

مطالعات سند ملی آمایش سرزمین

تغییرات اقلیمی (جلد دوم - ارزیابی روند پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم در ایران)



مرکز پژوهش‌های توسعه و آینده‌نگری

گروه پژوهشی آمایش سرزمین، توسعه و توازن منطقه‌ای

مجموعه گزارش شماره ۱۳۶

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

شناسه گزارش

مطالعات سند ملی آمایش سرزمین تغییرات اقلیمی (جلد دوم - ارزیابی روند و پیشنگری اثرات تغییر اقلیم در ایران)	عنوان
۹۹-۷-۱۰۱۸۶	کد شناسه
مهرداد کاشف، مصطفی کشتکار همکاران: دکتر فرزام پوراصغر سنگاچین، دکتر محسن ابراهیمی خوسفی	پدیدآورندگان
امور ذی ربط در سازمان برنامه و بودجه کشور: امور برنامه ریزی، نظارت و آمایش سرزمین	ناظر
گروه پژوهشی آمایش سرزمین، توسعه و توازن منطقه‌ای دبیر گروه: دکتر مرتضی مهرعلی تبار فیروزجایی اعضای گروه (به ترتیب الفباء): دکتر محسن ابراهیمی خوسفی، دکتر مینا ابوطالبی، دکتر مهدی رازپور، مهرداد کاشف مبارکه، مصطفی کشتکار و دکتر حمید محمدی مسئول هماهنگی و نظارت: سعید غلامی نتاج، مدیر کل دفتر خدمات پژوهشی و کاربست یافته‌های پژوهشی	واحد ذی ربط در مرکز
مرکز پژوهش‌های توسعه و آینده‌نگری	ناشر
زمستان ۱۳۹۹	تاریخ انتشار
مطالب این گزارش لزوماً بیانگر نظر رسمی سازمان برنامه و بودجه کشور و مرکز پژوهش‌های توسعه و آینده‌نگری نیست.	
حقوق معنوی اثر به پدیدآورندگان و حقوق مادی آن، به مرکز پژوهش‌های توسعه و آینده‌نگری سازمان برنامه و بودجه کشور تعلق دارد و استفاده از آن با ذکر مأخذ بلامانع است.	
آدرس: تهران - خیابان نجات‌اللهی - خیابان سپند - پلاک ۱۶ شماره‌های تماس ۰۲۱-۴۳۳۰۶۰۰۰-۰۲۱ شماره پیام‌رسان ۰۹۹۲۱۵۷۵۸۴۳۱۶	
https://www.dfrc.ir/	

پیشگفتار

تنظیم روابط بین عوامل انسانی، اقتصادی و محیطی با انگیزه بهره‌مندی از سرزمین در جهت استفاده شایسته و پایدار از توان انسانی و طبیعی، مورد توجه آمایش سرزمین است. به بیانی دیگر، آمایش سرزمین به دنبال چیدمان سه مؤلفه مهم جمعیت، سرمایه و منابع طبیعی برای تحقق مطلوب‌ترین، عادلانه‌ترین و پایدارترین سازمان فضایی در سرزمین است. در این راستا، بدیهی است که آمایش سرزمین در چارچوب اصول مصوب، از طریق حفاظت کاربری‌های پایدار اراضی، افزایش بهره‌وری، کارایی و بازده اقتصادی، گسترش عدالت اجتماعی، رفع فقر و محرومیت، برقراری تعادل و توازن در برخورداری از سطح معقول توسعه و رفاه در تمام مناطق جغرافیایی، ایجاد و تحکیم پیوندهای اقتصادی درون و برون منطقه‌ای و هماهنگ‌سازی تأثیرات فضایی- زمانی سیاست‌های بخشی، استانی، منطقه‌ای و ملی به گونه‌ای عمل کرده تا بتواند اهداف چشم‌انداز بلندمدت توسعه کشور و مدیریت یکپارچه سرزمین را به صورت تحقق‌پذیر، متوازن، پایدار و عادلانه عملی سازد. در مجموع می‌توان چنین بیان داشت که آمایش سرزمین نوعی برنامه‌ریزی فضایی راهبردی است که با بهره‌مندی از خرد، دانش و بینش سرزمینی، به دنبال تحقق اهداف زیر است:

- توسعه فضایی متعادل و متوازن سرزمین با رعایت توان اکولوژیک؛
 - حفظ وحدت و یکپارچگی سرزمین؛
 - بهره‌وری بهینه از سرزمین، متناسب با ظرفیت‌های فضایی و موقعیت مکانی همچون هاب ارتباطی و اقتصاد دریای پایه؛
 - توجه ویژه به قلمروهای خاص سرزمینی؛
 - کاهش اختلاف در بهره‌مندی نواحی و اقوام گوناگون کشور از مواهب توسعه؛
 - ارتقاء بهره‌وری و کارایی اقتصادی؛
 - ارتقاء رقابت‌پذیری بین‌المللی، مبتنی بر فعال‌سازی مزیت‌های مغفول مانده و خلق مزیت‌های جدید سرزمینی و
 - ارتقاء کیفیت زندگی ساکنان همه مناطق کشور.
- آمایش سرزمین، با عنایت به اهمیت موضوع و ضرورت و نقش آن در نظام برنامه‌ریزی همواره مورد تأکید سازمان برنامه و بودجه کشور بوده، به نحوی که در پنج دهه گذشته، چهار دوره مطالعات آمایش سرزمین در کشور تجربه شده است. در ادامه تلاش‌های صورت گرفته برای تدوین سند ملی آمایش سرزمین؛ با احیای سازمان برنامه و بودجه کشور و توجه به اهمیت موضوع، با استناد به تکلیف قانونی ماده ۲۶ قانون برنامه ششم توسعه، تدوین سند

ملی آمایش سرزمین مدنظر قرار گرفت و انجام مطالعات پشتیبان تدوین سند ملی آمایش سرزمین به مرکز پژوهش‌های توسعه و آینده‌نگری سپرده شد.

مرکز پژوهش‌های توسعه و آینده‌نگری، به‌منظور بهره‌مندی حداکثری از مجموعه مطالعات و گزارش‌های انجام شده در کشور؛ بهره‌گیری از تمام اندوخته دولت و توان علمی کشور در راستای تدوین سندی جامع، به‌عنوان نقشه راه توسعه بلندمدت کشور، ساختار اجرایی تدوین سند ملی آمایش با هدف عضویت معاونت وزارتخانه‌ها و دستگاه‌های اجرایی ذی‌ربط و همچنین اساتید و صاحب‌نظران برجسته کشور در ترکیب تمامی کارگروه‌ها، شکل داد و بر این اساس مطالعات سند ملی آمایش سرزمین در قالب ۱۹ گروه مطالعاتی با حضور بیش از ۷۰ نفر از صاحب‌نظران برجسته کشور و کارشناسان مجرب در حوزه‌های جمعیتی، محیط‌زیست، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی انجام پذیرفت که ماحصل آن تدوین بیش از ۵۰ جلد گزارش پشتیبان سند ملی آمایش سرزمین بوده که این گزارش بخشی از آن مجموعه است.

این مأموریت تاریخی در پایان سال ۱۳۹۹ با تصویب سند ملی آمایش سرزمین در شورایی عالی آمایش و ابلاغ آن به کلیه دستگاه‌های اجرایی کشور، به ثمر نشست و با آغاز به کار دولت سیزدهم و تأکیدات مقام محترم ریاست جمهوری بر اجرای بندهای این سند تحول‌آفرین، انتشار اسناد پشتیبان این سند ملی به منظور همراه‌سازی افکار خواص و آحاد جامعه در دستور کار مرکز پژوهش‌های توسعه و آینده‌نگری قرار گرفت.

امید است نتایج حاصل از سند ملی آمایش سرزمین، راهنمای مناسبی برای تمامی ذی‌نفعان بوده و نویدبخش تحقق توسعه پایدار در سرزمین ایران باشد. در پایان واجب می‌دانیم مراتب تشکر و قدردانی صمیمانه خود از کلیه کسانی که در راهبری، هدایت و تدوین سند ملی آمایش سرزمین در قالب شورای مشورتی و سیاست‌گذاری، کمیته علمی و کمیته اجرایی سهیم بوده‌اند را ابراز داریم.

مرکز پژوهش‌های توسعه و آینده‌نگری

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
أ	خلاصه مدیریتی
۳	مقدمه
۵	۱- شرایط و مخاطرات اقلیمی در تحقیقات اقلیمی
۹	۲- مرور منابع
۱۱	۳- مواد و روش
۱۱	۳-۱- مقیاس مکانی مورد مطالعه
۱۱	۳-۲- مقیاس زمانی مطالعاتی
۱۲	۳-۳- مدل‌های مورد ارزیابی
۱۳	۳-۳-۱- سناریوهای پیش‌بینی مدل CMIP5
۱۶	۳-۳-۲- اطلاعات آماری و داده‌های مدل‌های CMIP5
۱۸	۳-۳-۳- ریزمقیاس نمایی
۱۹	۳-۳-۴- اعتبارسنجی مدل‌های شبیه‌سازی کننده گردش کلی جو از تغییر اقلیم آینده
۲۱	۴- نتایج
۲۴	۴-۱- ارزیابی و بررسی مدل‌ها
۲۴	۴-۱-۱- ارزیابی و بررسی مدل CSIRO-Mk3-6-0
۲۴	۴-۱-۲- ارزیابی مدل GFDL-ESM2M
۲۵	۴-۱-۳- ارزیابی مدل MRI-CGCM3
۲۵	۴-۲- نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها
۴۳	۵- بحث و نتیجه‌گیری و ارائه راهکارها
۴۷	منابع

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۴۳.....	شکل ۱: تغییرات دمای میانگین کره زمین تا سال ۲۳۰۰ میلادی نسبت به دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۵.....
۴۴.....	شکل ۲: تغییرات دمای میانگین کره زمین در سال‌های آتی (تا سال ۲۳۰۰) نسبت به دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۵.....

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۱۲.....	جدول ۱: لایه‌های اقلیمی بانک داده Bioclimate
۱۷.....	جدول ۲: مشخصات و ویژگی‌های مدل‌های مورد مطالعه از مجموعه مدل‌های CMIP5
۴۵.....	جدول ۳: راهکارهای پیشنهادی جهت به کار بست در اهداف، سیاست‌ها و راهبردهای سند ملی آمایش سرزمین

فهرست نقشه‌ها

صفحه

عنوان

۲۲.....	نقشه ۱: پراکنش فضایی میانگین بارش در کشور از سال ۱۹۷۰ تا سال ۲۰۰۰
۲۳.....	نقشه ۲: پراکنش فضایی میانگین دما در کشور از سال ۱۹۷۰ تا سال ۲۰۰۰
۲۶.....	نقشه ۳: پراکنش فضایی بارش در کشور در سناریو ۲,۶ مدل منتخب
۲۷.....	نقشه ۴: پراکنش فضایی بارش در کشور در سناریو ۴,۵ مدل منتخب
۲۸.....	نقشه ۵: پراکنش فضایی بارش در کشور در سناریو ۶,۰ مدل منتخب
۲۹.....	نقشه ۶: پراکنش فضایی بارش در کشور در سناریو ۸,۵ مدل منتخب
۳۰.....	نقشه ۷: پراکنش فضایی تغییرات بارش در کشور در سناریو ۲,۶ مدل منتخب تا سال ۲۰۳۰
۳۱.....	نقشه ۸: پراکنش فضایی تغییرات بارش در کشور در سناریو ۴,۵ مدل منتخب تا سال ۲۰۳۰
۳۲.....	نقشه ۹: پراکنش فضایی تغییرات بارش در کشور در سناریو ۶,۰ مدل منتخب تا سال ۲۰۳۰
۳۳.....	نقشه ۱۰: پراکنش فضایی تغییرات بارش در کشور در سناریو ۸,۵ مدل منتخب تا سال ۲۰۳۰
۳۴.....	نقشه ۱۱: پراکنش فضایی دما در کشور در سناریو ۲,۶ مدل منتخب
۳۵.....	نقشه ۱۲: پراکنش فضایی دما در کشور در سناریو ۴,۵ مدل منتخب
۳۶.....	نقشه ۱۳: پراکنش فضایی دما در کشور در سناریو ۶,۰ مدل منتخب
۳۷.....	نقشه ۱۴: پراکنش فضایی دما در کشور در سناریو ۸,۵ مدل منتخب
۳۹.....	نقشه ۱۵: پراکنش فضایی تغییرات دما در کشور در سناریو ۲,۶ مدل منتخب تا سال ۲۰۳۰
۴۰.....	نقشه ۱۶: پراکنش فضایی تغییرات دما در کشور در سناریو ۴,۵ مدل منتخب تا سال ۲۰۳۰
۴۱.....	نقشه ۱۷: پراکنش فضایی تغییرات دما در کشور در سناریو ۶,۰ مدل منتخب تا سال ۲۰۳۰
۴۲.....	نقشه ۱۸: پراکنش فضایی تغییرات دما در کشور در سناریو ۸,۵ مدل منتخب تا سال ۲۰۳۰

خلاصه مدیریتی

تغییر اقلیم و گرمایش جهانی از اواخر قرن بیستم تاکنون یکی از مسائلی بوده است که ذهن بسیاری از محققان را به خود معطوف داشته و به مهم‌ترین چالش قرن حاضر تبدیل شده است. آب و هوای کره زمین در طی این سال‌ها از تعادل خارج شده و دمای آن روزبه‌روز در حال افزایش بوده است. اقلیم یا آب‌وهوا به میانگین شرایط جوی زمینی یا آبی با توجه به شرایط فصلی و زمانی گفته می‌شود. معمولاً آب‌وهوا به وسیله مجموعه تغییرات پارامترهای سطحی و جوی مانند دما، میزان بارش، میزان وزش باد، رطوبت، ابری بودن، رطوبت خاک، دمای سطح آب دریا و غیره تعیین می‌شود. مجموعه این شرایط در طولانی‌مدت به همراه اندازه‌گیری سایر پارامترها مانند حداقل دمای روزانه، طول مدت فصل کشت یا شدت سیلاب‌ها، اقلیم منطقه را مشخص می‌کند.

این پژوهش با هدف بررسی اقلیمی ایران طی بازه زمانی بلندمدت و سپس پیش‌بینی برای سال ۲۰۳۰ که به افق زمانی سند ملی آمایش سرزمین نزدیک می‌باشد، انجام پذیرفته است. این مدل‌سازی مبتنی بر مدل‌های گزارش پنجم IPCC موسوم به CMIP5 انجام شده است. روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی و ارزیابی تغییرات اقلیمی وجود دارد، اما روش به کار گرفته شده در این پژوهش بر اساس داده‌های جهانی و نیز مقایسه مدل‌هاست نه صرفاً میانگین‌گیری از مدل‌های مختلف. بر این مبنا ابتدا با مرور منابع بهترین مدل‌های توصیه شده پژوهش‌های مختلف برای ایران از بین چندین مدل پیشنهادی انتخاب شدند. سپس بر اساس شاخص‌های آماری مدل‌های CSIRO-Mk3-6-0، GFDL-ESM2M و MRI-CGCM3 جهت انتخاب به کاربست در سند ملی آمایش صحت‌سنجی شدند. مدل MRI-CGCM3 در مقایسه با سایر مدل‌ها، کارایی مناسب و قابل قبولی در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی دارد و در پیش‌نگری پارامترهای دمایی از عملکرد خوبی برخوردار است. داده‌های مورد استفاده از مدل MRI-CGCM3 که ساخت و طراحی ژاپن بود با ریزمقیاس نمایی به روش MarkSimGCM با سه سناریوی واداشت تابشی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 تولید شدند. نتایج این پژوهش بیان‌کننده تغییرات کلان در میزان بارش و دما در پهنه جغرافیایی کشور است. نتایج حاصل از پیش‌نگری مدل نشان می‌دهد که مقادیر دما در سناریوهای مختلف طی دوره آینده نسبت به دوره مشاهداتی (روند زمانی گذشته تا زمان حال)، افزایش خواهد یافت. بیشترین میزان بارش در نواحی شمال و جنوب غرب است که در وهله اول مربوط به عرض جغرافیایی و تغییرات اقلیم در سطح جهانی است و در کنار آن عواملی همچون ارتفاعات، ناهمواری‌ها و تنوع توپوگرافی مزید علت می‌باشد که تغییرات و نوسانات را ایجاد می‌کند. بر پایه نتایج حاصل از داده‌های مدل، بارش در هر سه سناریوی مورد بررسی در مقایسه با دوره مشاهداتی در مناطق جنوب و مرکز کشور کاهش محسوسی را نشان

می‌دهند. لذا منطبق با شرایط اقلیمی آینده نیاز به اجرای برنامه‌های خاص یا تدوین راهبردها و سیاست‌های مختلف می‌باشد که در این خصوص راهکارهای پیشنهادی برای هر بخش اعلام شده است.

