

مقدمه‌ای بر مدل‌های پیش‌بینی تغییرات اقلیمی

ریحانه رسول زاده^۱، نغمه مبرقی دینان^{۲*}، حسن اسماعیل زاده^۳، یوسف رشیدی^۳، هومان لیاقتی^۴

۱. دانشجوی دکتری گروه برنامه‌ریزی و طراحی محیط، پژوهشکده علوم محیطی - دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲. دانشیار گروه برنامه‌ریزی و طراحی محیط، پژوهشکده علوم محیطی - دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۳. استادیار گروه فناوری‌های محیط‌زیست، پژوهشکده علوم محیطی - دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۴. استاد گروه بوم‌شناسی کشاورزی، پژوهشکده علوم محیطی - دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ تصویب: ۱۴۰۲/۰۸/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۹

چکیده

امروزه، تغییرات اقلیمی با تأثیر بر محیط‌زیست و زندگی انسان، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های جهانی است. این تغییرات، خسارات اقتصادی قابل توجهی به همراه داشته، اثرات مخربی بر محیط‌زیست، سلامت و رفاه انسان دارد. بنابراین، پیش‌بینی تغییرات اقلیمی جهت مدیریت و کاهش هزینه‌های مرتبط با این اثرات از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. یک گام مهم در مطالعات تغییر اقلیم، انتخاب مناسب‌ترین مدل برای کاهش عدم قطعیت مرتبط با پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی است. لذا هدف اصلی این مقاله، بررسی انواع مدل‌های پیش‌بینی تغییر اقلیم است تا با شناخت بهتر این مدل‌ها، پژوهشگران بتوانند بر اساس نیازها و اهداف خود، مناسب‌ترین و کارآمدترین مدل را انتخاب کنند. این انتخاب صحیح، امکان برنامه‌ریزی بهتر و مقابله مؤثرتر با بحران‌های ناشی از تغییرات اقلیمی را فراهم می‌سازد. در این پژوهش با جستجو در پایگاه‌های اینترنتی استنادی - علمی بیش از ۸۰ مقاله مرتبط با مطالعات تغییر اقلیم در ایران و جهان استخراج و بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل‌های پیش‌بینی تغییرات اقلیمی شامل پنج دسته مدل‌های موازنه انرژی، مدل‌های تابشی-همرفتی یا مدل‌های تک ستونی، مدل‌های محدود شده ابعادی، مدل‌های سیستم زمین و مدل‌های گردش عمومی است. همچنین هیچ مدل واحدی وجود ندارد که برای همه اهداف و مقیاس‌های زمانی و مکانی مناسب باشد. با این حال، تمام مدل‌ها، در صورتی که به درستی انتخاب و به کار گرفته شود، قادر به ارائه اطلاعات ارزشمندی در مورد سیستم اقلیمی است. با توجه به تنوع گسترده مدل‌های اقلیمی و اهمیت شناخت آن‌ها این پژوهش به بررسی انواع مدل‌های پیش‌بینی تغییرات اقلیمی پرداخته است.

کلید واژه‌ها: مدل‌های اقلیمی، مدل‌های گردش عمومی (GCM)^(۱)، پروژه مقایسه متقابل مدل جفت شده (CMIP)^(۲).



سرآغاز

هیأت بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC)^(۳) در سال ۲۰۰۱ اعلام کرد که اقلیم جهانی در حال تغییر است و این تغییرات اثرات اقتصادی و اجتماعی گسترده‌ای بر بخش‌های مختلف از جمله محیط‌زیست، منابع طبیعی، اکوسیستم‌ها، بهداشت و سلامت عمومی، تقاضای انرژی و کشاورزی دارد (IPCC, 1992). تغییر اقلیم به عنوان تغییرات معنادار در میانگین پارامترهای اقلیمی نظیر باد، بارش، تابش و دما در طول یک دوره زمانی طولانی (چند دهه و بیشتر) تعریف می‌شود (مدرسی و همکاران، ۱۳۸۹).

در دهه‌های اخیر، میانگین دمای سطح زمین به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. به عنوان مثال، در سال ۲۰۲۰ نسبت به سال‌های ۱۹۵۱-۱۹۸۰، افزایش دمای ۰/۹۴ درجه سلسیوس گزارش شده است (Earth, 2019; Zhao et al., 2022). این تغییرات دمایی منجر به وقوع اختلالات اقلیمی و بلایای طبیعی مانند خشکسالی و سیلاب در دهه‌های گذشته شده است (Pörtner et al., 2022; Romanello et al., 2021). همچنین تغییرات اقلیمی، باعث ذوب شدن یخچال‌ها و صفحات یخی شده است که همراه با انبساط حرارتی آب دریاها، نقشی مهمی در بالا آمدن سطح آب دریاها داشته است. در فاصله سال‌های ۱۹۷۱ تا ۲۰۱۰، سطح آب دریاها به طور متوسط سالانه ۱/۷۲ میلی‌متر افزایش یافته است، که این میزان در مقایسه با سال ۱۹۹۳ دو برابر شده است (Merrifield & Thompson, 2018). تغییرات اقلیمی با تأثیر بر پارامترهای اقلیمی مانند دما و بارندگی، به طور مستقیم و غیرمستقیم جوامع انسانی، تنوع‌زیستی، تولیدات کشاورزی، اکوسیستم‌ها، منابع آبی و چرخه‌های هیدرولوژیکی را تحت تأثیر قرار داده است (Dai et al., 2011). افزایش فشار ناشی از تغییر اقلیم و رشد جمعیت باعث شده است که تقاضا برای محصولات کشاورزی به طور قابل‌توجهی افزایش یابد و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰ این تقاضا در مقایسه با سال ۲۰۰۷ دو برابر شود (Ray et al., 2013; Mall et al., 2017; Das et al., 2020; FAO, 2016). در ایران نیز میانگین دمای روزانه طی صد سال گذشته حدود ۲ درجه سلسیوس افزایش یافته است (کریمی و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین، الگوی بارش سالانه طی شش دهه گذشته نوساناتی داشته، اما روند یکنواخت افزایشی یا کاهش‌ی در کل کشور مشاهده نمی‌شود. به عبارت دیگر، در برخی مناطق افزایش بارش و در مناطقی دیگر کاهش بارندگی گزارش شده

