‌ای و ذرات معلق در گذشته
دوره کنترل: ۲۱۰ سناریوهای :SRES ۱۸۹۰-۲۱۰۰	دوره کنترل: ۱۳۶ سناریوهای :SRES ۱۹۸۰-۲۰۹۹	دوره کنترل: ۱۰۰۰ سناریوهای :SRES ۱۹۶۱-۲۱۰۰	دوره کنترل: ۲۰۰ سناریوهای :SRES ۱۹۰۰-۲۱۰۰	دوره کنترل: ۲۱۹ سناریوهای :SRES ۱۹۶۱-۲۱۰۰	دوره کنترل: ۲۴۰ سناریوهای :SRES ۱۹۵۰-۲۰۹۹	دوره کنترل: ۲۴۰ سناریوهای :SRES ۱۹۹۰-۲۰۰۰	طول دوره شبیه‌سازی (سال)
A۱FI, A۱ A۱T, A۲ B۲, B۱	B۲, A۲ A۱B	B۲, A۲	B۲, A۲	A۲, A۱ B۲, B۱	A۲b, A۲ A۲c, B۲	B۲, A۲	سناریوهای شبیه‌سازی شده SRES
Nozawa et al., 2001	Meehl et al., 2001	Knutson et al., 1999	Flato and Boer, 2001	Gordon and O'Farrell, 1997	Gordon et al., 2000	Stendel et al., 2000	مرجع

رشد زیاد جمعیت و وابستگی کمتر به پیشرفت سریع اقتصادی می‌باشد.

وضعیت جمعیت در خانواده سناریوهای B۱ شبیه به A۱ می‌باشد، با این تفاوت که تاکید در این سناریو بیشتر در استفاده از انرژی‌های پاک و محیط زیست می‌باشد. در این خانواده تاکید بر پایداری اقتصاد، محیط‌زیست و اقتصاد در سطح جهانی می‌باشد.

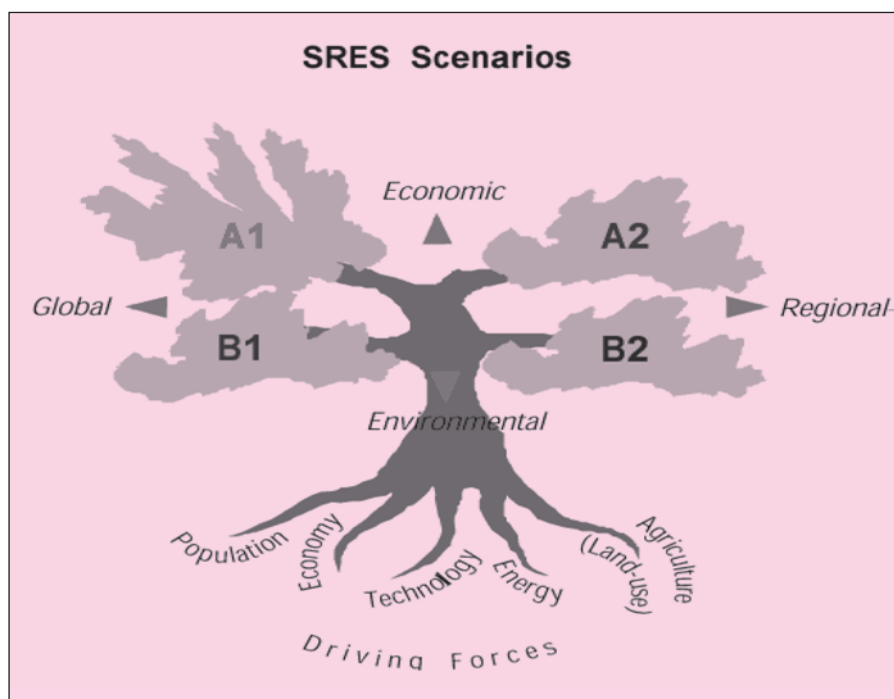
در سناریو B۲ تاکید بر راه‌حلهای منطقه‌ای برای تقویت مسایل اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیست می‌باشد. این یک دنیای ناهمگون با سرعت تغییرات تکنولوژی کمتر، اما با تنوع بیشتر می‌باشد. اما تاکید قوی در این سناریو بر ابتکار عمل جامعه و نوآوری‌های

خواهد رسید و از آن به بعد کاهش می‌یابد و معرفی تکنولوژی‌های جدید و کاراتر در نظر گرفته شده است. در این خانواده به مسایل اقتصادی نسبت به محیط زیست بیشتر تاکید شده و دیدگاه‌ها به جای منطقه‌ای، جهانی می‌باشد. سه زیر شاخه متفاوت برای گروه A۱ بر اساس نوع تکنولوژی مورد استفاده در قرن ۲۱ در نظر گرفته شده است: تشدید استفاده از سوخت فسیلی (A۱FI)، استفاده از منابع انرژی غیر فسیلی (A۱T) و استفاده از منابع فسیلی و غیر فسیلی به صورت متعادل (A۱B).