مقدمه

اقلیم به شرایط آب‌وهوایی یک منطقه جغرافیایی مانند دما، رطوبت، فشار جو، باد، بارش و سایر مشخصه‌های هواشناسی در مدت زمانی نسبتاً طولانی گفته می‌شود (دولابیان، ۱۳۹۶). تغییرات آب‌وهوایی یا تغییر اقلیم، یعنی هر تغییر مشخص در الگوهای مورد انتظار برای وضعیت میانگین آب‌وهوایی که در طولانی‌مدت در یک منطقه خاص یا برای کل اقلیم جهانی رخ بدهد. تغییر اقلیم نشان‌دهنده تغییرات غیرعادی در اقلیم درون جو زمین و پیامدهای ناشی از آن در قسمت‌های مختلف کره زمین است. هرچند که اقلیم و تغییر اقلیم معمولاً در سطح جهانی مطرح می‌شود، اما ممکن است متوسط دمای منطقه‌ای یا محلی از این متوسط جهانی فاصله بسیار داشته باشد که این امر منجر به کاهش یا تشدید عواقب تغییر اقلیم در نقاط مختلف جهان می‌شود (Council, 2001). اقلیم یک سامانه دینامیکی است و نتیجه برهمکنش مؤلفه‌های مختلف زمین با یکدیگر و با خورشید است. هواکره (Atmosphere)، یخ‌کره (Cryosphere)، زیست‌کره (Biosphere)، آب‌کره (Hydrosphere) و سنگ‌کره (Lithosphere) اجزاء سامانه اقلیم کره زمین را تشکیل می‌دهند. سامانه اقلیمی کره زمین، حاصل یک پیوند و ارتباط پیچیده بین پنج مؤلفه اصلی فوق است. سامانه اقلیمی، درگیر تبادل انرژی و رطوبتی است که بین مؤلفه‌های پنج‌گانه رخ می‌دهد. این تبادلات مهم‌ترین مؤلفه سامانه اقلیمی، یعنی هواکره را با دیگر مؤلفه‌ها پیوند می‌دهد. تغییرات در سامانه اقلیمی به‌طور مجزا رخ نمی‌دهند، بلکه وقتی یک قسمت از آن تغییر می‌کند، مؤلفه‌های دیگر نیز واکنش نشان می‌دهند (عزیزی، ۱۳۸۳).

تنها عاملی که به‌صورت غیرطبیعی بر سامانه اقلیم کره زمین تأثیر می‌گذارد، افزایش گازهای گلخانه‌ای است. بررسی وضعیت انتشار این گازها نشان می‌دهد که پس از انقلاب صنعتی در نیمه قرن هجدهم، به دلیل افزایش روزافزون صنایع و به‌واسطه آن افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی، تعادل مقادیر گازهای گلخانه‌ای در جو زمین از بین رفته و مقادیر آن به‌خصوص میزان گاز دی‌اکسید کربن افزایش یافته است. این افزایش سبب می‌شود تا امواج مادون قرمز ساطع شده از زمین بیش از پیش توسط گازهای گلخانه‌ای جذب شده و باعث گرم‌تر شدن جو کره زمین گردد. گرم‌تر شدن کره زمین نیز به نوبه خود بر وضعیت اجزاء دیگر سامانه اقلیم تأثیر گذاشته و پدیده تغییر اقلیم (Climate Change) را موجب می‌شود (Houghton et al., 2001). هواکره زمین با دارا بودن گازهای مختلف باعث جذب، پخش و انعکاس طول‌موج‌های مختلف نور خورشید شده و پدیده‌های مختلف از جمله میزان دمای اتمسفر را کنترل می‌کند. در بین این گازها، گازهای گلخانه‌ای که شامل

بخار آب (H₂O)، دی‌اکسید کربن (CO₂)، متان (CH₄)، نیتروژن اکسید (N₂O) و هالوکربن‌ها (CFC) هستند، از اهمیت ویژه‌ای در کنترل دمای سطحی هواکره برخوردارند، زیرا نور خورشید که عمدتاً با طول موج کوتاه بوده، از این گازها عبور کرده و به زمین می‌رسد و پس از گرم شدن زمین امواج مادون قرمز که دارای طول موج بلندی هستند از سطح زمین ساطع شده و با این گازها برخورد می‌کنند. این گازها امواج با طول موج بلند (مادون قرمز) را جذب کرده و گرم می‌شوند. این پدیده باعث افزایش دمای اتمسفر سطحی کره زمین می‌شود. یخ‌کره که دربرگیرنده یخ‌های موجود در سطح کره زمین است، بیشترین نقش را در انعکاس امواج رسیده به سطح زمین (Albedo) ایفا می‌کند؛ همچنین زیست‌کره نیز با انعکاس نور خورشید، تبخیر و تعرق از سطح گیاهان، به‌عنوان یکی از منابع اصلی تولید و مصرف دی‌اکسید کربن، نقش مهمی را در میزان انرژی سامانه اقلیم دارا است. درنهایت آب‌کره که شامل اقیانوس‌ها، دریاها، دریاچه‌ها و رودهای کره زمین است نقش به‌سزایی را در جذب دی‌اکسید کربن موجود در اتمسفر داشته و به لحاظ گرمایشی دارای اینرسی (تمایل ماده به حفظ وضع حرکتی خود) گرمایی بالایی هستند (Griggs & Noguera, 2002).

با توجه به آنچه گفته شد، اطمینان زیادی بر افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای و به‌تبع آن افزایش میانگین دمای سطحی جو کره زمین در دوره‌های آینده در بین دانشمندان وجود دارد؛ اما چگونگی تغییرات متغیرهای اقلیمی در مقیاس‌های منطقه‌ای به‌طور صریح مشخص نیست. بنابراین چون پیش‌بینی وضعیت اقلیم منطقه‌ای تحت پدیده تغییر اقلیم مشکل است؛ راه جایگزین، مشخص کردن وضعیت‌های ممکن آینده بوده که «سناریوی اقلیمی» نامیده می‌شود. سناریوها ابزارهایی هستند، برای تحلیل موقعیت‌هایی که نتیجه آنها نامطمئن است. هدف از کار با سناریوها پیش‌بینی آینده نیست، بلکه درک عدم اطمینان و جایگزینی آینده بهتر است. در مطالعات تغییرات اقلیمی، سناریوها مسیرهای قابل قبولی از جنبه‌های مختلف آینده را که برای بررسی پیامدهای بالقوه تغییرات اقلیمی توسط انسان شناخته شده است، توصیف می‌کنند (IPCC-TGCI, 1999).

۱- شرایط و مخاطرات اقلیمی در تحقیقات اقلیمی

همان‌گونه که بیان شد عوامل مختلفی باعث بر هم خوردن شرایط حاکم بر اجزاء مختلف سامانه اقلیم کره زمین می‌شود که می‌تواند تأثیراتی را بر اجزاء دیگر بگذارد. این عوامل به دو بخش شامل عوامل داخلی ناشی از کنش‌های متقابل بین اجزاء سامانه اقلیم و همچنین عوامل خارجی طبیعی ناشی از تابش خورشیدی، فعالیت‌های آتشفشانی و افزایش غیرطبیعی گازهای گلخانه‌ای قابل تقسیم می‌باشند. به تغییرات به وجود آمده در سامانه اقلیم کره زمین که نتیجه واکنش‌های درونی بین اجزاء سامانه اقلیم است، نوسانات درونی سیستم اقلیم (Internal climate variability) گفته می‌شود که از آن جمله می‌توان به پدیده El-Nino اشاره کرد. از طرف دیگر تابش‌های خورشیدی و بعضاً فعالیت‌های آتشفشانی به عنوان دو عامل طبیعی خارجی بر سامانه اقلیم کره زمین تأثیر می‌گذارند.

خورشید مهم‌ترین منبع تأمین گرمایش زمین می‌باشد. این در حالی است که پس از فعالیت‌های آتشفشانی، ذرات معلق بسیاری وارد اتمسفر منطقه شده و با انعکاس نور خورشید مانع از رسیدن نور خورشید به سطوح پایینی اتمسفر شده و سبب می‌گردد تا دمای منطقه سرد شود. به مجموع تغییرات ناشی از عوامل طبیعی خارجی و همچنین تغییرات ناشی از نوسانات درونی سامانه، نوسانات طبیعی اقلیم (Natural Climate Variability) اطلاق می‌شود. مهم‌ترین اثر تغییر اقلیم، تأثیرگذاری آن بر پدیده‌های حدی جوی و اقلیمی مانند طوفان، سیل، تگرگ، خشکسالی، امواج گرمایی و سرماهای نابهنگام خواهد بود (IPCC, 2007).

هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) طی چهارمین گزارش خود در سال ۲۰۰۷، اظهار داشت که تراکم فزاینده گازهای گلخانه‌ای به دلیل این رخدادهاست. در طی چند دهه گذشته فعالیت‌های انسانی به‌طور مستقیم و غیرمستقیم موجب افزایش غلظت اکثر گازهای گلخانه‌ای شده است. دانشمندان پیش‌بینی می‌کنند که این افزایش ممکن است اثر گلخانه‌ای را تشدید کرده و سیاره زمین گرم‌تر شود. روند کنونی افزایش متوسط دمای جو و سطح زمین در اثر تولید و انتشار بی‌رویه گازهای گلخانه‌ای را گرمایش جهانی می‌نامند (فراهانی، ۱۳۸۳). اثرات منفی پدیده گرم شدن زمین بر بخش‌های مختلف همچون منابع آب، کشاورزی، محیط‌زیست و مانند آن موجب شد که طی سال‌های اخیر، چندین نشست در سطح کشورها در ارتباط با موضوع تغییر اقلیم برگزار شود. این گزارش‌ها همچنین شرایط اقلیم جهانی را برای قرن ۲۱ با استفاده از نتایج شبیه‌سازی‌های مدل‌های جفتی جهانی پیش‌بینی کرده است. هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) گزارش داد که متوسط دمای کره زمین در قرن ۲۰ به میزان ۰/۲-۰/۶ درجه سلسیوس افزایش یافته است. این در حالی است که غلظت دی‌اکسید کربن از ۲۸۰ ppm به ۳۷۰ ppm افزایش یافته است (IPCC, 2007).

از اواخر قرن نوزدهم میلادی متوسط دمای کره زمین حدود ۰/۵ درجه سلسیوس افزایش یافته است. برخی از دانشمندان معتقدند متوسط دمای کره زمین تا سال ۲۱۰۰ بین ۱ تا ۶ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. این افزایش دما باعث تغییرات ناگهانی اقلیم جهان می‌شود. گرم شدن زمین به زندگی انسان‌ها آسیب‌های فراوانی می‌زند. شیوع بیماری‌های ناشناخته از جمله این آسیب‌ها است. گرمایش جهانی بر نابودی گسترده محصولات کشاورزی هم تأثیرگذار است. دما مهم‌ترین پارامتر هواشناسی است که هم در تغییر اقلیم و هم در نیاز انسان به آسایش حرارتی مطرح است. پس گرم شدن کره زمین و تغییرات آینده زمین و نیاز به مصرف انرژی اکثراً با پارامتر دما مشخص می‌شود.

بررسی روند عناصر اقلیمی، به‌ویژه دما و بارش، موضوع پژوهش‌های بسیاری بوده است؛ زیرا این دو عنصر نشانه تغییر کلی شرایط اقلیمی به شمار می‌روند. تغییر اقلیم یکی از بزرگ‌ترین چالش‌هایی است که انسان در قرن بیست و یک با آن مواجه است و به‌عنوان یک تهدید بالقوه، محیط‌های طبیعی و انسان‌ساخت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش ۰/۵ درجه سلسیوس دما در اروپای غربی، ۰/۴۱ درجه سلسیوس در آمریکا، ۱/۲۳ درجه سلسیوس در روسیه و ۱/۳ درجه سلسیوس در شرق سیبری، افزایش ۲ درجه سلسیوس دمای شبانه‌روزی ایران در ۱۰۰ سال و افزایش میانگین دمای کمینه در یک دهه برای تهران تا حد ۰/۶۸ درجه سلسیوس نشان‌دهنده این است که عوامل (انسانی و طبیعی) اقلیم کره زمین را دچار تغییر می‌کنند. به‌طور کلی میانگین دمای جهانی طی ۱۰۰ سال گذشته ۰/۷۴ درجه سلسیوس افزایش یافته است و افزایش دماهای کمینه و دماهای زمستانی سریع‌تر از دماهای بیشینه و دماهای تابستانی بوده است.

انتظار می‌رود که تغییرات آب و هوایی در مناطق مختلف جهان به شدت متفاوت باشد. اثرات حاصل از آن بستگی به شرایط آب و هوا، خاک، دسترسی به منابع و زیرساخت‌ها برای مقابله با تغییرات دارد (Parry, Rosenzweig, Iglesias, Fischer, and Livermore, 1999). با این حال پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی تغییر اقلیم فراوان‌اند. عمده‌ترین آنها این است که با افزایش دما، سطح متوسط آب‌ها در اقیانوس‌ها بالاتر می‌رود. گرمایش جهانی منجر به افزایش فراوانی پدیده دماهای آستانه‌ای می‌شود، در حال حاضر تعداد روزها و شب‌های داغ و امواج گرم نسبت به پدیده‌های سرد روندی افزایشی داشته است. اثر دماهای زیاد هم‌اکنون در جابجایی گونه‌های گیاهی و جانوری منعکس شده است، همچنین دماهای بالاتر موجب افزایش بازدهی محصولات کشاورزی در عرض‌های بالاتر و کاهش آن در عرض‌های پایین‌تر خواهد شد (بریو مک‌کیم، ۱۳۹۴). وقوع سیل‌های بسیار مخرب، بروز موج‌های غیرطبیعی و بی‌موقع گرمایی و سرمای، افزایش فراوانی خشکسالی‌ها، شیوع آفات و بیماری‌های گیاهی، کاهش ضخامت لایه ازن، بیابان‌زایی، کاهش رشد و عملکرد محصولات کشاورزی از جمله پیامدهای تغییر اقلیم می‌باشند (Antle, 2010).

به طور کلی می‌توان بیان کرد که سیستم آب و هوای کره زمین، در ابعاد جهانی و منطقه‌ای تغییر کرده است که بخشی از این تغییرات به فعالیت‌های انسانی نسبت داده می‌شود که از مهم‌ترین این تغییرات می‌توان موارد زیر را برشمرد:

- هوای کره زمین از سال ۱۸۶۰ تاکنون 0.6 ± 0.2 درجه سانتی‌گراد گرم‌تر شده است که دو دهه آخر قرن بیستم و همچنین سال ۲۰۱۸ در زمره گرم‌ترین سال‌های زمین بوده است؛
- افزایش دمای کره زمین در قرن بیستم در نیمکره شمالی احتمالاً بیش از تمامی قرون در هزار سال گذشته بوده است؛
- الگوهای بارش با افزایش تعداد بارندگی‌های شدید در بعضی از مناطق تغییر یافته و باعث افزایش تعداد بروز رخداد‌های حدی مانند سیل‌ها و خشکسالی‌ها شده است.
- از سال ۱۹۰۰ تاکنون سطح دریاها ده تا بیست سانتیمتر افزایش یافته؛ بیشتر یخچال‌های واقع در مناطق غیرقطبی در حال آب شدن است و گستره و ضخامت یخ اقیانوس منجمد شمالی در تابستان‌ها کاهش می‌یابد.
- فعالیت‌های انسانی موجب افزایش گازهای گلخانه‌ای شده است که این پدیده نیز افزایش دمای جو زمین را به دنبال داشته و در بعضی مناطق، افزایش غلظت آئروسول‌های حاوی سولفات باعث سرد شدن جو زمین شده است.
- در این میان مهم‌ترین پیامدهای منفی ناشی از تغییرات آب و هوا برای نظام‌های انسانی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- کاهش بازده محصولات کشاورزی در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری
- کاهش بازده محصولات کشاورزی در عرض‌های میانی به ازای چند درجه سانتی‌گراد تغییر در درجه حرارت
- کاهش دسترسی به آب در مناطق کم‌آب
- افزایش ابتلا به بیماری‌های واگیر (مانند مالاریا) و امراض ناشی از مصرف آب آلوده (مانند وبا)
- افزایش مرگ و میر ناشی از گرمادگی
- افزایش خطر وقوع سیل در اثر بارندگی‌های شدید و افزایش سطح آب دریاها
- افزایش تقاضای انرژی برای سرمایش در تابستان
- افزایش وقوع سیل، لغزش زمین، بهمن و رانش زمین
- افزایش فرسایش خاک

-
- افزایش رواناب‌های حاصل از سیل که می‌تواند موجب تغذیه بیش از حد سفره‌های آب در اراضی سیل‌خیز شود
 - افزایش فشار بر نظام‌های بیمه دولتی و خصوصی برای بیمه خسارت‌های ناشی از سیل
 - افزایش مرگ و میر و بیماری در گروه‌های سنی سالخورده و اقشار فقیر در مناطق شهری
 - افزایش گرمادگی و تلف شدن دام‌های اهلی و حیات وحش
 - تغییر مقصد گردشگران
 - افزایش احتمال وارد شدن خسارت به برخی از محصولات زراعی
 - افزایش تقاضا برای وسایل الکترونیکی سرمازا و کاهش عرضه انرژی
- سایر پیامدهای ناشی از تغییر آب و هوا در این بخش عبارتند از: خوردگی و از بین رفتن تجهیزات پالایشگاه‌ها و مجتمع‌های پتروشیمی؛ افزایش استفاده از سیستم‌های تبرید و تهویه مطبوع؛ افزایش تلفات تبخیر بنزین؛ کاهش راندمان سیکل‌های تبریدی در پالایشگاه‌ها و غیره است همچنین از آثار سودمند تغییرات آب و هوا می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
- افزایش بازده محصولات کشاورزی در برخی مناطق عرض‌های میانی به ازای تغییر اندک در دمای منطقه
 - افزایش دسترسی به آب در برخی مناطق کم‌آب جهان
 - کاهش مرگ و میرهای زمستانه در عرض‌های میانی و بالا
 - کاهش تقاضای انرژی در فصل زمستان
 - به‌طور کلی در اثر تغییر آب و هوا، بازدهی نیروگاه‌ها و به تبع آن ظرفیت تولید برق نیروگاه‌ها کاهش می‌یابد.
 - تلفات شبکه برق با افزایش دما، روند صعودی پیدا می‌کند؛ در نتیجه مصرف برق و به تبع آن مصرف سوخت‌های فسیلی مانند گاز افزایش می‌یابد.

