

ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر دما و بارش ایران در دهه‌های آینده،

با کمک مدل MAGICC-SCENGEN

فاطمه عباسی* - کارشناس ارشد هواشناسی، مربی دانشگاه جامع علمی و کاربردی

ایمان بابائیان - دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی دانشگاه تبریز

مجید حبیبی نوخندان - استادیار پژوهشکده اقلیم‌شناسی

لیلا گلی مختاری - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه اصفهان

شراره ملبوسی - عضو گروه پژوهشی تغییر اقلیم، پژوهشکده اقلیم‌شناسی

شمس‌الله عسکری - کارشناس ارشد جغرافیای طبیعی و عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام

پذیرش مقاله: ۱۳۸۸/۸/۱۱ تأیید نهایی: ۱۳۸۹/۴/۲۶

چکیده

در این مقاله شرایط اقلیم ایران در دهه‌های ۲۰۰۰، ۲۰۲۵، ۲۰۵۰، ۲۰۷۵ و ۲۱۰۰ با استفاده از خروجی دو مدل گردش عمومی جو HadCM2 و ECHAM4 و با در نظر گیری ۱۸ سناریوی انتشار IPCC، مدل‌سازی شده است. از مدل MAGICC-SCENGEN برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های با قدرت تفکیک کم خروجی مدل‌های گردش عمومی استفاده شد. در این تحقیق به بررسی و مقایسه نتایج دو مدل HadCM2 و ECHAM4 پرداخته شده است. بر این اساس، نتایج مدل HadCM2 حاکی از کاهش بارش‌های ایران تا دهه ۲۱۰۰ به میزان ۲/۵ درصد است، در حالی که برای دوره مشابه در مدل ECHAM4 بارش‌های کشورمان به میزان ۱۹/۸ درصد افزایش یافته است. تحلیل منطقه‌ای نتایج مدل HadCM2 نشان می‌دهد که در دهه‌های آینده استان‌های مازندران، گلستان، خراسان شمالی، شمال خراسان رضوی و سمنان، تهران و بخش‌هایی از گیلان و قزوین با افزایش بارش مواجه خواهند شد، در حالی که مدل ECHAM4 برای مناطق مذکور کاهش بارش را پیش‌بینی کرده است. همچنین مدل HadCM2 برای نواحی جنوب شرق کشورمان شامل استان‌های هرمزگان، کرمان، بوشهر، جنوب فارس و بخش‌هایی از سیستان و بلوچستان کاهش بارش را پیش‌بینی کرده است، اما در مدل ECHAM4 مناطق مذکور در دوره مشابه با افزایش بارش مواجه خواهند بود. براساس بررسی‌های به عمل آمده، نتایج هر دو مدل بیانگر افزایش دمای تمامی استان‌های کشورمان در دهه‌های آینده است. این دو مدل تا دهه ۲۱۰۰ به‌طور میانگین افزایش دمای ۳ تا ۳/۶ درجه سانتیگراد را برای کشورمان پیش‌بینی می‌کنند، که در هر دو مدل توزیع مکانی افزایش دما با هم مطابقت دارند.

کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، MAGICC-SCENGEN، مدل گردش عمومی جو HadCM2، ECHAM4، ایران.

مقدمه

رشد صنایع و به‌موجب آن مصرف بیش از حد سوخت‌های فسیلی از یک سو، و افزایش جمعیت جهان و تغییر کاربری اراضی از سوی دیگر، موجب شده است تا پس از انقلاب صنعتی به تدریج تغییرات مشهودی در اقلیم کره زمین به‌وجود آید (بابائیان، ۱۳۸۶، ۳). به‌منظور بررسی دقیق‌تر مسئله، در سال ۱۹۸۸ مؤسسه‌ای با نام هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم به‌طور مشترک به‌وسیله سازمان جهانی هواشناسی و برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد، با هدف ارزیابی شناخت و مطالعه جنبه‌های علمی، فنی و اقتصادی - اجتماعی و مخاطرات به‌وجود آمده بر اثر تغییر اقلیم به‌وسیله انسان، تأسیس شد. شروع فعالیت‌های IPCC با ارائه گزارش‌های ویژه ارزیابی‌های علل تغییر اقلیم بود. برای انجام مطالعات تغییر اقلیم بر منابع مختلف در دوره‌های آتی، در ابتدا می‌بایست متغیرهای اقلیمی تحت تأثیر تغییرات گازهای گلخانه‌ای شبیه‌سازی شوند. روش‌های مختلفی برای این کار وجود دارد که معتبرترین آنها استفاده از داده‌های مدل گردش عمومی جو^۱ (GCM) است. پیش‌بینی‌های اقلیمی و ارزیابی‌های تغییر اقلیم با مشکلاتی چون برآورد سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای و سایر آلاینده‌ها در دهه‌های آتی، بزرگ‌مقیاس بودن تفکیک مکانی و زمانی مدل‌های گردش عمومی جو نظایر اینها مواجه‌اند. این فاکتورها با عدم قطعیت‌های زیاد مواجه‌اند. مشکل دیگری که در زمینه طرح‌های مدل‌های مناسب اقلیمی وجود دارد، یکپارچه کردن تمام بازخوردهای^۲ موجود در سیستم جفت شده جو - اقیانوس - بیوسفر - جامعه است.

برخی از این بازخوردها حتی در پیشرفته‌ترین مدل‌های گردش عمومی (GCM) به‌صورتی ابتدایی پارامترسازی شده‌اند. یکی دیگر از مشکلات، روش مدل‌سازی سیستم‌های پیش‌گفته است. این کار نیاز به شبیه‌سازی‌های چندگانه به‌منظور جداسازی تأثیرات انسانی از نوسان‌های طبیعی دارد. مدل‌های اقلیمی نیاز به زمان زیادی برای ارزیابی، آزمایش و اجرا دارند و ممکن است به ماه‌ها و سال‌های زیادی برای طراحی، اجرا و تشخیص مجموعه مناسبی از آزمایش‌ها نیاز باشد. به‌علاوه، آنها نیازمند ظرفیت محاسباتی بالایی نیز هستند. بنا به دلایل یاد شده، مدل‌های تولید سناریوهای اقلیمی^۳ (CSGs) گزینه‌های مناسبی برای این منظورند، به شرطی که: الف) بتوانند رفتار مدل‌های پیچیده‌تر را الگو قرار دهند؛ ب) عدم قطعیت‌های پیش‌بینی‌های اقلیمی را به‌طور مؤثر و با سرعت کشف کنند؛ و ج) به آسانی در بسیاری از مناطق استفاده شوند (حبیبی، ۱۳۸۷، ۳).

در این مطالعه با به‌کارگیری مدل SCENGEN و MAGICC، داده‌های دو مدل مختلف گردش عمومی جو بر روی ایران ریزمقیاس گردیده و وضعیت بارش و دمای کشور تا سال ۲۱۰۰ میلادی مدل‌سازی شده است. در نهایت نتایج حاصل از اجرای مدل M-S با نتایج اجرای مدل LARS0-WG، که مدل تولید داده‌های هواشناسی است، مقایسه می‌گردد. مدل MAGICC SCENGEN (که به اختصار M-S گفته می‌شود) پیش‌تر به‌طور وسیعی در تعداد زیادی از مطالعات مرتبط با ارزیابی و بررسی تأثیرات تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گرفته است. لازار^۴ و همکاران در مطالعه‌ای،

1. General Circulation Model
2. Feedback
3. Climate Scenario Generators
4. Lazar

تأثیرات تغییر اقلیم نشای از افزایش گازهای گلخانه‌ای را بر روی کمیت و میزان تراکم برف و همچنین تغییرات زمانی وقوع بهمن در منطقه کوهستانی Aspen در سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۱۰۰ مورد بررسی قرار دارند. در مطالعه مذکور برای ارزیابی تغییرات اقلیمی دما و بارش از نرم‌افزار M-S با خروجی پنج مدل گردش عمومی جو با عناوین^۱ CSIRO، ECHAM4، ECHAM3^۲، HadCM2، HadCM3^۳ استفاده گردید (Lazar and Williams, 2008, 219). نسخه ۲/۴ نرم‌افزار یاد شده را ویگلی^۴ و همکاران (2000) ارائه کردند (Wigley, Raper, 2000, 48). این مدل در برنامه وسیع بین‌المللی تغییر اقلیم در چهار منطقه شامل ایالات متحد آمریکا، آسیای جنوب غربی و آفریقای جنوبی اجرا گردیده و نتایج آن در گزارش‌های متفاوتی در اختیار نهادهای اجرایی و دانشگاهی جهان قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

توصیف مدل MAGICC SCENGEN

در سال‌های اخیر تعداد زیادی از CSGها شکل گرفته و توسعه یافته‌اند و در مطالعات اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ترکیب مدل اقلیمی ساده به نام MAGICC و پایگاه داده سناریوهای اقلیمی SCENGEN تولیدکننده سناریوی MAGICC SCENGEN را تشکیل می‌دهند. مدل M-S از دو بخش اصلی MAGICC و SCENGEN تشکیل شده است که ارزیابی تغییر اقلیم ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌عهد بخش MAGICC است، متشکل از مجموعه‌ای از مدل‌های ساده مرتبط با یکدیگر (Harvey et al., 1997, 50).

