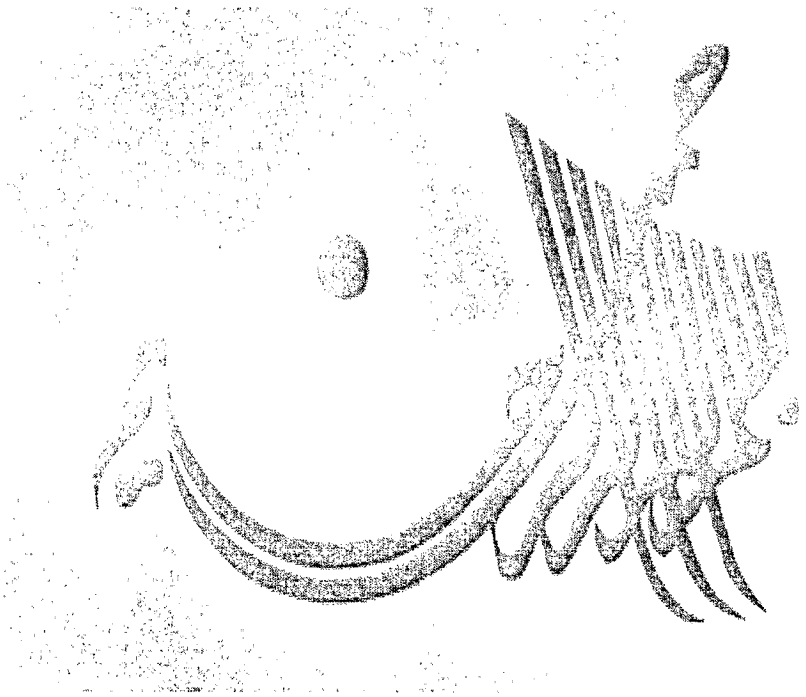

١١٢٧٨

دانشگاه شیراز

دانشکده کشاورزی

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته هواشناسی کشاورزی

ارزیابی امکان فرو مقیاس نمودن خروجی مدل GCM جهت پیش بینی دما در مناطق جنوب غرب ایران

به وسیله‌ی

حسین امیری

استاد راهنما:

دکتر سید محمد جعفر ناظم السادات

۱۳۸۸/۶/۱۱

بهمن ماه ۱۳۸۷

۱۱۶۲۶۵

به نام خدا

اظهارنامه

اینجانب حسین امیری (۸۴۰۵۹۷) دانشجوی رشته‌ی مهندسی کشاورزی گرایش هواشناسی کشاورزی دانشکده کشاورزی اظهار می کنم که این پایان نامه حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته ام .همچنین اظهارمی کنم که تحقیق و موضوع پایان نامه ام تکراری نیست و تعهد می نمایم که بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشرننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم. کلیه حقوق این اثر مطابق با آیین نامه مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.

نام ونام خانوادگی: حسین امیری

تاریخ و امضا: ۸۸/۴/۱۴

به نام خدا

ارزیابی امکان فرو مقیاس نمودن خروجی مدل GCM جهت پیش بینی دما در مناطق جنوب غرب ایران

به کوشش

حسین امیری

پایان نامه
ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی
از فعالیت های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته‌ی:

هواشناسی کشاورزی

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: عالی

دکتر محمد جعفر ناظم السادات، دانشیار بخش مهندسی آب (رئیس کمیته).....

دکتر علی اکبر کامگار حقیقی، دانشیار بخش مهندسی آب.....

دکتر داور خلیلی، دانشیار بخش مهندسی آب .....

امین شیروانی، کارشناس بخش مهندسی آب.....

بهمن ماه ۱۳۸۷

تقدیم به خانواده ام،

آنانکه دوست داشتن را به من آموختند.

سپاسگزاری

سپاس و ستایش یزدان پاک را که ذات بیکرانش آکنده از علم و دانش است و چه با سخاوت از این خوان بی همتا، بشر را موهبتی شگرف ارزانی داشته است.