۲- مرور منابع

تاکنون مطالعات نسبتاً فراوانی در زمینه تغییرات اقلیمی در سراسر دنیا انجام گرفته است که نتیجه آن انتشار حجم قابل توجهی از اطلاعات در این زمینه طی سال‌های اخیر بوده است. سیاری و همکاران (۱۳۹۰) در مقایسه دو مدل گردش عمومی جو CGCM2 و HadCM3 تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 بر اساس دوره پایه ۱۹۶۱-۱۹۹۰ دریافتند که دمای حداقل و حداکثر پیش‌بینی شده توسط دو مدل، تطابق خوبی با داده‌های مشاهده شده دارد و مقادیر RMSE در مرحله اعتبارسنجی در محدوده ۰/۸۳-۱/۲۳ قرار گرفت. همچنین دریافتند که پیش‌بینی دما در دو مدل تحت سناریوی B2 نسبت به سناریوی A2 از دقت بیشتری برخوردار است؛ اما این تفاوت معنی‌دار نبود. روشن و همکاران (۱۳۹۱) در مطالعه‌ای به شبیه‌سازی تأثیر تغییرات اقلیم بر نیاز مصرف انرژی در سیستم‌های سرمایش و گرمایش خانگی با استفاده از شاخص درجه روز پرداختند. برای این منظور، از مدل گردش عمومی برای شناسایی تغییرات اقلیمی آینده و شبیه‌سازی مقادیر درجه روز استفاده کردند. یافته‌های تحقیق افزایش مصرف انرژی برای سرمایش خانوارها در سال ۲۰۷۵ را نشان می‌دهد؛ با طولانی شدن فصول گرم و کاهش فصول سرد سال، نیاز به تأمین مداوم انرژی برای سرمایش هوا افزایش می‌یابد.

بابائیان و همکاران (۱۳۹۳)، با استفاده از آمار دما و برق مصرفی سالانه کشور و برونداد ریزمقیاس شده پیش‌بینی دمای مدل گردش عمومی جو HadCM3 روی کشور، دما و میزان تقاضای برق در کشور تا سال ۲۱۰۰ میلادی را شبیه‌سازی کردند. یافته‌های آنها نشان داد، با توجه به افزایش دمای پیش‌بینی شده، میزان تقاضای برق کشور در آینده در مقایسه با میانگین انرژی برق مصرفی در دوره ۱۳۸۶-۱۳۹۰ افزایش قابل توجهی خواهد داشت. دشت بزرگی و همکاران (۱۳۹۴)، روند شاخص‌های حدی دما را بر اساس سناریوهای وضعیت موجود و ۳ سناریوی RCP شامل RCP۲/۶، RCP۴/۵ و RCP۶ برای استان خوزستان انجام دادند. نتایج نشان داد روند شاخص‌های شب‌های سرد و گرم (TN90p و TN10p) با روند شاخص TMINmean و شاخص‌های روزهای سرد و گرم (TX90p و TX10p) با شاخص TMAXmean در مناطق مختلف استان هماهنگی نشان می‌دهد؛ به طوری که بر اساس آنها تا سال ۲۰۵۰ شاخص‌های دوره سرد روند کاهشی (روزها و شب‌های سرد) و شاخص‌های دوره گرم سال (روزها و شب‌های گرم) روند افزایشی خواهند داشت.

ترکمان و همکاران (۱۳۹۵)، گرمایش جهانی را بر اساس سناریوهای RCP با استفاده از مدل‌های GFDL-ESM2g و HadGEM-es برای اردبیل، اصفهان و مشهد پیش‌بینی کردند. نتایج پیش‌بینی در مناطق تحت مطالعه و در بین چهار سناریوی RCP، بیانگر افزایش دمای حداکثر در محدوده ۰/۸۸ تا ۱/۱۱ و دمای حداقل در محدوده ۰/۴۹ تا ۱/۲۴ درجه سلسیوس در مدل GFDL-ESM2g و در مدل HadGEM2-es افزایش دمای

حداکثر در محدوده ۱/۸۸ تا ۲/۳۵ و افزایش دمای حداقل در محدوده ۱/۷۳ تا ۲/۴۹ درجه سلسیوس در دوره اقلیمی ۲۰۲۵-۲۰۴۹ میلادی بود. در هر دو مدل بیشترین افزایش دما در سناریوی RCP8.5 و کمترین افزایش دما در سناریوی RCP2.6 مشاهده شد. نتایج کلی مقایسه دو مدل نشان داد که مقادیر افزایش دما در مدل HadGEM2-es بیشتر از مدل GFDL-ESM2g است. کریستنسن و همکاران (۲۰۰۴)، در پژوهشی به بررسی اثر گرم شدن آب و هوا بر درجه روز و نیاز به انرژی در سوئیس پرداختند. آنها بیان می‌کنند که در طول سال‌های ۲۰۰۳-۱۹۰۱، درجه-روز گرمایش با توجه به دمای آستانه (۸، ۱۰ یا ۱۲ درجه سلسیوس) و موقعیت، کاهش یافته و به ۱۱ تا ۱۸ درصد رسید. برای دوره ۲۰۸۵-۱۹۷۵، محاسبات سناریو نشان می‌دهد که کاهش بیشتر بین ۱۳ درصد تا ۸۷ درصد است. برای درجه-روز سرمایش، ترویج روند مثبت در طول قرن بیست و یکم رخ می‌دهد (Christenson, Manz & Gyalistras, 2006).

فرانک (۲۰۰۵)، اثر گرمایش جهانی را روی مصرف انرژی مورد نیاز برای گرمایش و سرمایش در زوریخ بررسی کرد. برای این کار از داده‌های دمای ساعتی طی دوره آماری ۲۳ ساله (۲۰۰۳-۱۹۸۱) استفاده کرد. طبق سناریوی اقلیمی انجام گرفته در طی دوره ۱۹۹۰-۱۹۶۱ میانگین دمای سالانه به میزان ۴/۴ درجه روز افزایش یافته است. میلر و همکاران (۲۰۰۷)، مطالعه‌ای با عنوان تغییر اقلیم، گرمای شدید و تقاضای برق در کالیفرنیا انجام دادند، با مطالعه سناریوهای انتشار گوناگون مشخص شد تعداد گرم‌ترین روزهای تابستان که در شرایط فعلی ۱۲ روز در سال است، به ۹۶ روز در سال ۲۱۰۰ افزایش خواهد یافت. لی و فانگ (۲۰۰۷)، به بررسی گرمایش جهانی و اثرات آن بر میزان انرژی مصرفی گرمایش، با استفاده از میانگین دمای روزانه و ماهانه ۵۹۰ ایستگاه هواشناسی در سرتاسر چین، در طی دوره آماری ۲۰ ساله ۲۰۰۴-۱۹۸۰ پرداختند. نتایج نشان داد میزان انرژی سوخت ذخیره شده و میزان کمتر مصرف برای فصول سرد سال ناشی از تغییرات اقلیم جهانی است.

کوکس و همکاران (۲۰۱۵)، اثر گرمایش جهانی بر تغییرات انرژی در نواحی مدیترانه را با استفاده از مدل گردش عمومی جو شبیه‌سازی کردند. بدین منظور داده‌های میانگین دمای روزانه هوا توسط مدل PRECIS طی دوره آماری ۲۰۹۹-۱۹۵۰ تحت سناریوی A1B در ابعاد ۲۵*۲۵ کیلومتر روی حوضه مدیترانه شبیه‌سازی شد و نتایج نشان داد که میانگین روزانه دما در طی دوره ۲۰۴۰-۲۰۰۱ روند افزایشی به میزان ۱ تا ۲ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد که روی انرژی مصرفی جهت خنک کردن اماکن اثر قابل توجهی دارد. همچنین در دهه ۲۰۹۹-۲۰۵۰ روند دما افزایش چشمگیری نسبت به دهه ۲۰۴۰-۲۰۰۱ نشان می‌دهد.

۳- مواد و روش

۳-۱- مقیاس مکانی مورد مطالعه

کشور ایران در منطقه معتدله خشک شمالی و در عرض متوسط روی کره زمین در ناحیه جنب استوایی و استوایی قرار دارد. ایران سرزمینی بسیار متنوع است. این تنوع در تمام ویژگی‌های جغرافیایی آن از مسائل انسانی گرفته تا خصوصیات طبیعی به چشم می‌خورد (علیجانی، ۱۳۸۳). نصف‌النهار ۴۴/۵ شرقی از غربی‌ترین نقطه و نصف‌النهار ۶۳/۱۸ شرقی از شرقی‌ترین نقطه ایران می‌گذرد. همچنین مدار ۲۵/۳ شمالی از جنوبی‌ترین نقطه و مدار ۳۹/۴۷ شمالی از شمالی‌ترین نقطه این کشور عبور می‌کند. این موقعیت جغرافیایی با دوری از دریاها بزرگ، به‌ویژه جریان‌های هوایی سبب شده است تا آب‌وهوای ایران خشک و برّی باشد؛ اما به سبب وسعت زیاد و وجود عوارض گوناگون طبیعی مانند ارتفاعات بلند در شمال و غرب و پستی‌های وسیع، مانند دشت‌های مرکزی در داخل فلات و افزون بر آن، مجاورت دریای خزر و خلیج فارس و اقیانوس هند که هر یک از این افق‌ها، اقلیمی جداگانه می‌سازند، ایران را از اقالیم مختلف و آب‌وهوای متنوع برخوردار کرده است. ایران فلاتی مرتفع، نزدیک به دشت‌های وسیع آسیا است که ارتفاع میانگین آن حدود ۱۲۰۰ متر بالاتر از سطح دریا و متوسط دمای سالانه آن حدود ۱۸ درجه سلسیوس است. آب‌وهوای قسمت غربی کشور، مدیترانه‌ای است و در نواحی جنوبی آن، آب‌وهوای نیمه‌صحرائی گرم نیز بر آن تأثیرگذار است. در نواحی جنوبی، با وجود هوای مرطوبی که در سرتاسر این منطقه حاکم است، میزان دما بالاست؛ به طوری که حداکثر دما در خوزستان به ۵۴ درجه سلسیوس نیز می‌رسد. از ویژگی‌های این ناحیه تابستان‌های گرم و زمستان‌های معتدل است و اختلاف دما در فصول مختلف و شب و روز زیاد نیست. به دلیل وجود کوه‌های البرز در شمال و رشته‌کوه‌های زاگرس در غرب کشور، نواحی داخلی فلات ایران دارای آب‌وهوای خشک و بیابانی است.

۳-۲- مقیاس زمانی مطالعاتی

اساس و مبنای تراز و تعدیل آماری داده‌های بارش روزانه و دما در دوره آماری، آمار ایستگاه‌های هواشناسی است که در مطالعات پتانسیل‌یابی به‌صورت شبکه‌ای انجام می‌شود. هر چه تراکم ایستگاه‌ها بیشتر باشد نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آمار و اطلاعات دقیق‌تر می‌باشد. بنابراین مبنای انتخاب ایستگاه‌های هواشناسی طول دوره آماری است؛ یعنی ایستگاه‌های که دارای دوره آماری طولانی‌تر باشند به عنوان ایستگاه‌های مورد مطالعه انتخاب می‌شوند. بر این اساس دوره آماری از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۰۰ به عنوان اطلاعات پایه و از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ به عنوان سال‌های ارزیابی و سال ۲۰۳۰ به عنوان سال هدف انتخاب شد.

۳-۳- مدل‌های مورد ارزیابی

در این پژوهش جهت پیش‌بینی وضعیت اقلیمی از داده‌های اقلیمی Bioclimate که با دسترسی رایگان به صورت رستری در سایت <http://www.worldclim.org> در اختیار کاربران قرار دارد، استفاده شده است. این مجموعه داده برای خشکی‌های کره زمین بوده و شامل سری زمانی سالانه با میانگین داده ماهانه برای بارش و میانگین، حداقل و حداکثر درجه حرارت، حاصل بیش از ۴۰۰۰ ایستگاه آب و هوایی بین سال‌های ۱۹۵۰ و ۲۰۰۰ است (Hijmans et al., 2005). این مجموعه داده شامل اطلاعات اقلیمی از مناطقی با عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی و ارتفاع مشخص است و در این مجموعه تعدادی از رویکردهای مختلف آماری برای تولید سطوح اقلیمی، مورد استفاده قرار گرفته است (New et al., 1999, 2002; Daly et al., 2002).

یکی از مزایای WordClim در مقایسه با سایر داده‌های اقلیمی جهانی، ارائه داده‌های اقلیمی از تعداد بیشتری ایستگاه‌ها است. WordClim از یک الگوریتم استفاده می‌کند که هر ایستگاه به عنوان یک نقطه داده در نظر گرفته می‌شود. در سری داده‌های WordClim، داده‌های مضاعف حذف می‌شوند؛ زیرا فقط اطلاعات ثبت شده به وسیله ایستگاه‌هایی که فاصله بیشتر از ۵ کیلومتر از هم دارند، در تجزیه و تحلیل وارد می‌گردد. داده‌های عرض، طول و ارتفاع در مقیاس‌های مکانی کوچک‌تر (مانند اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای SRTM) با یک تابع هموار چندضابطه‌ای - چندجمله‌ای رتبه دوم، به عنوان متغیرهای مستقل مورد استفاده قرار گرفتند تا مدل بر آن‌ها واسنجی و تنظیم شود. پس از آزمودن سایر روش‌ها مانند تابع هموار چندضابطه‌ای - چندجمله‌ای رتبه سوم و یا استفاده از روش ارتفاع به عنوان یک متغیر کمکی این انتخاب انجام می‌شود. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت در روش تابع هموار چندضابطه‌ای - چندجمله‌ای رتبه دوم پایین‌ترین خطای کلی نسبت به روش‌های دیگر مانند تابع هموار چندضابطه‌ای - چندجمله‌ای رتبه سوم یا ارتفاع به عنوان متغیر کمکی وجود دارد (Hijmans et al., 2005). داده‌ها اقلیمی مورد استفاده دارای ۱۹ متغیر است (جدول ۱).