هر چند MAGICC مدل GCM نیست، اما از داده‌های برخی از مدل‌های اقلیمی استفاده می‌کند تا رفتار مدل‌های GCM را بر روی مناطق مختلف جهان مدل‌سازی کند (Wigley et al., 2002, 2690). MAGICC متوسط سالانه دمای هوای سطح زمین و متوسط سالانه دمای سطح دریا را از سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای و دی‌اکسید گوگرد محاسبه می‌کند (Raper et al., 1996, 20) (Warrick et al., 1996, 358) (Kattenberg et al., 1996, 258). این بخش شامل مجموعه‌ای از داده‌های اقلیمی مشاهده‌ای و خروجی مدل‌های گردش عمومی جو است که به کاربر امکان بررسی و ارزیابی ابعاد مختلف عدم قطعیت درباره اقلیم آینده را می‌دهد. در حقیقت این بخش شامل مجموعه‌ای از مدل‌های جفت شده مختلف است که در یک بسته نرم‌افزاری با یکدیگر تلفیق شده‌اند. این نرم‌افزار به کاربر امکان می‌دهد که تغییرات در غلظت دی‌اکسید کربن جو (CO₂)، دمای متوسط سطح زمین و دریا بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۱۰۰ را با استفاده از سناریوهای انتشار دی‌اکسید کربن Co₂، متان (CH₄)، اکسید نیتروژن (N₂O)، هالوکربن‌ها (از قبیل HCFC^۵، HFC^۶ و PFC^۷) و دی‌اکسید سولفور تعیین کند.

1. Australia's Common Weath Scientific and Industrial Research Organization

۲. مدل‌های گردش عمومی جو، که مرکز ماکس پلانک آلمان از مدل مرکز پیش‌بینی ECMWF اقتباس کرده است، و اکنون نسخه‌های ۳، ۴ و ۵ آن برای پیش‌بینی‌های اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

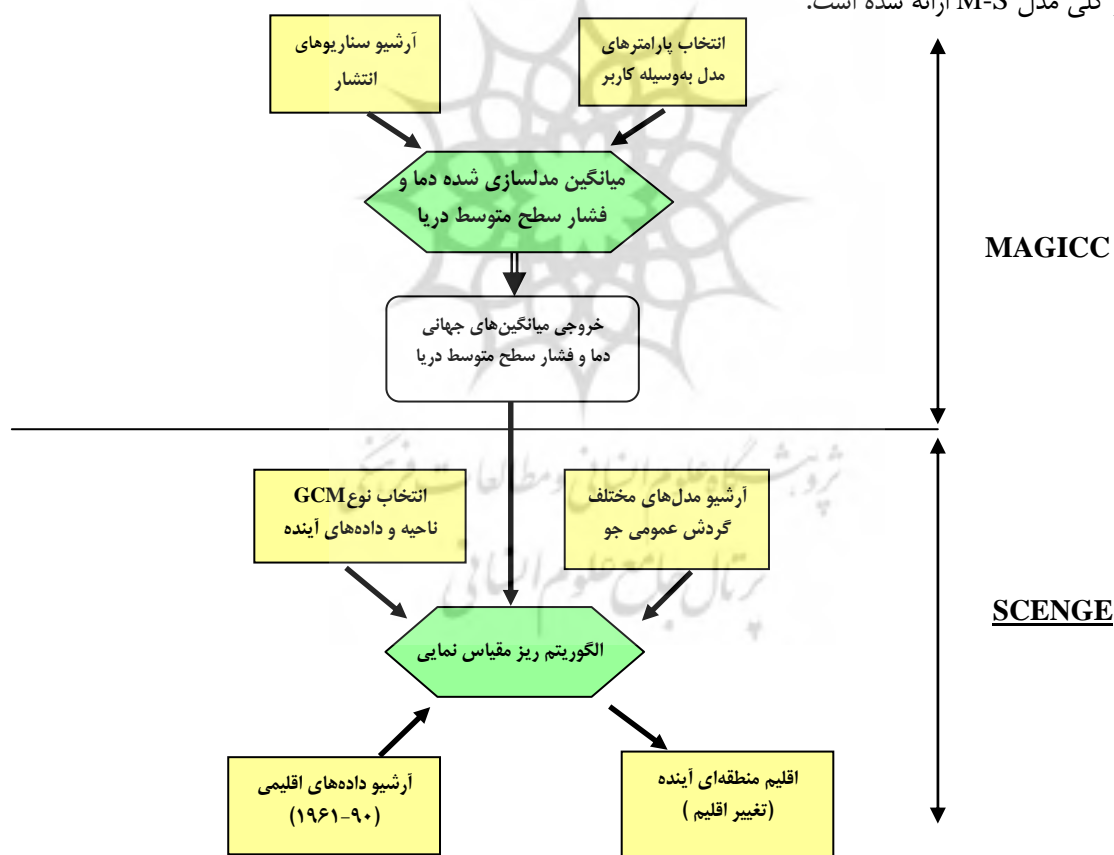
3. Hadley Center General Circulation Model

4. Wigley

5. Hydrochloro Fluoro Carbons

(Schimel et al. 1997, 52) و (Wigley et al., 2000, 8-11) و (Wigley et al., 1993, 409) و (Wigley) (et al., 1994, 194) و (Wigley et al., 1997, 41). این مدل به‌طور وسیعی به‌وسیله IPCC برای ارزیابی‌های مختلف استفاده شده است. در بخش MAGICC، ۱۸ سناریوی انتشار پیش‌فرض وجود دارد. این سناریوها ویرایش شدنی‌اند و امکان روزآمد شدن را به‌نگام‌سازی را نیز دارند و کاربرد می‌تواند حتی سناریوی تهیه شده به‌دست خودش را نیز به مدل وارد کند (Wigley et al., 2003, 5).

بخش دوم این مدل SCENGEN نام دارد که پایگاه داده‌ای از نتایج تعداد زیادی از مدل‌های گردش عمومی جو، داده‌های مشاهده‌ای جهانی و چهار مجموعه از داده‌های اقلیمی اروپا، جنوب آسیا، امریکای جنوبی و آفریقای جنوبی است. SCENGEN که طی چندین سال شکل گرفته و توسعه پیدا کرده است، به‌تنهایی نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. MAGICC و SCENGEN سناریوهای گازهای گلخانه‌ای و دی‌اکسید گوگرد را تبدیل به برآوردهایی از تغییر دمای متوسط سطح زمین و سطح دریا می‌کنند (Santere et al., 1990, 29) و (Hulme et al., 2000, 52). در شکل ۱ ساختار کلی مدل M-S ارائه شده است.



شکل ۱. مدل MAGICC-SCENGEN از دو بخش اصلی MAGICC و SCENGEN تشکیل شده است

منبع: Wigley et al., 2003

1. Hydrofluoro Carbons
2. Perfluoro Carbons

در مدل MAGICC-SCENGEN مجموعه داده‌های اقلیمی جهانی با قدرت تفکیک ۵ درجه طول و عرض جغرافیایی برای سه متغیر اقلیمی دمای میانگین، بارش و پوشش ابر وجود دارند، اما داده‌های مشاهده‌ای اقلیمی با قدرت تفکیک ۰/۵ درجه جغرافیایی فقط برای ۴ منطقه بزرگ (اروپا، جنوب آسیا، امریکا و افریقای جنوبی) در دسترس‌اند (Wigley et al., 2003, 11). این مدل علاوه بر دمای میانگین و بارش و پوشش ابر، می‌تواند دمای حداقل، دمای حداکثر، فشار بخار، سرعت باد و میزان تغییرات شبانه‌روزی دما را نیز مدل‌سازی کند (Wigley, et al., 2000, 72) و (Covey et al., 2003, 120).