اکنون که به یاری پروردگار مهربان تحقیق و نگارش این پایان نامه به اتمام رسیده است از تمامی کسانی که در به فرجام رسیدن این مهم بنده را یاری کردند تشکر و قدرانی می نمایم. وظیفه خود می دانم از خانواده عزیزم که با بلند نظری، رنج تمام مراحل زندگیم را به جان خریده اند و در کوران حوادث و مشکلات با صبر و متانت همواره مرا یار بوده اند سپاسگزاری کنم.

در اجرای این پروژهش از یاری و بذل توجه بسیاری از اساتید بهره مند بودم که وظیفه خویش می دانم از آن ها قدرانی نمایم. از استاد راهنمای عزیزم، جناب آقای دکتر ناظم السادات که بیشترین زحمت را در این زمینه تقبل نمودند و همچنین از دیگر اعضای محترم کمیته پایان نامه آقایان دکتر کامگار حقیقی، دکتر خلیلی و آقای امین شیروانی از صمیم قلب متشکرم.

از همراهی همکلاسی های عزیزم آقایان مهندس شهرام زارع، مهندس علی فاروغی، مهندس حمیدرضا افشار نادری و همچنین از همکاری دوست مهربانم مهندس محمدکاظم شعبانی و سایر دوستانی که در این مجال ذکر نام یکایکشان میسر نیست سپاسگزارم. یاد و خاطره آنها همواره در ذهن من باقی خواهد ماند.

چکیده

ارزیابی امکان فرو مقیاس نمودن خروجی مدل GCM جهت پیش بینی دما در مناطق جنوب غرب ایران

به وسیله‌ی

حسین امیری

با توجه به این که مدل‌های GCM بزرگ مقیاس هستند بین اطلاعات آنها با شرایط منطقه‌ای و محلی اختلاف وجود دارد. بنابراین در این تحقیق سعی شده است از روش فرومقیاس نمودن برای تطبیق بیشتر خروجی مدل GCM با شرایط مناطق جنوبی استفاده شود. برای ارزیابی امکان فرومقیاس نمودن دما در مناطق جنوب غرب ابتدا لازم بود با استفاده از روشهای چند متغیره آماری نظیر تحلیل مؤلفه های اصلی و تحلیل خوشه‌ای به پهنه‌بندی دمای ایران پرداخته شود. در سراسر ایران ۶ پهنه دمایی مشخص گردید که از این بین، تنها یک پهنه در منطقه جنوب و جنوب غرب مشخص گردید. سپس از گره های مدل GCM درون منطقه یا نزدیک به آن جهت فرومقیاس نمودن مشخص گردید.

در گام بعد بین خروجی مدل در گره های مختلف با داده های هواشناسی، روابط رگرسیونی خطی ساده برقرار گردید. در این تحقیق برای ارزیابی روابط رگرسیونی حاصل از گره های مختلف از توابع توزیع احتمال و همچنین روش Bootstrap استفاده گردید. بر اساس این روابط پیش بینی شد دمای منطقه جنوب غرب ایران تا سال ۲۰۳۹ به طور میانگین ۱/۴ درجه سانتیگراد افزایش یابد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱- کلیات	۱
۱-۲- تاریخچه تکامل مدل‌های GCMs	۳
۱-۳- خصوصیات مدل‌های GCM	۶
۱-۴- اهداف تحقیق	۸
فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته	۹
۲-۱- روشهای چند متغیره	۹
۲-۲- فرومقیاس نمودن	۱۲
فصل سوم: داده‌ها و روش‌های محاسباتی	۱۶
۳-۱- داده ها	۱۶
۳-۱-۱- داده های دمای ماهانه ایستگاههای هواشناسی	۱۶
۳-۱-۲- داده‌های خروجی مدل Echam4	۱۹
۳-۲- روشهای محاسباتی	۲۰
۳-۲-۱- پهنه‌بندی دمای ایران	۲۰
۳-۲-۱-۱- تحلیل مؤلفه‌های اصلی	۲۰
۳-۲-۱-۲ تحلیل خوشه ای	۲۳
۳-۲-۲- فرو مقیاس نمودن آماری	۲۴