جدول ۱: لایه‌های اقلیمی بانک داده Bioclimate

ردیف	متغیر	توضیح
۱	BIO1	دمای متوسط سالانه
۲	BIO2	میانگین دمای روزانه
۳	BIO3	$(BIO2/BIO7) (* 100)$
۴	BIO4	دمای فصلی
۵	BIO5	حداکثر درجه حرارت گرم‌ترین ماه سال
۶	BIO6	دمای حداقل در سردترین ماه سال

ردیف	متغیر	توضیح
۷	BIO7	محدوده دمای سالانه
۸	BIO8	دمای متوسط فصل مرطوب
۹	BIO9	دمای متوسط فصل خشک
۱۰	BIO10	دمای متوسط گرم‌ترین فصل
۱۱	BIO11	دمای متوسط سردترین فصل
۱۲	BIO12	بارندگی سالانه
۱۳	BIO13	بارش مرطوب‌ترین ماه سال
۱۴	BIO14	بارش خشک‌ترین ماه سال
۱۵	BIO15	بارش فصلی
۱۶	BIO16	بارش در مرطوب‌ترین فصل
۱۷	BIO17	بارش در خشک‌ترین فصل
۱۸	BIO18	بارش در گرم‌ترین فصل
۱۹	BIO19	بارش در سردترین فصل

۳-۳-۱- سناریوهای پیش‌بینی مدل CMIP5

هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در گزارش پنجم ارزیابی خود AR5 از سناریوهای جدید RCP به‌عنوان نماینده خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده است. سناریوهای جدید انتشار دارای چهار خط‌سیر کلیدی به نام‌های RCP2.6، RCP4.5، RCP6، RCP8.5 می‌باشند که بر اساس میزان واداشت تابشی آنها در سال ۲۱۰۰ نام‌گذاری شده‌اند. به عبارت دیگر، سناریوهای RCPs در سال ۲۰۱۰ توسط یک کمیته علمی و زیر نظر هیئت بین‌الدول تغییرات اقلیمی با هدف مهیا کردن مجموعه‌ای از اطلاعاتی که از نتایج آن بتوان عوامل اصلی تغییرات اقلیمی را ردیابی نمود و برای مدل‌های اقلیمی اعمال کرد، تهیه شده است. مدل‌های اقلیمی از نتایج این سناریوها برای نشان دادن غلظت و انتشار گازهای گلخانه‌ای و میزان آلودگی‌ها و تغییرات کاربری اراضی استفاده می‌کنند.

سناریوهای خانواده RCP شامل ۴ سناریوی مختلف است که این سناریوها عبارت‌اند از: ۸/۵، ۶، ۴/۵ و ۲/۶. این سناریوها بر اساس مشخصات متفاوت سطح تکنولوژی، وضعیت اجتماعی و اقتصادی، خط‌مشی‌ها در آینده می‌باشند که در هر شرایطی می‌تواند منجر به سطح انتشار متفاوت گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی شود. در هر نسخه از این سناریوها، اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای بر اساس نقش آن بر سطح واداشت‌های تابشی به ۴ دسته ۸/۵، ۶، ۴/۵ و ۲/۶ وات بر مترمربع تا پایان قرن ۲۱ طبقه‌بندی شده‌اند. نتایج این سناریوها از سال ۱۸۵۰ تا پایان قرن ۲۱ را پوشش می‌دهند و همچنین تا سال ۲۳۰۰ فرموله شده است.

متغیرهای این سناریو عبارت‌اند از:

- میزان انتشار گازهای CO₂، CH₄، N₂O، HFCS، PFCS، SF₆، CFCC.
- میزان انتشار گازهای شیمیایی فعال و آئروسول‌ها، کربن سیاه (دوده)، SO₂، کربن ارگانیک، CO، NH₃، VOXS، NOX.
- میزان غلظت گازهای گلخانه‌ای (CO₂، CH₄، N₂O، HFCS، PFCS، SF₆).
- میزان غلظت آئروسول‌ها و گازهای شیمیایی فعال (O₃، آئروسول).
- داده‌های کاربری اراضی و پوشش سطحی زمین.

این سناریوها بر اساس نتایج حاصل از برخی فراسنج‌های اجتماعی-اقتصادی، تکنولوژیکی و همچنین میزان غلظت برخی گازها برای دهه‌های آینده طراحی شده‌اند (Van Vuuren et al., 2011).

سناریو RCP8.5 (سناریوی بدبینانه)

بدون اتخاذ هیچ‌گونه سیاست‌های کاهش‌ی آثار و مقابله با پیامدهای اقلیم، آب‌وهوای کره زمین در خط سیر سناریوی انتشار RCP8.5 پیش خواهد رفت. در سناریوی ۸/۵، میزان غلظت CO₂ تا سال ۲۱۰۰؛ ۱۳۷۰ ppm و نیز اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشتهای تابشی را تا ۸/۵ وات بر مترمربع تخمین زده‌اند و همچنان روند افزایشی خواهد داشت. این سناریو توسط تیم مدل‌سازی MESSAGE و مؤسسه IIASA به سرپرستی پروفیسور کیوان ریاحی در مؤسسه بین‌المللی آنالیز سیستم‌های کاربردی IIASA در اتریش توسعه و طراحی شده است و وجه مشخصه آن، روند افزایش گازهای گلخانه‌ای است.

سناریو RCP6 (سناریوی حد متوسط)

در سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP6 با کاهش واداشت تابشی، میزان دی‌اکسید کربن نیز کاهش می‌یابد. در سناریوی ۶، میزان غلظت CO₂ تا سال ۲۱۰۰؛ ۸۵۰ ppm و اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشتهای تابشی را تا ۶ وات بر مترمربع تخمین زده‌اند. سناریو انتشار ۶ توسط گروه مدل‌سازی IMAGE در مؤسسه ملی مطالعات محیطی ژاپن طراحی شده است. در این سناریو واداشت تابشی بعد از سال ۲۱۰۰ به دلیل استفاده از فناوری‌های جدید و سیاست‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای ثابت می‌ماند.

سناریو RCP4.5 (سناریوی حد متوسط)

در سناریوی RCP4.5، میزان غلظت CO₂ تا سال ۲۱۰۰؛ ۶۵۰ ppm و اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشتهای تابشی را ۴/۵ وات بر مترمربع تخمین زده‌اند. این سناریو توسط گروه مدل‌سازی IMAGE طراحی شده است

و در آن واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ به مقدار ۴/۵ وات بر مترمربع ثابت می‌ماند.

سناریو RCP2.6 (سناریوی خوش‌بینانه)

این سناریو توسط گروه مدل‌سازی IMAGE از مؤسسه ارزیابی‌های محیطی هلند طراحی شده است. این سناریو دربرگیرنده کمترین نرخ افزایش گازهای گلخانه‌ای و واداشت تابشی ناشی از آن است. در سناریوی RCP2.6، میزان غلظت CO₂ تا سال ۲۱۰۰؛ ۴۹۰ ppm و اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت‌های تابشی تا ۲/۶ وات بر مترمربع تخمین زده شده است. مطابق این سناریو، واداشت تابشی در اواسط این قرن به حدود ۳/۱ رسیده و سپس کاهش یافته و به ۲/۶ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌رسد. برای رسیدن به این سطح واداشت تابشی، گازهای گلخانه‌ای باید به میزان قابل توجهی کاهش یابند (Van Vuuren, Edmonds, Kainuma, Riahi, Thomson, et al., و Kainuma, Riahi, & Weyant, 2011 و Riahi et al., 2011).

جمع‌بندی مدل‌ها

در مجموع، میزان جمعیت در سال ۲۱۰۰ در سناریوی RCP8.5 حدود ۱۲ میلیارد نفر خواهد بود که این میزان جمعیتی بین سناریوی A1 و A2 در سری SRES است. بر اساس سناریوی ۸/۵ میزان تولید ناخالص داخلی در کشورهای توسعه‌یافته به دلیل افزایش جمعیت و سطح پایین توسعه تکنولوژی پایین است. در مقابل سناریوی RCP2.6 میزان جمعیت را تا سال ۲۱۰۰ حدود ۷ میلیارد نفر پیش‌بینی کرده است. در این سناریو رشد تکنولوژی‌های جدید نسبت به دیگر سناریوها بیشتر و به دلیل نرخ رشد پایین جمعیت و استفاده از انرژی‌های نو، میزان تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای پایین‌تر از دیگر سناریوها است.

در سناریوی RCP4.5 میزان رشد جمعیت کمتر از سناریوی ۲/۶ تخمین زده شده است؛ اما در دیگر پارامترهای مؤثر در تغییرات اقلیمی (مانند نرخ استفاده از انرژی‌های نو، رشد تکنولوژی و ...)، نسبت به سناریوی ۲/۶ ضعیف‌تر در نظر گرفته شده است، در نتیجه سهم انتشار گازهای گلخانه‌ای تحت این سناریو در واداشت‌های تابشی بیش از سناریوی ۲/۶ است.

در سناریوی RCP6 میزان جمعیت جهانی حدود ۹ میلیارد نفر تخمین زده شده است که اندکی کمتر از میزان در نظر گرفته‌شده در سناریوی A2 از سری سناریوهای SRES است. در سناریوی ۲/۶ به دلیل رشد پایین جمعیت و رشد تکنولوژی‌های جدید، به‌طور کلی میزان استفاده از انرژی و سوخت‌های فسیلی کمتر از سایر سناریوها در نظر گرفته‌شده است. در این سناریو میزان استفاده از زغال‌سنگ بیش از سناریوهای ۴/۵ و ۶

است؛ ولی در مقابل میزان استفاده از انرژی‌های نو در این سناریو بیشتر و میزان استفاده از انرژی نفت کمتر از دو سناریو دیگر در نظر گرفته شده است.

با توجه به میزان جمعیت در نظر گرفته شده در سناریوی ۸/۵ و نیاز جمعیت ساکن در کره زمین به تأمین انرژی، استفاده از انواع انرژی (به جز انرژی زیستی) در این سناریو بیش از دیگر سناریوها در نظر گرفته شده است. همچنین میزان انتشار مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای مؤثر بر وقوع تغییر اقلیم نشان می‌دهند که بیشترین میزان انتشار این گازها در سناریوی ۸/۵ است (Van Vuuren, and Riahi et al., 2011 and Van Vuuren, Edmonds, Kainuma, Riahi, & Weyant, 2011 and Edmonds, Kainuma, Riahi, Thomson, et al., 2011).

اگر قادر به درک درست سامانه اقلیمی باشیم و تصویر واضحی از اقلیم‌های گذشته داشته و آن را با داده‌های قابل مشاهده مقایسه کنیم، امکان پیش‌بینی شرایط اقلیمی آینده نیز امکان‌پذیر خواهد بود. مدل‌های اقلیمی برای ارزیابی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی طراحی شده‌اند (Easterling, 2007). معروف‌ترین مدل‌های اقلیمی در سطح جهان شامل NASA، GISS، NCAR، GFDL، CCC و UKMO می‌باشند و امروزه پارامترهای پیش‌بینی شده این مدل‌ها بر اساس سناریوهای انتشار SRES (Change, 2007) و سناریوهای RCP تحت عنوان واداشت‌های تابشی (Stocker, 2014) در تخمین نوسانات دمایی برای دهه‌های آینده کاربرد فراوانی یافته است.

۳-۲-۳- اطلاعات آماری و داده‌های مدل‌های CMIP5

به منظور بررسی و پیش‌بینی شاخص‌های اقلیمی حدی مکانی-زمانی اقلیم آینده ایران بر اساس مدل‌های CMIP5، داده‌های دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش روزانه ۳ مدل (CSIRO-Mk3-6-0، GFDL-ESM2M) و MRI-CGCM3 از آخرین نسخه مدل‌های گردش عمومی جو CMIP5، شامل داده‌های پیش‌بینی شده سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۶/۰ ۸/۵ (RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5) در دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۰) دریافت (جدول ۳) و در محیط نرم‌افزارهای آماری R نسخه ۳،۵،۱ و Excel ۲۰۱۶ تجزیه و تحلیل شده‌اند؛ سپس فایل‌های خروجی این دو نرم‌افزار در محیط نرم‌افزار ArcMap نسخه ۱۰،۵ پردازش شده است. شبیه‌سازی‌های CMIP5 ارائه چارچوبی برای آزمایش تغییرات آینده آب‌وهوا است. لازم به ذکر است که مجموعه داده‌های CMIP5 از سایت زیر دریافت شده است:^۱

1. <http://gismap.ciat.cgiar.org/MarkSimGCM>

جدول ۲: مشخصات و ویژگی‌های مدل‌های مورد مطالعه از مجموعه مدل‌های CMIP5

ردیف	مدل	وضوح (طول×عرض)	مرکز	کشور	مرجع
۱	CSIRO-Mk3-6-0	۱/۸۷۵×۱/۸۷۵	سازمان تحقیقاتی، علمی و صنعتی و مرکز برون‌مرزی تغییرات اقلیمی	استرالیا	Collier MA et al. (2011)
۲	GFDL-ESM2M	۲/۰×۲/۵	آزمایشگاه دینامیک سیالات ژئوفیزیکی	ایالات متحده	Dunne JP et al. (2012).
۳	MRI-CGCM3	۱/۱۲۵×۱/۱۲۵	موسسه‌ی تحقیقات هواشناسی	ژاپن	Yukimoto S (2012).

معرفی مختصر مدل‌های منتخب CMIP5 در این پژوهش

مدل CSIRO-Mk3-6-0

مدل CSIRO Mark 3.6 (Mk3.6) ساخت کشور استرالیا است و قادر به زمان‌بندی تعاملات از طریق اجزای بالا هر یک از اجزای کنونی در مدل سیستم آب‌وهوای Mk3 است. این مدل از چهار جزء اصلی تشکیل شده است. مدل CSIRO برای انواع پوشش سطح، تکامل گیاهان در بیوسفر، شیمی هواسپهر و اقیانوس‌ها ناشی از تحولات آینده توسعه داده شد. نسخه Mk3 برای بررسی فرایندهای دینامیکی و فیزیکی کنترل شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم آب‌وهوا، برای پیش‌نگری‌های فصلی زیر فصلی و برای بررسی‌های بلندمدت آب و هوایی و تغییرپذیری آن است. مدل آب و هوا جهانی (GCM) از نسخه قبلی Mk3.5 توسعه یافته‌تر است، این یک مدل فضای اقیانوس همراه با دریای پویا است. همچنین دارای یک طرح خاکستری با ویژگی‌های پوشش گیاهی است. مدل‌های اقیانوس، دریاخ و تپه خاکی بین Mk3.5 و Mk3.6 تغییری نکرده‌اند. تفاوت اصلی بین Mk3.5 و Mk3.6 عبارتند از ترکیب درمان آروماتیک تعاملی و یک طرح تابش به‌روز شده در Mk3.6 (Jeffrey et al., 2013).

مدل GFDL-ESM2M

مدل GFDL یک مدل گردش عمومی جو ساخت طراحی کشور ایالات متحده برای جو، اقیانوس‌ها، زمین و یخ دریا است. هدف مدل این است که مسائل در حال ظهور در تغییرات آب‌وهوایی، از جمله تعاملات هواویز-ابر، تعامل شیمیایی آب و هوا و اتصال بین تروپوسفر و استراتوسفر را در بر گیرند. این مدل همچنین جزء سیستم‌های فیزیکی، سیستم مدل زمین و مدل پیش‌نگری‌های دهه‌های آینده نزدیک طراحی شده است.

مدل MRI-CGCM3

این مدل جدید آب‌وهوایی جهانی، در مؤسسه تحقیقات هواشناسی (MRI) توسعه یافته است. این مدل ارتقاء یافته مدل MRI-CGCM2 مدل آب‌وهوایی سابق MRI است. MRI-CGCM3 از مدل‌های جو زمین، آئروسول و اقیانوس-یخ تشکیل شده است و زیرمجموعه‌ای از مدل سامانه زمین‌شناسی MRI-ESM1 MRI است. مؤلفه جرمی MRI-AGCM3 به صورت تعاملی همراه با مدل آئروسول برای نشان دادن آشکارسازهای مستقیم و غیرمستقیم با یک طرح میکرو فیزیک ابر جدید است (Yukimoto et al., 2012).

۳-۳-۳ ریزمقیاس نمایی

یکی از مشکلات عمده در استفاده از برون‌داد مدل‌های CMIP5 در مطالعات ارزیابی اثرات تغییر اقلیم در سطوح منطقه‌ای، بزرگ بودن مقیاس مکانی سلول محاسباتی آنها نسبت به منطقه مورد بررسی است. روش‌های مختلفی برای تولید سناریوهای اقلیمی منطقه‌ای از سناریوهای اقلیمی مدل‌های CMIP وجود دارد که به دو دسته آماری و دینامیکی تقسیم می‌شوند. در روش آماری ارتباط بین متغیرهای سطحی و خروجی مدل گردش عمومی از طریق روابط آماری به دست آمده در دوره تاریخی محاسبه می‌شوند؛ اما در روش دینامیکی این روابط از طریق حل معادله سیال هوا به دست می‌آید. از آنجا که روش دینامیکی هزینه‌بر و وقت‌گیر است، ترجیح داده می‌شود از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری استفاده شود.