سناریوهای انتشار IPCC

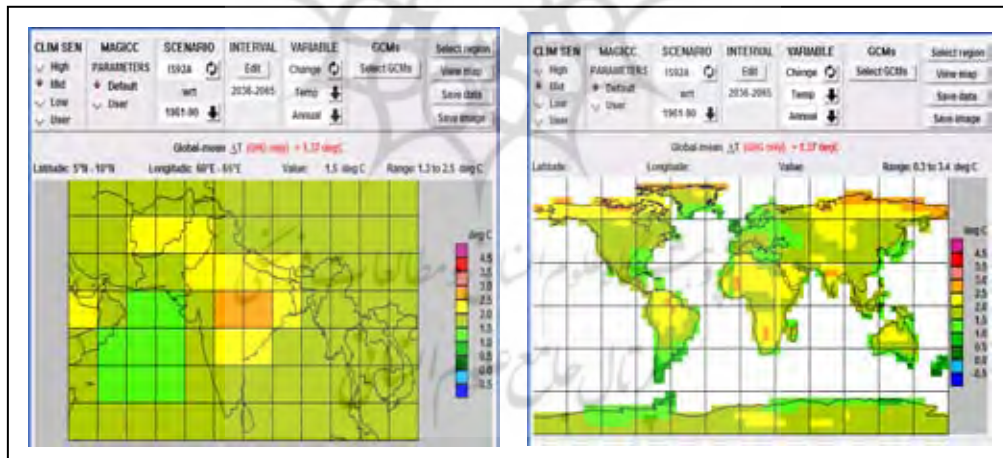
سناریوی انتشار دربرگیرنده اطلاعاتی از وضعیت اقتصادی - اجتماعی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر کره زمین است. در سال ۱۹۹۲ اولین سناریوهای انتشار IPCC تحت عنوان IS92 (IS92a تا IS92f) برای استفاده در ورودی مدل‌های گردش عمومی جو به‌منظور مدل‌سازی سناریوهای تغییر اقلیم تدوین شدند. سناریوهای IS92 شامل برآورد جمعیت، تولید ناخالص ملی، مصرف انرژی به تفکیک بخش‌های تجارت، صنعت، حمل‌ونقل و مسکونی، تولید انرژی، میزان تولید و مصرف سوخت‌های ثانوی، میزان تولید انرژی از سوخت‌های مایع، جامد، گاز هیدروژنی، هسته‌ای خورشیدی، بیوماس، مقدار انتشار دی‌اکسید کربن، منواکسید کربن، اکسید نیترو، اکسیدهای نیتروژن، متان از طریق احتراق، انتشار متان از معادن و بسیاری منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای برای ده منطقه کره زمین شامل امریکا، غرب اروپا و کانادا، آسیا و آسیای جنوب شرقی، اروپای مرکزی، آسیای مرکزی، افریقا، خاورمیانه، امریکای لاتین، جنوب و جنوب‌غرب آسیا و روسیه برای سال‌های ۱۹۸۵، ۱۹۹۰، ۱۹۹۵، ۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵، ۲۰۲۰، ۲۰۲۵، ۲۰۵۰، ۲۰۷۵ و ۲۱۰۰ بود. IPCC در سال ۲۰۰۰ سری جدیدی از سناریوهای انتشار را تحت عنوان SRES^۱ برای ارائه در سومین گزارش ویژه سناریوهای انتشار تدوین کرد. گروه SRES سه خانواده سناریو با نام‌های A1، A2، B1 و B2 را برای توصیف ارتباط بین فرایندهای تولیدکننده گازهای گلخانه‌ای و اثرات و نحوه تغییرات آنها طی قرن بیست‌ویکم در مناطق مهم کره زمین به کار گرفت. اطلاعات تکمیلی از هر کدام از سناریوهای IPCC و سناریوهای تدوین شده به‌وسیله دیگر سازمان‌ها در قالب بانک اطلاعات مدون در سایت IPCC به نشانی www.IPCC.ch در دسترس است. (Houghton et al., 1996, 572) (Harvey et al., 1997, 50).

داده‌ها، ناحیه و دوره مورد مطالعه

با توجه به محدودیت‌های موجود در اجرای مدل‌های دینامیکی اقلیمی و همچنین قدرت تفکیک فضا - زمانی اندک این مدل‌ها برای ارزیابی تغییرات اقلیمی دهه‌های آینده، مدل M-S برای ریزمقیاس نمایی آماری خروجی دو مدل گردش عمومی جو HadCM2 و ECHAM4 انتخاب گردید و با تقسیم ایران به ۹ شبکه محاسباتی، برای هر کدام از مناطق

مذکور تغییرات بارش و دما برای دهه‌های ۲۰۰۰، ۲۰۲۵، ۲۰۵۰، ۲۰۷۵ و ۲۱۰۰ مدل‌سازی شد. بازه‌های زمانی نمایش سناریوهای تغییر اقلیم می‌تواند به صورت ماهانه یا فصلی و یا سالانه باشد. محاسبات برای ایران با قدرت تفکیک ۰/۵ درجه جغرافیایی انجام شد.

علاوه بر فصول سه ماهه استاندارد یک دوره اضافی شامل ژوئن، ژوئیه، اوت و سپتامبر نیز به دلیل اهمیت موسمی هندوستان در نظر گرفته شده است. این مدل می‌تواند از ۱۶ مدل GCM به صورت منفرد یا چندتایی و یا از همه آنها استفاده کند، که در صورت انتخاب چند GCM، میانگین آنها مدنظر خواهد بود (Hulme, Wigley, 2000, 52). در این مطالعه محاسبات براساس خروجی‌های دو مدل HadCM2 و ECHAM4 انجام شده است. در شکل ۲ محدوده جهانی و منطقه‌ای برای استفاده از مدل M-S برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو با استفاده از ۱۸ سناریوی انتشار دیده می‌شود که در ناحیه جنوب غرب آسیا قرار دارد. در شبکه‌بندی منطقه‌ای ملاحظه می‌شود که ایران در داخل ۹ شبکه محاسباتی مدل M-S قرار گرفته است. در این مطالعه دوره آماری ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰ میلادی به عنوان دوره اقلیم پایه در نظر گرفته شده است که داده‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۵ میلادی (نماینده دهه ۲۰۰۰)، ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰ میلادی (دهه ۲۰۲۵)، دوره ۲۰۳۶ تا ۲۰۶۵ میلادی (دهه ۲۰۵۰ میلادی)، دوره ۲۰۶۱ تا ۲۰۹۰ میلادی (دهه ۲۰۷۵) و دوره ۲۰۸۶ تا ۲۱۱۵ میلادی (دهه ۲۱۰۰) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.



شکل ۲. محدوده منطقه‌ای (شکل چپ) و جهانی (شکل راست) مدل MAGICC-SCENGEN

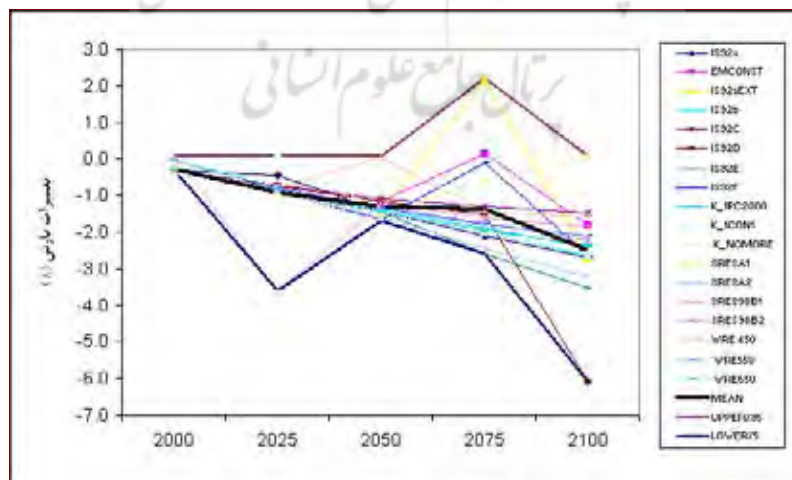
یافته‌های تحقیق

میانگین بارش

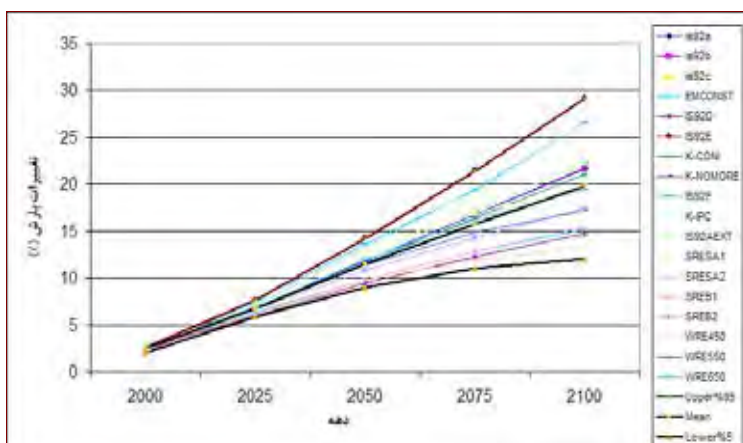
نتایج حاصل از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل HadCM2، نشان‌دهنده کاهش میانگین بارش در کل منطقه در دهه‌های آینده است. در بین دهه‌های منتخب، دهه ۲۱۰۰ (نماینده دوره ۲۰۸۶ تا ۲۱۱۵ میلادی) بیشترین کاهش بارش را در مقایسه با دهه‌های دیگر دارد (شکل ۳ و جدول ۱). بیشترین کاهش بارندگی در دهه مذکور مربوط به سناریوی IS92D با حدود ۶ درصد است. مناطق ۱، ۲ و ۳ شامل استان‌های مازندران، گلستان، خراسان شمالی، نواحی شمالی خراسان