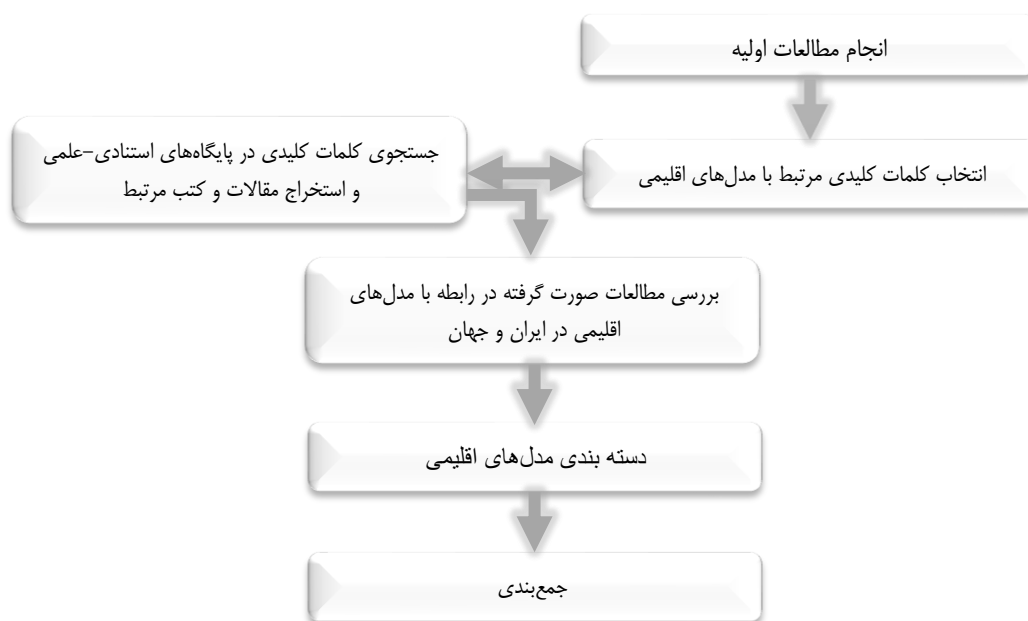
است. با توجه به توپوگرافی متنوع ایران، منابع رطوبتی و رفتار متفاوت الگوهای جوی، الگوی مکانی شاخص‌های بارش در طول ۶۰ سال گذشته همگن نبوده است (دوستان، ۱۳۹۸). انتشار گازهای گلخانه‌ای به عنوان محرک اصلی تغییر اقلیم و گرمایش جهانی شناخته می‌شود (Rasch, 2012). ایران از منظر انتشار گازهای گلخانه‌ای رتبه اول در خاورمیانه و رتبه هفتم را در جهان دارد (Daneshvar et al., 2019). در سال‌های اخیر، به دلیل پیامدهای اقتصادی و اجتماعی ناشی از رویدادهای جوی، توجه به تغییرات اقلیمی افزایش یافته است (اکبری و صیاد، ۱۴۰۰). با توجه به اثرات گسترده تغییرات اقلیمی بر محیط فیزیکی، بیولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی و تحمیل هزینه خسارت قابل توجه، ضروری است که این تغییرات در مطالعات محیط‌زیستی، برنامه‌ریزی، مدیریت و ارزیابی سرزمین مورد توجه قرار گیرد. مدل‌های پیش‌بینی تغییرات اقلیمی به عنوان ابزاری ضروری برای پیش‌بینی اثرات آینده و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی به کار می‌رود (Rasch, 2012). این مدل‌ها، که شبیه‌سازی‌های کامپیوتری برای پیش‌بینی اثرات انتشار گازهای گلخانه‌ای و سایر عوامل بر سیستم اقلیمی زمین است، اطلاعات مفیدی را در مورد سیستم اقلیمی فراهم می‌کند. با وجود این که، مدل‌های اقلیمی کامل نیست، اما نشان داده شده است که به طور نسبتاً خوبی می‌تواند تغییرات اقلیمی را پیش‌بینی کند و برای اتخاذ تصمیمات اقتصادی و سیاسی مهم در سراسر جهان مورد استفاده قرار گیرد (Harper, 2018). از این‌رو، همه انواع مدل‌ها زمانی که به درستی به کار برده شود می‌تواند اطلاعات مفیدی را در مورد سیستم اقلیمی ارائه دهد. با توجه به این که انتخاب بهترین مدل به هدف یا مسأله تحقیق بستگی دارد (Goosse et al., 2010)، مطالعه و شناخت مدل‌های مختلف و انتخاب مناسب‌ترین مدل برای انجام مطالعات مرتبط با تغییرات اقلیمی و کاهش هزینه‌های اقتصادی ناشی از آن دارای اهمیت بسیار است. از این‌رو، هدف اصلی این تحقیق، معرفی و بررسی جامع انواع مدل‌های تغییر اقلیم است. این کار، به پژوهشگران و متخصصان کمک می‌کند تا شناخت بهتری از مدل‌های اقلیمی داشته باشند و گزینه‌ای را انتخاب نمایند که بیشترین تطابق را با نیازها و اهداف پژوهشی آن‌ها دارد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، از روش مطالعه کتابخانه‌ای و جستجو در منابع

موضوع پژوهش در پایگاه‌های اینترنتی استنادی-علمی نظیر مگیران، Science Direct، Springer و سیولیکا تعیین شد. در این پژوهش، بیش از ۸۰ مقاله علمی- پژوهشی، گزارش و کتاب مرتبط با موضوع مطالعه مورد بررسی قرار گرفت و اطلاعات مربوط به مدل‌های پیش‌بینی تغییرات اقلیمی جمع‌بندی شد. در نمودار (۱)، مراحل انجام این پژوهش نشان داده شده است.

علمی معتبر برای بررسی مدل‌های پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در ایران و جهان استفاده شد. در مرحله نخست، با توجه به مطالعات اولیه انجام شده، کلید واژه‌هایی نظیر Climate Change Models, General Circulation Models, Energy Balance Models, Dimensionally Constrained Earth- Statistical-Dynamical Models, Models, Integrated System Models, Land Surface Models, Single Column Models, Radiative-Convective Models برای جستجو و استخراج مقالات و کتب مرتبط با



نمودار (۱): مراحل انجام پژوهش

نتایج و بحث

جغرافیایی پایین و بالا) و حرکات عمودی (مانند تلاطم‌های کوچک مقیاس، همرفت) صورت می‌پذیرد. ۳. فرایندهای سطحی: این فرایندها شامل اثرات یخ دریاها، خشکی‌ها، برف، پوشش گیاهی و تغییرات آلبو است. همچنین تبادل و انتشار انرژی و رطوبت بین سطح و اتمسفر را شامل می‌شود. ۴. شیمی: این مؤلفه به ترکیب شیمیایی اتمسفر و تعاملات آن با اجزای دیگر (مانند تبدلات کربن بین اقیانوس‌ها، زمین و جو) مربوط می‌شود. ۵. رزولوشن یا وضوح: این مؤلفه به مقیاس‌های زمانی و مکانی مدل‌ها اشاره دارد و تعیین می‌کند که یک مدل چگونه قادر به شبیه‌سازی دقیق فرایندهای اقلیمی در مقیاس‌های مختلف است (Rossby, 1946). دسته‌بندی‌های مختلفی برای مدل‌های پیش‌بینی تغییرات اقلیمی وجود دارد (برای مثال: Rasch, 2012; Rossby, 1946). با این حال، همانطور که در نمودار (۲)

مدل اقلیمی ابزاری است که برای شبیه‌سازی فرایندهای پیچیده‌ای طراحی شده است که اقلیم را شکل می‌دهد و به‌طور کلی نمایشی از تبادل انرژی بین سیستم زمین و فضا و تأثیر این تبدلات بر میانگین دمای جو و سطح زمین را به دست می‌دهد (Rasch, 2012; Gent, 1946). مهم‌ترین مؤلفه‌هایی که در ساخت یا درک یک مدل اقلیمی باید در نظر گرفته شود عبارت است از: ۱. تابش: این مؤلفه به نحوه جذب تشعشعات خورشیدی توسط اتمسفر و اقیانوس‌ها و بازتاب آن به اتمسفر به‌صورت تشعشعات مادون قرمز پرداخته، تعیین می‌کند که چگونه انرژی دریافتی به شکل انرژی حرارتی در سطح زمین توزیع می‌شود. ۲. دینامیک: این بخش شامل حرکت انرژی در سطح جهانی است که از طریق بادهای و جریان‌های اقیانوسی (ویژه در عرض‌های

همرفتی یا مدل‌های تک ستونی^(۵)، ۳. مدل‌های محدود شده ابعادی^(۶)، ۴. مدل‌های سیستم زمین^(۷) و ۵. مدل‌های گردش عمومی.

مشاهده می‌شود، بر اساس نتایج این پژوهش، به طور کلی پنج گروه اصلی برای مدل‌های پیش‌بینی تغییرات اقلیمی می‌توان در نظر گرفت: ۱. مدل‌های موازنه انرژی^(۴)، ۲. مدل‌های تابشی-



نمودار (۲): دسته بندی مدل‌های اقلیمی

۱. **مدل‌های موازنه انرژی:** این دسته از مدل‌ها شامل مدل‌های صفر یا یک بعدی است که از دمای سطح زمین به عنوان شاخص اصلی برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی استفاده می‌کند. در این مدل‌ها میزان اشعه خورشیدی جذب شده توسط یک ستون هوا باید در موازنه با انرژی تابشی رها شده به فضا از همان ستون باشد. در مدل موازنه انرژی یک بعدی میانگین‌های منطقه‌ای (میانگین‌های پیرامون عرض‌های جغرافیایی) برابر در نظر گرفته می‌شود و فرض بر این است که زمین به لحاظ منطقه‌ای متقارن بوده، نور خورشید از یک عرض جغرافیایی به عرض جغرافیایی دیگر منتشر نمی‌شود

مدل‌های اقلیمی دامنه مختلفی از نظر مقیاس و درجه حساسیت دارد. مدل‌های موازنه انرژی در ساده‌ترین سطح توصیف سیستم اقلیم جهانی قرار دارد. این مدل‌ها کل سیستم اقلیم را با یک عدد مشخص (میانگین دمای جهانی) نشان می‌دهد. در سوی دیگر این طیف، مدل‌های سیستم زمین و مدل‌های جفت شده گردش عمومی جو-اقیانوس قرار دارد که گردش‌های جزئی‌تری از جو و اقیانوس را علاوه بر دیگر موارد مشارکت می‌دهد و از میلیون‌ها عدد برای شبیه‌سازی وضعیت اقلیمی استفاده می‌کند (North & Kim, 2017). در ادامه به تشریح دقیق‌تر مدل‌های پیش‌بینی تغییرات اقلیمی پرداخته شده است.