مدل‌های گردش عمومی جو از سلول‌هایی استفاده می‌کنند که در حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر در سطح زمین را پوشش می‌دهند؛ بنابراین، آنها اقلیم را در یک مکان خاص بسیار دقیق شبیه‌سازی نمی‌کنند. در روش MarkSimGCM انحراف میانگین از مبدأ هر سلول برای لحاظ کردن در منطقه مورد مطالعه و ویژگی‌های اقلیمی مورد انتظار ارزیابی می‌شود. MarkSimGCM یک مولد داده‌های اقلیم است که از ۷۲۰ طبقه اقلیمی در سراسر جهان استفاده می‌کند تا ضرایب مولد بارندگی Markov مرتبه سوم محاسبه‌اند. اجزای تشکیل‌دهنده ریزمقیاس‌نمایی مدل Markov با خروجی مدل‌های گردش عمومی جو تناسب دارد و با استفاده از آن داده‌های اقلیمی را برای منطقه مورد مطالعه تولید می‌کند.

۳-۳-۴- اعتبارسنجی مدل‌های شبیه‌سازی کننده گردش کلی جو از تغییر اقلیم آینده

جهت بررسی نحوه عملکرد و مقایسه قدرت پیش‌بینی، به منظور ارزیابی کارکرد مدل‌ها لازم و ضروری است. برای ارزیابی داده‌های مدل‌ها شاخص‌های آماری مختلفی وجود دارند که در این پژوهش شاخص‌های کمی R^2 ، $RMSE$ ، MAE و MBE به کار گرفته شده است.

ضریب تعیین^۱ (R^2)

ضریب تعیین R^2 توصیف درجه همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده است. ضریب تعیین معیاری بدون بعد و دامنه آن بین صفر تا یک است. هرچه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده ارتباط قوی بین دو گروه است. R^2 توصیف مقدار واریانس در اندازه‌گیری داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل است. پارامتر ضریب تعیین به طور گسترده‌ای برای ارزیابی مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، زیرا R^2 به داده‌های پرت و تفاوت بین داده‌های برآورد شده مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده بسیار حساس است. به طور کلی R^2 بیانگر ارتباط بین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده و همچنین این شاخص توان دوم ضریب همبستگی بین دو گروه داده است. از آنجا که ضریب تعیین تنها رابطه خطی بین دو متغیر را می‌سنجد قدرت آن در حد استاندارد کردن تفاوت میانگین و پراکنش مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده است؛ بنابراین، نسبت اختلاف بین داده‌ها را در نظر نمی‌گیرد.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

مجذور میانگین مربعات خطا^۲ ($RMSE$)

$RMSE$ نشان‌دهنده میزان خطای مدل است، این شاخص معرف دقت در بسیاری از روش‌های آماری است. همچنین این نمایه بیان‌کننده تفاوت بین مقادیر برآورد شده مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده است. هرچه این اعداد به صفر نزدیک‌تر باشند نشان‌دهنده دقت بالای مدل و خطای کمتر و مقدار صفر نشان‌دهنده عدم وجود خطا در برآورد مدل است. $RMSE$ مهم‌ترین کمیت آماری است که به اندازه داده پرت حساس بوده و برای مشخص شدن اندازه خطاهای بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. هرچه مقدار این کمیت کمتر باشد گرایش مرکزی و دقت بیشتر می‌شود.

1. Returns the square
2. Root Mean Square Error

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{N}}$$

میانگین خطای مطلق^۱ (MAE)

میانگین خطای مطلق بیان‌کننده تفاوت بین دو متغیر پیوسته است. MAE همچنین میانگین فاصله افقی بین هر نقطه و خط هویت است.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n}$$

میانگین انحراف خطا^۲ (MBE)

این آماره بیانگر مقادیر خطای بیش‌برآورد یا کم‌برآورد است. MBE می‌تواند از صفر در عملکرد عالی تا بی‌نهایت تغییر کند. مقادیر مثبت MBE نشان‌دهنده آن است که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل بیشتر از مقادیر واقعی و مقادیر منفی آن بیان‌کننده این است که مقادیر برآورد شده توسط مدل کمتر از مقادیر واقعی هستند.

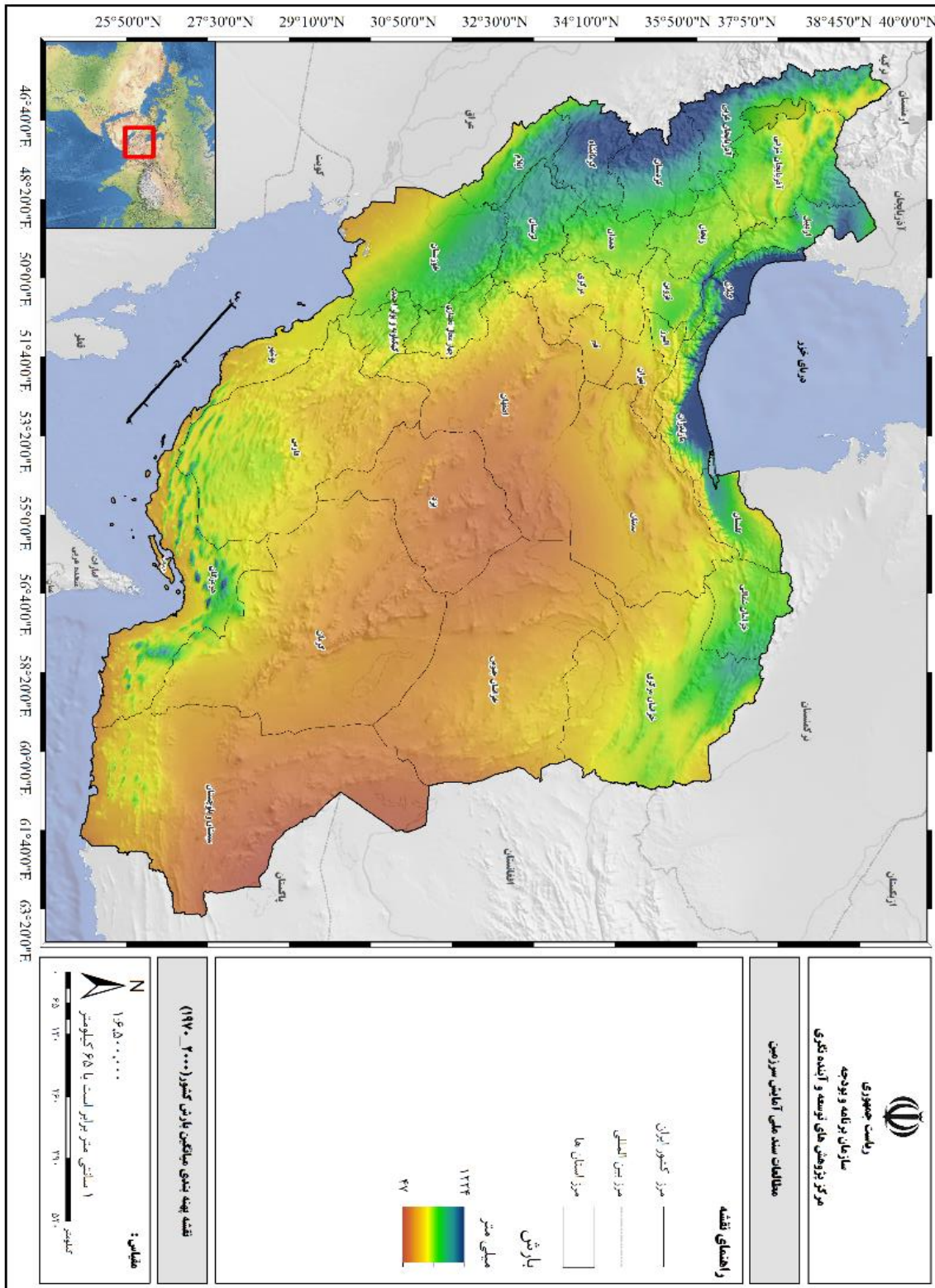
$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n}$$

در روابط فوق X_i : مقادیر مشاهداتی، Y_i : داده برآورد شده توسط مدل، n : تعداد کل داده‌های مورد ارزیابی، \bar{X} : میانگین مقادیر مشاهده‌شده، \bar{Y} : میانگین مقادیر مدل است.

1. Mean absolute error
2. Mean Bias Error

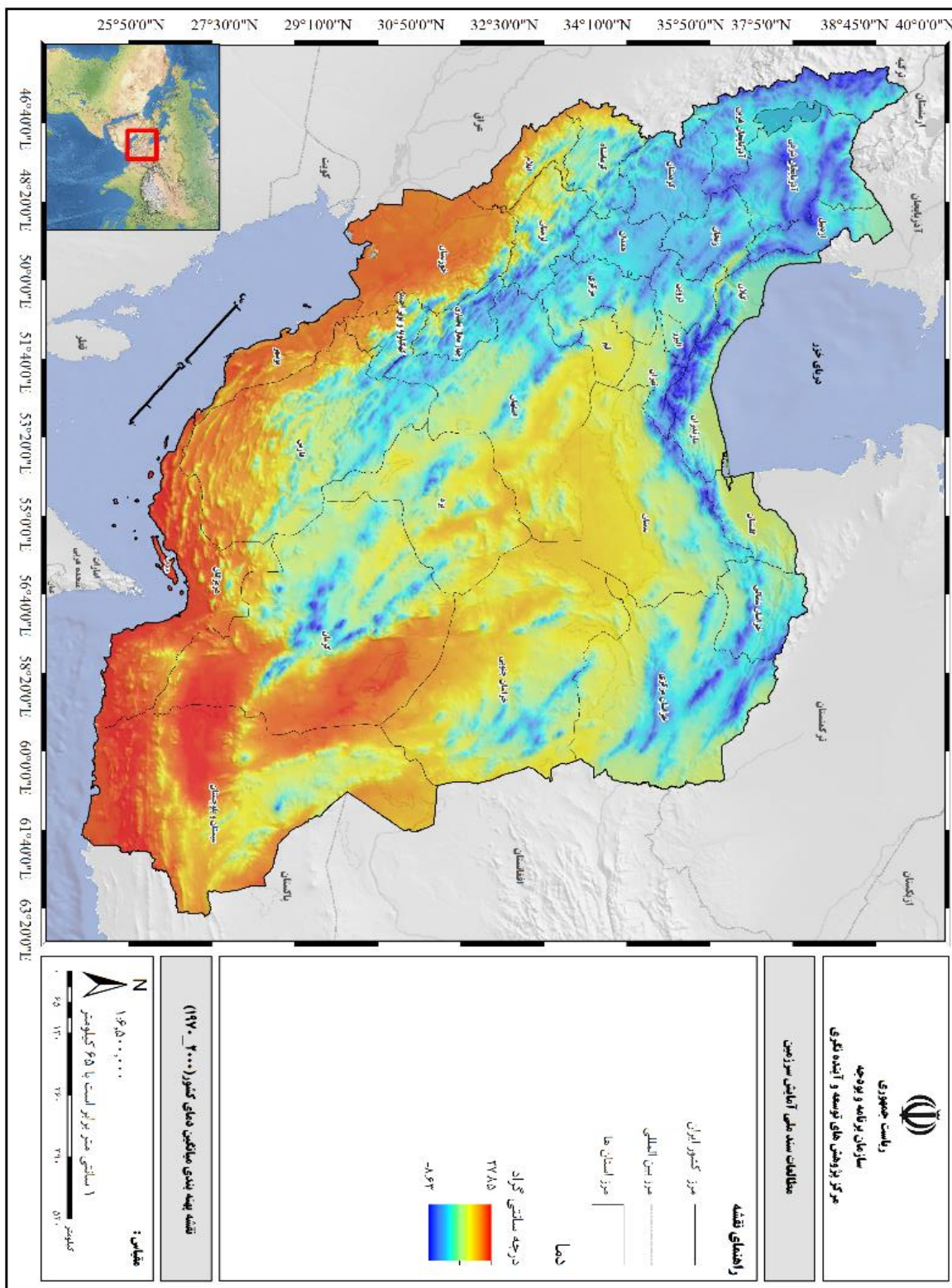
۴- نتایج

در این پژوهش با هدف بررسی و پیش‌بینی تغییر اقلیم کشور، داده‌های دما و بارش طی سال‌های اخیر جمع‌آوری شد و پیش‌بینی تغییر اقلیم، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. به منظور ارزیابی وضعیت تغییر اقلیم در آینده بر اساس مدل‌های CMIP5 داده‌های اقلیمی از مدل‌های جهانی، آخرین نسخه مدل‌های گردش عمومی جو و ریزمقیاس‌نمایی به روش MarkSimGCM شامل داده‌های برآورد شده سناریوهای واداشتی تابشی (RCP) که به عنوان نماینده‌های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای است و بر اساس میزان واداشت تابشی آنها در سال ۲۱۰۰ نام‌گذاری شده‌اند. در این مطالعه سناریوهای RCP4.5، RCP2.6، RCP6.0 و RCP8.5 برای سال ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ دریافت و مورد ارزیابی و سنجش قرار گرفتند. در مرحله اول نیاز به شناسایی وضع موجود است؛ بنابراین، نقشه‌های ۱ و ۲ میانگین بلندمدت ۳۰ ساله (۱۹۷۰-۲۰۰۰) را نشان می‌دهد.



نقشه ۱: پراکنش فضایی میانگین بارش در کشور از سال ۱۹۷۰ تا سال ۲۰۰۰

تغییرات اقلیمی (جلد دوم - ارزیابی روند پیش‌گامی اثرات تغییر اقلیم در ایران)



نقشه ۲: پراکنش فضایی میانگین دما در کشور از سال ۱۹۷۰ تا سال ۲۰۰۰

جهت تعیین مناسب‌ترین مدل، ابتدا داده‌های تاریخی سه مدل GFDL-ESM2M، CSIRO-Mk3-6-0 و MRI-CGCM3 طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ میلادی نسبت به داده‌های مشاهداتی روزانه بر اساس شاخص‌های آماری R^2 ، RMSE، MAE و MBE مورد ارزیابی و سنجش قرار گرفتند که نتایج آن به شرح زیر است.

۴-۱- ارزیابی و بررسی مدل‌ها

۴-۱-۱- ارزیابی و بررسی مدل CSIRO-Mk3-6-0

دقت داده‌های دمایی (بیشینه و کمینه) برآورد شده از مدل CSIRO-Mk3-6-0 در مقایسه با داده‌های تاریخی در کشور بر اساس شاخص‌های آماری مختلف را نشان می‌دهد. بررسی مقادیر ضریب تعیین (R^2) بین دمای به دست آمده توسط مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها، بیانگر دقت بالای دمای شبیه‌سازی شده توسط این مدل در ایران است که مقادیر R^2 در تمام ایستگاه‌های منتخب بیش از ۹۰ درصد است. آماره مجذور میانگین مربعات خطا بیانگر برآوردی قابل قبول و خطای کم مدل در شبیه‌سازی دما در اغلب ایستگاه‌های مورد مطالعه است، زیرا که مقادیر RMSE در همه ایستگاه‌ها ۷۶/۴۷ درصد کمتر از ۳ است و نشان می‌دهد که انحرافات دما کم است. بیشترین مقدار RMSE متعلق به قسمت‌هایی از دامنه‌های زاگرس و شمال شرق است. مقادیر میانگین مطلق خطا MAE که نشان‌دهنده میزان تفاوت بین دو متغیر پیوسته است، بیانگر تفاوت نه‌چندان زیاد بین مقادیر دمای سالانه ایستگاه‌های مورد مطالعه و داده‌های برآورد شده مدل است. به عبارت دیگر، تقریباً ۷۶/۴ درصد ایستگاه‌های منتخب دارای مقدار کمتر از ۲،۳۶ است. مقادیر میانگین انحراف خطا MBE نشان می‌دهد که اختلاف خروجی مدل و داده‌های تاریخی در بیشتر ایستگاه‌ها اندک است، زیرا انحراف خطای داده‌ها در ۷۶/۴ درصد از ایستگاه‌ها کمتر از ± 2 است. در مجموع، مقادیر به دست آمده مدل نشان می‌دهد که کارایی مدل CSIRO-Mk3-6-0 در برآورد مقدار دما مناسب می‌باشد و بر اساس شاخص‌های آماری R^2 ، RMSE، MAE و MBE، این امر واضح است. بیشترین هماهنگی و ارتباط بین داده‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل در اکثر مناطق مورد مطالعه به‌خصوص در شمال، شمال غرب، جنوب و جنوب غرب واضح است؛ بنابراین، مدل مذکور از توانایی مناسبی در تشخیص فراز و نشیب‌ها و روند دما در اکثر نقاط کشور برخوردار است.