عنوان | صفحه

۳-۲-۲-۱- روابط رگرسیون خطی ساده ۲۵
۳-۲-۳- سنجش اعتبار و ارزیابی توان مدل‌ها در امر پیش‌بینی ۲۶
۳-۲-۳-۱- روش های ارزیابی ۲۷
۳-۲-۳-۱-۱- توابع توزیع احتمال ۲۷
۳-۲-۳-۱-۲- آزمون معنی دار بودن ضریب همبستگی با روش Bootstrap ۲۸
۳-۲-۳-۱-۳- صحت سنجی مدل‌های رگرسیونی ۳۱
۳-۳- مدل GCM مورد استفاده ۳۱
۳-۴- منطقه مورد مطالعه ۳۲
فصل چهارم: بحث و نتیجه‌گیری ۳۴
۴-۱- مؤلفه های اصلی دما ۳۴
۴-۲- تحلیل خوشه ای ۳۵
۴-۲-۱- روش سلسله مراتبی در تحلیل خوشه‌ای ۳۶
۴-۳- همبستگی خطی ساده ۴۱
۴-۴- توابع توزیع احتمال ۴۳
۴-۵- روابط رگرسیونی ۵۴
۴-۶- آزمون معنی‌داری ضریب همبستگی با روش Bootstrap ۵۷
۴-۷- صحت سنجی مدل‌های رگرسیونی ۵۹
۴-۸- پیش‌بینی دمای منطقه برای دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ ۷۲
فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات ۷۳
منابع ۷۶
پیوست ۸۰

فهرست جدول ها

عنوان و شماره	صفحه
جدول(۳-۱): مشخصات جغرافیایی ایستگاههای سینوپتیک	۱۷
جدول (۴-۱): میانگین و انحراف معیار ماهانه مناطق شش‌گانه	۳۹
جدول (۴-۲): میزان همبستگی(R2) بین گره های مختلف با ایستگاههای محدوده مطالعاتی	۴۲
جدول(۴-۳): روابط رگرسیونی بین گره‌های مختلف و ایستگاه‌های منطقه	۵۴
جدول (۴-۴): مقادیر حدود اطمینان در روش Bootstrap	۵۸
جدول (۴-۵):خصوصیات آماری دمای مشاهده‌ای، خروجی مدلEcham4 وکوچک مقیاس شده در ایستگاه آبادان	۶۲
جدول (۴-۶): خصوصیات آماری دمای مشاهده‌ای، خروجی مدلEcham4 و کوچک مقیاس شده در ایستگاه اهواز	۶۳
جدول (۴-۷): خصوصیات آماری دمای مشاهده‌ای، خروجی مدلEcham4 و کوچک مقیاس شده در ایستگاه بندرعباس	۶۴
جدول (۴-۸): خصوصیات آماری دمای مشاهده‌ای، خروجی مدلEcham4 و کوچک مقیاس شده در ایستگاه بندرلنگه	۶۵
جدول (۴-۹): خصوصیات آماری دمای مشاهده‌ای، خروجی مدلEcham4 و کوچک مقیاس شده در ایستگاه بوشهر	۶۶
جدول (۴-۱۰) خصوصیات آماری دمای مشاهده‌ای، خروجی مدلEcham4 و کوچک مقیاس شده در ایستگاه فسا	۶۷
جدول (۴-۱۱) خصوصیات آماری دمای مشاهده‌ای، خروجی مدلEcham4 و کوچک مقیاس شده در ایستگاه هفت‌تپه	۶۸

عنوان و شماره | صفحه

جدول (۴-۱۲) خصوصیات آماری دمای مشاهده‌ای، خروجی مدلEcham4
و کوچک مقیاس شده در ایستگاه حمیدیه ۶۹
جدول (۴-۱۳) خصوصیات آماری دمای مشاهده‌ای، خروجی مدلEcham4
و کوچک مقیاس شده در ایستگاه شیراز ۷۰
جدول (۴-۱۴) خصوصیات آماری دمای مشاهده‌ای، خروجی مدلEcham4
و کوچک مقیاس شده در ایستگاه شاخص منطقه ۷۱