(North & Kim, 2017).

۲. مدل‌های تابشی - همرفتی یا مدل‌های تک ستونی: این

گروه از مدل‌ها شامل مدل‌های یک بعدی و دو بعدی است که از ستون‌های اتمسفری واحدی تشکیل شده است که در آن‌ها انتقال انرژی تنها به صورت عمودی (بدون هیچ‌گونه انتقال افقی انرژی) رخ می‌دهد. در این دسته از مدل‌ها فرض بر این است که مقدار انرژی که زمین به شکل انرژی حرارتی به فضا باز می‌تاباند معادل انرژی تابشی است که از خورشید دریافت کرده است. جذب تابش خورشیدی و انتشار مجدد آن توسط فرایندهای دینامیکی و تشعشعی، تعیین کننده میانگین دمای سطح زمین است. مدل‌های تابشی - همرفتی این فرآیندها را شبیه‌سازی می‌کند و امکان درک اثرات آن‌ها را بر بودجه انرژی زمین به دست می‌دهد (شرقی و همکاران، ۱۳۹۶).

۳. مدل‌های محدود شده ابعادی: این دسته از مدل‌های

اقلیمی، موارد ذیل را شامل می‌شود:

الف: مدل‌های با یک یا دو جزء فعال: در این مدل‌ها، شبیه‌سازی‌های اقلیمی با استفاده از یک یا دو جزء فعال انجام می‌شود و دیگر اجزا تنها با داده‌های مشاهداتی جایگزین می‌شود. بهترین حالت زمانی است که اتمسفر و زمین به عنوان اجزای فعال در نظر گرفته شود و یخ‌های دریاها و اقیانوس‌ها با داده‌های مشاهداتی جایگزین گردد. این دسته از مدل‌ها شامل مدل‌های آماری - دینامیکی^(۸) و مدل‌های سیستم زمین با پیچیدگی متوسط^(۹) یا مدل‌های سطح زمین^(۱۰) به شرح زیر است:

- **مدل‌های آماری-دینامیکی**، این مدل‌ها معمولاً دو بعدی و ترکیبی از دو مدل تابشی - همرفتی و موازنه انرژی است و سیستم اقلیمی را در دو بعد افقی و عمودی شبیه‌سازی می‌کند (سیاری و همکاران، ۱۳۹۰).

- **مدل‌های سیستم زمین با پیچیدگی متوسط یا مدل‌های سطح زمین:** این مدل‌ها توسعه یافته مدل‌های آماری - دینامیکی است و تغییرات جفت شده آب، انرژی و کربن را بین سطح زمین و اتمسفر تحلیل می‌کند. مدل‌های سطح زمین ابزار مهمی برای درک و پیش‌بینی پویایی سطح زمین و بررسی نقش آن در سیستم زمین تحت تأثیر تغییرات اقلیمی است (Pitman, 2003).

ب: مدل‌های با چند جزء فعال (مدل‌های ارزیابی یکپارچه)^(۱۱): این مدل‌ها سیستم اقلیمی را به مدل‌های اقتصادی پیوند می‌دهد

تا تأثیر انتخاب‌های سیاسی خاص را به طور کامل ارزیابی کند. با استفاده از این مدل‌ها مسئولین و مدیران می‌توانند گزینه‌های مختلف را ارزیابی کرده، مؤثرترین و مقرون به صرفه‌ترین استراتژی‌ها را انتخاب نمایند. از مدل‌های این گروه می‌توان به مدل یکپارچه پویای^(۱۲) اقتصاد اقلیمی اشاره کرد (Brooks & Newbold; 2014; Rasch, 2012).

۴. **مدل‌های سیستم زمین:** این دسته از مدل‌ها یکی از جامع‌ترین مدل‌ها برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی به شمار می‌رود، زیرا نه تنها اجزای فیزیکی سیستم اقلیمی زمین را در بر دارد، بلکه فعل و انفعالات بیولوژیکی و شیمیایی تأثیرگذار بر اقلیم را نیز شامل می‌شود. این دسته از مدل‌ها به منظور شبیه‌سازی اقلیمی به غلظت گذشته، حال و آینده کربن دی‌اکساید و سایر گازهای گلخانه‌ای نیاز دارد. از آنجا که مدل‌های سیستم زمین فرآیندهای فیزیکی زیادی نظیر تابش، شکل‌گیری ابرها، بارندگی و غیره را در بر دارد، به زمان و نیروی انسانی قابل توجهی برای توسعه این مدل‌ها نیاز است. همچنین استفاده از علوم مانند شیمی و زیست‌شناسی در این مدل‌ها وجود همکاری بین‌سازمانی را برای توسعه آن‌ها ضروری می‌سازد. از این‌رو، به‌روزرسانی و استفاده از این مدل‌ها به طور فزاینده‌ای پیچیده و دشوار است (Berger et al., 2012).

۵. **مدل‌های گردش عمومی:** مدل‌های گردش عمومی نوعی مدل ریاضی است که سیستم اقلیمی زمین را از طریق بررسی تعاملات بین زمین، اتمسفر، اقیانوس‌ها و یخ‌ها (پوشش برفی، یخچال‌های طبیعی و کلاهک‌های قطبی) شبیه‌سازی می‌کند (Hardy, 2003). مدل‌های گردش عمومی می‌تواند به عنوان مدل‌های گردش عمومی اتمسفری - اقیانوسی کاملاً جفت شده یا به‌عنوان مدل‌های گردش عمومی اتمسفری و اقیانوسی مستقل^(۱۳) وجود داشته باشد (Readinger, 2007; محمدی و همکاران، ۱۳۹۵). مدل‌های گردش عمومی، توانایی شبیه‌سازی اثرات انتشار گازهای گلخانه‌ای بر سیستم اقلیمی و پیش‌بینی واقع‌گرایانه از شرایط آینده را دارد (Flato et al., 2013; Hartmann, 2016). در واقع، مزیت اصلی مدل‌های گردش عمومی توانایی آن‌ها در پیش‌بینی اقلیم آتی در پاسخ به سناریوهای مختلف غلظت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر است (Chen et al., 2014; Taylor et al., 2011; van Vuuren et al., 2011). این مدل‌ها به عنوان بخشی از پروژه مقایسه متقابل مدل جفت شده (CMIP) در دسترس عموم قرار دارد (Hamed et al., 2022). در حال حاضر

تنها در این فاز نتایج آزمایشات به صورت غیر رسمی جمع‌آوری شد. در طی فاز چهارم، شبیه‌سازی‌های بیشتری جهت بررسی اثر وقایع طبیعی و انسان‌ساز بر اقلیم قرن بیستم انجام گرفت.

- **CMIP5 (۲۰۱۰-۲۰۱۴):** فاز پنجم (CMIP5) بر دو مقیاس زمانی دور (از اواسط قرن نوزدهم تا اواخر قرن بیستم) و نزدیک (از اوایل قرن ۲۱ تا سال ۲۰۳۵) تمرکز دارد (Taylor et al., 2012). هم آزمایشات مقیاس زمانی دور و هم آزمایشات مقیاس زمانی نزدیک با استفاده از مدل‌های اقلیمی گردش عمومی اتمسفری- اقیانوسی (AOGCM) یعنی مدل‌های استاندارد که در فازهای قبلی نیز مورد استفاده قرار گرفته بود، انجام شد. مدل‌های گردش عمومی اتمسفری- اقیانوسی به غلظت‌های متفاوتی از ترکیبات جوی (مانند گازهای گلخانه‌ای) واکنش نشان می‌دهد و دربرگیرنده تعاملات بین زمین، اتمسفر، اقیانوس‌ها و یخ‌های دریاهاست. در CMIP5 مجموعه جدیدی از سناریوهای گازهای گلخانه‌ای، ذرات معلق و کاربری زمین مورد استفاده قرار گرفت (Emori et al., 2016).