موضوع دربرگیرنده خانواده سناریوهای A۲ تقویت نیروهای جمعیتی منطقه‌ای با تاکید بر ارزش خانواده‌ها و رسوم خانوادگی،

سناریوهای IS۹۲ با نام SRES (Special Report on Emission Scenarios) ارائه کرد. در مجموع ۴۰ زیر سناریوی متفاوت SRES که در برگرنده طیف وسیعی از تغییرات رشد جمعیت انسان در آینده، عوامل اقتصادی و تکنولوژیکی موثر بر انتشار گازهای گلخانه‌ای و ذرات معلق می‌باشد ارائه شده است. هر کدام از این زیر سناریوها مربوط به یکی از گروه‌های A۱, A۲, B۱ و B۲ می‌باشد. شکل ۲-۴ وضعیت ۴ گروه سناریوهای SRES را نشان می‌دهد (IPCC ۲۰۰۷c).

در خانواده سناریوهای گروه A۱ یک جهان با رشد سریع اقتصادی، افزایش رشد جمعیت که در اواسط قرن ۲۱ به اوج خود



شکل ۴- وضعیت چهار خانواده سناریوی SRES بطور شماتیک (Carter et al, ۲۰۰۷)

مورد مطالعه می‌باشد. در این روش در صورت مشاهده روند در متغیر مورد نظر این روند با استفاده از روش‌های آماری امتداد داده شده و متغیر مورد نظر، برای دوره‌های آتی مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد (Yu et al, ۲۰۰۲). ضعف عمده این روش تکیه بر روند تجربه شده در داده‌های گذشته می‌باشد. تحقیقات نشان می‌دهند که روندهای مشاهداتی در دوره‌های آماری منطقه‌ای، می‌تواند قسمتی از سیکل‌های بلند مدت تغییرات درونی سیستم اقلیم منطقه باشد (Zhang et al, ۲۰۰۵; Klain Tank et al, ۲۰۰۵). بنابراین امتداد روند برای دوره‌های آتی می‌تواند بیانگر وضعیت آن متغیر تحت تاثیر تغییرات اقلیم نباشد.

در حال حاضر معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوهای اقلیمی مدل‌هایی سه بعدی جفت شده اقیانوس - اتمسفر گردش عمومی جو که AOGCM (Atmosphere- Ocean General Circulation Model) (Wilby and Harris, ۲۰۰۵; Mitchell, ۲۰۰۳; Lane et al, ۱۹۹۹).

مشخص نمی‌باشد. بنابراین چون پیش‌بینی وضعیت اقلیم منطقه‌ای تحت پدیده تغییر اقلیم مشکل می‌باشد، راه جایگزین مشخص کردن وضعیت‌های ممکن آینده بوده که "سناریوی اقلیمی" نامیده می‌شود، اما باید توجه داشت که یک سناریوی اقلیمی یک پیش‌بینی‌کننده آب و هوا نیست. در حال حاضر از روش‌های مختلفی برای تولید سناریوهای اقلیمی در دوره‌های آتی استفاده شده که ابتدایی‌ترین آنها تولید سناریوهای مصنوعی (Synthetic Scenario) می‌باشد. در این سناریوها متغیرهای اقلیمی به طور دلخواه مورد افزایش و یا کاهش قرار می‌گیرند (Williams et al, ۱۹۸۸; Semenov and Porter, ۱۹۹۵). مثلاً می‌توان درصد مشخصی از بارندگی‌ها را کاهش و دما را افزایش داد. گرچه در این روش می‌توان سناریوهای مختلف اقلیمی را به راحتی تولید کرد ولی به دلیل آن که این سناریوها مبنای فیزیکی ندارند نتایج قابل قبولی را ارائه نمی‌کنند.

روش دیگر در تولید سناریوهای اقلیمی استفاده از داده‌های گذشته متغیر اقلیمی منطقه

آن برای یافتن راه‌حل‌های منطقه‌ای نسبت به راه‌حل‌های جهانی می‌باشد. جدول ۲-۲ خلاصه‌ای از خصوصیات اصلی در نظر گرفته شده برای چهار سناریوی شاخص A1، A2، B1 و B2 را در سال ۲۱۰۰ نشان می‌دهد (IPCC ۲۰۰۷c).