فهرست شکل ها

عنوان و شماره	صفحه
شکل (۱-۱): موقعیت شبکه های GCM بر روی کره زمین	۸
شکل (۳-۱): موقعیت ایستگاههای هواشناسی	۱۹
شکل(۳-۲): موقعیت منطقه مورد مطالعه (همرا با موقعیت ایستگاههای هواشناسی)	۳۳
شکل (۴-۱): نمودار Scree Plot	۳۵
شکل(۴-۲): فاصله بین گروه ها تشکیل شده بعنوان تابعی از گام‌ها	۳۷
شکل(۴-۳): مناطق همگن دمایی ایران	۳۸
شکل(۴-۴): شاخص نسبی ایستگاههای محدوده مطالعاتی	۴۱
شکل(۴-۵): موقعیت گره های شبکه Echam4 در محدوده مطالعاتی	۴۳
شکل(۴-۶) نمودار توابع توزیع احتمال دمای ایستگاه آبادان و خروجی مدلGCM در گره N2	۴۵
شکل(۴-۷) نمودار توابع توزیع احتمال دمای ایستگاه آبادان و خروجی مدلGCM در گره N1	۴۵
شکل(۴-۸) نمودار توابع توزیع احتمال دمای ایستگاه اهواز و خروجی مدلGCM در گره N2	۴۶
شکل(۴-۹) نمودار توابع توزیع احتمال دمای ایستگاه اهواز و خروجی مدلGCM در گره N1	۴۶
شکل(۴-۱۰) نمودار توابع توزیع احتمال دمای ایستگاه بوشهر و خروجی مدل GCM در گره N2	۴۷
شکل(۴-۱۱) نمودار توابع توزیع احتمال دمای ایستگاه بوشهر و خروجی مدل GCM در گره N4	۴۷

عنوان و شماره صفحه

شکل(۴-۱۲) نمودار توابع توزیع احتمال دمای ایستگاه بندرعباس و خروجی مدل GCM در گره N2 ۴۸

شکل(۴-۱۳) نمودار توابع توزیع احتمال دمای ایستگاه بندرعباس و خروجی مدل GCM در گره N6 ۴۸

شکل(۴-۱۴) نمودار توابع توزیع احتمال دمای ایستگاه بندرلنگه و خروجی مدل GCM در گره N2 ۴۹

شکل(۴-۱۵) نمودار توابع توزیع احتمال دمای ایستگاه بندرلنگه و خروجی مدل GCM در گره N6 ۴۹

شکل(۴-۱۶) نمودار توابع توزیع احتمال دمای ایستگاه فسا و خروجی مدل GCM در گره N2 ۵۰

شکل(۴-۱۷) نمودار توابع توزیع احتمال دمای ایستگاه فسا و خروجی مدل GCM در گره N5 ۵۰

شکل(۴-۱۸) نمودار توابع توزیع احتمال دمای ایستگاه هفت‌تپه و خروجی مدل GCM در گره N2 ۵۱

شکل(۴-۱۹) نمودار توابع توزیع احتمال دمای ایستگاه هفت‌تپه و خروجی مدل GCM در گره N1 ۵۱

شکل(۴-۲۰) نمودار توابع توزیع احتمال دمای ایستگاه حمیدیه و خروجی مدل GCM در گره N2 ۵۲

شکل(۴-۲۱) نمودار توابع توزیع احتمال دمای ایستگاه حمیدیه و خروجی مدل GCM در گره N1 ۵۲

شکل(۴-۲۲) نمودار توابع توزیع احتمال دمای ایستگاه شیراز و خروجی مدل GCM در گره N2 ۵۳

شکل(۴-۲۳) نمودار توابع توزیع احتمال دمای ایستگاه شیراز و خروجی مدل GCM در گره N5 ۵۳

عنوان و شماره | صفحه

شکل(۴-۲۴) نمودار توزیع احتمال دمای شاخص منطقه و خروجی مدل GCM در گره N2 ۵۴

شکل (۴-۲۵): نمودار رابطه همبستگی بین ایستگاه اهواز و گره N1 ۵۵

شکل (۴-۲۶): نمودار رابطه همبستگی بین ایستگاه بندرعباس و گره N1 ۵۶

شکل (۴-۲۷): نمودار رابطه همبستگی بین ایستگاه بوشهر و گره N4 ۵۶

شکل (۴-۲۸): نمودار رابطه همبستگی بین ایستگاه شیراز و گره N1 ۵۷

شکل(۴-۲۹): هیستوگرام سریهای تصادفی جفت شده (شاخص منطقه – گره N2) همراه با خط توزیع نرمال ۵۸