رضوی، نیمه شمالی استان سمنان، تهران و بخش‌هایی از گیلان، قزوین و مرکزی در دهه‌های آینده با افزایش بارندگی مواجه خواهند بود. بیشترین افزایش بارندگی در منطقه ۳ که شامل شمال شرق و شرق استان خراسان رضوی است رخ می‌دهد. افزایش بارش‌ها در سواحل شرقی و جنوبی خزر، چندان نیست که توجه جدی را طلب کند. همچنین بیشترین کاهش بارش کشورمان در مناطق ۷، ۸ و ۹ در استان‌های جنوبی و جنوب شرقی کشور، شامل هرمزگان، بخش‌هایی از سیستان و بلوچستان جنوب استان فارس، کرمان و بوشهر رخ می‌دهد. در شکل ۳ تغییرات بارش دهه‌های آینده کشورمان با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف با داده‌های Hadcm2 مشاهده می‌شود. نتایج اجرای مدل M-S با داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHAM4 نشان می‌دهد که بارش‌ها در کل منطقه روند افزایشی دارند، به طوری که بیشترین افزایش بارش در دهه ۲۱۰۰ رخ می‌دهد. در این مدل بیشترین و کمترین افزایش بارش به ترتیب با سناریوهای IS92C و IS92E به میزان ۲۹/۲ و ۱۲ درصد رخ می‌دهد (جدول ۱). براساس این نتایج، مناطق ۱ و ۲ و ۳ شامل استان‌های مازندران، خراسان شمالی، گلستان، بخش‌هایی از خراسان رضوی، نیمه شمالی استان سمنان، تهران و بخش‌هایی از گیلان، قزوین و مرکزی در دهه‌های آینده با کاهش بارندگی مواجه خواهند بود که بیشترین کاهش بارندگی در منطقه ۱ شامل استان‌های واقع در سواحل شرقی و جنوبی خزر مانند مازندران، گلستان، بخش‌هایی از گیلان، سمنان، قزوین، مرکزی خواهد بود. این استان‌ها بین ۸/۰ تا حدود ۹ درصد کاهش بارندگی خواهند داشت.

جز مناطق ۱ و ۲ و ۳، سایر استان‌های کشور شامل استان‌های سیستان و بلوچستان، هرمزگان، کرمان، فارس، بوشهر، خراسان جنوبی، یزد، اصفهان، چهارمحال و بختیاری، نوار جنوبی خراسان رضوی، بخش‌های جنوبی سمنان، تهران و مرکزی با افزایش بارش مواجه‌اند، که بیشترین افزایش بارندگی در سواحل خلیج فارس و دریای عمان خواهد بود. در شکل ۴ تغییرات بارش میانگین دهه‌های کشور در دهه‌های آینده، با سناریوهای مختلف مدل ECHAM4 دیده می‌شود.



شکل ۳. برآورد تغییرات دهه‌ای بارش کشور به وسیله مدل M-S، با استفاده از داده‌های مدل گردش عمومی جو HadCM2

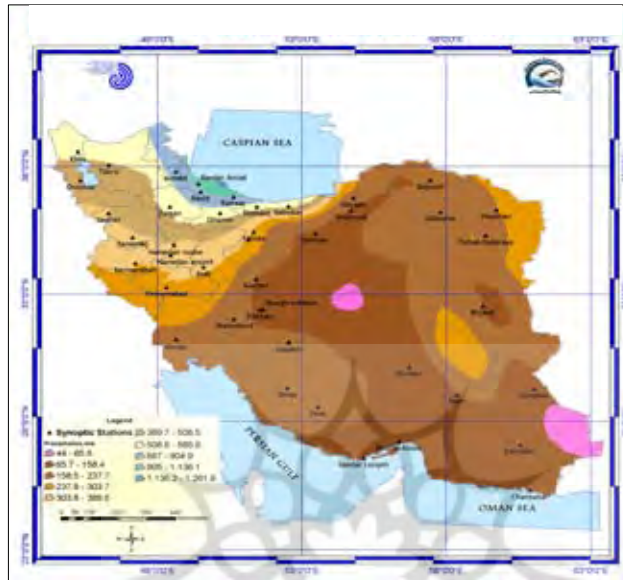


شکل ۴. برآورد تغییرات دهه‌ای بارش در دوره ۲۱۰۰-۲۰۰۰ کشور به وسیله مدل M-S، با استفاده از داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHAM4

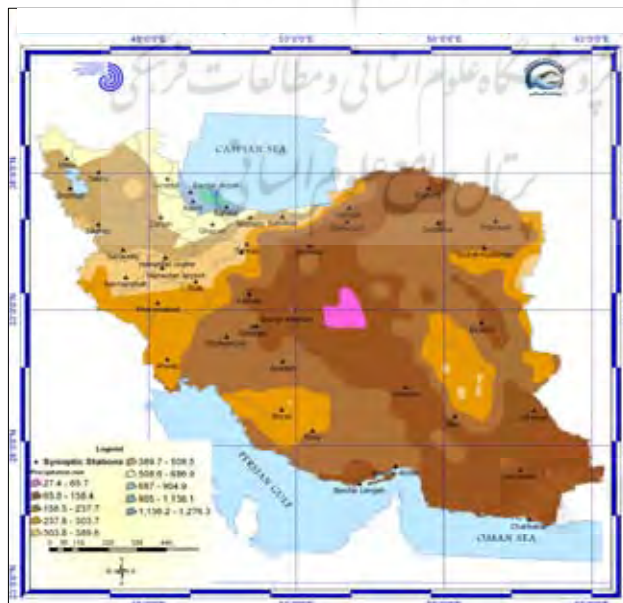
جدول ۱. تغییرات بارش (درصد) کشور در دهه‌های ۲۰۰۰ تا ۲۱۰۰ میلادی، با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری خروجی مدل‌های ECHAM4 و HadCM2 به وسیله مدل MAGICC-SCENGEN با ۱۸ سناریوی انتشار

دهه ۲۱۰۰		دهه ۲۰۷۵		دهه ۲۰۵۰		دهه ۲۰۲۵		دهه ۲۰۰۰		سناریوها (IPCC و سایر مراجع بین‌المللی)	ردیف
HadCM2	ECHAM4	HadCM2	ECHAM4	HadCM2	ECHAM4	HadCM2	ECHAM4	HadCM2	ECHAM4		
-۲/۷	۲۲/۳	-۲/۱	۱۷/۳	-۱/۵	۱۲/۲	-۰/۴	۶/۹	-۰/۳	۲/۵	IS92a	۱
-۲/۶	۲۱/۶	-۲	۱۶/۸	-۱/۴	۱۱/۸	-۰/۸	۶/۸	-۰/۳	۲/۵	IS92b	۲
-۱/۵	۱۲	-۱/۳	۱۱	-۱/۱	۹	-۰/۷	۵/۹	-۰/۳	۲/۶	IS92c	۳
-۶/۱	۱۴/۸	-۱/۵	۱۲/۳	-۱/۲	۹/۴	-۰/۷	۵/۹	-۰/۳	۲/۴	IS92d	۴
-۳/۵	۲۹/۲	-۲/۶	۲۱/۴	-۱/۵	۱۴/۲	-۰/۹	۷/۷	-۰/۳	۲	IS92e	۵
-۲/۷	۱۶/۶	-۰/۱	۱۹/۴	-۱/۷	۱۳/۶	-۰/۹	۷/۵	-۰/۳	۲/۶	IS92f	۶
-۲/۷	۲۲/۳	۲/۲	۱۷/۳	-۱/۵	۱۲/۲	-۰/۸	۶/۹	-۰/۳	۲/۵	IS92aEXT	۷
-۲/۶	۲۱/۱	-۲	۱۶/۴	-۱/۴	۱۱/۶	-۰/۱	۶/۷	-۰/۳	۲/۵	K-CONI	۸
-۲/۴	۱۹/۹	-۱/۹	۱۵/۷	-۱/۴	۱۱/۳	۰/۸	۶/۷	۰	۲/۵	K-IPC	۹
-۲/۶	۲۱/۸	-۲	۱۶/۸	-۱/۴	۱۱/۸	-۰/۸	۶/۸	-۰/۳	۲/۵	K-NOMO	۱۰
-۱/۸	۱۵/۲	۰/۱	۱۲/۸	-۱/۲	۹/۸	-۰/۸	۶/۳	-۰/۳	۲/۵	EMCONST	۱۱
-۱/۶	۱۳/۳	-۱/۴	۱۱/۹	۰/۱	۹/۸	-۰/۸	۶/۶	-۰/۳	۲/۵	WRE450	۱۲
-۲/۱	۱۷/۳	-۱/۸	۱۴/۹	-۱/۴	۱۱/۴	-۰/۸	۶/۹	-۰/۳	۲/۵	WRE550	۱۳
-۲/۴	۱۹/۵	-۲	۱۶/۲	-۱/۴	۱۱/۹	-۰/۸	۶/۹	-۰/۳	۲/۵	WRE650	۱۴
۰/۱	۱۹/۶	-۰/۶	۱۷	-۱/۶	۱۳	-۱	۷/۵	-۰/۳	۲/۵	SRESA1	۱۵
-۳/۲	۲۶/۵	-۲/۵	۱۹/۵	-۱/۶	۱۳/۱	-۰/۹	۷/۱	۰	۲/۵	SRESA2	۱۶
-۱/۹	۱۵/۴	-۱/۶	۱۲/۸	-۱/۲	۹/۸	-۳/۶	۶/۲	-۰/۳	۲/۵	SRESB1	۱۷
-۲/۲	۱۷/۴	-۱/۷	۱۴/۳	-۱/۳	۱۰/۸	-۰/۸	۶/۷	-۰/۳	۲/۵	SRESB2	۱۸
-۲/۵	۱۹/۸	-۱/۴	۱۵/۸	-۱/۳	۱۱/۵	-۰/۹	۶/۸	-۰/۳	۲/۵	میانگین	