۴-۱-۲- ارزیابی مدل GFDL-ESM2M

بررسی این مدل با شاخص R^2 ، بیانگر آن است که در ضریب تعیین بیش از ۹۰ درصد روشن است که ارتباط مناسب بین سری‌های زمانی را در اکثر مناطق مورد مطالعه بیان می‌کند. آماره RMSE، نشان می‌دهد که ۹۴/۱۱ درصد ریشه میانگین مربع خطای کمتر از ۳ دارند؛ اما در شکل وضعیت متفاوت است، به طوری که ۵۲/۹۴ درصد ایستگاه‌ها RMSE کمتر از ۳ را نشان می‌دهند. بر پایه نتایج، میانگین خطای مطلق عمدتاً کمتر

از ۲/۲۷ است. میانگین انحراف خطای مدل نسبت داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد که نسبت به داده‌های واقعی خطای اندکی دارند، اما در شکل میزان انحراف مثبت و منفی خطا بیشتر است و میانگین انحراف خطا در ۶۴/۷۰ درصد نقاط ± 2 است. با توجه به مطالب بالا بر اساس شکل مدل GFDL-ESM2M با شاخص‌های R2، RMSE، MAE و MBE تا حدودی همسو با مدل CSIRO-Mk3-6-0 است؛ اما توانایی مدل مذکور برای برآورد دمای کمینه زیاد مناسب نیست.

۴-۱-۳ - ارزیابی مدل MRI-CGCM3

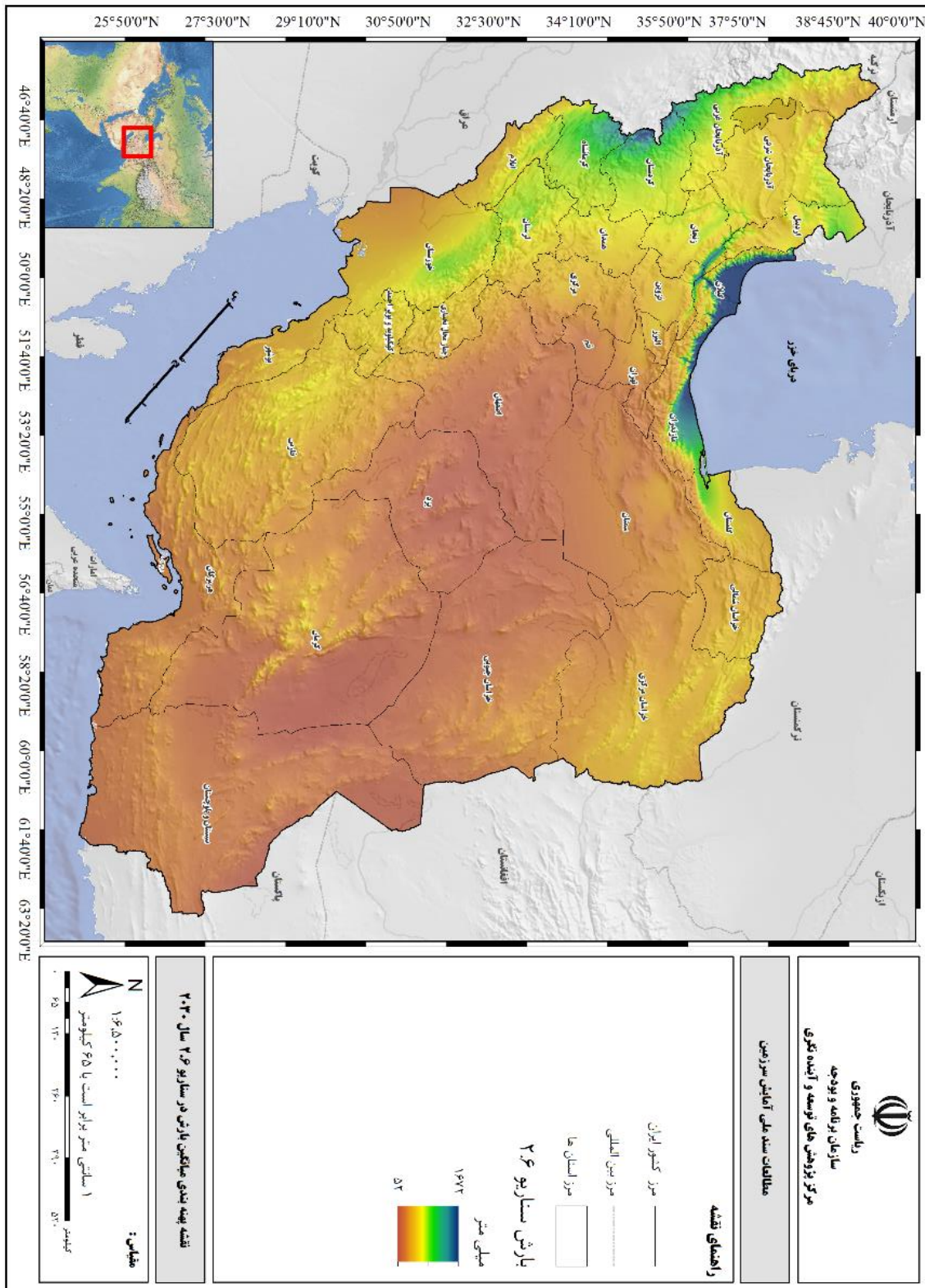
دقت داده‌های میانگین دمای سالانه برآورد شده از مدل MRI-CGCM3 در مقایسه با داده‌های دمای اندازه‌گیری شده در کشور بر اساس آماره‌های مختلف را نشان می‌دهد. بر پایه نتایج شکل، ارتباط و همبستگی بین داده‌های مدل و اندازه‌گیری شده، R2 در ۱۰۰ درصد ایستگاه‌های منتخب بیش از ۹۰ درصد است. مجذور مربعات میانگین خطا در ۹۴/۱۱ درصد نقاط کشور کمتر از ۳ است. در نمایه میانگین خطای مطلق از خطای کمتر از ۲/۳۶ برخوردار هستند. وضعیت اغلب ایستگاه‌ها از نظر MAE مناسب است. آماره انحراف خطای مدل در وضعیت مناسبی قرار دارد.

به‌طور کلی بر پایه نتایج حاصل از روش‌های آماری مدل MRI-CGCM3 با آزمون‌های R2، RMSE، MAE و MBE تا حدودی در بیشتر نواحی کشور به‌خصوص شمال، شمال غرب و جنوب کارایی، دقت نسبتاً بالا و خطای اندک آن قابل مشاهده است.

۴-۲ - نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها

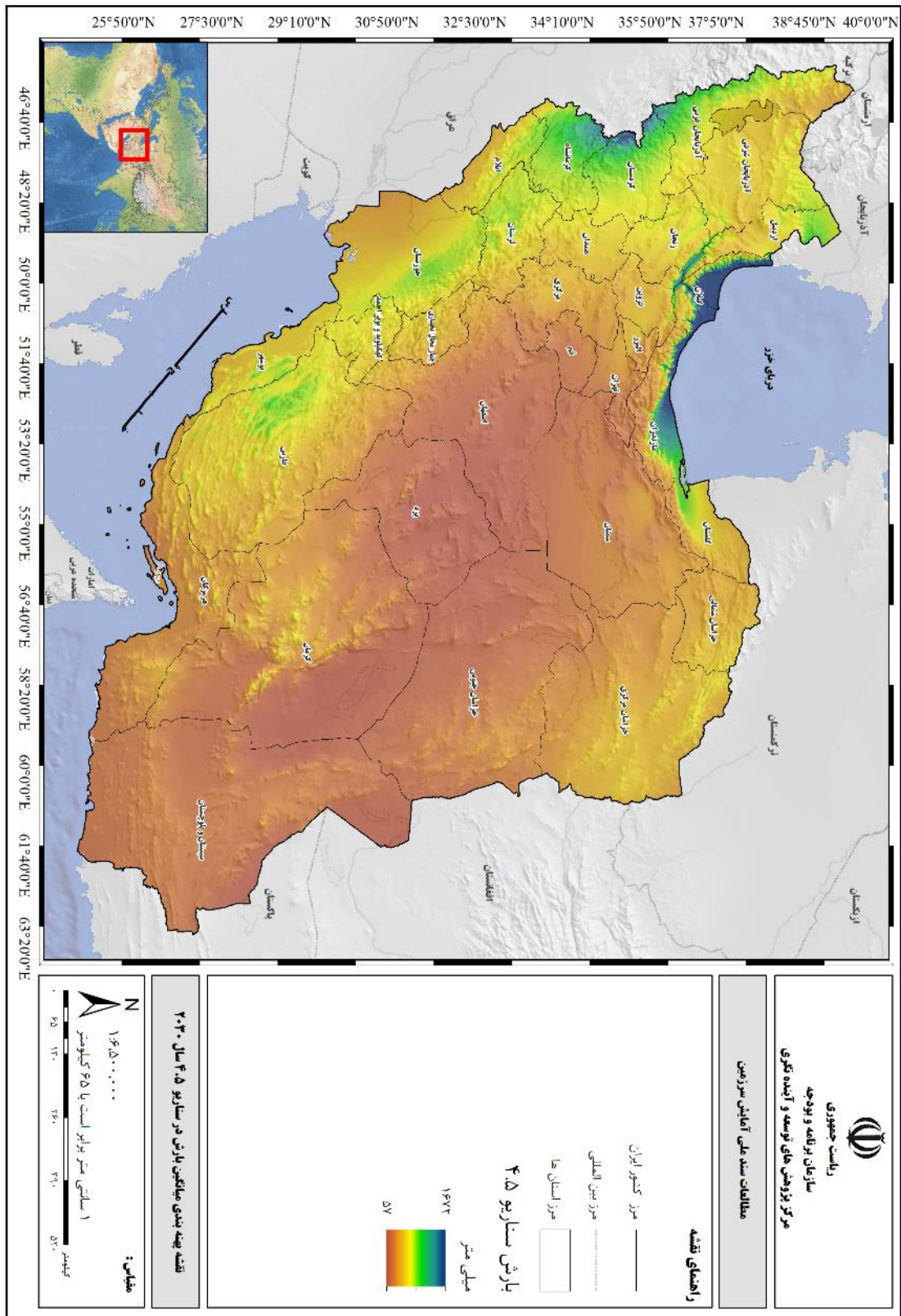
نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌های منتخب طی دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۸ با ضرایب R2، RMSE، نشان داد، مدل MRI-CGCM3 انطباق بالاتری با داده‌های مشاهداتی دارد و نسبت به سایر مدل‌ها از قابلیت بهتری برخوردار است؛ بنابراین، از مدل مذکور برای ارزیابی شرایط تغییر اقلیم در ایران طی دهه‌های آتی استفاده شد. نتایج مشاهدات در سناریو RCP4.5 و یا در واقع حد میانگین مورد بررسی قرار گرفتند.

نتایج احتمالی تغییر اقلیم نشان می‌دهد که در ناحیه مرکزی ایران بارش کاهش خواهد یافت، اما در برخی مناطق همچون جنوب سیستان و نیز استان هرمزگان، خراسان شمالی، نواحی مرکزی این کاهش محسوس است (نقشه‌های ۳-۸). از طرفی شاهد افزایش بارش در نواحی جنوب غربی کشور و در استان بوشهر و جنوب استان فارس، کهگیلویه و بویراحمد و نیز خوزستان خواهیم بود که این میزان در شمال کشور و استان گیلان نیز به همین منوال خواهد بود. نقشه‌های ۷-۱۰ بیانگر میزان تغییر در میزان بارش سناریوهای مدل منتخب است. افزایش بارش در برخی مناطق همچون استان گیلان موجب تغذیه بیش از حد سفره‌های آب در اراضی سیل‌خیز می‌شود (نقشه ۸).

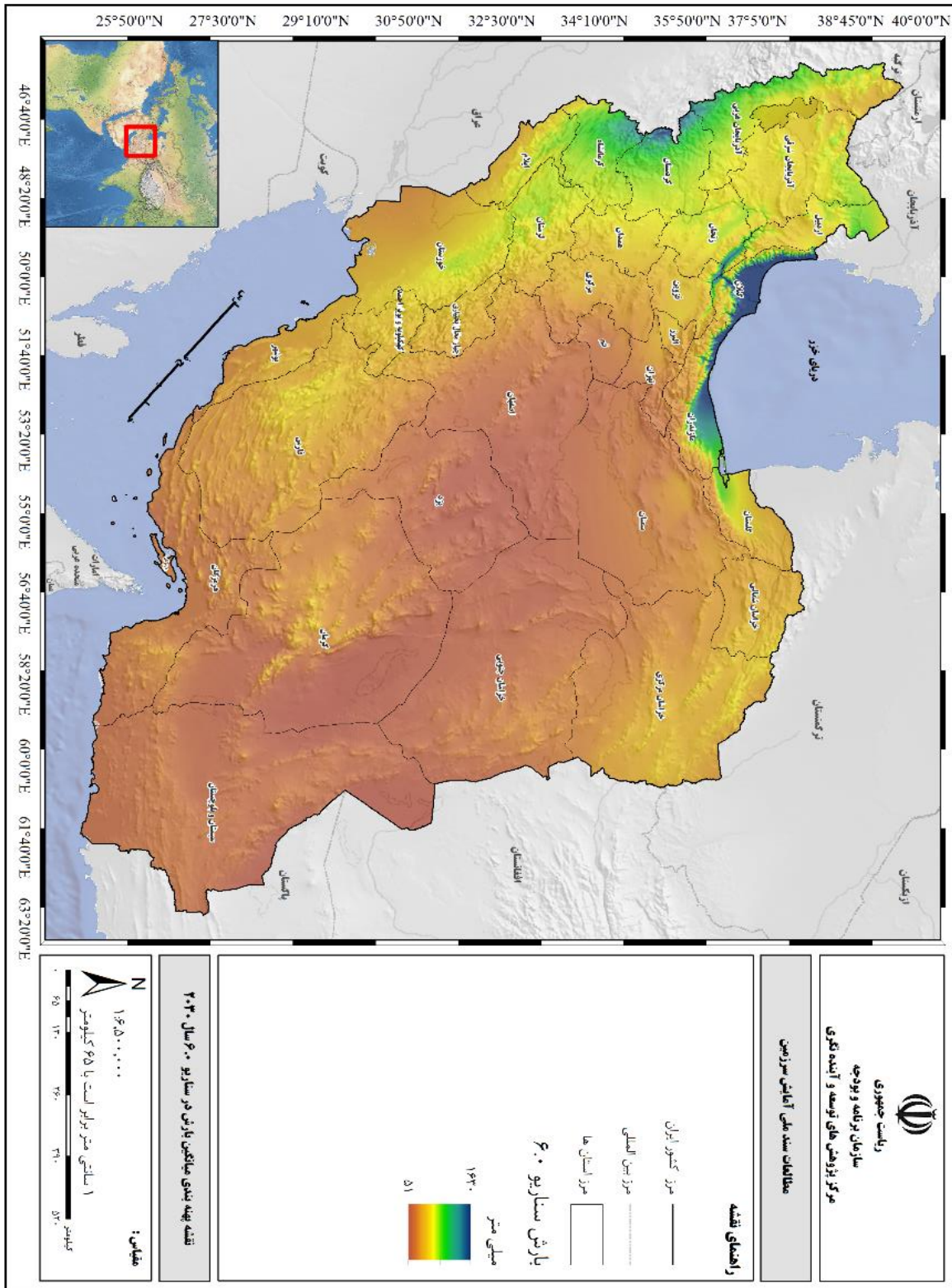


نقشه ۳: پراکنش فضایی بارش در کشور در سناریو ۲٫۶ مدل منتخب

تغییرات اقلیمی (جلد دوم - ارزیابی روند پیش‌گامی اثرات تغییر اقلیم در ایران)