شکل (۴-۳۰) مقادیر فرو مقیاس شده در ایستگاه آبادان همراه با مقادیر مشاهده‌ای و خروجی مدلEcham4 در گره N2 ۶۲

شکل (۴-۳۱) مقادیر فرو مقیاس شده در ایستگاه اهواز همراه با مقادیر مشاهده‌ای و خروجی مدلEcham4 در گره N2 ۶۳

شکل (۴-۳۲) مقادیر فرو مقیاس شده در ایستگاه بندرعباس همراه با مقادیر مشاهده‌ای و خروجی مدلEcham4 در گره N2 ۶۴

شکل (۴-۳۳) مقادیر فرو مقیاس شده در ایستگاه بندرلنگه همراه با مقادیر مشاهده‌ای و خروجی مدلEcham4 در گره N2 ۶۵

شکل (۴-۳۴) مقادیر فرو مقیاس شده در ایستگاه بوشهر همراه با مقادیر مشاهده‌ای و خروجی مدلEcham4 در گره N2 ۶۶

شکل (۴-۳۵) مقادیر فرو مقیاس شده در ایستگاه فسا همراه با مقادیر مشاهده‌ای و خروجی مدلEcham4 در گره N2 ۶۷

شکل (۴-۳۶) مقادیر فرو مقیاس شده در ایستگاه هفت‌تپه همراه با مقادیر مشاهده‌ای و خروجی مدلEcham4 در گره N2 ۶۸

شکل (۴-۳۷) مقادیر فرو مقیاس شده در ایستگاه حمیدیه همراه با مقادیر مشاهده‌ای و خروجی مدلEcham4 در گره N2 ۶۹

عنوان و شماره | صفحه

شکل (۴-۳۸) مقادیر فرو مقیاس شده در ایستگاه شیراز همراه با مقادیر مشاهده‌ای و خروجی مدلEcham4 در گره N2 ۷۰

شکل (۴-۳۹) مقادیر فرو مقیاس شده شاخص منطقه همراه با مقادیر مشاهده‌ای و خروجی مدلEcham4 در گره N2 ۷۱

شکل (۴-۴۰): میزان افزایش دما در دوره آماری ۲۰۳۹-۲۰۱۰ ۷۲

۱- مقدمه

۱-۱- کلیات

هیأت بین الدول تغییر اقلیم[1] در سال ۲۰۰۱ بر تغییرات جهانی حاکی از افزایش دمای کره زمین حدود ۰/۷ درجه سانتی‌گراد اشاره نموده است. این تغییرات از نیمه دوم قرن نوزدهم آغاز شده و پیش بینی می‌گردد که میزان این تغییرات تا سال ۲۱۰۰ بین ۱ تا ۳/۵ درجه سانتیگراد باشد. در سالهای اخیر فعالیت‌های بشری در تغییر اقلیم مؤثر بوده است. شواهد علمی محکمی وجود دارد که گرمایش جهانی سالهای اخیر را به افزایش گاز CO_2 در ۵۰ سال گذشته نسبت می‌دهند. این گرمایش جهانی سبب افزایش مقادیر حدی و شرایط آب و هوایی نامطلوب در دورانهای نه چندان دور می‌شود. بی‌شک تغییر اقلیم در آینده نزدیک اثرات نابهنجاری را در سطح زمین در پی خواهد داشت. از انواع مختلف اثرات تغییر اقلیم می‌توان به تغییر در الگوی بارش، وقوع سیل و خشکسالی، فراوانی روزهای سرد و کاهش دامنه تغییرات شبانه روزی دما اشاره نمود. (هیأت بین الدول تغییر اقلیم، ۲۰۰۱)

موضوع تغییر اقلیم و اثرات احتمالی آن بر روی بخشهای مختلف اقتصادی، اجتماعی و کشاورزی بعنوان یکی از چالشهای توسعه صنعتی مطرح می باشد. به طوری که سازمانهای بین‌المللی مختلفی همچون چهارچوب کنوانسیون تغییر اقلیم سازمان ملل متحد[2]، پروتکل کیوتو، هیئت بین الدولی تغییر اقلیم جهت بررسی این موضوع تشکیل گردیده‌اند. در این راستا سازمان هواشناسی کشور از طرف دولت به عنوان متولی امر تغییر اقلیم و بررسی آن در سطح کشور می‌باشد. به دلیل رویکرد جهانی برنامه چهارم توسعه و نیز بین المللی بودن مسئله تغییر