شکل ۵ توزیع مکانی بارش مدل MAGICC SCENGEN با داده‌های HadCM2، با استفاده از سناریوی IS92A و شکل ۶ توزیع مکانی بارش در مدل MAGICC SCENGEN با داده‌های ECHAM4 با استفاده از سناریوی IS92A برای دهه ۲۰۲۵ کشور را نشان می‌دهند.



شکل ۵. توزیع مکانی بارش در مدل MAGICC SCENGEN با داده‌های HadCM2 با استفاده از سناریوی IS92A برای دهه ۲۰۲۵ کشور برای دهه ۲۰۲۵ کشور



شکل ۶. توزیع مکانی بارش در مدل MAGICC SCENGEN با داده‌های ECHAM4 با استفاده از سناریوی IS92A برای دهه ۲۰۲۵ در کشور

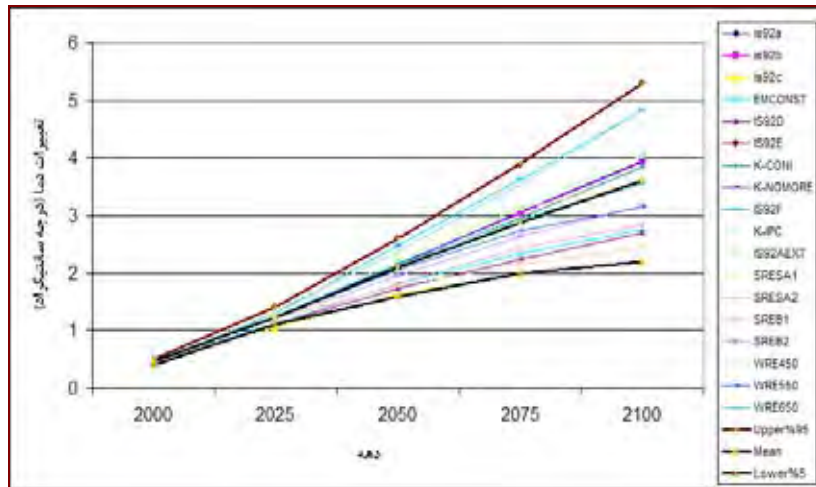
میانگین دما

میانگین دمای ریزمقیاس‌نمایی شده خروجی دو مدل گردش عمومی جو HadCM2 و ECHAM4 به وسیله مدل اماری MS با دمای دوره پایه کشورمان (۱۹۶۱-۱۹۹۰) مقایسه گردید و میزان تغییرات دمای دهه‌های ۲۰۰۰، ۲۰۲۵، ۲۰۵۰، ۲۰۷۵ و ۲۱۰۰ نسبت به دوره پایه، مطابق جدول ۲، محاسبه شد. شکل‌های ۷ و ۸ تغییرات دمای دهه‌ای کشور را با سناریوهای مختلف نشان می‌دهند که در آن میانگین دما در دهه‌های آینده روند افزایشی دارد. در بین دهه‌های مورد مطالعه، دهه ۲۱۰۰ بیشترین افزایش دما را نسبت به نرمال خواهد داشت. نتایج نشان می‌دهند که میانگین دمای تمامی استان‌های کشور افزایش می‌یابد، به طوری که میانگین آن در دهه‌های آینده و با سناریوهای مختلف بین ۰/۴ تا ۳ درجه سانتی‌گراد در مدل HadCM2 و بین ۰/۵ تا ۴ درجه سانتی‌گراد در مدل ECHAM4 افزایش خواهد داشت که بیشترین تغییرات دما به میزان ۴/۴ تا ۵/۳ درجه سانتی‌گراد در دهه ۲۱۰۰ رخ می‌دهد. مقادیر جهانی این مقدار بین ۱/۴ تا ۵/۸ درجه سانتی‌گراد است.

در مدل HadCM2 بیشترین افزایش دما در استان‌های یزد، خراسان جنوبی، چهارمحال و بختیاری، اصفهان، بخش‌هایی از خراسان رضوی، سمنان، تهران، مرکزی، قزوین و گیلان رخ می‌دهد. استان‌های دیگری که با افزایش جدی دما مواجه‌اند عبارت‌اند از: هرمزگان، سیستان و بلوچستان، بوشهر، کرمان و فارس. اما در مدل ECHAM4 بیشترین افزایش دما در استان‌های فارس، اصفهان، چهارمحال و بختیاری، بوشهر، مازندران، تهران و بخش‌هایی از استان‌های یزد، سمنان، قزوین، گیلان و مرکزی روی می‌دهد.

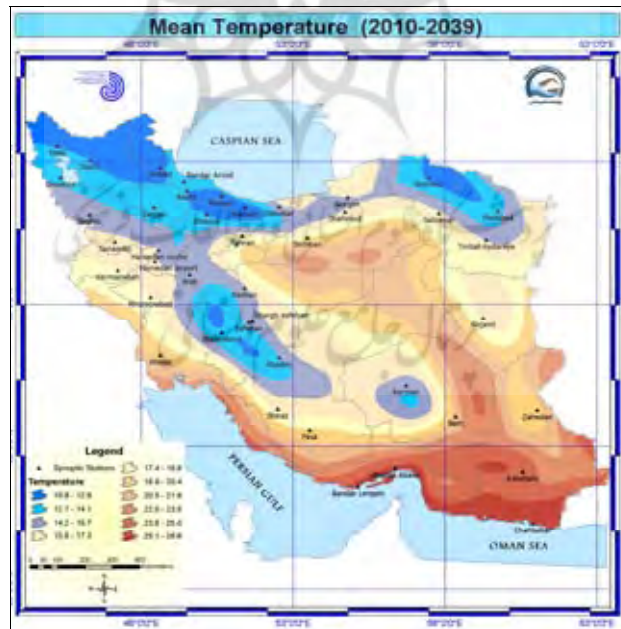


شکل ۷. برآورد تغییرات دمای دهه‌ای کشور، به وسیله مدل M-S، با استفاده از داده‌های مدل گردش عمومی جو HadCM2

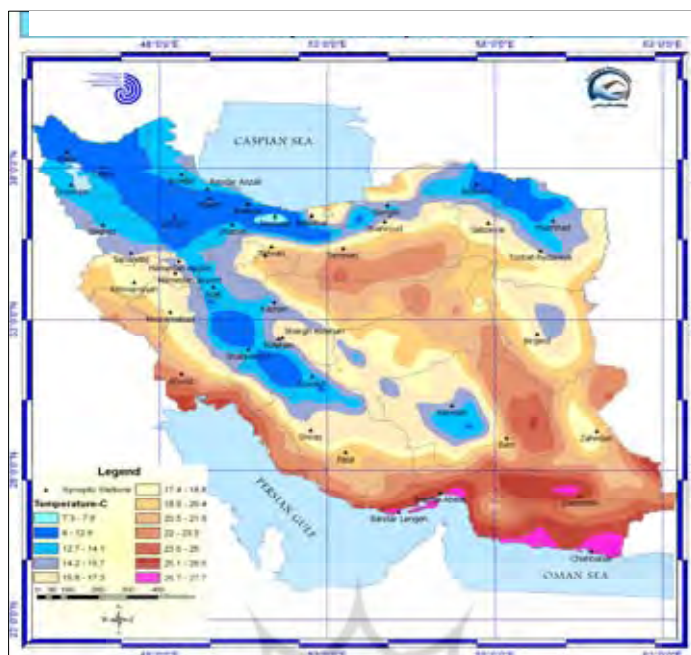


شکل ۸. برآورد تغییرات دمای کشور، به وسیله مدل M-S، با استفاده از داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHAM4

شکل ۹ توزیع مکانی میانگین دما را در مدل MAGICC SCENGEN با داده‌های HadCM2 با استفاده از سناریوی IS92A و شکل ۱۰ توزیع مکانی میانگین دما را در مدل MAGICC SCENGEN با داده‌های ECHAM4 با استفاده از سناریوی IS92A برای دهه ۲۰۲۵ کشور نشان می‌دهند.



