

فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال ۲۷، شماره اول، بهار ۱۳۹۱، شماره پیاپی ۱۰۴

F. Abbasi
I. Babaeian
SH. Malboosi
M. Asmari
L.G.Mokhtari

فاطمه عباسی، کارشناس ارشد هواشناسی، مربی دانشگاه جامع علمی کاربردی،

پژوهشکده اقلیم شناسی

ایمان بابائیان، دانشجوی دکتری اقلیم شناسی، دانشگاه تبریز

شراره ملبوسی، دانشجوی کامپیوتر، پژوهشکده اقلیم شناسی

مرتضی اثمري، کارشناس ارشد هواشناسی، اداره کل هواشناسی خراسان رضوی

لیلی گلی مختاری، دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه اصفهان

E-mail: abbasi9999@yahoo.com

شماره مقاله: ۸۵۲

شماره صفحه پیاپی ۱۸۰۰۵-۱۷۹۷۹

ارزیابی تغییر اقلیم ایران در دهه‌های آینده (۲۰۲۵ تا ۲۱۰۰ میلادی) با استفاده از

ریز مقیاس نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو

چکیده:

علیرغم افزایش قابل ملاحظه دقت مدل‌های عددی گردش عمومی جو و مدل‌های منطقه‌ای، تاکنون هیچ کدام از آنها قادر به پیش بینی در مقیاس کوچک نیستند. به این منظور، مدل‌های مختلف آماری و دینامیکی برای شبیه سازی و ریز مقیاس نمایی خروجی مدل‌های^۱ GCM و^۲ RCM ابداع شده اند. در مطالعه حاضر، با استفاده از مدل MAGICC-SCENGEN خروجی‌های دو مدل گردش عمومی جو HadCM2 و ECHAM4 با لحاظ هجده سناریوی انتشار IPCC، برای دهه‌های آینده ریز مقیاس گردیده، نتایج آن بر روی ایران تجزیه و تحلیل شد. هر دهه شامل یک پرپود ۳۰ ساله است که دهه ۲۰۰۰ نماینده (۲۰۱۵ تا ۱۹۸۶)، ۲۰۲۵ (۲۰۴۰ تا ۲۰۱۱)، ۲۰۵۰ (۲۰۶۵ تا ۲۰۳۶) و ۲۰۷۵ (۲۰۹۰ تا ۲۰۶۱) و دهه ۲۱۰۰ (۲۱۱۵ تا ۲۰۸۶) است. نتایج اجرای مدل با داده‌های HadCM2 بیانگر کاهش ۲/۵ درصدی بارش کشور تا دهه ۲۱۰۰ است. در حالی که برای دوره مشابه در مدل ECHAM4 بارش‌های کشورمان به میزان ۱۹/۸ درصد افزایش می‌یابد. تحلیل مکانی نتایج مدل HadCM2 نشان می‌دهد که در دهه‌های آینده استان‌های مازندران، گلستان،

1-Global Circulation Model

2- Regional Climate Model

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 نموده است، اما در مدل ECHAM4 مناطق مذکور در دوره مشابه افزایش بارش را تجربه خواهند کرد. در هر دو مدل تمامی استان‌های کشور با افزایش دما در آینده مواجهند. این دو مدل، افزایش دمایی بین ۳ تا ۳/۶ را تا دهه ۲۱۰۰ پیش‌بینی می‌کنند که بیشترین افزایش دما به دهه ۲۱۰۰ و مدل ECHAM4 مربوط است که افزایش دمایی حدود ۱ درجه سانتیگراد بیشتر از مدل HadCM2 پیش‌بینی می‌کند. در هر دو مدل توزیع مکانی افزایش دما با هم مطابقت دارند.

واژه‌های کلیدی: مدل گردش عمومی جو، HadCM2، ECHAM4، ریزمقیاس نمایی، ایران، مدل MAGICC-SCENGEN.

مقدمه:

طی چند دهه اخیر، رشد صنایع و کارخانه‌ها از یک طرف و جنگل زدایی و تخریب محیط زیست از طرف دیگر باعث افزایش روز افزون تخریب طبیعت و افزایش گازهای گلخانه‌ای در سطح کره زمین شده است. این پیامد منفی باعث ایجاد تغییرات قابل ملاحظه‌ای در وضعیت آب و هوایی کره زمین شده است؛ به طوری که در سال‌های اخیر شدت خشکسالی‌ها و سیلاب‌ها و پدیده‌های حدی در بخش‌های مختلف کره زمین به نحو چشمگیری افزایش داشته است. به منظور بررسی دقیق‌تر مساله، در سال ۱۹۸۸ موسسه‌ای با نام هیأت بین دول تغییر اقلیم^۳ IPCC به وسیله سازمان هواشناسی جهان WMO و برنامه

ارزیابی تغییر اقلیم ایران در دهه‌های آینده (۲۰۲۵ تا ۲۱۰۰ میلادی) با استفاده از ریز مقیاس نمایی داده‌های مدل ... / ۲۰۷

محیط زیست سازمان ملل UNEP تاسیس یافت. هدف اصلی این مؤسسه، شناختن تمام جنبه‌های تغییر اقلیم و بخصوص چگونگی تاثیر فعالیتهای انسانی بر آن بود. اطلاعات تکمیلی از هر کدام از سناریوهای IPCC و سناریوهای تدوین شده توسط سایر سازمانها در قالب یک بانک اطلاعات مدون در سایت IPCC به آدرس www.IPCC.ch قابل دسترسی است

برای انجام مطالعات تغییر اقلیم بر منابع مختلف در دوره‌های آتی، در ابتدا باید متغیرهای اقلیمی تحت تاثیر تغییرات گازهای گلخانه‌ای شبیه سازی شوند. روش‌های مختلفی برای این کار وجود دارد که معتبرترین آنها استفاده از داده‌های مدل گردش عمومی جو یا GCM است. پیش‌بینی‌های اقلیمی و ارزیابی‌های تغییر اقلیم با مشکلاتی، نظیر بر آورد سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای و سایر آلاینده‌ها در دهه‌های آتی، بزرگ مقیاس بودن تفکیک مکانی و زمانی مدل‌های گردش عمومی جو و نظایر آن مواجه هستند. این فاکتورها با عدم قطعیت‌های زیادی مواجهند. مشکل دیگری که در رابطه با طراحی مدل‌های مناسب اقلیمی وجود دارد، یکپارچه کردن تمام بازخوردهایی^۴ است که در سیستم جفت شده جو- اقیانوس- بیوسفیر- جامعه وجود دارند. برخی از این بازخوردها حتی در پیشرفته ترین مدل‌های گردش عمومی (GCM) به شکلی ابتدایی پارامتر سازی شده‌اند. یکی دیگر از مشکلات، روش مدل سازی سیستم‌های یاد شده است. این کار به شبیه سازی‌های چندگانه به منظور جداسازی تأثیرات انسانی از نوسان‌های طبیعی نیاز دارد. مدل‌های اقلیمی به زمان زیادی برای ارزیابی، آزمایش و اجرا دارند. آنها همچنین به ظرفیت محاسباتی بالایی نیاز دارند. بنا به دلایل یادشده، مدل‌های تولید سناریوهای اقلیمی^۵ (CSGs) گزینه‌های مناسبی برای این منظور هستند؛ به شرط آنکه: الف) بتوانند رفتار مدل‌های پیچیده تر را الگو قرار دهند؛ ب) عدم قطعیت‌های پیش‌بینی‌های اقلیمی را

4- Feedback

5- Climate Scenario Generators

به طور مؤثر و با سرعت کشف کنند و ج) به آسانی در بسیاری از مناطق استفاده شوند (حبیبی، ۱۳۸۷: ۳).