1 - Invernmental panel on climate change, IPCC
2 - United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC

اقلیم، شناخت دقیق این موضوع در راستای منافع ملی از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. فلذا تبیین جایگاه تغییر اقلیم با محوریت سازمان هواشناسی کشور امری روشن و بدیهی می‌باشد. طبق رویکرد برنامه چهارم، سازمان هواشناسی کشور باید با بررسی و مطالعه دقیق و استفاده از مدلهای چرخش عمومی[1] تغییرات کمی و کیفی تغییرات اقلیمی و اثرات آن در عملکرد محصولات کشاورزی با همکاری وزارت جهاد کشاورزی تعیین نماید. مهمترین این تغییرات که مورد مطالعه قرار می‌گیرد پیش‌بینی رخدادهای حدی همچون سیل و خشکسالی در تمامی مناطق ایران می‌باشد (سازمان مدیریت و برنامه ریزی، ۱۳۸۴).

هرگونه تغییر در شرایط آب و هوایی، کشاورزی و تولید محصولات زراعی را تحت تأثیر قرار خواهد داد. یکی از اثرات مهم تغییر اقلیم بر گیاهان زراعی در رابطه با افزایش تبخیر و تعرق گیاهان است. با توجه به محدودیت منابع آب و خشکسالی‌های پی در پی در کشور، تغییر اقلیم یکی از عوامل تشدید بحران در مدیریت منابع آب خواهد بود. افزایش دما اثرات دیگری نیز بر رشد گیاهان و عملکرد آنها خواهد داشت. کاهش رطوبت و افزایش تنش خاک، رقابت بیشتر علف‌های هرز، زودرسی گیاهان و تغییر در الگوی کشت از آن جمله هستند. بنابراین در صورتی که که در طی سالهای آینده تغییرات اساسی در رژیم حرارتی مناطق کشور رخ دهد، لازم است متناسب با آن سیاست‌های بخش کشاورزی نیز باآن سازگار گردد. برای تحقق این امر مهم، پیش‌بینی تغییرات دما از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود.

یکی از اقدامات اساسی که جامعه علمی برای حل مشکل پیش بینی‌های اقلیمی به انجام رسانیده است، ارائه مدلهای عددی چرخه عمومی جو می‌باشد. این مدلها عموماً با در نظر گرفتن رفتار گذشته و کنونی جو- اقیانوس و خشکی، نسبت به پیش‌بینی‌های آتی این رفتارها اقدام می‌نمایند. افزون براین، با توجه به افزایش گاز کربن دی اکسید و اثرات گلخانه‌ای آن در تغییر اقلیم، مدلهای گردش عمومی جو در راستای پیش بینی شرایط آب و هوایی ناشی از این افزایش، برنامه ریزی گردیده‌اند.

1 - General Circulation Models, GCMs

۱-۲- تاریخچه تکامل مدل‌های GCMs

یکی از آرزوهای بشر، شناخت تغییرات آب و هوایی و پیش‌بینی دقیق آن بوده‌است. در اوائل قرن بیستم میلادی دانشمند سوئدی بنام ژرکنس[1] برای پیش‌بینی تغییرات آب و هوایی، شروع به حل پاره‌ای از معادلات فیزیک پایه نمود. وی با توسعه چند معادله و با استفاده از نقشه‌های هواشناسی مانند نقشه‌های هم دما و نقشه جهت باد توانست تغییرات دما، رطوبت و حرکت هوا را تا اندازه ای توضیح دهد. روش وی تا سال ۱۹۵۰ پایه مدل های پیش بینی بود.