شکل ۹. توزیع مکانی میانگین دما در مدل MAGICC SCENGEN با HADCM2، با استفاده از سناریوی IS92A برای دهه ۲۰۲۵ کشور



شکل ۱۰. توزیع مکانی میانگین دما در مدل MAGICC SCENGEN با داده‌های ECHAM4. با استفاده از سناریوی IS92A برای دهه ۲۰۲۵ کشور

جدول ۲. تغییرات میانگین دمای کشور (درجه سانتی‌گراد) در دهه‌های ۲۰۰۰ تا ۲۱۰۰ میلادی، با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری خروجی مدل با ۱۸ سناریوی انتشار MAGICC-SCENGEN به‌وسایله مدل‌های ECHAM4 و HadCM2

دهه ۲۱۰۰		دهه ۲۰۷۵		دهه ۲۰۵۰		دهه ۲۰۲۵		دهه ۲۰۰۰		سناریوها (IPCC و سایر مراجع بین‌المللی)	ردیف
HadCM2	ECHAM4	HadCM2	ECHAM4	HadCM2	ECHAM4	HadCM2	ECHAM4	HadCM2	ECHAM4		
۳/۴	۴/۱	۲/۶	۳/۱	۱/۸	۲/۲	۰/۸	۱/۲	۰/۴	۰/۵	IS92a	۱
۳/۳	۳/۹	۲/۶	۳	۱/۸	۲/۱	۱	۱/۲	۰/۴	۰/۵	IS92b	۲
۱/۸	۲/۲	۱/۷	۲	۱/۴	۱/۶	۰/۹	۱/۱	۰/۴	۰/۵	IS92c	۳
۲	۲/۷	۱/۹	۲/۲	۱/۴	۱/۷	۰/۹	۱/۱	۰/۴	۰/۴	IS92d	۴
۴/۴	۵/۳	۲/۲	۳/۹	۱/۸	۱/۶	۱/۲	۱/۴	۰/۴	۰/۵	IS92e	۵
۴	۴/۸	۳	۳/۶	۲	۲/۵	۱/۱	۱/۳	۰/۴	۰/۴	IS92f	۶
۳/۴	۴/۱	۲/۶	۳/۱	۱/۸	۲/۲	۱/۱	۱/۲	۰/۴	۰/۵	IS92aEXT	۷
۳/۲	۳/۸	۲/۵	۳	۱/۸	۲/۱	۱	۱/۲	۰/۴	۰/۵	K-CONI	۸
۳	۳/۶	۲/۴	۲/۸	۱/۷	۲	۱	۱/۲	۰/۴	۰/۵	K-IPC	۹
۳/۳	۴	۲/۶	۳/۱	۱/۸	۲/۱	۱	۱/۲	۰/۴	۰/۵	K-NOMO	۱۰
۲/۳	۲/۸	۱/۹	۲/۳	۱/۵	۱/۸	۱	۱/۱	۰/۴	۰/۵	EMCONST	۱۱

دهه ۲۱۰۰		دهه ۲۰۷۵		دهه ۲۰۵۰		دهه ۲۰۲۵		دهه ۲۰۰۰		سناریوها (IPCC و سایر مراجع بین‌المللی)	ردیف
HadCM2	ECHAM4	HadCM2	ECHAM4	HadCM2	ECHAM4	HadCM2	ECHAM4	HadCM2	ECHAM4		
۲	۲/۴	۱/۸	۲/۲	۱/۵	۱/۸	۱	۱/۲	۰/۴	۰/۵	WRE450	۱۲
۲/۶	۳/۱	۲/۲	۲/۷	۱/۷	۲	۱	۱/۲	۰/۴	۰/۵	WRE550	۱۳
۳	۳/۵	۲/۵	۲/۹	۱/۸	۲/۲	۱	۱/۲	۰/۴	۰/۵	WRE650	۱۴
۳	۳/۶	۲/۶	۳/۱	۲	۲/۴	۱/۱	۱/۴	۰/۴	۰/۵	SRESA1	۱۵
۴	۴/۸	۳	۳/۵	۲	۲/۴	۱/۱	۱/۳	۰/۴	۰/۵	SRESA2	۱۶
۲/۳	۲/۸	۲	۲/۴	۱/۵	۱/۸	۰/۹	۱/۱	۰/۴	۰/۵	SRESB1	۱۷
۲/۷	۳/۲	۲/۲	۲/۶	۱/۷	۲	۱	۱/۲	۰/۴	۰/۵	SRESB2	۱۸
۳	۳/۶	۲/۳	۲/۹	۱/۷	۲/۱	۱	۱/۲	۰/۴	۰/۵	میانگین	

در نهایت، نتایج حاصل از اجرای مدل M-S با نتایج اجرای مدل LARS-WG مقایسه می‌شود. LARS-WG یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هواست که برای تولید مقادیر بارش، تابش، درجه حرارت‌های بیشینه و کمینه روزانه در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم پایه و آینده به کار می‌رود. مبنای مدل LARS-WG برای مدل‌سازی طول دوره‌های خشک و تر، بارش روزانه و سری‌های تابش، توزیع نیمه‌تجربی است (Semenov, 2002, 2). در این مدل سری‌های فوریه، درجه حرارت را تخمین می‌زنند. رفتار حاکم بر مقادیر مانده‌ها که از تفریق مقادیر میانگین از مقدار دیدبانی شده به دست می‌آیند، از طریق تحلیل خود همبستگی زمانی داده‌های مینیوم و ماکزیمم به دست می‌آید (بابائیان، ۱۳۸۵، ۵۷). مکانیسم عمل مدل LARS-WG به این صورت است که در ابتدا با استفاده از سناریوی تولید داده ماهانه که در بگیرنده رفتار اقلیم پایه است، تمامی داده‌های ماهانه را مطابق این فرمول، پریشیده^۱ می‌کند:

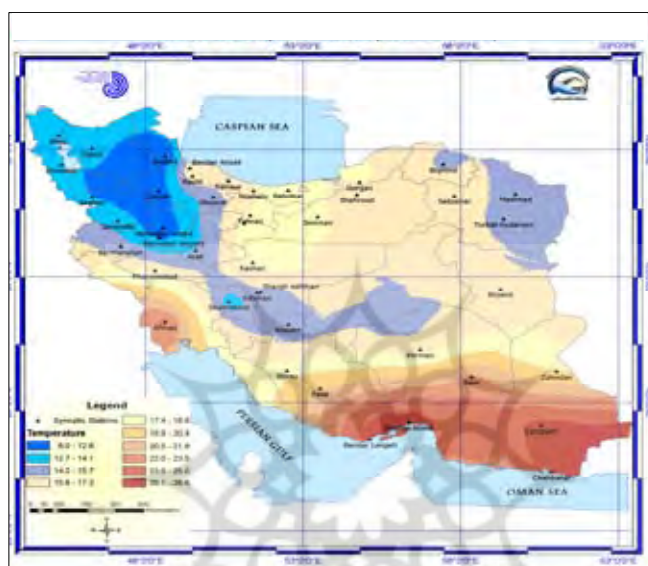
$$F_{fut} = F_{obs} + (F_{GCM}^{fut} - F_{GCM}^{base}) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در آن، F_{GCM}^{fut} و F_{obs} و F_{fut} و F_{GCM}^{base} به ترتیب نشان‌دهنده پارامتر هواشناسی پیش‌بینی شده بر روی ایستگاه هواشناسی، پارامتر هواشناسی دیدبانی شده در همان ایستگاه، پارامتر هواشناسی پیش‌بینی شده بر روی شبکه مدل در دوره آینده و پارامتر هواشناسی مدل شده بر روی شبکه مدل در دوره گذشته‌اند. سپس با حفظ میانگین، انحراف معیار آنها را مطابق این فرمول تغییر می‌دهد (بابائیان و کوان، ۲۰۰۴: ۷۵):