پس از تخمین مقادیر موثر بر میزان گازهای گلخانه‌ای در هر سناریو از ۴۰ سناریوی SRES تا سال ۲۱۰۰، این مقادیر به مدل‌هایی اقتصادی-انرژی (مانند MAGICC) معرفی شده و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از هر سناریو تا سال ۲۱۰۰ محاسبه می‌شود. باید توجه داشت که گرچه تا به حال ۴۰ سناریوی مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط IPCC ارائه شده است، ولی در اکثر تحقیقات از نتایج مربوط به ۶ سناریوی شاخص SRES شامل A1B، A1FI، A2، B1، B2 و A1T استفاده می‌گردد. براساس میزان تولید نیروی تابشی تا سال ۲۱۰۰، سناریوی A1FI بیشترین نیرو و سناریوی B1 کمترین نیرو را تولید می‌کند. بنابراین سناریوی A1FI تاثیرات بیشتری را نسبت به سناریوی B1 خواهد گذاشت. وضعیت سناریوها بر اساس تولید نیروی تابشی به طور نزولی به صورت A1B، B2، A1FI، A2، A1T و B1 می‌باشد. شکل ۲-۵ میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در ۶ سناریوی SRES و همچنین سناریوی IS۹۲a را نشان می‌دهد (IPCC ۲۰۰۷c). (سناریوی IS۹۲a مربوط به سناریوهای قدیمی IS۹۲ بوده و وضعیت انتشار گازهای گلخانه‌ای را بر اساس ادامه روند کنونی نشان می‌دهد).

۲- سناریوهای اقلیمی (Climatic Scenario)

با توجه به آن چه آمد، اطمینان زیادی بر افزایش غلظت گازهای اتمسفر و بالتبع آن افزایش میانگین دمای سطحی اتمسفر کره زمین در دوره‌های آتی در بین دانشمندان وجود دارد. ولی چگونگی تغییرات متغیرهای اقلیمی در مقیاس‌های منطقه‌ای به طور صریح

جدول ۴- مشخصات ۹ مدل AOGCM مربوط به گزارش چهارم (IPCC-AR۴)

نام مدل	گروه موسس	سناریوهای شبه سازی	قدرت تفکیک	
			اتمسفری	اقیانوسی
CCSM3	NCAR (USA)	A2, B1	1.4° . 1.4°	0.46° . 1.125°
CGCM3	CCCMA (Canada)	A2, B1	3.75° . 3.75°	1.875° . 1.875°
CSIROMk3	ABM (Australia)	A2, B1	1.875° . 1.875°	0.95° . 1.875°
GFDL CM2.1	NOAA/GFDL (USA)	A1FI, A2, B1	2° . 2.5°	0.9° . 1.0°
GISS E-R	NASA/GISS (USA)	A2, B1	4° . 5°	4° . 5°
HadCM3	UKMO (UK)	A1FI, A2, B1	2.5° . 3.75°	1.25° . 1.25°
ECHAM5	MPI (Germany)	A2, B1	1.875° . 1.875°	1.0° . 1.0°
MIROC-med	CCSR (Japan)	A2, B1	2.81° . 2.81°	0.9° . 1.4°
PCM	NCAR (USA)	A1FI, A2, B1	2.81° . 2.81°	1.0° . 1.0°

مدل‌های AOGCM

مدل‌هایی AOGCM بر پایه قوانین فیزیکی که به وسیله روابط ریاضی ارایه می‌شوند، استوار می‌باشند. این روابط در یک شبکه سه بعدی در سطح کره زمین حل می‌گردند. به منظور شبیه‌سازی اقلیم کره زمین فرایندهای اصلی اقلیمی (اتمسفر، اقیانوس، سطح زمین، یخ پسته و زیست کره) در مدل‌هایی فرعی جداگانه شبیه‌سازی می‌شوند. سپس تمام مدل‌هایی فرعی مربوط به اتمسفر و اقیانوس با یکدیگر جفت شده و مدل‌هایی گردش عمومی اقیانوس- اتمسفر (AOGCM) را تشکیل می‌دهند. در برنامه‌های فرعی، جابه‌جایی مومنتوم، گرما و رطوبت در مقیاس‌های بزرگ، شبیه‌سازی می‌گردند. دقت مکانی افقی مدل‌های در سطح خشکی‌های کره زمین نوعاً ۲۵۰ کیلومتر و دقت مکانی قائم آن برابر ۱ کیلومتر می‌باشد. در حالی که دقت مکانی قائم در اقیانوس‌ها ۲۰۰ تا ۴۰۰ متر و دقت مکانی افقی برابر ۱۲۵ تا ۲۵۰ کیلومتر است. کمترین مقیاس زمانی برای حل معادلات ۳۰ دقیقه است. در حالی که فرایندهای فیزیکی زیادی نظیر فرایندهای مربوط به ابرها و اقیانوس‌ها در مقیاس‌های زمانی کمتر اتفاق می‌افتد. بنابراین این فرایندها نمی‌توانند به طور صریح در مدل‌های AOGCM مدل شوند. در این حالت به طور تقریبی اثرات میانگین آنها با در نظر گرفتن رابطه فیزیکی مربوط با متغیرهای بزرگ مقیاس، در مدل لحاظ گردیده که به آن پارامتره کردن (Parameterization) گویند. مدل‌های AOGCM در چند دهه اخیر با افزایش قدرت رایانه‌ها توسعه زیادی یافته‌اند (مساح بوانی ۱۳۸۵).