در سال ۱۹۲۲ ریاضیدان بریتانیایی، ریچاردسون[2] تصمیم گرفت مدلی را طراحی کند که بتوان بوسیله آن در تمامی نقاط دنیا به پیش بینی تغییرات آب وهوایی پرداخت. او عقیده داشت که می توان تمامی مناطق روی زمین را یک شبکه بهم پیوسته در نظر گرفت و بر روی این شبکه‌ها معادلات ژرکنس را اعمال نمود. وی توانست با محاسبه اختلاف فشار در دو سلول مجاورسرعت باد را محاسبه نماید. مدل وی اولین مدل عددی پیش بینی آب و هوایی بود.

در سال ۱۹۵۲ اقلیم شناس آمریکایی بولین[3] با استفلاده از معادلات دینامیک توانست تا حد زیادی به دقت مدل عددی ریچاردسون بیافزاید. با آغاز جنگ سرد در دهه ۵۰ میلادی پیشرفت چشمگیری در علوم کامپیوتر بوجود آمد. شخصی به نام نیومن[4] مؤظف گردید برای ناوبری بهتر کشتی ها و هواپیماها، ارتش آمریکا را از وضعیت جو آگاه کند. وی با تشکیل یک گروه فیزیکدان و ریاضیدان توانست با تغییراتی در مدل ریچاردسون قدرت مدل وی را در پیش بینی افزایش دهد. آنها با دعوت از اقلیم‌شناس معروف دانشگاه شیکاگو چارنی[5] به این مهم دست یافتند. چارنی با ساده کردن معادلات ریچاردسون به پیش‌بینی‌های هفتگی تا ۱۰۰ ساله دست یافت. وی با در نظر گرفتن نوارهای باریکی از هوا در یک عرض جغرافیایی معین به پردازش معادلات دینامیک پرداخت. از خصوصیات عمده این مدل، حل معادلات ریچاردسون در یک فضای سه بعدی بود. پارامترهایی که به این مدل ساده شده وارد شده بودند عبارت از: پستی و بلندی زمین و گردش هوا بود. اما بزرگترین چالشی که گروه با آن روبرو بود عدم

---

1 - Bjerknes
2 - Richardson
3 - Bolin
4 - Neuman
5 - Charni

همخوانی و مطابقت خروجی مدل با واقعیت های جو بود. در این راستا گروه وی شروع به جمع آوری آمار هواشناسی از تمامی مناطق دنیا نمودند. مهمترین این پارامترها دما، سرعت باد و رطوبت هوا بود. آنها با احداث ایستگاههای جو بالا، تغییرات دما و رطوبت را در ارتفاعات مختلف جو اندازگیری نمودند. با استفاده از این آمار نقشه های هواشناسی دقیق‌تری از مناطق مختلف دنیا بدست آمد. این تلاش‌ها جدی‌ترین شبیه سازی هواشناسی را به دنبال داشت. مدل آنها به مانند مدل ریچاردسون از سلول‌های هم اندازه تشکیل شده بود.

تا آن زمان عمده مشکلات مدل های گردش عمومی جو، عدم درک شرایط مرزی اقیانوس – خشکی، اتمسفر بود. فیلیپس[1] برای حل این مشکل راه حلی را ارائه نمود. وی ابتدا نیمکره شمالی را به شکل ماهی‌تاوه ای پر از آب فرض نموده و استوانه ای با ۱۶ لایه عمود بر آن در نظر گرفت. آنگاه به حل معادلات ریچاردسون پرداخت. نیومن اولین بار در سال ۱۹۵۴ این نظریه فیلیپس را در یک کنفرانس هواشناسی اعلام نمود. دولت آمریکا از فیلیپس خواست تا به این ایده به عنوان یک پروژه ملی نگاه کند و به وی اعلام نمودند برای رسیدن به نتایج مطلوب، دولت از هر گونه کمک مالی دریغ نخواهد نمود.

در سال ۱۹۵۵ اداره هواشناسی[2] نزدیک واشنگتن دی سی با مدیریت اسماگرونسکی[3] مسئولیت این پروژه را به عهده گرفت. این مرکز برای پاسخ به بعضی مجهولات ازنظریات سوکی[4].اقلیم شناس دانشگاه توکیو بهره فراوان برد. در سال ۱۹۵۸ دقیقترین مدل عددی با استفاده از ابر رایانه‌های آن زمان بدست آمد. در این مدل پارامترهایی نظیر بخار آب و رطوبت ابرها وارد شد. آن چیز که به دقت و سرعت این مدل افزوده بود لحاظ کردن تأثیر بخارآب، دی اکسید کربن و ازن بر روی تشعشعات موج بلند و موج کوتاه خورشید در معادلات بود.