روش‌های مختلفی برای تولید سناریوهای اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای ایجاد شده‌اند که به آنها ریزمقیاس کردن^۶ گفته می‌شود. ترکیب مدل اقلیمی به نام MAGICC و پایگاه داده‌های سناریوهای اقلیمی به نام SCENGEN چنین تولیدکننده سناریویی را تشکیل می‌دهد. مدل MAGICC SCENGEN (به اختصار M-S گفته می‌شود) قبلاً به طور وسیعی در تعداد زیادی از مطالعات مرتبط با ارزیابی و بررسی تأثیرات تغییر اقلیم استفاده شده است. لوکاتلی^۷ (۲۰۰۸) در پژوهشی روش‌ها و ابزارهای مناسب برای ارزیابی آسیب پذیری جنگل‌ها و اکوسیستم‌های جنگلی و بخش‌های مرتبط با آن در اثر تغییر اقلیم را معرفی نمود. این الگوها از مرکز پژوهش‌های بین‌المللی جنگل‌ها^۸ (CIFOR) و پژوهش‌های کشاورزی حاره‌ای و مرکز آموزش عالی جنگل‌های حاره‌ای (CATIE) گرفته شده که در یک برنامه وسیع بین‌المللی تغییر اقلیم در مناطق ایالات متحده آمریکا، آسیای جنوب غربی و آفریقای جنوبی اجرا شدند. مدل MAGICC SCENGEN نیز در این مطالعه ارائه شده است (Locatelli and Herawat, 2008, 3). لازار^۹ و همکاران در مطالعه‌ای تأثیرات تغییر اقلیم ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای بر کمیت و میزان تراکم برف و همچنین، تغییرات زمانی وقوع بهمن در منطقه کوهستانی Aspen را در سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۱۰۰ بررسی کردند. در مطالعه مذکور برای ارزیابی تغییرات اقلیمی دما و بارش از نرم افزار M-S با خروجی پنج مدل گردش عمومی جو با عناوین HadCM3^{۱۰}, HadCM2, ECHAM3^{۱۱}, ECHAM4, CSIRO12 استفاده شد (Lazar

6-Down-Scaling

7- Locatelli

8-Center for International Forst Research

9- Lazar

10- Hadley Center General Circulation Model

ارزیابی تغییر اقلیم ایران در دهه‌های آینده (۲۰۲۵ تا ۲۱۰۰ میلادی) با استفاده از ریز مقیاس نمایی داده‌های مدل ... / ۲۰۹
(and Williams, 2008, 219). نسخه ۲.۴ نرم افزار یاد شده توسط ویگلی^{۱۳} و همکاران
(۲۰۰۰) ارائه شد (Wigley, Raper, 2000, 48).

مواد و روش‌ها:

۱- توصیف مدل MAGICC SCENGEN :

ترکیب یک مدل اقلیمی ساده به نام MAGICC و پایگاه داده سناریوهای اقلیمی SCENGEN تولید کننده سناریوی MAGICC SCENGEN را تشکیل می دهند. مدل M-S از دو بخش اصلی MAGICC و SCENGEN تشکیل شده است که ارزیابی تغییر اقلیم ناشی از انتشار گازهای گلخانه ای به عهده بخش MAGICC است که متشکل از مجموعه ای از مدل های ساده مرتبط با یکدیگر است (Harvey et al, 1997, 50). هرچند MAGICC یک مدل GCM نیست، اما از داده های یک سری مدل های اقلیمی استفاده می کند تا رفتار مدل های GCM را بر روی مناطق مختلف جهان مدل سازی کند (Wigley et al 2002): (2690). MAGICC متوسط سالانه دمای هوای سطح زمین و متوسط سالانه دمای سطح دریا را از سناریوهای انتشار گازهای گلخانه ای و دی اکسید گوگرد محاسبه می کند (Warrick et al, 1996:286) (Kattenberg et al 1996: 20) (Raper et al, 1996: 358). این بخش شامل مجموعه ای از داده های اقلیمی مشاهده ای و خروجی مدل های گردش عمومی جو است که به کاربر امکان بررسی و ارزیابی ابعاد مختلف عدم قطعیت در رابطه با اقلیم آینده را می دهد. در حقیقت، این بخش شامل مجموعه ای از مدل های جفت شده مختلف است که در یک بسته نرم افزاری با یکدیگر تلفیق شده اند. این نرم افزار به کاربر امکان می دهد که تغییرات در غلظت دی

۱۱- نسخه های اقتباس شده است که اکنون ECMWF یک مدل گردش عمومی جو که توسط مرکز ماکس پلانک

آلمان از مدل مرکز پیش بینی ۴.۳ و ۵ آن برای پیش بینی های اقلیمی اروپا استفاده می شود.

12- Australia's Comm on weath scientific and Industrial Research Organization

13- Wigley

اکسید کربن جو (CO_2)، دمای متوسط سطح زمین و دریا بین سال های ۱۹۹۰ تا ۲۱۰۰ را با استفاده از سناریو های انتشار دی اکسید کربن CO_2 ، متان (CH_4)، اکسید نیتروژن (N_2O)، هالوکربن ها (از قبیل HCFC^{14} ، HFC^{15} و PFC^{16}) و دی اکسید سولفور تعیین کنـــد (Wigleyetal2000:8-، (Wigleyetal1993:409)، (Schimeletal,1997:52)، (Wigley et al 11)، (Wigley et al, 1997:41)، (Wigley et al, 1994:194). در بخش MAGICC، هجده سناریوی انتشار پیش فرض وجود دارد. این سناریوها قابل ویرایش و به روز شدن هستند و کاربر می تواند حتی سناریوی تهیه شده توسط خودش را نیز به مدل وارد کند (Wigley et al, 2003:5). در جدول ۱ مشخصات دو مؤلفه اصلی سناریوهای مورد استفاده در این مطالعه دیده می شود (Houghton et al, 1996:572) (Harvey et al., 1997:50).

جدول ۱. میزان انتشار دی اکسید کربن و دی اکسید گوگرد در ۱۸ سناریوی انتشار مورد مطالعه