- **CMIP6 (۲۰۱۹- تا کنون):** فاز ششم (CMIP6) یعنی آخرین فاز از پروژه مقایسه متقابل مدل جفت شده در سال ۲۰۱۹ و برای پر کردن شکاف‌های علمی باقی مانده در فاز پنجم (CMIP5) و رسیدگی به چالش‌های نوظهور در مدل‌سازی تغییرات اقلیمی آغاز و انتشار داده‌های آن در سال ۲۰۲۲ تکمیل شد (Eyring et al., 2016). بیش از ۴۰ مدل گروهی از سرتاسر جهان (۱۶ کشور) در فاز ششم مشارکت داشتند و منبع اطلاعاتی غنی و ارزشمندی را برای درک بهتر اقلیم گذشته، حال و آینده فراهم نمودند. مدل‌های فاز ششم نسبت به نسخه‌های قبلی پیشرفت‌های زیادی داشته است و از تفکیک پذیری فضایی بهتر، حساسیت اقلیمی بالاتر و پیچیدگی فضایی بیشتری برخوردار است (Bock et al., 2020). همچنین غلظت گازهای گلخانه‌ای، نیروی آتروسول (خواص نوری) و سایر عوامل محیطی (مانند کاربری زمین) را نیز شامل می‌شود (Eyring et al., 2016; Moss et al., 2019; Wyser et al., 2019). علاوه بر این، مدل‌های فاز ششم سناریوهای بیشتری را با استفاده از مسیرهای اجتماعی- اقتصادی مشترک^(۱۵) پیش‌بینی می‌کند (O'Neill et al., 2016; Schlund et al., 2020; Hamed et al., 2022). به عبارت دیگر، فاز ششم علاوه بر چهار سناریوی مورد

مدل‌های گردش عمومی انواع مختلفی دارد و از آنجا که مؤلفه‌های بیشتری را شامل می‌شود، دقیق‌ترین توصیف را از وضعیت سیستم اقلیمی ارائه می‌دهد. از این‌رو، در سال‌های اخیر مدل‌های گردش عمومی در مطالعات تغییر اقلیم کاربرد بیشتری یافته است. از این‌رو در ادامه بیشتر به آن‌ها پرداخته شده، مشکلات مرتبط با این مدل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

پروژه مقایسه متقابل مدل جفت شده (CMIP): یک تلاش بین‌المللی هماهنگ برای بهبود درک ما از سیستم اقلیمی زمین است. CMIPها توسط برنامه تحقیقات اقلیم جهانی^(۱۴) سازماندهی شده، از اوایل دهه ۱۹۹۰ هر چند سال یک بار به روزرسانی می‌شود. آخرین به روزرسانی (فاز ششم یا CMIP6) در سال ۲۰۱۹ آغاز شد (Covey et al., 2003).

- **CMIP1 (۱۹۹۵-۲۰۰۱):** اولین فاز پروژه مقایسه متقابل مدل جفت شده است که CMIP1 نامیده می‌شود و شامل ۲۱ مدل از ۹ کشور است. در این مدل‌ها، میزان کربن دی‌اکساید، روشنایی خورشیدی و دیگر نیروهای اقلیمی خارجی ثابت در نظر گرفته شده است. در حالی که، در دیگر CMIPها مقادیر متفاوت ثابت خورشیدی و غلظت‌های مختلف کربن‌دی‌اکساید اعمال شده است که به ترتیب در محدوده ۱۳۵۴ تا ۱۳۷۰ Wm⁻² و ۲۹۰ تا ۳۴۵ ppm قرار دارد (Covey et al., 2003).

- **CMIP2 (۱۹۹۹-۲۰۰۲):** فاز دوم (CMIP2) شامل ۱۸ مدل از ۸ کشور است و شامل مدل‌های کنترلی و اقلیمی است. این مدل‌ها با فرض افزایش سالانه یک درصدی غلظت کربن‌دی‌اکساید عمل می‌کند و عوامل انسانی دیگری که بر اقلیم اثر می‌گذارد (مانند غلظت ذرات معلق که تأثیر خنک‌کنندگی دارد) را در نظر نمی‌گیرد. همچنین، این مدل‌ها افزایش کربن‌دی‌اکساید ناشی از فرایندهای طبیعی مانند فوران‌های آتشفشانی یا تغییرات تابش خورشیدی را شامل نمی‌شود (Covey et al., 2003).

- **CMIP3 (۲۰۰۳-۲۰۰۷):** در فاز سوم (CMIP3)، تجربیات حاصل از مطالعات تغییرات اقلیمی ۱۱ کشور (۱۶ گروه) و ۲۳ مدل گردآوری شد. مدل‌های حاصل از این فاز قادر به پیش‌بینی دهه‌ای تغییرات اقلیمی با تفکیک پذیری نسبتاً بالا (۵۰ کیلومتر) است. CMIP3 آغاز دوران دسترسی آزاد به مدل‌های جفت شده از طریق اینترنت است (Meehl et al., 2007).

- **CMIP4 (۲۰۰۷-۲۰۱۲):** فاز چهارم (CMIP4) ارائه نشد و

است (Eyring et al., 2016). داده‌های فاز ششم در دسترس عموم قرار دارد و از آزمایشگاه ملی لارنس لیورمور (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6>) و پورتال (<https://www.climate4impact.eu/c4i-frontend/project>) قابل دریافت است. لازم به ذکر است که مدل‌های اقلیم منطقه‌ای^(۱۶) مانند RegCM4 و RegCM5 نیز در گروه مدل‌های گردش عمومی قرار دارد. در جدول (۱)، مزایا و معایب هر دسته از مدل‌های اقلیمی به اختصار ارائه شده است.

استفاده در فاز پنجم که معادل SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP4-6.0 و SSP5-8.5 است، چهار سناریوی جدید دیگر (SSP1-1.9، SSP3-7.0 و SSP5-3.4-OS، SSP4-3.4) را نیز شامل می‌شود که این امر امکان ارزیابی بهتر پیامدهای تغییرات اقلیمی را فراهم می‌آورد. در نتیجه، انتظار می‌رود که پیش‌بینی‌های حاصل از مدل‌های فاز ششم، عدم قطعیت کمتری را نسبت به نسخه‌های قبلی خود داشته باشد (Arias et al., 2021; Iqbal et al., 2021; Hamed et al., 2022). با این حال، بررسی مدل‌های مختلف موجود جهت منعکس کردن طیف کاملی از تغییرات اقلیم آتی ایده خوبی