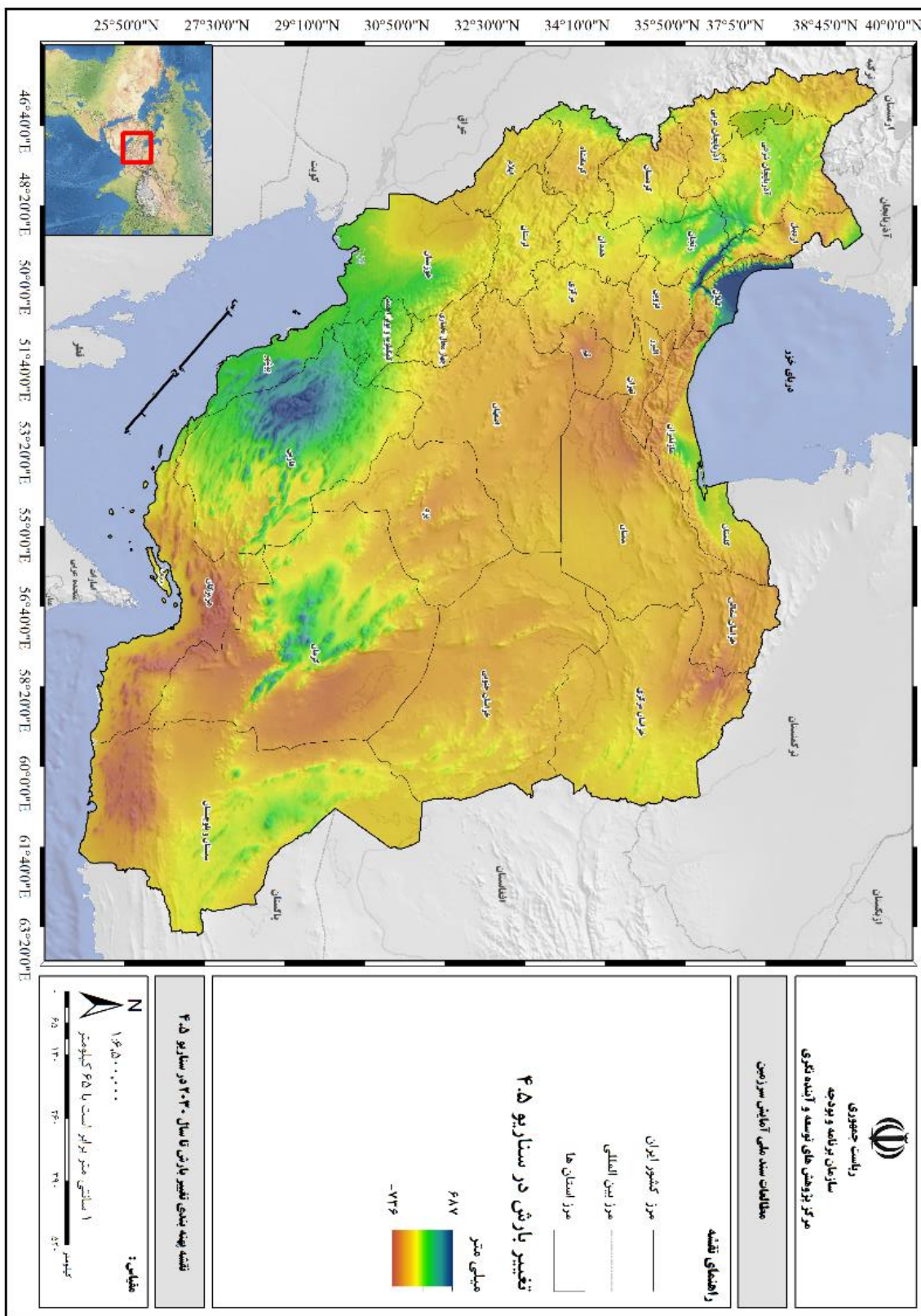


نقشه ۴: پراکنش فضایی بارش در کشور در سناریو ۴,۵ مدل منتخب

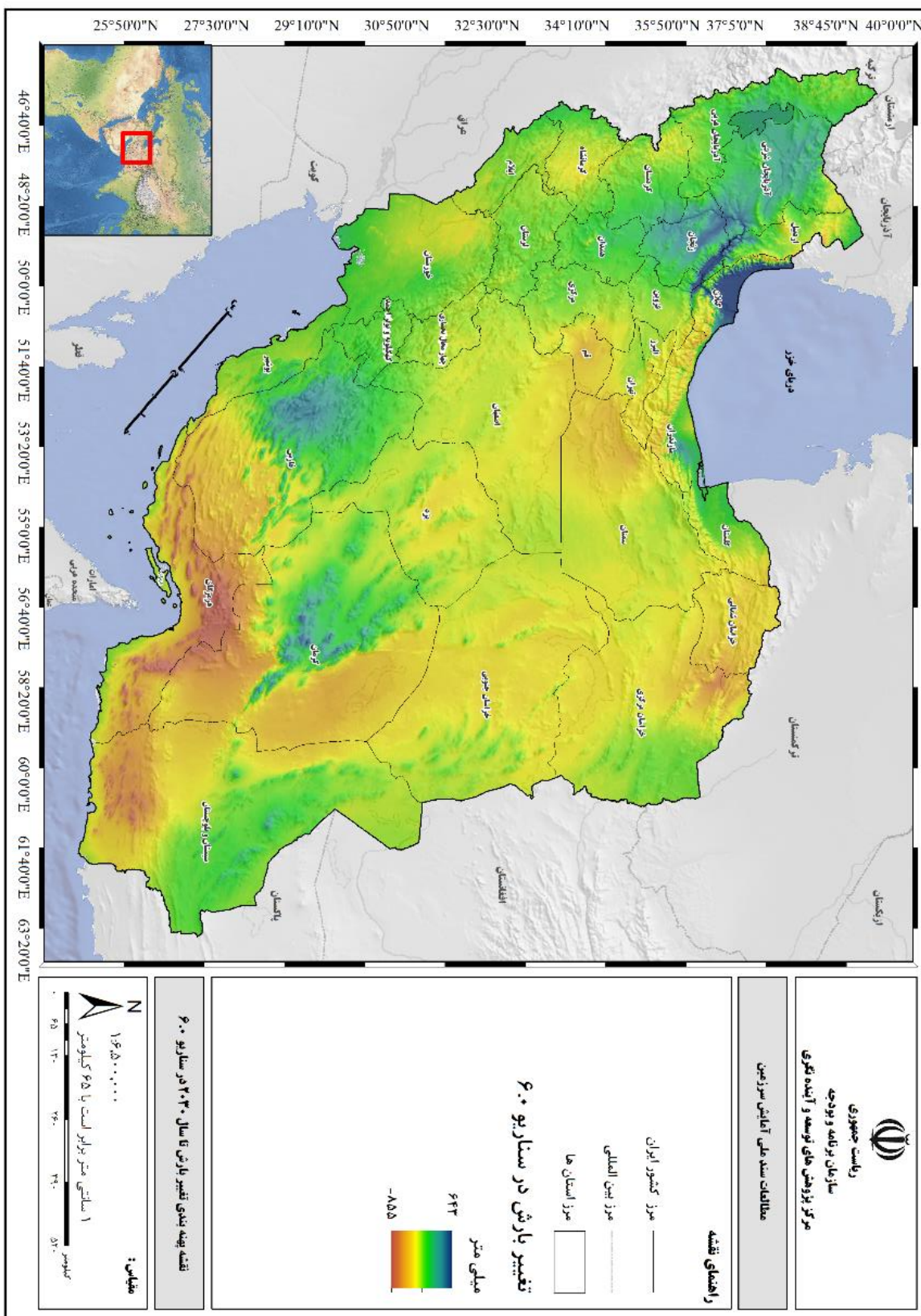


نقشه ۵: پراکنش فضایی بارش در کشور در سناریو ۶.۰ مدل منتخب

تغییرات اقلیمی (جلد دوم) - ارزیابی روند پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم در ایران

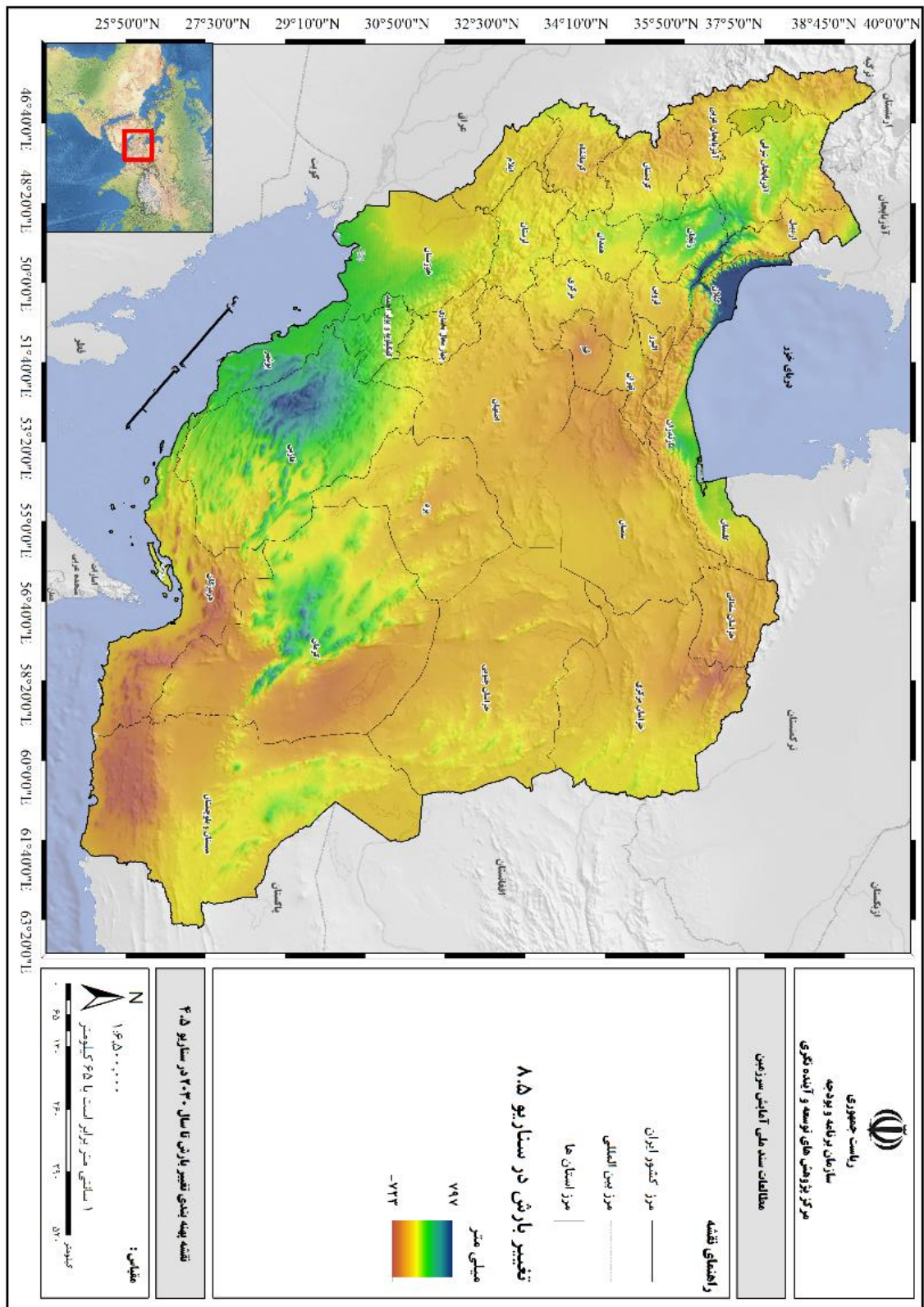


نقشه ۸: پراکنش فضایی تغییرات بارش در کشور در سناریو ۴.۵ مدل منتخب تا سال ۲۰۳۰



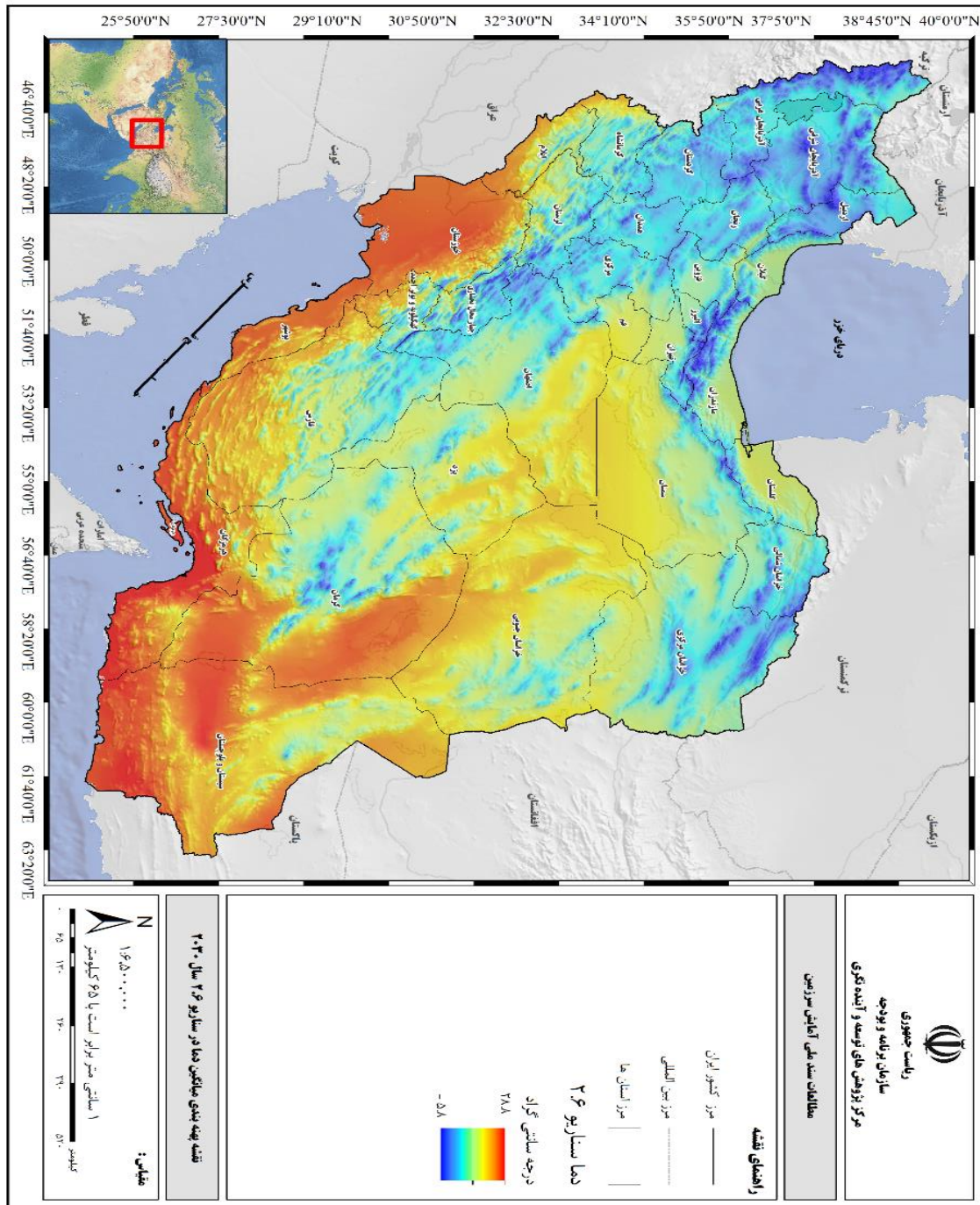
نقشه ۹: پراکنش فضایی تغییرات بارش در کشور در سناریو ۶.۰ مدل منتخب تا سال ۲۰۳۰

تغییرات اقلیمی (جلد دوم) - ارزیابی روند پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم در ایران