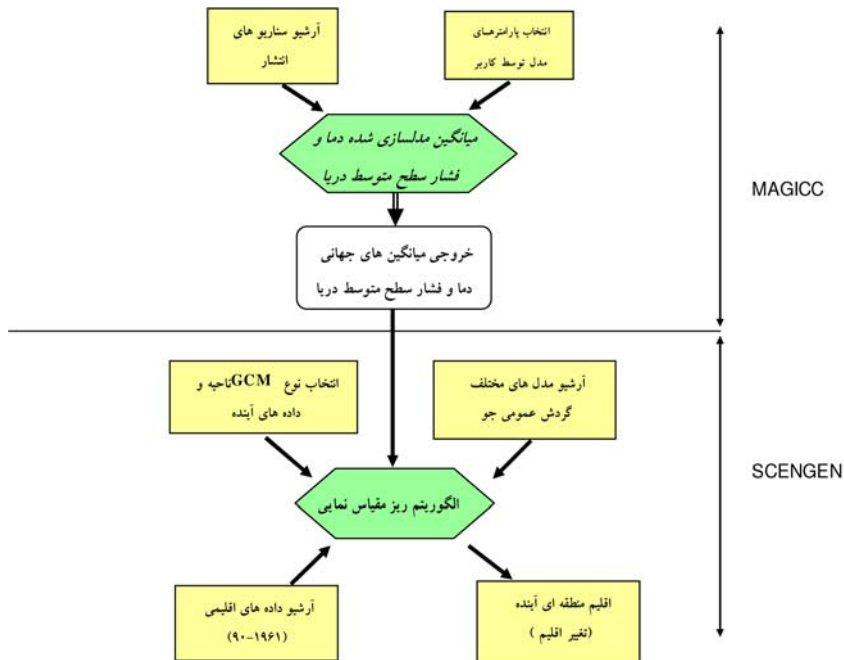
ردیف	سناریو	میزان انتشار CO_2 در ۲۱۰۰ (گیگاتن کربن)	میزان انتشار SO_2 در ۲۱۰۰ برای آسیا (ترا گرم سولفور)
۱	IS92a	۲۰/۴	۲۳/۳
۲	IS92b	۱۹/۲	۲۳/۱
۳	IS92c	۴/۸	-۴/۸
۴	IS92d	۱۰/۴	-۱/۲
۵	IS92e	۳۵/۹	۴۲/۳
۶	IS92f	۲۶/۶	۲۷/۳
۷	EMCONST	۷/۱	۲۳/۳
۸	IS92AEXT	۲۰/۴	۲۳/۳
۹	K-1PC	۱۶/۲	۲۳/۳
۱۰	K-CON1	۱۸/۴	۲۳/۳

-
- 13-Hydrochloro fluoro Carbons
14- Hydrofluoro Carbons
15- Perfluoro Carbons

۲۳/۳	۱۹/۸	K-NOMO	۱۱
۲۳/۳	۳/۷	WRE450	۱۲
۲۳/۳	۶/۸	WRE550	۱۳
۲۳/۳	۱۰	WRE650	۱۴
-۱۵/۸	۱۳/۲	SRESA1	۱۵
-۰/۹۳	۲۸/۸	SRESA2	۱۶
-۱۷/۱	۶/۵	SRESB1	۱۷
-۱/۸	۱۳/۷	SRESB2	۱۸

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، آمریکا و آفریقای جنوبی است. MAGICC و SCENGEN سناریوهای گازهای گلخانه‌ای و دی اکسید گوگرد را به برآوردهایی از تغییر دمای متوسط سطح زمین و سطح دریا تبدیل می‌کنند (Santere et al, 1990:29) و (Hulme et al, 2000:52). در مدل SCENGEN - MAGICC 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 چهار منطقه بزرگ (اروپا، جنوب آسیا، آمریکا و آفریقای جنوبی) در دسترس هستند (Wigley et al, 2003:11). این مدل علاوه بر دمای میانگین، بارش و پوشش ابر می‌تواند دمای حداقل، دمای حداکثر، فشار بخار، سرعت باد و میزان تغییرات شبانه روزی دما را نیز مدل‌سازی نماید (Covey et al, 2003:120) (Wigley, et al, 2000:72). بازه‌های زمانی نمایش سناریوهای تغییر اقلیم می‌تواند به صورت ماهانه، فصلی و یا سالانه باشد. علاوه بر فصول سه ماهه استاندارد یک دوره اضافی شامل ژوئن، جولای، اگوست و سپتامبر نیز به دلیل اهمیت موسمی هندوستان در نظر گرفته شده است. این مدل می‌تواند از شانزده مدل GCM به صورت منفرد یا

چندتایی و یا از همه آنها استفاده کند که در صورت انتخاب چند GCM، میانگین آنها مد نظر خواهد بود (Hulme, Wigley, 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 (Wigley et al, 2003).

داده ها، ناحیه و دوره مورد مطالعه

با توجه به محدودیت های موجود در اجرای مدل های دینامیکی اقلیمی و همچنین، قدرت تفکیک فضا- زمانی کم این مدل ها برای ارزیابی تغییرات اقلیمی دهه های آینده، مدل M-S برای ریز مقیاس نمایی آماری خروجی دو مدل گردش عمومی جو HadCM2 و ECHAM4 و هجده سناریوی انتشار (جدول ۱) انتخاب و با تقسیم ایران به

ارزیابی تغییر اقلیم ایران در دهه‌های آینده (۲۰۲۵ تا ۲۱۰۰ میلادی) با استفاده از ریز مقیاس نمایی داده‌های مدل ... / ۲۱۳

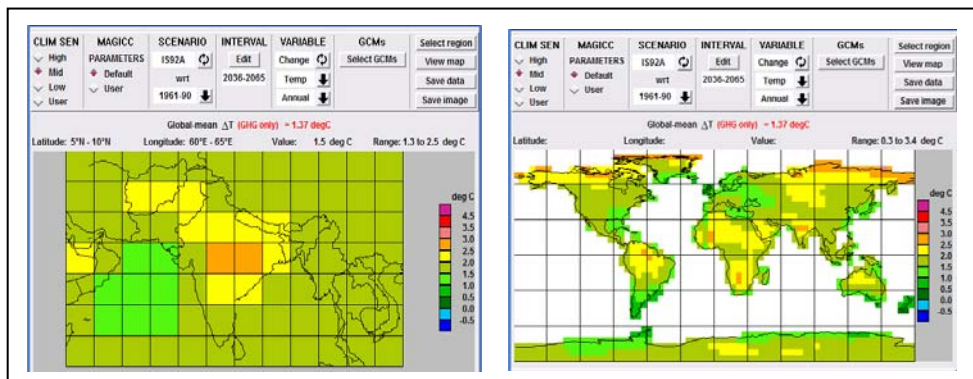
۹ شبکه محاسباتی، برای هر کدام از مناطق مذکور تغییرات بارش و دما برای دهه‌های ۲۰۰۰، ۲۰۲۵، ۲۰۵۰، ۲۰۷۵ و ۲۱۰۰ با استفاده از هجده سناریوی انتشار مدل سازی شد. این محاسبات برای ایران با قدرت تفکیک ۰/۵ درجه جغرافیایی انجام شده است. مدل M-S مطابق جدول ۲ ایران را به ۹ شبکه (منطقه) محاسباتی تقسیم می‌کند. در شکل ۲ محدوده جهانی و منطقه ای برای استفاده از مدل M-S برای ریزمقیاس نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو مشاهده می‌شود که ایران در ناحیه جنوب غرب آسیا قرار دارد.

جدول ۲: موقعیت و ابعاد شبکه محاسباتی در مدل MAGICC-SCENGEN برای ایران

منطقه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	۵۰-۵۵E	۳۵-۴۰N
۲	۵۵-۶۰E	۳۵-۴۰N
۳	۶۰-۶۵E	۳۵-۴۰N
۴	۵۰-۵۵E	۳۰-۳۵N
۵	۵۵-۶۰E	۳۰-۳۵N
۶	۶۰-۶۵E	۳۰-۳۵N
۷	۵۰-۵۵E	۲۵-۳۰N
۸	۵۵-۶۰E	۲۵-۳۰N
۹	۶۰-۶۵E	۲۵-۳۰N