جدول (۱): مزایا و معایب پنج نوع مدل اقلیمی

مدل	تاریخ	مزایا	معایب	توضیحات	رفرنس
مدل‌های موازنه انرژی	دهه ۱۹۶۰	سادگی و هزینه کم، استفاده گسترده در مطالعات اولیه تغییرات اقلیمی	ناتوانی در شبیه‌سازی دقیق جزئیات اقلیمی، عدم توانایی در برآورد دمای اتمسفر	به عنوان اولین مدل‌های اقلیمی، ساده و کم‌هزینه بود و برای محاسبه تعادل انرژی در سیستم زمین به کار می‌رفت.	North, 2024
مدل‌های تابشی-همرفتی یا تک ستونی	دهه ۱۹۶۰	سادگی، توانایی تمرکز بر فرآیندهای تابشی و همرفتی، توانایی برای برآورد دمای اتمسفر و سطح زمین، بررسی جنبه‌های خاصی از سیستم اقلیمی زمین (مانند نحوه اثرگذاری تغییر غلظت کربن دی اکساید اتمسفر بر دمای جهانی)	عدم شبیه‌سازی کامل فرآیندهای جوی، محدودیت در مقیاس‌های زمانی و مکانی شبیه‌سازی‌ها، ناتوانی در محاسبه انتقال افقی انرژی گرمایی	این مدل‌ها برای تمرکز بر فرآیندهای تابشی و همرفتی خاص توسعه یافت.	Edwards, 2011; Robinson & Catling, 2012; Renno & Huang, 2015; Rasch, 2012; سیاری و همکاران، ۱۳۹۰
مدل‌های محدود شده ابعادی	دهه ۱۹۷۰	دقت بالا	محدودیت در شبیه‌سازی تغییرات جهانی و نیاز به داده‌های محلی و دقیق	برای شبیه‌سازی دقیق‌تر مناطق معرفی شد که شامل مدل‌های آماری-دینامیکی، مدل‌های زمین با پیچیدگی متوسط (مدل‌های سطح زمین) و مدل‌های ارزیابی یکپارچه است.	سیاری و همکاران، ۱۳۹۰; Pitman, 2003; Brooks & Newbold, 2014; Rasch, 2012
مدل‌های گردش عمومی	دهه ۱۹۵۰	قابلیت شبیه‌سازی جریان‌های جوی و اقیانوسی، استفاده گسترده در پیش‌بینی‌های اقلیمی بلندمدت، کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها، سادگی و سرعت اجرا، واکنش به غلظت‌های مختلف CO ₂ اتمسفر	نیاز به داده‌های بسیار دقیق و کامل، بزرگ بودن مقیاس مکانی، عدم توانایی در به کارگیری نقش ابرها در محاسبات	اولین مدل‌های گردش عمومی در دهه ۱۹۵۰ معرفی شد و به تدریج پیچیده‌تر شد.	Edwards, 2000
مدل‌های سیستم زمین	دهه ۱۹۹۰	توانایی بررسی تعاملات بین اجزای مختلف سیستم اقلیمی زمین و شبیه‌سازی جامع و کامل سیستم‌های مختلف اقلیمی	هزینه بالا، نیاز به منابع محاسباتی زیاد، پیچیدگی و دشواری به روز رسانی مدل‌ها	این مدل‌ها علاوه بر شبیه‌سازی جو و اقیانوس‌ها، تعاملات بین بیوسفر، چرخه‌های بیوژئوشیمیایی و تأثیرات انسانی را نیز در نظر می‌گیرد.	Berger et al., 2012

مشکلات اصلی مرتبط با مدل‌های گردش عمومی

از مهم‌ترین مشکلات مرتبط با مدل‌های گردش عمومی بزرگ مقیاس بودن سلول محاسباتی آن‌ها و وجود عدم قطعیت در پیش‌بینی‌ها است که در ادامه به آن پرداخته شده است.

• عدم قطعیت مدل‌ها

مدل‌های گردش عمومی به عنوان قابل اعتمادترین مدل‌های عددی برای پیش‌بینی اقلیم آینده در نظر گرفته می‌شود. این مدل‌ها بر اساس غلظت گازهای گلخانه‌ای، اقلیم گذشته را شبیه‌سازی کرده و نیز بر اساس غلظت احتمالی گازهای گلخانه‌ای در آینده، اقلیم آتی را پیش‌بینی می‌نماید. اگرچه، نسخه‌های اخیر مدل‌های گردش عمومی پیشرفت‌های قابل توجهی داشته است (Ahmed et al., 2020)، اما همانند دیگر مدل‌های اقلیمی، عدم قطعیت مرتبط با بازسازی اقلیم گذشته و پیش‌بینی آینده توسط آنها هنوز قابل توجه است. در واقع پیش‌بینی‌های مدل‌های گردش عمومی دارای درجاتی از عدم قطعیت است که ناشی از توصیف ناکافی مدل‌ها از فرآیندهای فیزیکی (Gao et al., 2019; Hamed et al., 2022; Weigel et al., 2010)، شرایط مرزی اولیه و ثانویه، پارامترسازی، چرخه کربن و همچنین دانش نظری ناقص در رابطه با اقلیم زمین است (Knutti et al., 2008). پروژه مقایسه متقابل مدل جفت شده برای غلبه بر این عدم قطعیت‌ها، در طول سال‌ها از CMIP1 تا آخرین نسخه یعنی CMIP6 تغییرات زیادی داشته، به شدت بهبود یافته است (Eyring et al., 2016).

برای کاهش عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی، استراتژی‌های مختلفی مانند انتخاب کارآمدترین مدل بر اساس رتبه‌بندی مدل‌ها، کاهش مقیاس، تصحیح آریبی و مجموعه‌سازی چند مدلی^(۱۷) به کار رفته است. در میان استراتژی‌های مختلف، انتخاب کارآمدترین مدل بر اساس رتبه‌بندی مدل‌ها و تولید مجموعه‌سازی چند مدلی یکی از رایج‌ترین رویکردها برای کاهش عدم قطعیت ناشی از مدل‌های گردش عمومی است (Knutti et al., 2008). به طور کلی روش‌های مجموعه‌سازی چند مدلی به دو دسته کلی طبقه‌بندی می‌شود: ۱. روش مجموعه‌سازی چند مدلی با میانگین‌گیری ساده^(۱۸) و روش مجموعه‌سازی چند مدلی وزن‌دهی شده^(۱۹) (wang et al., 2017; Ahmed et al., 2020). در روش میانگین‌گیری ساده همه مدل‌ها دارای وزن یکسانی است، در حالی که در روش وزن‌دهی شده اعضای مجموعه با توجه به عملکرد

آن‌ها در شبیه‌سازی اقلیم گذشته، وزن‌های متفاوتی دریافت می‌کند. هر دو رویکرد دارای مزایا و معایبی است که پژوهشگر با توجه به اهداف تحقیق و شرایط خود یکی را برمی‌گزیند (Wang et al., 2018).

• ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های گردش عمومی

یکی از مشکلات اصلی در رابطه با استفاده از مدل‌های گردش عمومی، بزرگ بودن مقیاس مکانی سلول محاسباتی آن‌ها نسبت به منطقه‌ی مطالعاتی است. بنابراین، به دلیل وجود عدم تطابق بین مقیاس این مدل‌ها و مقیاس مورد نیاز جهت بررسی اثرات تغییر اقلیم به ریزمقیاس‌نمایی نیاز است. ریزمقیاس‌نمایی به رویکردهایی اطلاق می‌شود که به منظور تبدیل شبکه‌بندی بزرگ مقیاس مدل‌های اقلیمی به شبکه‌های کوچکتر (محلی و منطقه‌ای) توسعه و کاربرد یافته‌است و به دو دسته الف. روش‌های آماری و ب. روش‌های دینامیکی تقسیم می‌شود (Solomon et al., 2007). در روش‌های آماری ارتباط بین متغیرهای مستقل و متغیرهای وابسته (خروجی مدل) مشخص می‌شود و از این روابط برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی تحت شرایط تغییر اقلیم استفاده می‌شود. اما در روش‌های دینامیکی این روابط از طریق حل معادله‌ی سیال هوا به دست می‌آید. از آنجا که روش‌های دینامیکی هزینه بر و وقت‌گیر است، استفاده از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری دارای ارجحیت است. روش‌های آماری قوی و کم هزینه است، اما به سری‌های آماری بلند مدت نیاز دارد. روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری عبارت است از: روش‌های مبتنی بر الگوی‌های اقلیمی، روش‌های تولید داده و روش‌های رگرسیونی (Semenov & Brooks, 1999; Semenov et al., 2002).

پیشینه پژوهش‌های مرتبط با تغییرات اقلیمی در ایران

بر اساس دانش نویسندگان، بیشتر مطالعات انجام گرفته در زمینه مدل‌سازی تغییرات اقلیمی در ایران به سال‌های پس از ۱۳۹۰ مربوط می‌شود و پژوهش‌های انجام شده پیش از این تاریخ بسیار اندک است. برای مثال، بابائیان و همکاران (۱۳۸۸) تغییرات اقلیمی کشور را طی دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ و با استفاده از مدل گردش عمومی (ECHO-G) بررسی نمودند. کوچکی و همکاران (۱۳۸۲) به کمک مدل‌های گردش عمومی به شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی ایران پرداختند.