درسال ۱۹۶۵ این گروه توانست یک مدل سه بعدی با ۹ لایه جوی ارائه دهد. آنها فرض کرده بودند مناطق مورد مطالعه به طور کامل پوشیده از آب هستند و تنها بادهای آرام به این منطقه می وزند. با توجه به سابقه همکاری این گروه با دانشگاه توکیو، آنها ریاضیدان جوانی را از این دانشگاه به نام آرکاوا[5] به استخدام مرکز بورو درآوردند. وی مسئول ایده های نو در این

---

1 - Phillips
2 - the Weather Bureau
3 - Smagorinsky
4 - Suki
5 - Arkawa

مرکز گردید. آرکاوا سعی داشت با طراحی مدل‌های دقیق‌تر ریاضی، ازحجم محاسبات بکاهد. مدلی که آنها در سال ۱۹۶۵ ارائه نمودند تمامی مناطق دنیا را پوشش می‌داد. از ویژگی این مدل وارد شدن الگو گردش بادهای اصلی بودند که سرتاسر زمین را احاطه کرده‌اند.

در سال ۱۹۶۸ محل تیم فیلیپس تغییر نمود. آنها از واشنگتن دی سی خارج شده و در خارج شهر پرینستون[1] اقامت گزیدند. هدف از این جابجایی بسط و توسعه مرکز به منظور استخدام نیروهای جدید از سرتاسر دنیا بود. درهمان سال با تصویب هیئت دولت سرپرستی این تیم به سازمان ملی اتمسفر و اقیانوس[2] واگذار گردید. اگرچه طراحان در دهه ۵۰ و ۶۰ میلادی به نتایج خوبی دست یافتند اما تا حصول نتایج مطلوب‌تر راه طولانی در پیش بود.

در سال ۱۹۷۰ گزارشی توسط محققین محیط زیست ارائه گردید مبنی بر این که اقلیم در حال تغییر می‌باشد. بنابراین با توجه به این مهم، طراحان مدل‌های گردش عمومی جو باید غلظت گاز دی اکسید کربن و نقش آن در گرمایش جهانی را مد نظر قرار می‌دادند. در همین سال مؤسسه گدارد[3] در سازمان فضایی آمریکا ناسا[4] زیر نظر هانسن[5]، مأمور مطالعه و توسعه دادن مدل‌های گردش عمومی جو شد. محوریت این مطالعات اتمسفر سیاره مشتری بود. تمرکز مدل آنها بر روی معادلات فیزیک ابر بود. آنها یک سری معادلات طرح نمودند که در آن بازتابش نور از سطح برف تعریف شده بود. مطالعات آنها بر روی منطقه ای به مساحت ۱۰۰۰ کیلومترمربع صورت پذیرفت. این گروه به جای مدل شبکه ای، مدل حلقوی را در نظر گرفتند. اشکال عمده این مدل عدم پردازش دقیق توسط کامپیوترها بود. تا آن زمان مدل آرکاوا، دقیق ترین مدل شناخته شده بود اما در این مدل تأثیرات گازدی اکسید کربن لحاظ نشده بود.

در اواخر دهه ۱۹۶۰ میلادی سوکی با تشکیل یک گروه جوان از دانشگاه توکیو تصمیم گرفت تأثیر گاز دی اکسید کربن را به درستی بر روی تغییراقلیم بفهمد. آنها با ساختن یک مدل آبی تغییرات غلظت گاز دی اکسید کربن را بر روی تعادل گرمایی و رطوبت هوا مورد بررسی قرار دادند. به طور کل مدل هایی که برای شبیه سازی افزایش غلظت گازهای گلخانه ای به کار رفتند، دو نوع بودند: ۱- مدل های GCM تعادلی: در این مدل ها تغییرات

---

1 - Princeton
2 - the National Center for Atmospheric Research, NCAR
3 - Goddard
4 - NASA
5 - Hansen