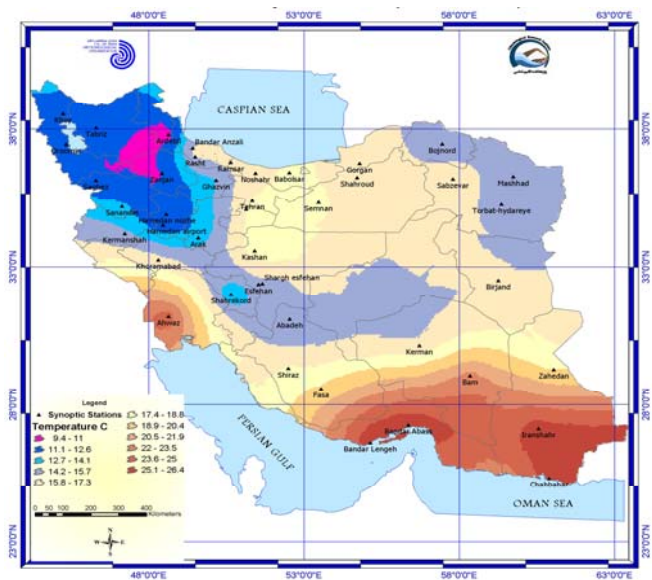
در این مطالعه، دوره آماری ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰ میلادی به عنوان دوره اقلیم پایه لحاظ شد که داده‌های آن مطابق قدرت تفکیک مدل برای ایران موجود می‌باشد. خروجی‌های دما و بارش برای دوره‌های زمانی ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۵ میلادی (نماینده دهه ۲۰۰۰)، ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰ میلادی (دهه ۲۰۲۵)، دوره ۲۰۳۶ تا ۲۰۶۵ میلادی (دهه ۲۰۵۰ میلادی)، دوره ۲۰۶۱ تا ۲۰۹۰ میلادی (دهه ۲۰۷۵) و دوره ۲۰۸۶ تا ۲۱۱۵ میلادی (دهه ۲۱۰۰) تجزیه و

تحلیل شدند که هر دهه شامل یک دوره ۳۰ ساله است. به منظور بررسی توانمندی مدل، مقادیر دما و بارش برای دوره ۱۹۶۱-۱۹۹۰ میلادی توسط مدل تولید شده و با مقادیر واقعی مقایسه گردیدند. برای مقایسه از آزمون آماری دو نمونه ای زوجی T استیودنت استفاده شدند. نتایج آزمون با میزان خطای بحرانی ۰/۰۵ نشان می‌دهد که تفاوت معنا داری بین مقادیر مدل سازی شده و واقعی بارش و دما وجود ندارد و مقادیر همبستگی بین مقادیر شبیه سازی شده و واقعی در سطح معناداری ۰/۰۱ مورد پذیرش قرار می‌گیرد. بنابراین، مدل MAGICC-SCENGEN توانایی خوبی در مدل سازی متغیرهای اقلیمی مذکور دارد. شکل ۳ میانگین سالانه دما و شکل ۴ میانگین سالانه بارش کشور را در دوره آماری ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰ میلادی نشان می‌دهند.

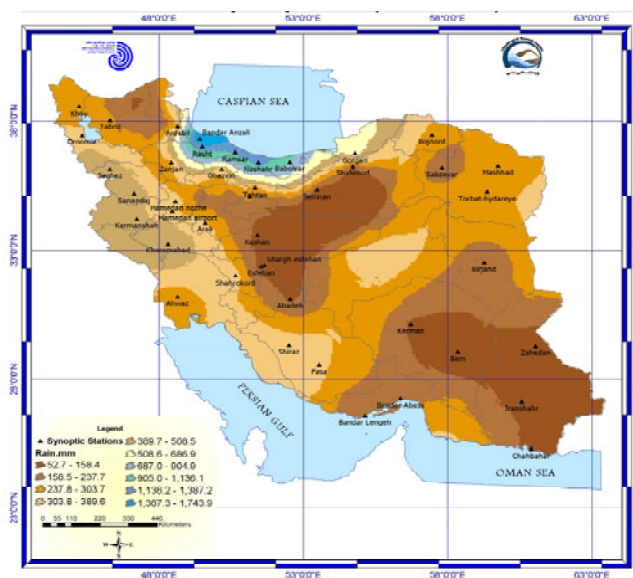


شکل ۲. محدوده منطقه‌ای (شکل چپ) و جهانی (شکل راست) مدل MAGICC-SCENGEN

ارزیابی تغییر اقلیم ایران در دهه‌های آینده (۲۰۲۵ تا ۲۱۰۰ میلادی) با استفاده از ریز مقیاس نمایی داده‌های مدل ... / ۲۱۵



شکل ۳. توزیع مکانی میانگین سالانه بارش در دوره آماری ۱۹۹۰-۱۹۶۱ میلادی

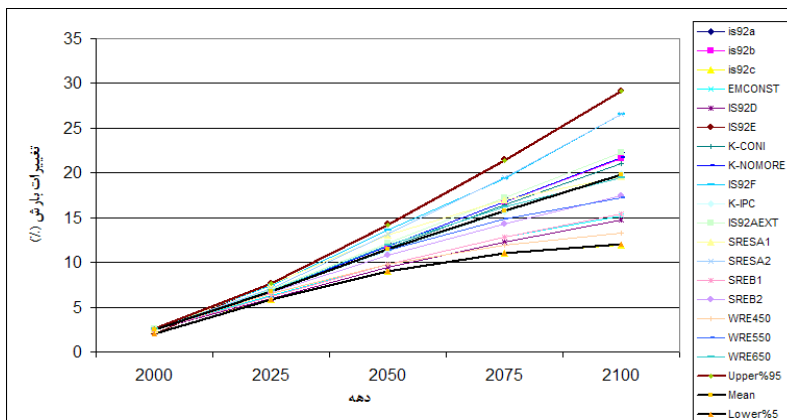


شکل ۴ - توزیع مکانی میانگین بارش در دوره آماری ۱۹۹۰-۱۹۶۱ میلادی

یافته‌های تحقیق:

میانگین بارش:

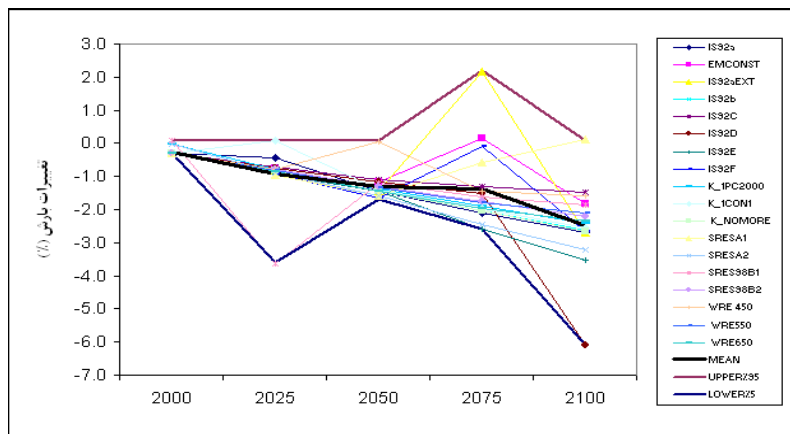
نتایج حاصل از ریز مقیاس نمایی داده‌های مدل HadCM2، نشان دهنده کاهش میانگین بارش در کل منطقه در دهه‌های آینده است. در بین دهه‌های منتخب، دهه ۲۱۰۰ (نماینده دوره ۲۰۸۶ تا ۲۱۱۵ میلادی) بیشترین کاهش بارش را نسبت به دهه‌های دیگر دارد (شکل ۵ و جدول ۳). بیشترین کاهش بارندگی در دهه مذکور مربوط به سناریوی IS92D با حدود ۶ درصد است. مناطق ۲، ۳ و ۴ 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 شامل شمال شرق و شرق استان خراسان رضوی، رخ می‌دهد. افزایش بارش‌ها در سواحل شرقی و جنوبی خزر قابل ملاحظه نیست. 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 ۵ تغییرات بارش دهه‌های آینده کشورمان با لحاظ سناریوهای مختلف دیده می‌شود.