به منظور در اختیار گذاشتن خروجی مدل‌های AOGCM برای بررسی اثرات تغییر اقلیم در نقاط مختلف کره زمین، در سال ۱۹۹۸، IPCC کمیت‌های را با نام DDC (Data Distribution Center) (IPCC-DDC)، تشکیل داد. DDC معیارهای زیر را به منظور پذیرش خروجی

به عنوان مثال مشخصات مدل‌های سومین گزارش IPCC (Third Assessment Report, TAR) و جدول ۲-۴ بعنوان مثال مشخصات مدل‌های چهارمین گزارش IPCC (Assessment Report, AR۴)، را نشان می‌دهد) در تمام این مدل‌های هشت متغیر اقلیمی از سطح زمین شامل، میزان بارندگی، میانگین فشار سطح دریاها، تابش خورشیدی، میانگین دمای هوا، دمای نقطه شبنم، حداقل دمای هوا، حداکثر دمای هوا و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری تا سال ۲۱۰۰ تحت سناریوهای مختلف انتشار شبیه‌سازی شده‌اند. همچنین متغیرهای دیگری شامل محدوده تغییرات دمای روزانه، فشار بخار، واریانس دمای روزانه و بارندگی نیز تحت بعضی از مدل‌های اجرا شده‌اند. مجموعه کامل متغیرهای ماهانه ذکر شده از آرشیو داده‌های مدل‌های AOGCM در بخش DDC از سایت IPCC قابل دسترسی می‌باشد (IPCC-DDC).

مدل‌های عددی ساده

اگرچه مدل‌های AOGCM جامع‌ترین ابزار جهت شبیه‌سازی پاسخ اقلیم به تغییرات

مدل‌های AOGCM موجود وضع کرد:

- مدل‌هایی که بغیر از دیگر سناریوهای انتشار، سناریوی IS۹۲a را نیز اجرا کرده باشند. (سناریوی IS۹۲a امتداد وضعیت روند مشاهده شده در داده‌های کنونی برای آینده می‌باشد (Business As Usual)).
- اجرای مدل‌های براساس داده‌های ثبت شده گازهای اتمسفر در قرن گذشته
- اجرای مدل‌های تا سال ۲۱۰۰ بر اساس سناریوهای مختلف،
- مستند بودن علمی مدل‌های
- مدل‌هایی که در طرح‌های مقایسه‌ای مدل‌های AOGCM نظیر AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project) و CMIP (The Coupled Model Intercomparison Project) مورد آزمایش قرار گرفته باشند (Gates et al., ۱۹۹۸).

پس از بررسی مدل‌های AOGCM موجود با معیارهای ذکر شده، نهایتاً خروجی مدل‌هایی مختلف در سال‌های مختلف در سایت IPCC قرار گرفت (جدول ۲-۳)

در نیروی تابشی می‌باشند، ولی شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در سطح کره زمین توسط این مدل‌های تحت هر سناریوی انتشار، احتیاج به صرف زمانی بسیار طولانی دارد. به طوری که برای انجام یک آزمایش احتیاج به چندین نفر- سال برای طراحی، اجراء و تجزیه و تحلیل می‌باشد. همان طور که از جداول ۲-۳ و ۲-۴ مشاهده می‌شود در اکثر مدل‌هایی AOGCM، از ۴۰ سناریوی انتشار SRES تنها نتایج اجرای ۲ سناریو A۲ و B۲ و در بعضی از آنها ۴ سناریو A۲، B۲، A۱FI و B۱ موجود می‌باشد. روش جایگزین برای بررسی پاسخ اقلیم به نیروی تابشی استفاده از مدل‌هایی ساده‌تر می‌باشد. در این مدل‌های، کل کره زمین به عنوان یک سلول محاسباتی در نظر گرفته شده که در آن بسیاری از جزئیات فرایندهای شبیه‌سازی مدل‌هایی AOGCM ساده‌سازی می‌شوند. گرچه با استفاده از این مدل‌های می‌توان نتایج حاصل از پاسخ اقلیم را تحت اعمال تمامی ۴۰ سناریوی انتشار در دوره‌های آتی شبیه‌سازی کرد، ولی این مدل‌های تنها قادر به شبیه‌سازی میانگین دمای سطحی اتمسفر زمین در مقیاس سالیانه می‌باشند. یکی از این مدل‌های که در بیشتر تحقیقات مربوط استفاده شده مدل MAGICC (Model for Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change) (Raper and Cubasch, ۱۹۹۶) می‌باشد.

شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های گذشته و آینده توسط مدل‌هایی AOGCM

نسخه‌های جدید مدل‌هایی AOGCM دو نوع شبیه‌سازی متفاوت از متغیرهای اقلیمی را اجرا کرده‌اند. در نوع اول مقدار گازهای گلخانه‌ای در طول زمان شبیه‌سازی در سطح مقادیر مشاهداتی آن در سال ۱۸۶۰، ثابت نگه داشته می‌شود. در این شبیه‌سازی که به اجرای کنترل (Control Run) مشهور می‌باشد، معمولاً متغیرهای اقلیمی

تحت یک دوره ۱۰۰۰ ساله شبیه‌سازی می‌شوند. بدیهی است، به دلیل ثابت ماندن مقادیر گازهای گلخانه‌ای و دیگر عوامل خارجی (مانند تابش خورشیدی) در این شبیه‌سازی‌ها سری زمانی متغیر مورد مطالعه تنها تحت تاثیر نیروهای درونی سیستم اقلیم قرار گرفته و نتیجتاً مشخص‌کننده تغییرات درونی (Internal Variability) سیستم اقلیم می‌باشند. در صورتی که فرض کنیم در دوره‌های آتی تغییری در میزان عوامل خارجی (تابش خورشیدی و فعالیت‌های آتشفشانی) رخ ندهد، می‌توان گفت این شبیه‌سازی بیانگر تغییرات طبیعی اقلیم نیز می‌باشد. در شبیه‌سازی دیگر به منظور بررسی وضعیت گذشته اقلیم کره زمین، مقادیر مشاهداتی گازهای گلخانه‌ای، نوسانات تابش خورشیدی و ذرات معلق ناشی از فواران‌های آتشفشانی تا سال ۲۰۰۰، به عنوان ورودی به مدل‌هایی AOGCM ارائه شده و متغیرهای اقلیمی در این دوره به صورت سری زمانی شبیه‌سازی می‌گردند. مقایسه نتایج مدل‌هایی AOGCM مختلف با داده‌های مشاهداتی میانگین سالانه دما و بارندگی، میانگین فصلی دما و بارندگی، پدیده‌های جوی نظیر: انسو (ENSO) (پدیده انسو مهم‌ترین برهمکنش پیچیده اقیانوس و جو است که بخش اقیانوسی آن النینو و بخش جوی آن نوسان جنوبی می‌باشد و سبب تغییرات اقلیمی جهانی در مقیاس درون سالی است. این پدیده در ارتباط با گرم و سرد شدن دمای سطح آب و تغییرات فشار سطح آب در امتداد شرقی و غربی اقیانوس آرام (که کانون اصلی پدیده انسو است) می‌باشد و بر آب و هوای جهان کم و بیش تاثیرگذار است. فاز گرم انسو را النینو و فاز سرد آن را لانینا گویند)، مانسون، ال-نینو (EL-NINO)، نائو (NAO) و رخدادهای استثنائی نظیر دما و بارندگی حدی نشان از معتبر بودن شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط این مدل‌های است (Oldenborgh et al, ۲۰۰۵; Stott et al; ۲۰۰۰; Arthur et al, ۱۹۹۵; Lambert et al, ۲۰۰۵). پس