همانطور که گفته شد، بیشترین مطالعات مرتبط با موضوع تغییرات

بلاایای طبیعی و تغییرات جوی نیز می‌شود. در این راستا پیش‌بینی دقیق تغییرات اقلیمی به منظور مدیریت بهینه و کاهش هزینه‌های اقتصادی اهمیت به‌سزایی دارد. مدل‌های اقلیمی ابزارهای کلیدی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی است و هر یک تلاش می‌کند تا فرآیندهای پیچیده‌ای که اقلیم آینده را شکل می‌دهد، به تصویر کشد. امروزه مدل‌های اقلیمی شامل مؤلفه‌های متعددی مانند تعاملات میان اقیانوس‌ها و جو است. این مدل‌ها با در نظر گرفتن متغیرهای مختلف، از جمله تابش، دینامیک جوی و اقیانوسی، فرآیندهای سطحی و شیمی اتمسفر، به پیش‌بینی تغییرات اقلیمی می‌پردازد. بر اساس نتایج پژوهش پیش‌رو، پنج گروه اصلی از مدل‌های پیش‌بینی تغییرات اقلیمی وجود دارد که عبارت است از: ۱. مدل‌های موازنه انرژی، ۲. مدل‌های تابشی-همرفتی یا تک ستونی، ۳. مدل‌های محدود شده ابعادی، ۴. مدل‌های سیستم زمین و ۵. مدل‌های گردش عمومی. مدل‌های اقلیمی دامنه مختلفی از نظر اندازه و درجه حساسیت دارد. در حال حاضر مدل‌های گردش عمومی یکی از پرکاربردترین مدل‌های مورد استفاده در مطالعات تغییر اقلیم است. از آنجا که این مدل‌ها مؤلفه‌های بیشتری را شامل می‌شود، دقیق‌ترین توصیف را از سیستم اقلیمی زمین نتیجه می‌دهد. با این حال، تمام این مدل‌ها دارای اریبی است که سبب ایجاد عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های آتی می‌شود. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود که محققان و پژوهشگران با توجه به داده‌های موجود، محدوده مطالعاتی و هدف تحقیق، کارآمدترین مدل را برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی انتخاب نمایند. این اطلاعات به محققان و تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا با شناخت انواع مدل‌ها و انتخاب مدل مناسب بر اساس هدف تحقیق و نیازهای خاص خود، پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از تغییرات اقلیمی داشته باشند و بتوانند برنامه‌ریزی مؤثرتری برای مقابله با چالش‌های ناشی از تغییر اقلیم انجام دهند.

تشکر و قدردانی

از صندوق حمایت از پژوهشگران که بخشی از هزینه‌های این تحقیق را تأمین نموده است (شماره ۹۸۰۱۲۶۳۵)، تشکر و قدردانی می‌شود.

یادداشت‌ها

1. General Circulation Models (GCMs)

اقلیمی در ایران مربوط به سال‌های پس از ۱۳۹۰ است و مدل‌های گردش عمومی بیشترین مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش‌ها بوده است. در پژوهش روشن و همکاران (۱۳۹۱) مدل‌های GISS-EH و CNRM-CM3 بهترین مدل برای پیش‌بینی تغییرات بارش و INMCM-30 بهترین مدل برای پیش‌بینی تغییرات دمایی در ایران معرفی شد. طلب و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از مدل‌های گردش عمومی به مدل‌سازی اقلیم استان‌های تهران و مازندران برای دوره زمانی ۲۰۱۰-۲۰۳۹ پرداختند. خلف آبادی و همکاران (۱۳۹۲)، بارش و دمای خوزستان را با استفاده از مدل‌های گردش عمومی پیش‌بینی نمودند. قاضی و جیهونی (۲۰۲۲) به کمک مدل‌های گردش عمومی به بررسی تغییرات دما و بارش شهر تبریز در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰ پرداختند. (Ghazi & Jeihouni, 2022). کاظمی راد و محمدی (۱۳۹۴)، با استفاده از دو مدل MPEH5 و HaDCM3، تغییرات اقلیمی استان گیلان را برای دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ پیش‌بینی نمودند. کابوسی و کردجزی (۱۳۹۶)، مدل‌های گردش عمومی (ECHO-G و HadCM3) را برای پیش‌بینی تغییر اقلیم استان گلستان برای دوره ۲۰۱۶-۲۰۴۵ به کار بردند. عباسیان و همکاران (۲۰۱۹)، عملکرد ۳۷ مدل گردش عمومی را برای شبیه‌سازی دما و بارش ایران (۱۹۰۱-۲۰۰۵) بررسی نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که بهترین مدل‌ها برای پیش‌بینی دما و بارش در ایران به ترتیب CMCC-CMS و MRI-CGCM3 است (Abbasian et al., 2019). احمدیان و منتصری (۱۳۹۹) به بررسی عملکرد ۳۶ مدل گردش عمومی در دامنه‌ها جنوبی رشته کوه البرز پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل‌های ACCESS1-0 و GFDL-CM3 دارای بهترین عملکرد برای پیش‌بینی تغییرات بارش در محدوده مطالعاتی است. همچنین در این زمینه می‌توان به مطالعات زرین و داداشی رودباری (۱۳۹۹)، طاهری تیزرو و همکاران (۱۳۹۶)، ربیعی و همکاران (۱۴۰۰)، باران پور و همکاران (۱۴۰۰) اشاره کرد.

نتیجه‌گیری

امروزه تغییرات اقلیمی با سرعت قابل توجهی در حال وقوع است و اثرات گسترده‌ای بر محیط‌زیست فیزیکی، زیستی، اقتصادی و اجتماعی دارد. این تغییرات نه تنها بر منابع طبیعی و اکوسیستم‌ها تأثیر می‌گذارد، بلکه موجب افزایش هزینه‌های اقتصادی ناشی از

- | | |
|---|--|
| 11. Integrated Assessment Models (IAMs) | 2. Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) |
| 12. Dynamic Integrated Climate Economy Model | 3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) |
| 13. Oceanic General Circulation Models (OGCMs) and Atmospheric General Circulation Models (AGCMs) | 4. Energy Balance Climate Models (EBCMs) |
| 14. World Climate Research Program | 5. Radiative-Convective Models (RCMs)/ Single Column Models (SCMs) |
| 15. Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) | 6. Dimensionally Constrained Models (DCMs) |
| 16. Regional Climate Model (RCM) | 7. Earth System Models (ESMs) |
| 17. Multi-Model Ensembles (MMEs) | 8. Statistical-Dynamical Models (SDMs) |
| 18. Simple Ensemble Mean (SEM) | 9. Earth-System Models of Intermediate Complexity (ESMICS) |
| 19. Weighted Ensemble Method (WEM) | 10. Land Surface Models (LSMs) |