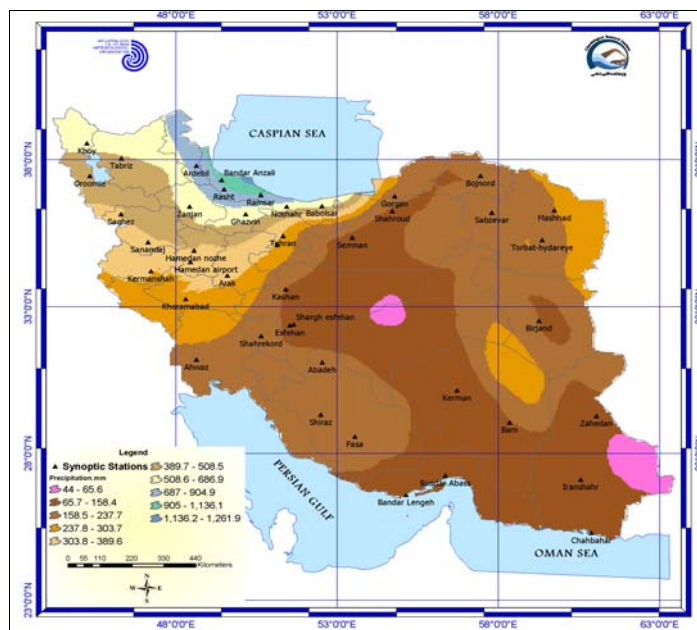
شکل ۵. بر آورد تغییرات دهه ای بارش کشور توسط مدل M-S با استفاده از داده‌های مدل

گردش عمومی جو HadCM2

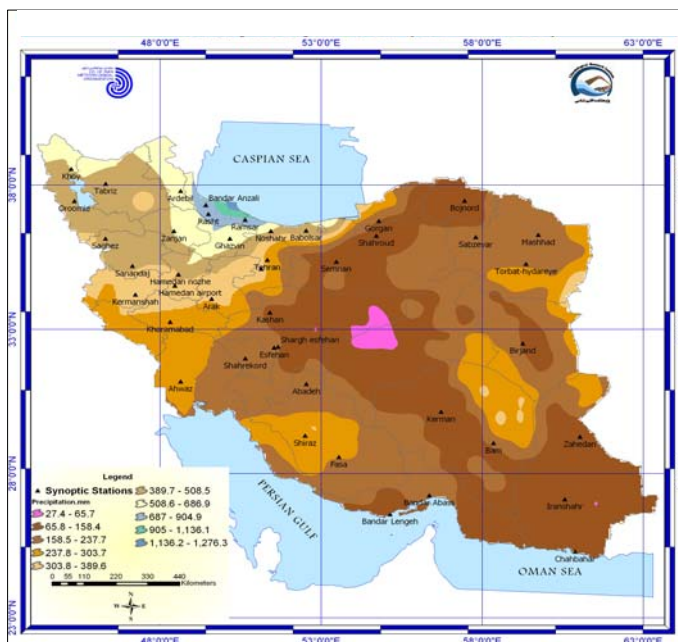
نتایج اجرای مدل M-S با داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHAM4 نشان می‌دهد که بارش‌ها در کل منطقه روند افزایشی دارند، به طوری که بیشترین افزایش بارش در دهه ۲۱۰۰ رخ می‌دهد. در این مدل بیشترین و کمترین افزایش بارش به ترتیب با سناریوهای IS92E و IS92C به میزان ۲۹/۲ و ۱۲ درصد رخ می‌دهد (جدول ۳). بر اساس این نتایج، مناطق ۳ و ۱ 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 ۰/۸ تا حدود ۹ درصد کاهش بارندگی خواهند داشت. به جز مناطق ۲، ۱ 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 مواجه هستند، که بیشترین افزایش بارندگی در سواحل خلیج فارس و دریای عمان خواهد بود. در شکل ۶ تغییرات بارش میانگین دهه‌ای کشور در دهه‌های آینده با سناریوهای مختلف دیده می‌شود. اشکال ۷ و ۸ توزیع مکانی میانگین بارش کشور در دهه ۲۰۲۵ با داده‌های HADCM2 و ECHAM4 با استفاده از سناریوی IS92A را نشان می‌دهند.



شکل ۶. بر آورد تغییرات دهه‌ای بارش در دوره ۲۰۰۰-۲۱۰۰ کشور توسط مدل M-S با استفاده از داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHAM4



ارزیابی تغییر اقلیم ایران در دهه‌های آینده (۲۰۲۵ تا ۲۱۰۰ میلادی) با استفاده از ریز مقیاس نمایی داده‌های مدل ... / ۲۱۹



شکل ۸. توزیع مکانی بارش در مدل MAGICC SCENGEN با داده‌های ECHAM4
استفاده از سناریوی IS92A برای دهه ۲۰۲۵ در کشور

جدول ۳: تغییرات بارش (درصد) کشور در دهه‌های ۲۰۰۰ تا ۲۱۰۰ میلادی با استفاده از ریز مقیاس

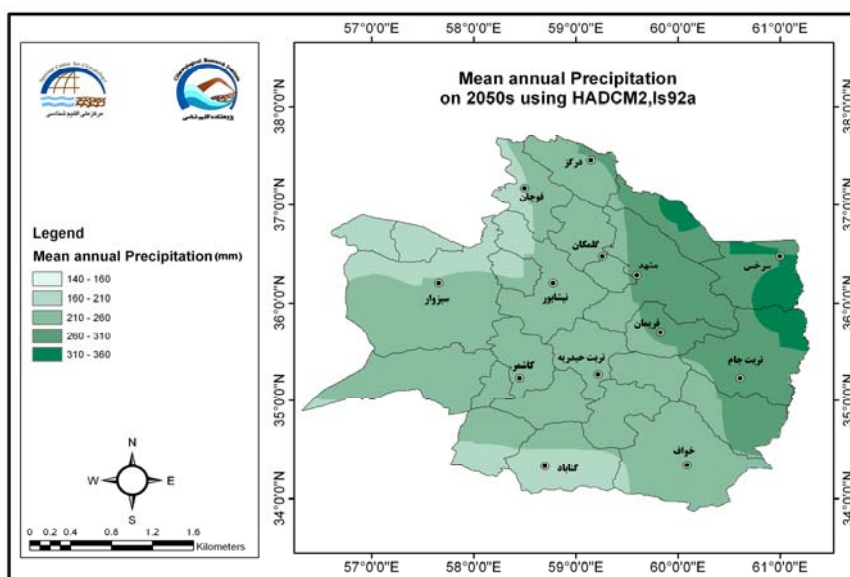
نمایی آماری خروجی مدل‌های ECHAM4 و HadCM2 توسط مدل MAGICC-