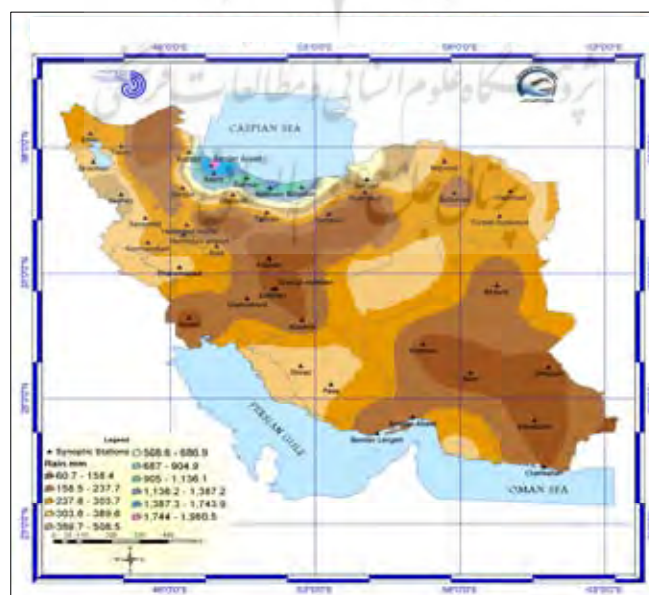
$$STD_{fut} = \frac{STD_{base}^{OBS}}{STD_{base}^{GCM}} \times STD_{fut}^{GCM} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در آن، STD انحراف معیار پارامتر هواشناسی تحت بررسی است. برای مقایسه نتایج به دست آمده از مدل LARS-

WG با مدل MAGICC SCENGE ابتدا دوره مرجع ۳۰ ساله مورد استفاده در مدل M-S (۱۹۶۱-۱۹۹۰) در مدل LARS-WG نیز به کار گرفته شد و از سناریوی انتشار IS92a برای مقایسه نتایج استفاده گردید. نتایج به دست آمده از دو مدل برای بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰ میلادی (دهه ۲۰۲۵) به عنوان دوره پیش‌بینی مشترک مورد مقایسه قرار گرفت. شکل ۱۱ توزیع مکانی مقادیر پیش‌بینی دمای مدل LARS-WG و شکل ۱۲ توزیع مکانی بارش در مدل LARS-WG برای دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ را در کشور نشان می‌دهند.



شکل ۱۱. نقشه مقادیر پیش‌بینی دمای مدل LARS-WG در دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ میلادی برای کشور



شکل ۱۲. توزیع مکانی بارش در مدل LARS-WG برای دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ میلادی در کشور

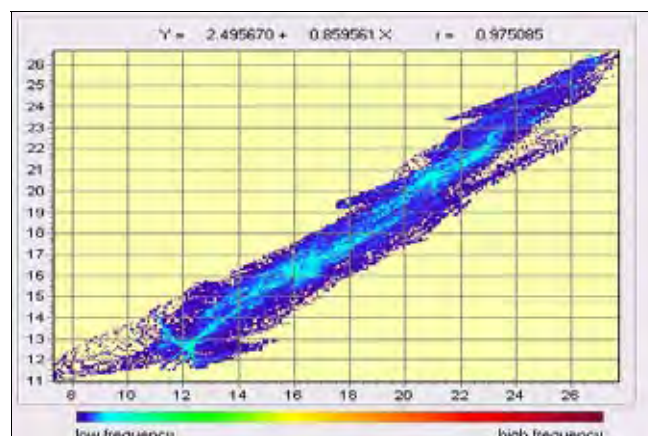
برای مقایسه نتایج مقادیر پیش‌بینی دما و بارش در دو مدل از آزمون‌های آماری استفاده گردید. نتایج به‌دست آمده از آزمون دو نمونه‌ای T نشان داد که در پیش‌بینی مقادیر دما و بارندگی مدل M-S با داده‌های HadCM2 با مقادیر مدل‌سازی دما و بارندگی مدل LARS-WG تفاوت معناداری در سطح معناداری ۰/۰۵ وجود ندارد و بازه اطمینان داده‌ها در مدل‌های مذکور مشتمل بر صفر است. بررسی مکانی تغییرات بارش در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ نشان‌دهنده وجود تغییرات منطقه‌ای در بارش‌های دو مدل LARS-WG و MAGICC SCENGEN با داده‌های HadCM2 است. اما این تغییرات از نظر آماری با ۹۵ درصد اطمینان پذیرفتنی است (جدول ۳).

جدول ۳. مقایسه مقادیر پیش‌بینی دما و بارش مدل‌ها در دهه ۲۰۲۵ میلادی برای کشور

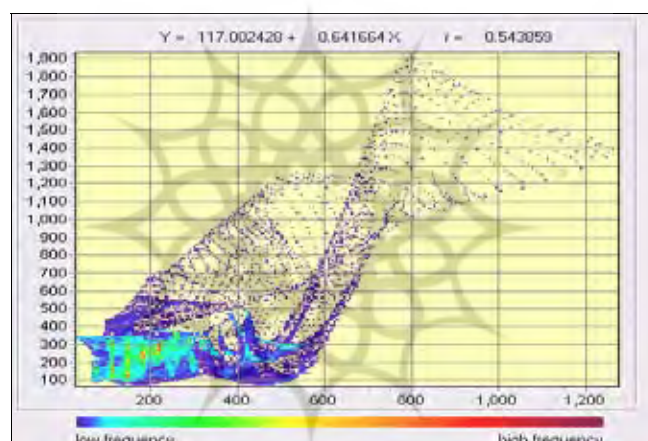
MAGICC SCENGEN IS92a(Hadcm2)	MAGICC SCENGEN IS92a(Hadcm2)	مدل	
		آماره	
۰/۸۵	۱/۷۱	t-Test	LARS WG
۰/۳۹	۰/۰۹۳	Significance level	
-۴۶/۱ ۱۱۴/۳	-۰/۰۰۸ ۰/۱۱	95percent confidence interval	
۰/۹۹ **	۰/۹۹	Correlation	

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

نتایج آنالیز همبستگی مکانی نشان می‌دهد که بین میانگین دما در دو مدل M-S یعنی با داده‌های ECHAM4 و داده‌های HADCM2، ضریب همبستگی ۹۷ درصد است و فراوانی آن به گونه‌ای است که بیشترین همبستگی تقریباً در مناطقی که دمای آن کمتر از ۲۳ درجه سلسیوس است دیده می‌شود (شکل ۱۳). همچنین بین میانگین دمای مدل M-S و LARS-WG ضریب همبستگی خوبی وجود دارد. ولی بین میانگین بارش مدل M-S با داده‌های ECHAM4 و LARS-WG ضریب همبستگی ۵۴ درصد است. مقدار فراوانی پیکسل‌های هم‌ارزش بارش در دو مدل ECHAM4 و LARS-WG نشان‌دهنده تفاوت‌های نسبتاً زیاد در بارش بیشتر از ۳۵۰ میلی‌متر و تفاوت کمتر در بارش کمتر از ۳۵۰ میلی‌متر است (شکل ۱۴).



شکل ۱۳. همبستگی مکانی بین میانگین دمای مدل m-S با داده‌های ECHAM4 و HADCM2 با سناریوی مشترک IS92A



شکل ۱۴. همبستگی مکانی بین میانگین بارش مدل M-S با داده‌های ECHAM4 و مدل LARS-WG با سناریوی مشترک IS92A در دهه ۲۰۲۵

نتیجه‌گیری

در این مطالعه از مدل MAGICC-SCENGEN برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های دو مدل گردش عمومی جو HadCM2 و ECHAM4 با ۱۸ سناریوی اقلیمی مورد تأیید IPCC بر روی کشورمان استفاده شد. با به‌کارگیری این روش قدرت تفکیک افقی داده‌های مدل گردش عمومی جو از حدود ۲/۵ درجه جغرافیایی به ۰/۵ درجه جغرافیایی افزایش یافت. دوره مورد مطالعه در این پژوهش دهه‌های ۲۰۰۰، ۲۰۲۵، ۲۰۵۰، ۲۰۷۵ و ۲۱۰۰ بود، که تغییرات مقادیر بارش و دمای دوره پیش‌بینی شده به‌وسیله دو مدل یاد شده با دوره پایه (۱۹۶۱-۱۹۹۰) مقایسه شدند. هرچند هر دو مدل در زمینه پیش‌بینی میانگین دمای کشورمان تا حدود زیادی پاسخ یکسانی را به دست داده‌اند، اما در پیش‌بینی بارش اختلاف آنها جدی است، به‌طوری‌که مدل HadCM2 بارش ایران را تا دهه ۲۱۰۰ به میزان ۲/۵ درصد کاهش داده است؛ اما برای دوره مشابه مدل ECHAM4 بارش‌های کشورمان را تا ۱۹/۸ درصد افزایش داده است. به‌رغم اینکه