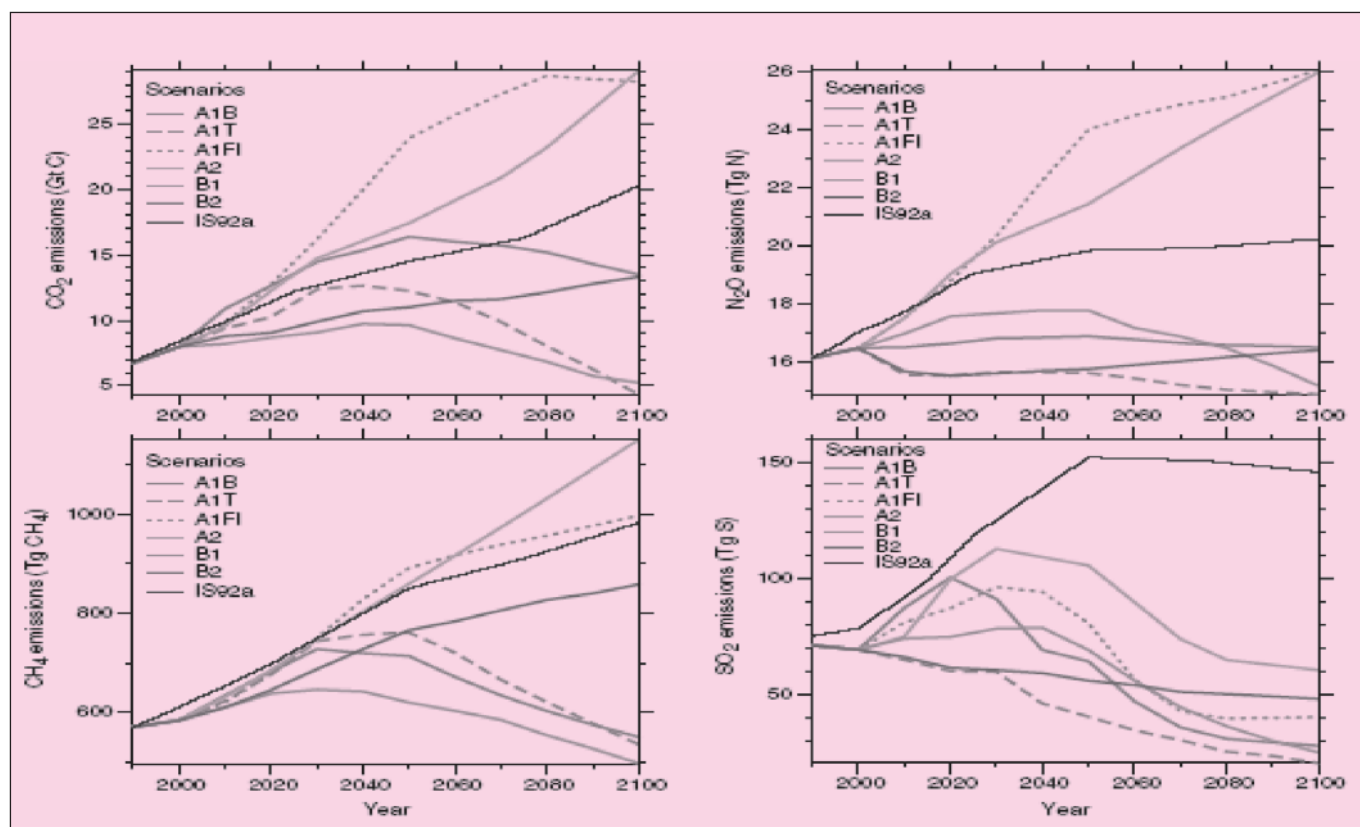
از شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های گذشته توسط مدل‌هایی AOGCM، به منظور شبیه‌سازی وضعیت این متغیرها در دوره‌های آتی، نیاز به معرفی وضعیت انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی برای این مدل‌های می‌باشد بدین منظور ابتدا میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه شده در سناریوهای انتشار (مثلاً سناریوهای SRES) توسط مدل‌هایی دیگر به غلظت و نهایتاً به میزان نیروی تابشی تبدیل شده و این مقادیر به عنوان ورودی برای مدل‌هایی AOGCM ارائه می‌شوند. نتایج ناشی از شبیه‌سازی مدل‌هایی AOGCM تحت سناریوهای انتشار، سری زمانی متغیرهای اقلیمی را تا سال ۲۱۰۰ ارائه می‌دهد (IPCC ۲۰۰۷a).

ریز مقیاس نمایی (Downscaling)

یکی از مشکلات عمده در استفاده از خروجی مدل‌هایی AOGCM در مطالعات ارزیابی تاثیر تغییر اقلیم در سطوح منطقه‌ای، بزرگ بودن مقیاس مکانی سلول محاسباتی آنها، نسبت به منطقه مورد مطالعه می‌باشد. روش‌های مختلفی جهت تولید سناریوهای اقلیمی منطقه‌ای از سناریوهای اقلیمی مدل‌هایی AOGCM وجود دارد که به این روش‌ها ریز مقیاس نمایی گفته می‌شود. این روش‌ها عبارتند از:

- استفاده از اطلاعات سلول اصلی: در این روش متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط AOGCM از اطلاعات مربوط به سلولی استخراج می‌شود که منطقه (ایستگاه) مورد مطالعه در آن قرار می‌گیرد. (Jones, Wilby and Harris, ۲۰۰۱, and Page, ۲۰۰۵).