SCENGEN با ۱۸ سناریوی انتشار

ردیف	سناریوها (IPCC و سایر مراجع بین‌المللی)	دهه ۲۰۰۰		دهه ۲۰۲۵		دهه ۲۰۵۰		دهه ۲۰۷۵		دهه ۲۱۰۰	
		ECHAM4	HadCM2	ECHAM4	HadCM2	ECHAM4	HadCM2	ECHAM4	HadCM2	ECHAM4	HadCM2
۱	IS92a	۲/۵	-۰/۳	۶/۹	-۰/۴	۱۲/۲	-۱/۵	۱۷/۳	-۲/۱	۲۲/۳	-۲/۷
۲	IS92b	۲/۵	-۰/۳	۶/۸	-۰/۸	۱۱/۸	-۱/۴	۱۶/۸	-۲	۲۱/۶	-۲/۶
۳	IS92c	۲/۶	-۰/۳	۵/۹	-۰/۷	۹	-۱/۱	۱۱	-۱/۳	۱۲	-۱/۵
۴	IS92d	۲/۴	-۰/۳	۵/۹	-۰/۷	۹/۴	-۱/۲	۱۲/۳	-۱/۵	۱۴/۸	-۶/۱
۵	IS92e	۲	-۰/۳	۷/۷	-۰/۹	۱۴/۲	-۱/۵	۲۱/۴	-۲/۶	۲۹/۲	-۳/۵
۶	IS92f	۲/۶	-۰/۳	۷/۵	-۰/۹	۱۳/۶	-۱/۷	۱۹/۴	-۰/۱	۱۶/۶	-۲/۷
۷	IS92aEXT	۲/۵	-۰/۳	۶/۹	-۰/۸	۱۲/۲	-۱/۵	۱۷/۳	۲/۲	۲۲/۳	-۲/۷
۸	K-CONI	۲/۵	-۰/۳	۶/۷	-۰/۱	۱۱/۶	-۱/۴	۱۶/۴	-۲	۲۱/۱	-۲/۶
۹	K-IPC	۲/۵	۰	۶/۷	۰/۸	۱۱/۳	-۱/۴	۱۵/۷	-۱/۹	۱۹/۹	-۲/۴

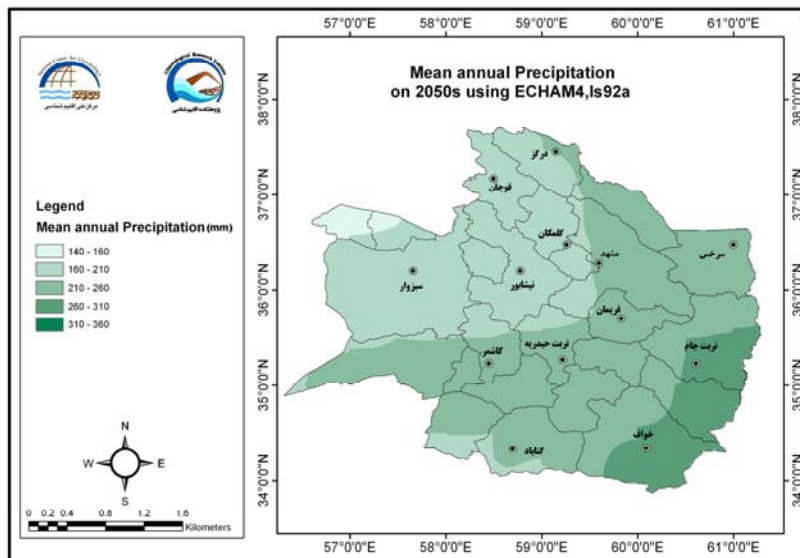
۱۰	K-NOMO	۲/۵	-۰/۳	۶/۸	-۰/۸	۱۱/۸	-۱/۴	۱۶/۸	-۲	۲۱/۸	-۲/۶
۱۱	EMCONST	۲/۵	-۰/۳	۶/۳	-۰/۸	۹/۸	-۱/۲	۱۲/۸	۰/۱	۱۵/۲	-۱/۸
۱۲	WRE450	۲/۵	-۰/۳	۶/۶	-۰/۸	۹/۸	۰/۱	۱۱/۹	-۱/۴	۱۳/۳	-۱/۶
۱۳	WRE550	۲/۵	-۰/۳	۶/۹	-۰/۸	۱۱/۴	-۱/۴	۱۴/۹	-۱/۸	۱۷/۳	-۲/۱
۱۴	WRE650	۲/۵	-۰/۳	۶/۹	-۰/۸	۱۱/۹	-۱/۴	۱۶/۲	-۲	۱۹/۵	-۲/۴
۱۵	SRESA1	۲/۵	-۰/۳	۷/۵	-۱	۱۳	-۱/۶	۱۷	-۰/۶	۱۹/۶	۰/۱
۱۶	SRESA2	۲/۵	۰	۷/۱	-۰/۹	۱۳/۱	-۱/۶	۱۹/۵	-۲/۵	۲۶/۵	-۳/۲
۱۷	SRESB1	۲/۵	-۰/۳	۶/۲	-۳/۶	۹/۸	-۱/۲	۱۲/۸	-۱/۶	۱۵/۴	-۱/۹
۱۸	SRESB2	۲/۵	-۰/۳	۶/۷	-۰/۸	۱۰/۸	-۱/۳	۱۴/۳	-۱/۷	۱۷/۴	-۲/۲
میانگین		۲/۵	-۰/۳	۶/۸	-۰/۹	۱۱/۵	-۱/۳	۱۵/۸	-۱/۴	۱۹/۸	-۲/۵

اشکال ۹ و ۱۰ میانگین بارش محاسبه شده توسط مدل M-S برای خراسان رضوی را در دهه ۲۰۵۰ با سناریوی IS92A به ترتیب با داده‌های HadCM2 و ECHAM4 نشان می‌دهند.



شکل ۹- توزیع مکانی میانگین بارش در مدل MAGICC SCENGEN با داده‌های HadCM2 با استفاده از سناریوی IS92A برای دهه ۲۰۵۰ استان خراسان رضوی

ارزیابی تغییر اقلیم ایران در دهه‌های آینده (۲۰۲۵ تا ۲۱۰۰ میلادی) با استفاده از ریز مقیاس نمایی داده‌های مدل ... / ۲۲۱



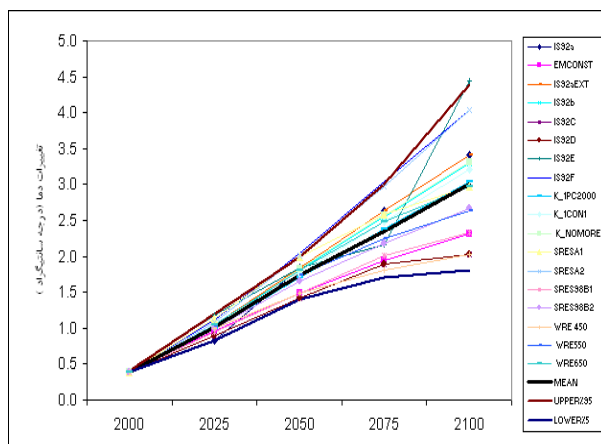
شکل ۱۰ - توزیع مکانی میانگین بارش در مدل MAGICC SCENGEN با داده‌های

ECHAM4 با استفاده از سناریوی IS92A برای دهه ۲۰۵۰ استان خراسان رضوی

میانگین دما:

دمای ریز مقیاس نمایی شده خروجی دو مدل گردش عمومی جو HadCM2 و ECHAM4 توسط مدل آماری M-S با دمای دوره پایه کشورمان (۱۹۹۰-۱۹۶۱) مقایسه گردید و میزان تغییرات دمای دهه‌های ۲۰۲۵، ۲۰۵۰، ۲۰۷۵، و ۲۱۰۰ نسبت به دوره پایه، مطابق جدول ۴، محاسبه گردید. اشکال ۱۱ و ۱۲ تغییرات دمای دهه ای کشور را با سناریوهای مختلف نشان می دهند 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 می دهند که میانگین دمای تمامی استان‌های کشور افزایش یافته، 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