منابع

- احمدیان، م.، و منتصری، م. (۲۰۲۱). ارزیابی مدل‌های گردش عمومی و رتبه بندی آنها به منظور شبیه‌سازی هیدرولوژیک. دانش آب و خاک، ۳۱(۴)، ۶۹-۸۴.
- اکبری، م. و صیاد، و. (۱۴۰۰). تحلیل مطالعات تغییر اقلیم در ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۳(۱).
- باباییان، الف.، نجفی نیک، ز.، زابل عباسی، ف.، حبیبی نوخندان، م.، ادب، ح.، و ملبوسی، ش. (۱۳۸۸). ارزیابی تغییر اقلیم کشور در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ میلادی با استفاده از ریزمقیاس نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHO-G. جغرافیا و توسعه، ۱۶، ۱۳۵-۱۵۲.
- باران پور، م.، خلیلی مقدم، ب.، ذرتی پور، الف. (۱۴۰۰). مطالعه موردی: کانون گرد و غبار جنوب و جنوب شرق اهواز. هیدروژئومورفولوژی، ۲۸، ۱۲۶-۱۰۷.
- بندری خلف‌آبادی، و.، شکیبیا، ع. و عظیمی، ف. (۲۰۱۳). پیش‌یابی رژیم بارش و دمای خوزستان با مدل‌های گردش عمومی جو. جغرافیای طبیعی، ۱۹(۶)، ۵۹-۷۰.
- حق‌طلب، ن.، گودرزی، م.، حبیبی نوخندان، م.، یآوری، الف.، و جعفری، ح. (۱۳۹۲). مدل‌سازی اقلیم استان‌های تهران و مازندران با استفاده از مدل اقلیمی LARS-WG و مقایسه تغییرات آن در جبهه‌های شمالی و جنوبی البرز مرکزی. علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۵۶(۵)، ۳۷-۴۹.
- دوستان، ر. (۱۳۹۸). تحلیل بر تغییرات بارش در ایران. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۲۵-۱۳.
- روشن، غ.، خوش‌اخلاق، ف. و عزیززی، ق. (۱۳۹۱). آزمون مدل مناسب گردش عمومی جو برای پیش‌یابی مقادیر دما و بارش ایران، تحت شرایط گرمایش جهانی. جغرافیا و توسعه، ۲۷(۲)، ۱۹-۳۶.
- زرین، الف.، داداشی رودباری، ع. (۱۳۹۹). پیشنهاد پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6). فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۶، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۹، صفحه ۵۸۳-۶۰۲.
- سیاری، ن.، عزیززاده، الف.، بنایان اول، م.، فرید حسینی، ع.، حسامی کرمانی، م. (۱۳۹۰). مقایسه دو مدل گردش عمومی جو (CGCM2، HadCM3) در پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی و نیاز آبی گیاهان تحت تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه کشف رود). نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵(۴).
- شرقی، الف.، نورانی، و.، آقایی لاهرودی، ف. (۱۳۹۶). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم روی پارامترهای دما و بارش ایستگاه تبریز در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ با استفاده از مدل WG-LARS و روش عامل تغییر، شانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردیبهرد ۱۵ و ۱۶ شهریور ۱۳۹۶.
- شیخ‌ربیعی، م.، پیروان، ح.، دانشکار آراسته، پ.، اکبری، م.، معتمد‌وزیری، ب. (۱۴۰۰). مقایسه‌ی کارایی مدل‌های SDSM و CCT در مطالعات تغییر اقلیم (مطالعه موردی حوزه آبخیز کرگانرود). نشریه هواشناسی و علوم جو، ۴(۲)، ۱۲۸-۱۴۶.

طاهری تیزرو، ع.، خدامرادپور، م. و مشهدیان، م. ج. (۱۳۹۶). ارزیابی شبیه‌سازی مولفه‌های بیلان آب سطحی توسط مدل اقلیمی منطقه ای RegCM4 (مطالعه موردی: حوضه تویسرکان، استان همدان). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۴ (۵). کابوسی، ک. و کردجزی، م. (۲۰۱۹). بررسی اثر عدم قطعیت خروجی مدل‌های گردش عمومی در پیش‌بینی متغیرهای هواشناسی استان گلستان. علوم و مهندسی آبیاری، ۴۲ (۲)، ۱۹۷-۲۱۳.

کاظمی راد، ل. و محمدی، ح. (۱۳۹۴). ارزیابی مدل مناسب گردش عمومی جو برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی استان گیلان. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۴ (۴)، ۷۴-۵۵.

کریمی، م.، کاکلی، س. و رفعتی، س. (۱۳۹۷). شرایط و مخاطرات اقلیمی آینده ایران در تحقیقات اقلیمی، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۵ (۳): ۱-۲۲.

محمدی، ح. (۱۳۹۳). آب و هواشناسی کاربردی. انتشارات دانشگاه تهران.

محمدی، ح.، امیری، الف.، ربانی، ف. (۱۳۹۵). تغییر اقلیم و مدل‌های اقلیمی. انتشارات دانشگاه تهران.

مدرسی، ف.، عراقی نژاد، ش.، ابراهیمی، ک.، خلقی، م. (۱۳۸۹). بررسی منطقه‌ای پدیده تغییر اقلیم با استفاده از آزمون‌های آماری مطالعه موردی: حوضه آبریز گرگانرود-قره‌سو. آب و خاک، ۲۴ (۳).

- Abbasian, M., Moghim, S., & Abrishamchi, A. (2019). Performance of the general circulation models in simulating temperature and precipitation over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(3-4), 1465-1483. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2456-y>.
- Ahmed, K., Sachindra, D. A., Shahid, S., Iqbal, Z., Nawaz, N., & Khan, N. (2020). Multi-model ensemble predictions of precipitation and temperature using machine learning algorithms. *Atmospheric Research*, 236, 104806.
- Arias Gómez, P. A., Ortega Villamizar, G. M., Villegas Villa, L. D., & Martínez Agudelo, J. A. (2021). Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: Persistent biases and improvements.
- Berger, A., Mesinger, F., & Sijacki, D. (Eds.). (2012). *Climate change: inferences from paleoclimate and regional aspects*. Springer Science & Business Media.
- Bock, L., Lauer, A., Schlund, M., Barreiro, M., Bellouin, N., Jones, C., ... & Eyring, V. (2020). Quantifying progress across different CMIP phases with the ESMValTool. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(21), e2019JD032321.
- Brooks, W. R., & Newbold, S. C. (2014). An updated biodiversity nonuse value function for use in climate change integrated assessment models. *Ecological Economics*, 105, 342-349.
- Chen, H., Sun, J., & Chen, X. (2014). Projection and uncertainty analysis of global precipitation-related extremes using CMIP5 models. *International journal of climatology*, 34(8), 2730-2748.
- Covey, C., AchutaRao, K. M., Cubasch, U., Jones, P., Lambert, S. J., Mann, M. E., ... & Taylor, K. E. (2003). An overview of results from the Coupled Model Intercomparison Project. *Global and Planetary Change*, 37(1-2), 103-133.
- Dai, Z., Amatya, D. M., Sun, G., Trettin, C. C., Li, C., & Li, H. (2011). Climate variability and its impact on forest hydrology on South Carolina coastal plain, USA. *Atmosphere*, 2(3), 330-357.
- Daneshvar, M. R. M.; Ebrahimi, M. and Nejadsoleymani, H. (2019). An overview of climate change in Iran: facts and statistics. *Environmental Systems Research*, 8(1): 1-10.
- Das, J., Poonia, V., Jha, S., & Goyal, M. K. (2020). Understanding the climate change impact on crop yield over Eastern Himalayan Region: ascertaining GCM and scenario uncertainty. *Theoretical and Applied Climatology*, 142, 467-482.
- Earth, B. (2019). *Global temperature report for 2019*. Berkeley Earth, Berkeley, California.
- Edwards, P. N. (2000). A brief history of atmospheric general circulation modeling. In *International Geophysics* (Vol. 70, pp. 67-90). Academic Press.
- Edwards, P. N. (2011). History of climate modeling. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1), 128-139.
- Emori, S., Taylor, K., Hewitson, B., Zermoglio, F., Juckes, M., Lautenschlager, M., & Stockhause, M. (2016). CMIP5 data provided at the IPCC Data Distribution Centre. Fact Sheet of the task group on data and