- درون‌یابی اطلاعات سلول‌های مجاور: به منظور برطرف کردن عدم پیوستگی در تغییرات بین متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده در سایت‌های نزدیک به هم که در دو سلول متفاوت محاسباتی قرار می‌گیرند، از روش درون‌یابی سلول‌های مجاور منطقه مورد مطالعه استفاده می‌شود (Barrow et



شکل ۵- میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در ۶ سناریوی SRES و سناریوی IS92a (Carter et al ۱۹۹۲، ۲۰۰۷)

عدم قطعیت (Uncertainty) در مطالعات تغییر اقلیم

باید توجه داشت که در مطالعات اثرات تغییر اقلیم بر سیستم‌های مختلف، منابع مختلف عدم قطعیت وجود داشته که عدم مدیریت این منابع در محاسبات، باعث به وجود آمدن نتایج غیر کاربردی و غیرمنطقی می‌گردد. به عنوان مثال استفاده از نتایج مدل HadCM3 تحت سناریوی انتشار A2 نشان از کاهش بارش برای حوضه زاینده‌رود در سال ۲۰۵۰ دارد. این در حالی است که استفاده از نتایج مدل HadCM3 تحت سناریوی انتشار B2 در سال ۲۰۵۰ نشان از افزایش بارش برای همین منطقه دارد. دلیل اصلی این تفاوت در عدم قطعیت موجود در سناریوی انتشار A2 و B2 است. به طور کلی منابع عدم قطعیتی که بر نتایج مطالعات شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر سیستم‌های مختلف از جمله منابع آب تأثیر می‌گذارند عبارتند از (مساح بوانی و همکاران ۱۳۸۹):

روش‌های ریز مقیاس نمایی استفاده از روش‌های عددی با مقیاس وضوح بالاتر در منطقه مورد مطالعه می‌باشد که به روش‌های مختلف انجام می‌گیرد. در یک روش می‌توان مدل AOGCM را با وضوح بالاتر اما در زمان محدودتر اجرا کرد. در روش دیگر مدل AOGCM با وضوح مختلف در سطح کره زمین اجرا می‌گردد، به گونه‌ای که در سطح منطقه مورد مطالعه وضوح بالاتری را شاهد خواهیم بود. در روش سوم از مدل‌هایی منطقه‌ای با وضوح بالا استفاده می‌شود. به گونه‌ای که خروجی‌های مدل AOGCM به عنوان شرایط مرزی این مدل‌های مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بعضی از مطالعات خروجی‌های یک مدل منطقه‌ای بعنوان شرایط مرزی مدل منطقه‌ای دیگر با وضوح بالاتر استفاده می‌شود. در نهایت می‌توان از روش‌های ترکیبی آماری و دینامیکی کوچک مقیاس کردن استفاده کرد. (Carter et al ۲۰۰۷).

al, ۱۹۹۶).
 - روش‌های آماری (Statistical Downscaling): روش منطقی‌تر در افزایش وضوح خروجی‌های مدل‌هایی AOGCM، محاسبه تغییرات مشاهداتی متغیر سطحی مورد مطالعه در مقیاس منطقه‌ای به عنوان تابعی از خصوصیات آماری متغیرهای مشاهداتی اقلیمی بزرگ مقیاس (میانگین فشار در سطح دریاها) می‌باشد. در این روش پس از برقراری تابع مطلوب، متغیرهای اقلیمی بزرگ مقیاس که توسط مدل‌هایی AOGCM در دوره‌های آتی شبیه‌سازی شده‌اند، به عنوان ورودی در این توابع اعمال شده و متغیر سطحی مورد نظر نتیجه خواهد شد. اگرچه این روش نسبت به روش‌های قبلی نتایج بهتری را ارائه می‌کند، ولی نیاز به داده‌های مشاهداتی زیاد و قضاوت متخصصین به منظور برقراری رابطه مناسب را دارد. (Wilby et al, ۱۹۹۸).
 - روش‌های دینامیکی: یکی دیگر از

از عدم قطعیت در کاربرد مدل‌هایی شبیه‌ساز منابع آب می‌شود (کمال و مساح بوانی ۱۳۸۸).

با توجه به آنچه آمد، می‌توان دریافت که عدم قطعیت‌های مختلفی می‌تواند نتایج مطالعات ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر سیستم‌های مختلف را تحت تاثیر قرار دهد. به عبارت دیگر تاثیر این عدم قطعیت‌ها تا حدی است که صرف‌نظر کردن از هر کدام از آنها تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج نهایی دارد. این امر نشان‌دهنده این مطلب است که عدم در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مرتبط با موضوع می‌تواند نتایج غیر واقعی را بدنبال داشته و برای تصمیم‌گیرندگان در قطعیت نتیجه ابهام ایجاد کند.