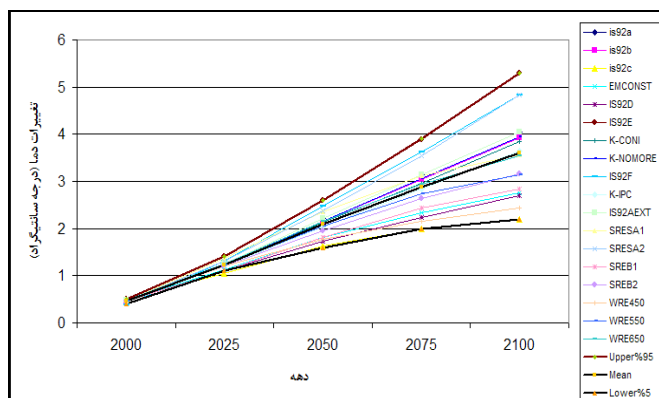
سانتیگراد در دهه ۲۱۰۰ رخ می‌دهد. مقادیر جهانی این مقدار بین ۱/۴ تا ۵/۸ درجه سانتیگراد است. در مدل HadCM2 بیشترین افزایش دما در استان‌های یزد، خراسان جنوبی، چهارمحال و بختیاری، اصفهان، بخش‌هایی از خراسان رضوی، سمنان، تهران، مرکزی، قزوین و گیلان رخ می‌دهد. استان‌های دیگری که با افزایش قابل ملاحظه دما مواجه هستند، عبارتند 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 ۱۲. برآورد تغییرات دمای دهه‌ای دمای کشور توسط مدل M-S با استفاده از داده‌های مدل گردش

عمومی جو ECHAM4

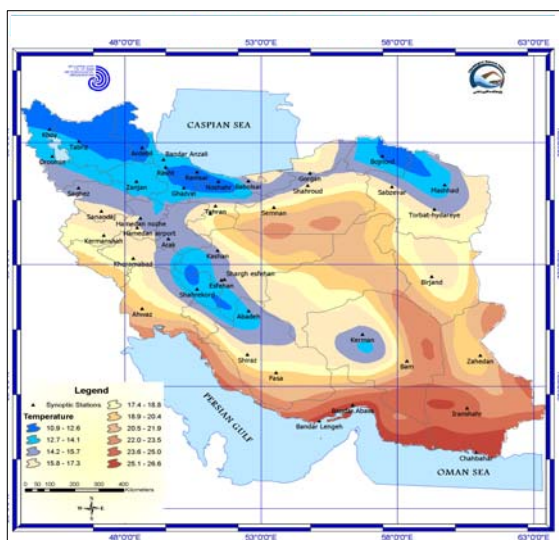
ارزیابی تغییر اقلیم ایران در دهه‌های آینده (۲۰۲۵ تا ۲۱۰۰ میلادی) با استفاده از ریز مقیاس نمایی داده‌های مدل ... / ۲۲۳



شکل ۱۱. برآورد تغییرات دهه‌ای دمای کشور توسط مدل M-S با استفاده از داده‌های مدل

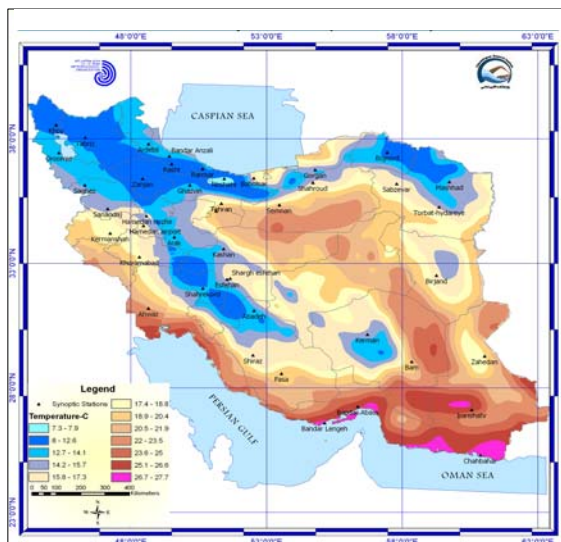
گرش عمومی جو HadCM2

همان طور که در اشکال ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود، تغییرات مقادیر مدل سازی شده دما و بارش در دهه ۲۰۰۰ نسبت به دوره پایه ناچیز بوده که بیانگر توانمندی مدل است. اشکال ۱۳ و ۱۴ توزیع مکانی میانگین دمای کشور را در دهه ۲۰۲۵ با داده‌های HADCM2 و ECHAM4 با استفاده از سناریوی IS92A نشان می‌دهند.



شکل ۱۳. توزیع مکانی میانگین دما در مدل MAGICC SCENGEN با داده‌های HADCM2

استفاده از سناریوی IS92A برای دهه ۲۰۲۵ کشور



شکل ۱۴. توزیع مکانی میانگین دما در مدل MAGICC SCENGEN با داده‌های

ECHAM4 با استفاده از سناریوی IS92A برای دهه ۲۰۲۵ کشور

جدول ۴: تغییرات دمای ($^{\circ}\text{C}$) کشور در دهه‌های ۲۰۰۰ تا ۲۱۰۰ میلادی با استفاده از ریزمقیاس