- scenario support for impact and climate analysis (TGICA) of the intergovernmental panel on climate change (IPCC), 8.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958.
- Fallah Kalaki, M., Shokri Kuchak, V., & Ramezani Etedali, H. (2021). Simulating the effects of climate change on runoff using the CMIP5 and CMIP6 climate models by SWAT hydrological model (Case study: Tashk-Bakhtegan Basin). *Iran-Water Resources Research*, 17(3), 345-359.
- FAO, F. (2016). *The state of food and agriculture: Climate change, agriculture and food security*. Rome, Italy.
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S.C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V. (2013). *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. In: Stock, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., et al. (Eds.), *Eval. Clim. Model*. Cambridge Cambridge Univ. Press.
- Gao, J., Sheshukov, A. Y., Yen, H., Douglas-Mankin, K. R., White, M. J., & Arnold, J. G. (2019). Uncertainty of hydrologic processes caused by bias-corrected CMIP5 climate change projections with alternative historical data sources. *Journal of Hydrology*, 568, 551-561.
- Gent, P. R. (2012). Coupled climate and earth system models. In *Climate Change Modeling Methodology: Selected Entries from the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* (pp. 5-30). New York, NY: Springer New York.
- Ghazi, B., & Jeihouni, E. (2022). Projection of temperature and precipitation under climate change in Tabriz, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(7), 1-11.
- Goosse, H., BARRIAT, P. Y., LOUTRE, M. F., & ZUNZ, V. (2010). *Introduction to climate dynamics and climate modeling*. Centre de recherche sur la Terre et le climat Georges Lemaître-UCLouvain.
- Hamed, M. M., Nashwan, M. S., & Shahid, S. (2022). Inter-comparison of historical simulation and future projections of rainfall and temperature by CMIP5 and CMIP6 GCMs over Egypt. *International Journal of Climatology*, 42(8), 4316-4332.
- Hamed, M. M., Nashwan, M. S., Shahid, S., bin Ismail, T., Wang, X. J., Dewan, A., & Asaduzzaman, M. (2022). Inconsistency in historical simulations and future projections of temperature and rainfall: A comparison of CMIP5 and CMIP6 models over Southeast Asia. *Atmospheric Research*, 265, 105927.
- Hardy, J. T. (2003). *Climate change: causes, effects, and solutions*. John Wiley & Sons.
- Harper, L. (2018). *What Are Climate Models and How Accurate Are They*. Blogs. ei. columbia. edu.
- Hartmann, D.L.(2016). *Global Climate Models, Second E*. Elsevier, Boston, pp. 325-360.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (1992). *Climate change: the 1990 and 1992 IPCC assessments*. WMO.
- Iqbal, Z., Shahid, S., Ahmed, K., Ismail, T., Ziarh, G. F., Chung, E. S., & Wang, X. (2021). Evaluation of CMIP6 GCM rainfall in mainland Southeast Asia. *Atmospheric Research*, 254, 105525.
- Kamruzzaman, M., Shahid, S., Islam, A. T., Hwang, S., Cho, J., Zaman, M. A. U., ... & Hossain, M. B. (2021). Comparison of CMIP6 and CMIP5 model performance in simulating historical precipitation and temperature in Bangladesh: a preliminary study. *Theoretical and Applied Climatology*, 145, 1385-1406.
- Knutti, R., Allen, M. R., Friedlingstein, P., Gregory, J. M., Hegerl, G. C., Meehl, G. A., ... & Wigley, T. M. L. (2008). A review of uncertainties in global temperature projections over the twenty-first century. *Journal of Climate*, 21(11), 2651-2663.
- Mall, R.K., Gupta, A., Sonkar, G. (2017) Effect of climate change on agricultural crops. In: *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*. Elsevier, pp 23-46.
- Meehl, G. A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J. F., ... & Taylor, K. E. (2007). The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American meteorological society*, 88(9), 1383-1394.
- Moss, R. et al. (2008) *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, pp. 132.
- North, G. R. (2024). Energy balance models in climate science. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 44.
- North, G. R., & Kim, K. Y. (2017). *Energy balance climate models*. John Wiley & Sons.

- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., ... & Van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic change*, 122, 387-400.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482.
- Pitman, A. J. (2003). The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 23(5), 479-510.
- Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Tignor, M., Alegría, A., ... & Okem, A. (2022). IPCC, 2022: Summary for policymakers.
- Rasch, P. J. (Ed.). (2012). *Climate change modeling methodology: selected entries from the Encyclopedia of sustainability science and technology*. Springer Science & Business Media.
- Ray, D. K., Mueller, N. D., West, P. C., & Foley, J. A. (2013). Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PloS one*, 8(6), e66428.
- Reader, C. (2007). *Climate Models and Global Climate Change*. Pro Quest.
- Renno, N.O., & Huang, X. (2015). *Radiative-Convective Equilibrium Climate Models*. Elsevier.
- Robinson, T. D., & Catling, D. C. (2012). An analytic radiative-convective model for planetary atmospheres. *The Astrophysical Journal*, 757(1), 104.
- Romanello, M., McGushin, A., Di Napoli, C., Drummond, P., Hughes, N., Jamart, L., ... & Hamilton, I. (2021). The 2021 report of the Lancet Countdown on health and climate change: code red for a healthy future. *The Lancet*, 398(10311), 1619-1662.
- Rossby, C. G. (1946). *A History of and Introduction to Climate Models*.
- Schlund, M., Lauer, A., Gentine, P., Sherwood, S. C., & Eyring, V. (2020). Emergent constraints on equilibrium climate sensitivity in CMIP5: do they hold for CMIP6?. *Earth System Dynamics*, 11(4), 1233-1258.
- Semenov M.A. & Brooks R.J. (1999). Spatial interpolation of the LARS-WG stochastic weather generator in Great Britain. *Climate Research* 11, 137-148.
- Semenov, M. A., Barrow, E. M., & Lars-Wg, A. (2002). A stochastic weather generator for use in climate impact studies. *User Man Herts UK*, 1-27.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., ... & Miller, H. (2007). IPCC fourth assessment report (AR4). *Climate change*, 374.
- Taylor, K. E., Balaji, V., Hankin, S., Jukes, M., Lawrence, B., & Pascoe, S. (2011). CMIP5 data reference syntax (DRS) and controlled vocabularies. Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison, http://pcmdi.github.io/mips/cmip5/docs/cmip5_data_reference_syntax.pdf (last access: 23 January 2023).
- Taylor, K. E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American meteorological society*, 93(4) 485- 498.
- Trenberth, K. E. (2001). Stronger evidence of human influences on climate: The 2001 IPCC Assessment. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 43(4), 8-19.
- North, G. R., & Kim, K. Y. (2017). *Energy balance climate models*. John Wiley & Sons.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109, 5-31.
- Wang, B., Zheng, L., Liu, D. L., Ji, F., Clark, A., & Yu, Q. (2018). Using multi-model ensembles of CMIP5 global climate models to reproduce observed monthly rainfall and temperature with machine learning methods in Australia. *International Journal of Climatology*, 38(13), 4891-4902.
- Weigel, A. P., Knutti, R., Liniger, M. A., & Appenzeller, C. (2010). Risks of model weighting in multimodel climate projections. *Journal of Climate*, 23(15), 4175-4191.
- Wyser, K., van Noije, T., Yang, S., von Hardenberg, J., O'Donnell, D., & Döscher, R. (2019). On the increased climate sensitivity in the EC-Earth model from CMIP5 to CMIP6.
- Zhao, Q., Yu, P., Mahendran, R., Huang, W., Gao, Y., Yang, Z., ... & Guo, Y. (2022). Global climate change and human health: Pathways and possible solutions. *Eco-Environment & Health*, 1(2), 53-62.

An Introduction to Climate Change Models

Reihaneh Rasoolzadeh¹, Naghmeh Mobarghaee Dinan^{2*}, Hassan Esmaeilzadeh²,
Yousef Rashidi³, Hooman Liaghati⁴

1. Ph.D. Candidate, Department of Environmental Planning and Design, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University
2. Associate Professor, Department of Environmental Planning and Design, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University
3. Assistant Professor, Department of Environmental Technology, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University
4. Professor, Department of Agroecology, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University

(Received: 2024/08/19

Accepted: 2023/11/01)

Abstract

Today, climate change, with its profound impact on the environment and human life, stands as one of the most significant global challenges. These changes have led to substantial economic cost damages and detrimental effects on the environment, human health, and well-being. Therefore, predicting climate change to manage and reduce the associated costs is of critical importance. A key step in climate change studies is selecting the most appropriate model to minimize the uncertainties related to predicting climatic parameters. This article aims to investigate the various climate change models to enable researchers to identify and select the most appropriate and efficient model based on their needs and goals. An accurate selection can facilitate better planning and more effective responses to crises resulting from future climate change. In this study, over 80 articles on climate change studies in Iran and worldwide were reviewed from scientific databases. The findings revealed that climate change prediction models are classified into five main categories: Energy Balance Models, Radiative-Convective Models or Single-Column Models, Dimensionally Constrained Models, Earth system models, and General Circulation Models. Furthermore, no single model is universally suitable for all objectives or temporal and spatial scales. However, all models, if appropriately selected and utilized, can provide valuable insights into the climate system. Considering the vast diversity of climate models and the importance of understanding them, this research introduces the various types of climate change prediction models.

Keywords: Climate models, General Circulation Models (GCM), Coupled Model Intercomparison Project (CMIP).

*Corresponding author:

DOI: 10.22034/eiat.2025.217700

Email: n_mobarghaee@sbu.ac.ir