سناریوهای پیش‌فرض برای اجرای هر دو مدل مذکور کاملاً یکسان بوده‌اند. با توجه به اینکه مراکز و دامنه‌مندان مختلفی در تکوین و توسعه هر کدام از دو مدل مشارکت داشته‌اند، علت اصلی اختلاف دو پاسخ‌ها به ساختار دینامیکی و طرح‌واره‌های فیزیکی و محاسباتی مختلف مورد استفاده در حل معادلات حرکت هوا مرتبط است. به‌طور کلی مدل HadCM2 بارش کشورمان را تا دهه ۲۱۰۰ به میزان ۲/۵ درصد کاهش داده است که در بین ۱۸ سناریوی مورد استفاده، سناریوی IS92D بیشترین کاهش بارش را با ۶ درصد کاهش پیش‌بینی کرده است. در این مدل بیشترین کاهش‌ها در نواحی جنوبی کشور شامل استان‌های هرمزگان، سیستان و بلوچستان، فارس، کرمان و بوشهر رخ می‌دهد. این مدل برای نواحی شمال شرقی کشورمان بیشترین افزایش را پیش‌بینی کرده است. همان‌طور که گفته شد، مدل ECHAM4 افزایش بارش را برای کشور پیش‌بینی کرده است که بیشترین افزایش بارش به‌وسیله سناریوی IS92E با ۲۹/۲ درصد افزایش در دهه ۲۱۰۰ مدل شده است. در بین ۱۸ سناریوی پیش‌فرض این سناریو دارای بیشترین انتشار دی‌اکسید کربن و دی‌اکسید سولفور در دوره ۲۱۰۰ است. برخلاف مدل HadCM2، مدل ECHAM4 عمدتاً برای نواحی جنوبی کشور افزایش و برای نواحی شمالی کشور کاهش بارش را پیش‌بینی کرده است که بیشترین افزایش در سواحل خلیج فارس و دریای عمان خواهد بود.

مدل‌های مذکور برای دهه‌های آتی افزایش دما را پیش‌بینی کرده‌اند. پیش‌بینی مدل HadCM2 برای افزایش دما بین ۰/۴ (دهه ۲۰۰۰) تا ۴/۴ (دهه ۲۱۰۰) درجه سانتی‌گراد و مدل ECHAM4 بین ۰/۴ (دهه ۲۰۰۰) تا ۵/۳ (دهه ۲۱۰۰) درجه سانتی‌گراد است. در هر دو مدل بیشترین افزایش را سناریوی IS92E پیش‌بینی کرده است که دارای بیشترین انتشار دی‌اکسید کربن و دی‌اکسید گوگرد است. سناریوی IS92E افزایش دمای بیشتری را پیش‌بینی کرده است که ناشی از پیش‌بینی انتشار دی‌اکسید کربن و دی‌اکسید گوگرد در قیاس با سایر سناریوهاست. در هر دو مدل توزیع مکانی افزایش دما با هم مطابقت دارند، اما بیشترین پیش‌بینی افزایش دمای دهه ۲۱۰۰ در مدل ECHAM4 حدود یک درجه از مدل HadCM2 بیشتر است. مقایسه نتایج به‌دست آمده از اجرای مدل M-S بر روی ایران، با نتایج حاصل از اجرای مدل LARS-WG نشان‌دهنده وجود تغییرات منطقه‌ای در بارش‌های دو مدل LARS-WG و MAGICC SCENGEN با داده‌های HADCM2 است. اما این تغییرات از نظر آماری با ۹۵ درصد اطمینان پذیرفتنی‌اند و هر دو مدل کاهش بارندگی را در دهه ۲۰۲۵ برای کشور پیش‌بینی می‌کنند. مدل LARS-WG نتایج حاصل از اجرای مدل MAGICC SCENGEN را با مدل گردش عمومی جو HADCM2 تأیید می‌کند. در پیش‌بینی مقادیر میانگین دما، نتایج مدل M-S با مدل LARS-WG مطابقت خوبی دارد.

منابع

- 9-Raper, S.C.B., Wigley, T.M.L. and Warrick, R.A., 1996, **Global Sea Level Rise: Past and Future**, (In) *Sea-Level Rise and Coastal Subsidence: Causes, Consequences and Strategies* (eds. J. Milliman and B.U. Haq), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 11-45.

- Babaeian, I. Najafi Nik, Z., 2006, **Introducing and Evaluation of LARS-WG Model for Modelling Meteorological Parameters of Khorasan Province (1961-2003)**, NIVAR.No. 62, 63-Autumn 2006 & Winter 2007, pp. 50-64.
- Babaeian, I., Kwon, W.T., and Im, E.S., 2004, **Application of Weather Generator Technique for Climate Change Assessment Over Korea**, Korea Meteorological Research Institute, Climate Research lab., pp. 98.
- Covey, C., AchutaRao, K.M., Cubasch, U., Jones, P.D., Lambert, S.J., Mann, M.E., Phillips, T.J. and Taylor, K.E., 2003, **An Overview of Results from the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)**, *Global and Planetary Change* 37, 103–133.
- Habibi, M. et al., 2008, **Climate Modeling and Climate Change of IRAN**, Final Project Climatological Research Institute (CRI).
- Harvey, L.D.D., Gregory, J., Hoffert, M., Jain, A., Lal, M., Leemans, R., Raper, S.B.C., Wigley, T.M.L. and de Wolde, J., 1997, **An introduction to Simple Climate models used in the IPCC Second Assessment Report: IPCC Technical Paper 2** (eds J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, D.J. Griggs and M. Noguer), Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, pp. 50.
- Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg A. and Maskell K., eds, 1996, **Climate Change 1995: The Science of Climate Change**, Cambridge University Press, New York, pp. 572.
- Hulme, M., Wigley, T.M.L., Barrow, E.M., Raper, S.C.B., Centella, A., Smith, S.J. and Chipanshi, A.C., 2000, **Using a Climate Scenario Generator for Vulnerability and Adaptation Assessments**, MAGICC and SCENGEN Version 2.4 Workbook. Climatic Research Unit, Norwich UK, pp. 52.
- Kattenberg, A., Giorgi, F. Grassl H., Meehl, G.A., Mitchell J.F.B., Stouffer, R.J., Tokioka, T., Weaver, A.J. and Wigley, T.M.L., 1996, **Climate Models**, Projections of Future Climate. (In) *Climate Change 1995: The Science of Climate Change* (eds J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell), Cambridge University Press, New York, 285.357.
- Lazar, B. and Williams, M., 2008, **Climate Change in Western Ski Areas: Potential Changes in the Timing of Wet Avalanches and Snow Quality for the Aspen Ski area in the years 2030 and 2100**, *Cold Regions Science and Technology* 51, 219-228.
- Santer, B.D., Wigley, T.M.L., Schlesinger, M.E. and Mitchell, J.F.B., 1990, **Developing Climate Scenarios from Equilibrium GCM Results**, Max-Planck-Institut für Meteorologie Report No. 47, Hamburg, Germany, pp. 29.
- Schimmel, D.S., Grubb, M., Joos, F., Kaufmann, R.K., Moss, R., Ogana, W., Richels, R., and Wigley, T.M.L., 1997, **Stabilization of Atmospheric Greenhouse Gases: Physical, Biological and Socio-economic Implications**, *IPCC Technical Paper 3* (eds. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, D.J. Griggs, M. Noguer), Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, pp. 52.
- Semenov, M.A., and Barrow, E.M, 2002, **LARS-WG a Stochastic Weather Generator for use in Climate Impact Studies**, User's manual, Version3.0.
- Warrick, R.A., Le Provost, C., Meier, M., Oerlemans, J., and Woodworth, P., 1996, **Changes in Sea Level**, (In) *Climate Change 1995: The Science of Climate Change* (eds J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell),

- Cambridge University Press, New York, pp. 358-405.
- Wigley, T.M.L. 2003, **MAGICC/SCENGEN 4.1: Technical Manual, National Center for Atmospheric Research**, Colorado, USA, October 2003,1-24.
- Wigley, T.M.L., 1993, **Balancing the Carbon Budget**, Implications for projections of future carbon dioxide *concentration* changes. *Tellus* 45B, 409-425.
- Wigley, T.M.L., 1994a, **The Contribution from Emissions of Different Gases to the Enhanced Greenhouse Effect**, (In) *Climate Change and the Agenda for Research* (ed. T. Hanisch), Westview Press, Boulder, CO, 193-222.
- Wigley, T.M.L., Jain, A., Joos, F., Shukla, P.R. and Nyenzi, B.S., 1997a, **Implications of Proposed CO₂ Emissions limitations**, IPCC Technical Paper 4 (eds. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, D.J. Griggs and M. Noguer), Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, pp. 41.
- Wigley, T.M.L., Raper, S.C.B., Hulme, M. and Smith, S., 2000, **The MAGICC/SCENGEN Climate Scenario Generator: Version 2.4**, Technical Manual, Climatic Research Unit, UEA, Norwich, UK, pp. 2-48.
- Wigley, T.M.L., Smith, S.J. and Prather, M.J., 2002, **Radiative Forcing Due to Reactive Gas Emissions**, *Journal of Climate* 15, 2690-2696.