نمایی آماری خروجی مدل‌های ECHAM4 و HadCM2 توسط مدل MAGICC-

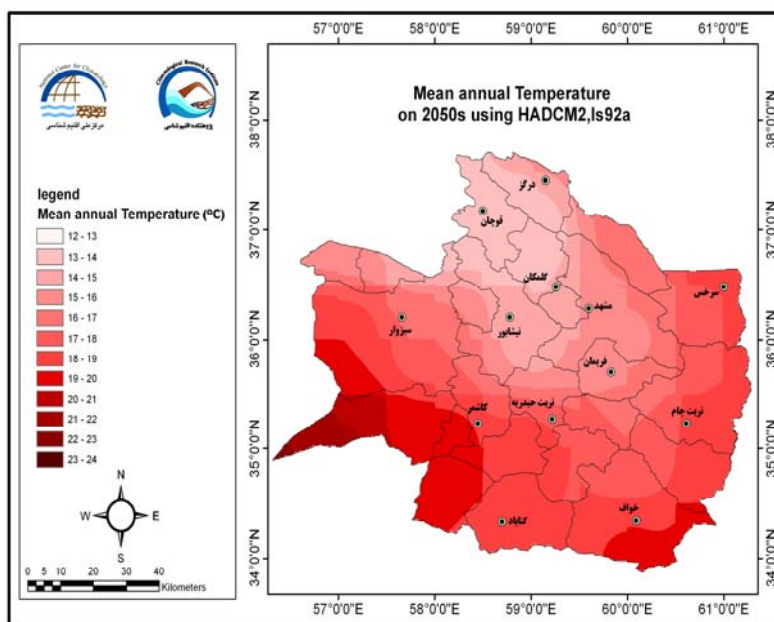
SCENGEN با لحاظ ۱۸ سناریوی انتشار

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

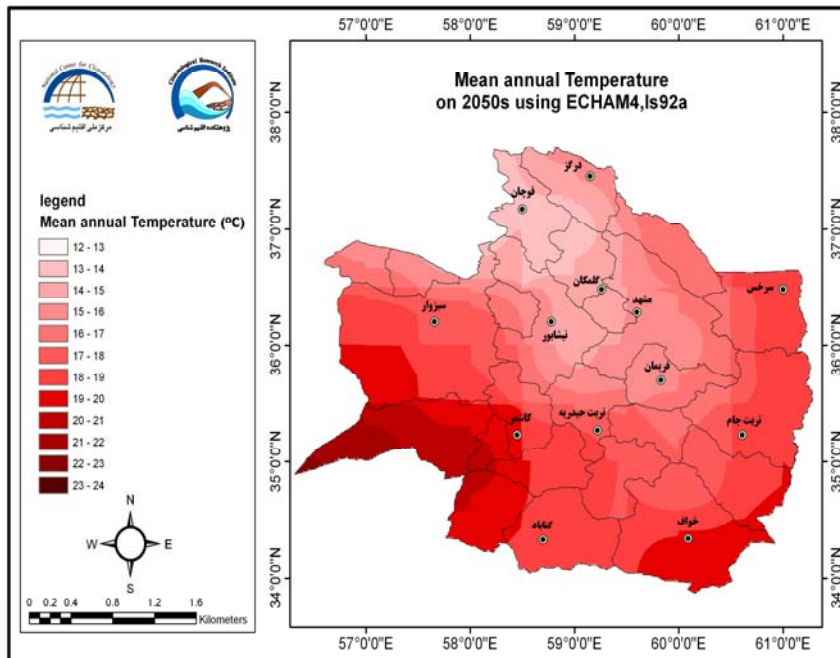
ارزیابی تغییر اقلیم ایران در دهه‌های آینده (۲۰۲۵ تا ۲۱۰۰ میلادی) با استفاده از ریز مقیاس نمایی داده‌های مدل ... / ۲۲۵

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
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	

اشکال ۱۵ و ۱۶ توزیع مکانی میانگین دمای تولید شده توسط مدل M-S را برای خراسان رضوی در دهه ۲۰۵۰ با سناریوی IS92A به ترتیب با داده‌های HadCM2 و ECHAM4 نشان می‌دهند.



شکل ۱۵. توزیع مکانی میانگین سالانه دما در مدل MAGICC SCENGEN با داده‌های HadCM2 با استفاده از سناریوی IS92A برای دهه ۲۰۵۰ استان خراسان رضوی



شکل ۱۶. توزیع مکانی میانگین سالانه دما در مدل MAGICC SCENGEN با داده‌های HadCM2 با استفاده از سناریوی IS92A برای دهه ۲۰۵۰ استان خراسان رضوی

نتیجه گیری:

در این مطالعه از مدل MAGICC-SCENGEN برای ریز مقیاس نمایی خروجی‌های دو مدل گردش عمومی جو HadCM2 و ECHAM4 با هجده سناریوی اقلیمی مورد تایید IPCC بر روی کشورمان استفاده گردید. با به کارگیری 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 پیش بینی شده توسط دو مدل یاد شده با دوره پایه (۱۹۹۰-۱۹۶۱) مقایسه شدند. هر چند هر دو مدل در ارتباط با پیش

ارزیابی تغییر اقلیم ایران در دهه‌های آینده (۲۰۲۵ تا ۲۱۰۰ میلادی) با استفاده از ریز مقیاس نمایی داده‌های مدل ... / ۲۲۷

بینی میانگین دمای کشورمان تا حدود زیادی پاسخ یکسانی را ارائه نموده اند، اما در پیش بینی بارش اختلاف آنها قابل توجه است، به طوری که 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. علی رغم اینکه سناریوهای پیش فرض برای اجرای هر دو مدل مذکور کاملاً یکسان بوده اند، با توجه به اینکه مراکز و دانشمندان مختلفی در توسعه هر کدام از دو مدل مشارکت داشته اند، علت اصلی اختلاف دو پاسخ به ساختار دینامیکی و طرحواره‌های فیزیکی و محاسباتی مختلف مورد استفاده در حل معادلات حرکت هوا مرتبط است. به طور کلی، مدل HadCM2 بارش کشورمان را تا دهه ۲۱۰۰ به میزان ۲/۵ درصد کاهش داده است که در بین هجده سناریوی مورد استفاده سناریو IS92D بیشترین کاهش بارش را با ۶٪ کاهش پیش بینی نموده 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 پیش بینی نموده است. همان طور که گفته شد، مدل ECHAM4 افزایش بارش را برای کشور پیش بینی کرده است که بیشترین افزایش بارش توسط سناریوی IS92E با ۲۹/۲ درصد افزایش در دهه ۲۱۰۰ مدل شده است. در بین هجده سناریوی پیش فرض این سناریو دارای بیشترین انتشار دی اکسید کربن و دی اکسید سولفور در دوره ۲۱۰۰ است. برخلاف مدل HadCM2، مدل ECHAM4 عمدتاً برای نواحی جنوبی کشور افزایش و برای نواحی شمالی کشور کاهش بارش را پیش بینی نموده است که بیشترین افزایش در سواحل خلیج فارس و دریای عمان خواهد بود.

مدل‌های مذکور برای دهه‌های آتی افزایش دما را پیش بینی نموده اند. پیش بینی مدل HadCM2 برای افزایش دما بین ۰/۴+ (دهه ۲۰۰۰) تا ۴/۴+ (دهه ۲۱۰۰) درجه

سانتیگراد و مدل ECHAM4 بین $+0.4$ (دهه ۲۰۰۰) تا $5/3$ (دهه ۲۱۰۰) درجه سانتیگراد است. در هر دو مدل، بیشترین افزایش را سناریوی IS92E پیش بینی نموده است که دارای بیشترین انتشار دی اکسید کربن و دی اکسید گوگرد است. سناریوی IS92E افزایش دمای بیشتری را پیش بینی نموده است که ناشی از پیش بینی انتشار دی اکسید کربن و دی اکسید گوگرد نسبت به سایر سناریوی‌ها است. در هر دو مدل توزیع مکانی افزایش دما با هم مطابقت دارند، اما بیشترین پیش بینی افزایش دمای دهه ۲۱۰۰ در مدل ECHAM4 حدود یک درجه از مدل HadCM2 بیشتر است.

منابع:

- ۱- حبیبی، م و همکاران. (۱۳۸۷). مدل سازی اقلیمی و تغییرات اقلیمی ایران، پروژه خاتمه یافته پژوهشکده اقلیم شناسی.
- 2-Andrew Ross¹ and H Damon Matthews, 2009, Climate engineering and the risk of rapid climate change, Environmental Research Letters, 4 (October-December 2009) 045103.
- 3-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.
- 4-Gusev, E.; Nasonova, O., 2007, Technique for estimating the dynamics of water and carbon budgets of a coniferous forest ecosystem, Atmospheric and Oceanic Physics, Volume 43, Number 1, February 2007, pp. 70-80(11).
- 5-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, 52 pp.
- 6- 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, 50 pp.
- 7- 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, 572 pp.

- 8-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.
- 9-Locatelli,B,Herawat,H,2008,Methods and Tools for Assessing the Vulnerability of Forests and People to Climate Change ,Working Paper, Center for International Forestry Research(CIFOR).2-24.
- 10-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
- 11-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.
- 12-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, 29pp.
- 13-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, 52 pp
- 14-Stehr,A., Debels,P., Luis Arum,J.,2008: Modelling hydrological response to climate change; experiences from two south – central Chilean Watersheds. 21st Century Watershed Technology: Improving Water Quality and Environment Conference Proceedings, 29 March - 3 April 2008, Concepcion, Chile 701P0208cd
- 15-Wigley, T.M.L., 1993: Balancing the carbon budget. Implications for projections of future carbon dioxide concentration changes. Tellus 45B, 409-425.
- 16- 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.
- 17-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.
- 18-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, 2-72 pp.
- 19-Wigley, T.M.L. 2003: MAGICC/SCENGEN 4.1: Technical Manual, National Center for Atmospheric Research, Colorado, USA, October 2003,1-24.

- 20-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, 41 pp.
- 21-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.