ساتی‌گراد می‌باشد (Jones, ۲۰۰۱).

- عدم قطعیت مربوط به شبیه‌سازی مدل‌هایی AOGCM در سطوح منطقه‌ای: بررسی متغیرهای اقلیمی حاصل از مدل‌هایی AOGCM در سطوح منطقه‌ای نشان می‌دهد که این مدل‌های به دلیل استفاده از روش‌های مختلف در پارامتره کردن (Parameterization) فرایندهای کوچک مقیاس (بارندگی و...)، نتایج یکسانی را از شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی مشابه در منطقه مورد نظر به دست نمی‌دهند. بنابراین علاوه بر عدم قطعیت‌های ذکر شده در شبیه‌سازی گرم شدن اقلیم کره زمین، در هر منطقه خاص شاهد محدودهای از عدم قطعیت در متغیرهای اقلیمی به وسیله مدل‌هایی مختلف AOGCM می‌باشیم (Jones, ۲۰۰۱).

- عدم قطعیت در استفاده از روش‌های مختلف ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌هایی AOGCM: همان‌طور که قبلاً ذکر گردید، روش‌های مختلفی جهت ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌هایی AOGCM وجود دارد. به دلیل تفاوت در چگونگی انجام عمل ریزمقیاس‌نمایی در روش‌های ذکر شده، خروجی حاصل از این روش‌ها یکسان نمی‌باشد. از طرف دیگر هر کدام از روش‌های ذکر شده دارای معایب و مزایای خاص خود بوده و نمی‌توان یک روش را به عنوان بهترین روش برگزید. بنابراین انتخاب نتایج ناشی از هر روش برای استفاده در مطالعات تغییر اقلیم می‌تواند همراه با عدم قطعیت باشد (Jones, ۲۰۰۱).

- عدم قطعیت در مدل‌هایی شبیه‌سازی منابع آب یک حوضه: به طور کلی مدل‌هایی مختلفی برای شبیه‌سازی منابع آب یک حوضه وجود داشته که به دو دسته مدل‌هایی آماری (Statistical) و مفهومی (Conceptual) تقسیم می‌شوند. در هر کدام از این دو دسته از مدل‌های منطقه‌ای متفاوتی برای شبیه‌سازی به کار رفته است. وجود تفاوت در منطق این مدل‌های باعث ایجاد تفاوت در خروجی‌ها تحت شرایط یکسان ورودی‌ها شده که نشان

- عدم قطعیت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای: بدلیل نامشخص بودن وضعیت اقتصادی- اجتماعی و تکنولوژیکی آینده جامعه بشری نمی‌توان به صراحت یک میزان مشخص برای انتشار گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفت. بنابراین وجود سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی نمونه‌ای از عدم قطعیت در انتشار این گازها بوده به طوری که هر کدام سطوح مختلفی از ترکیبات گازهای اتمسفر را ارایه می‌کند (Jones, ۲۰۰۱).

- عدم قطعیت در تبدیل میزان گازهای گلخانه‌ای به غلظت اتمسفریک و نیروی تابشی: به منظور وارد کردن سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای به مدل‌هایی AOGCM، لازم است تا در ابتدا مقدار این گازها در هر سناریو به میزان غلظت معادل آن در اتمسفر کره زمین تبدیل شده و سپس نیروی تابشی حاصل از آن محاسبه گردد. بدیهی است که به دلیل عدم وجود دانش کافی در چگونگی تبدیل مقدار این گازها به غلظت در اتمسفر و همچنین چگونگی تبدیل این غلظت به نیروی تابشی، برآورد این نیروها با عدم قطعیت همراه بود (Jones, ۲۰۰۱).

- عدم قطعیت مربوط به حساسیت مدل‌هایی AOGCM مختلف به نیروی تابشی یکسان: در مدل کردن فرایندهای فیزیکی و پسخوردهای آنها در مدل‌هایی مختلف AOGCM، مقدار حساسیت اتمسفر زمین متفاوت می‌باشد. بدین معنی که بعضی از مدل‌هایی AOGCM میانگین گرم شدن بیشتری را در اتمسفر کره زمین نسبت به واحد نیروی تابشی یکسان، شبیه‌سازی می‌کنند. میزان حساسیت اقلیم با شبیه‌سازی حالت فرضی دو برابر شدن میزان CO₂ و بررسی مقدار گرم شدن اقلیم کره زمین در حالت تعادل در مدل AOGCM برآورد می‌گردد. طبق گزارشات IPCC این محدوده بر اساس نتایج به دست آمده از مدل‌هایی AOGCM مختلف برابر ۲ تا ۵/۱ درجه