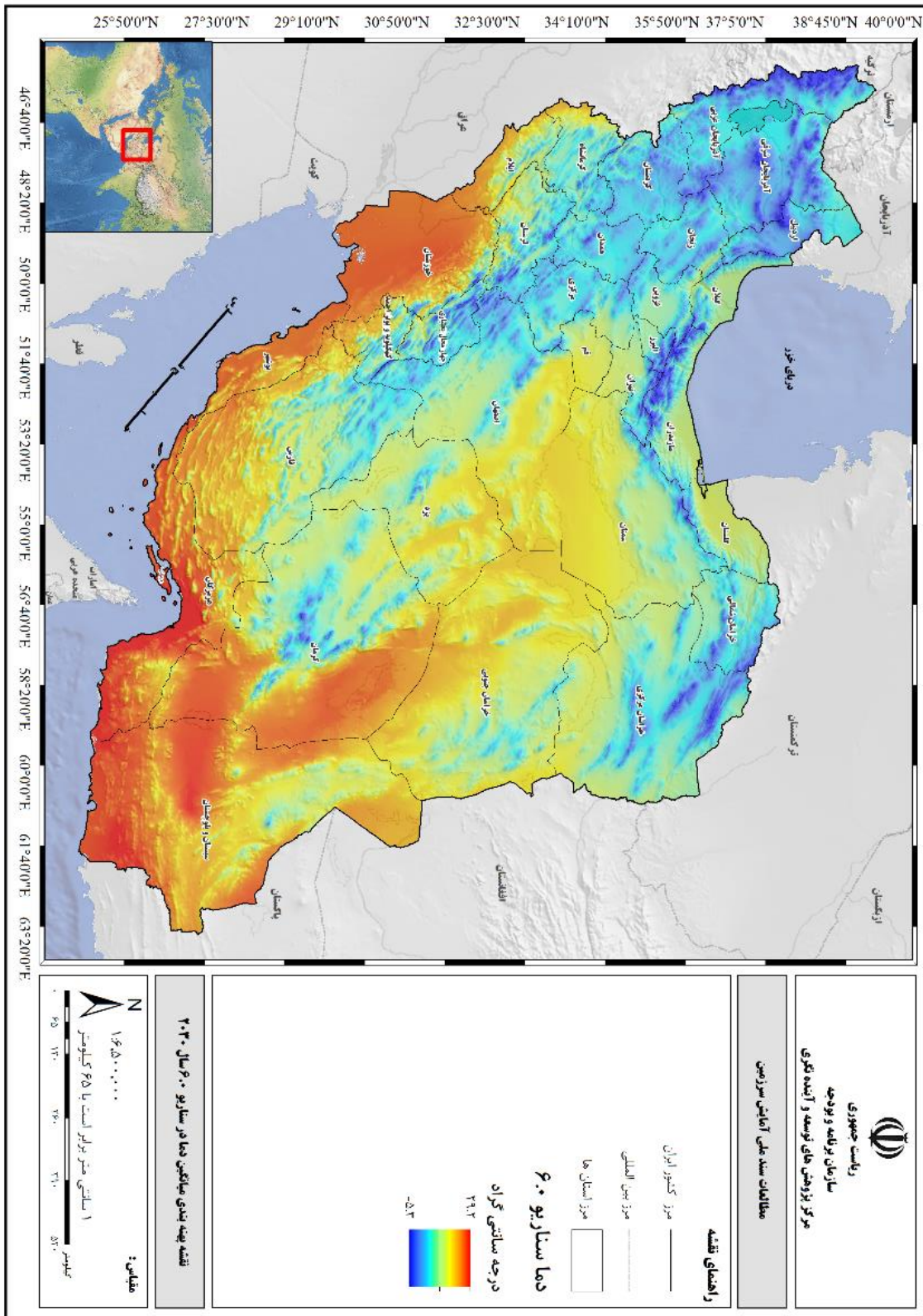


نقشه ۱۰: پراکنش فضایی تغییرات بارش در کشور در سناریو ۸.۵ مدل منتخب تا سال ۲۰۳۰

نتایج تغییر دما را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که ناحیه زاگرسی دچار افزایش دما خواهد شد؛ اما در استان‌های لرستان، ایلام و ناحیه جنوب استان فارس و کهگیلویه و بویراحمد کاهش دما را شاهد خواهیم بود. در رشته‌کوه البرز نیز شاهد افزایش دما به میزان قابل توجهی نیز خواهیم بود که این موضوع در نواحی استان‌های غربی و نیز دریاچه ارومیه مشهود است (نقشه‌های ۱۱-۱۴).

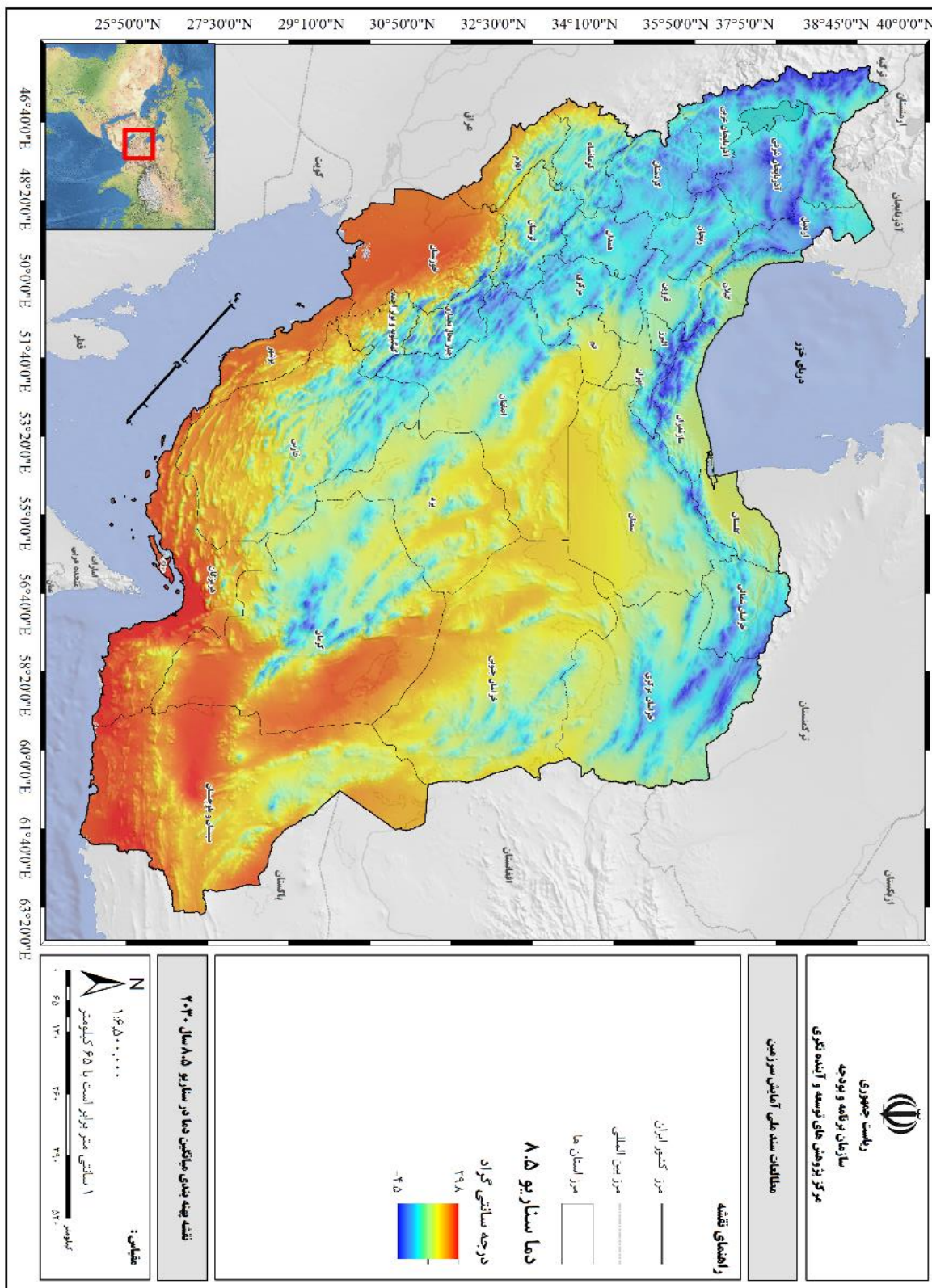


نقشه ۱۱: پراکنش فضایی دما در کشور در سناریو ۲۰۲۶ مدل منتخب



نقشه ۱۳: پراکنش فضایی دما در کشور در سناریو ۶،۰ مدل منتخب

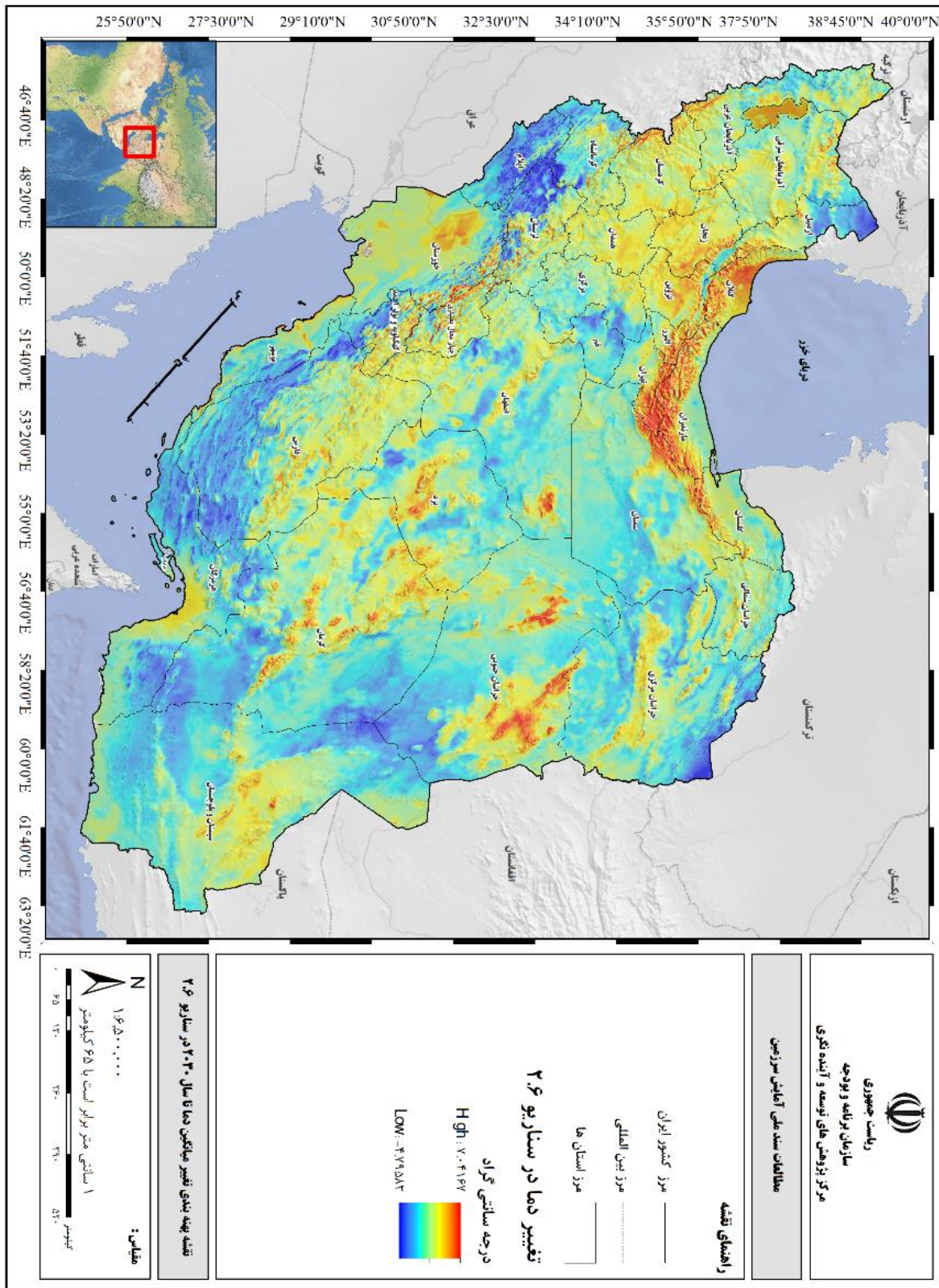
تغییرات اقلیمی (جلد دوم) - ارزیابی روند پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم در ایران



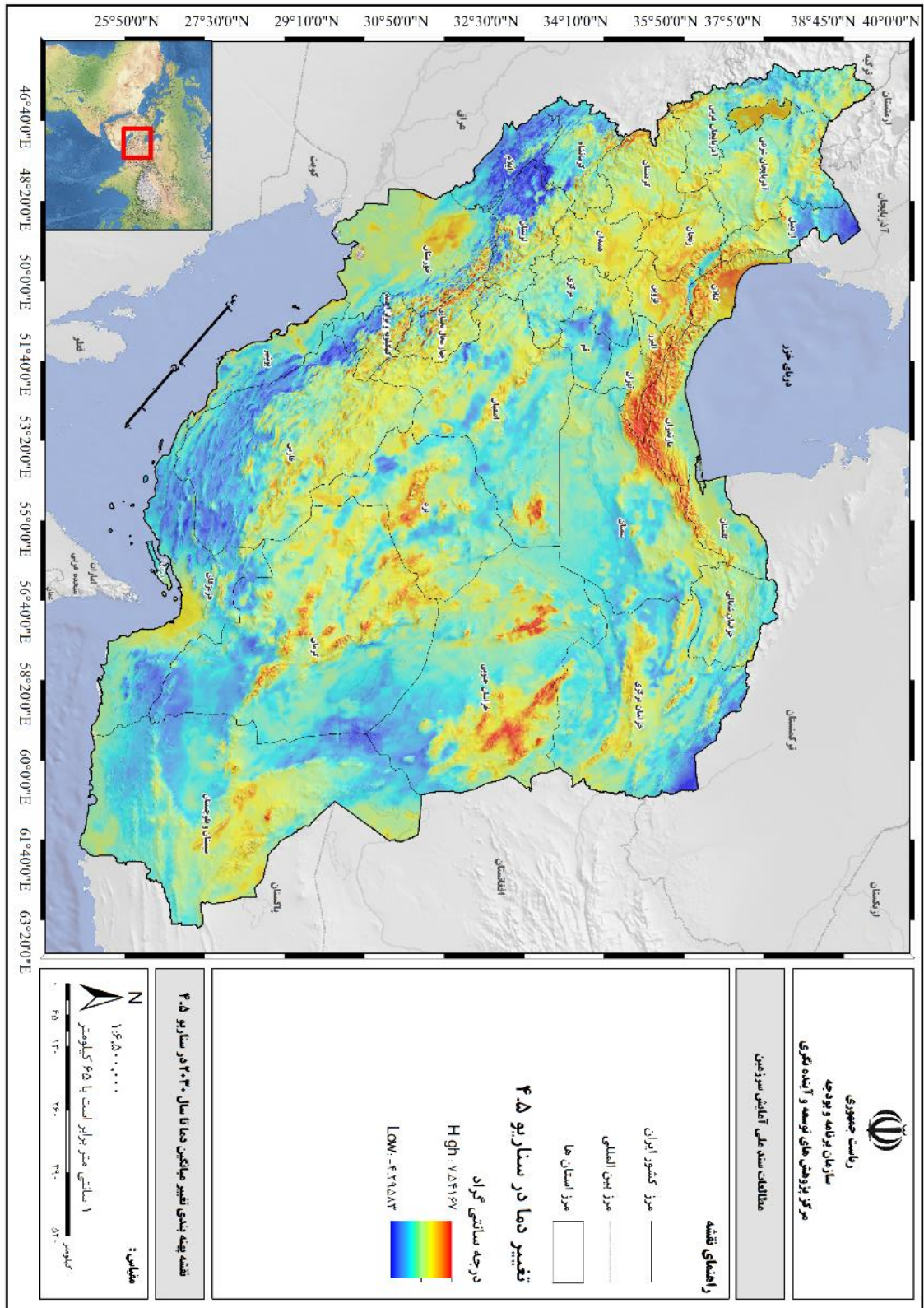
نقشه ۱۴: پراکنش فضایی دما در کشور در سناریو ۸.۵ مدل منتخب

بر همین اساس می‌توان بیان کرد شاهد تغییر رواناب در رشته‌کوه البرز خواهیم بود که با توجه به جنگل‌تراشی - های اخیر و نیز افزایش دما در این مناطق شاهد مخاطراتی همچون سیل و لغزش خواهیم بود. از طرفی در مناطقی همچون لرستان و خوزستان افزایش بارش را خواهیم داشت که باعث افزایش دبی خروجی و نیز با توجه به پوشش گیاهی افزایش فرسایش خاک و در نتیجه افزایش مخازن سدها و نیز تالاب‌ها را خواهیم داشت. از طرفی افزایش گرما در اقصی نقاط کشور منجر به مصرف سوخت و برق بیشتر برای وسایل سرمایشی خواهد شد. این تغییر اقلیم در مناطق دریایی باعث تخریب جزایر مرجانی در مناطق جنگلی تغییر پوشش گیاهی در اثر تغییر آستانه‌ها تحول و نیز تخریب زیستگاه‌های مرکز کشور به علت افزایش بیش از حد دما و تخریب حداقل آب موجود خواهیم بود. در ادامه برخی از راهبردهای مورد استفاده در بخش‌های مختلف ارائه می‌شود (نقشه‌های ۱۵-۱۷).

تغییرات اقلیمی (جلد دوم) - ارزیابی روند پیش‌گامی اثرات تغییر اقلیم در ایران

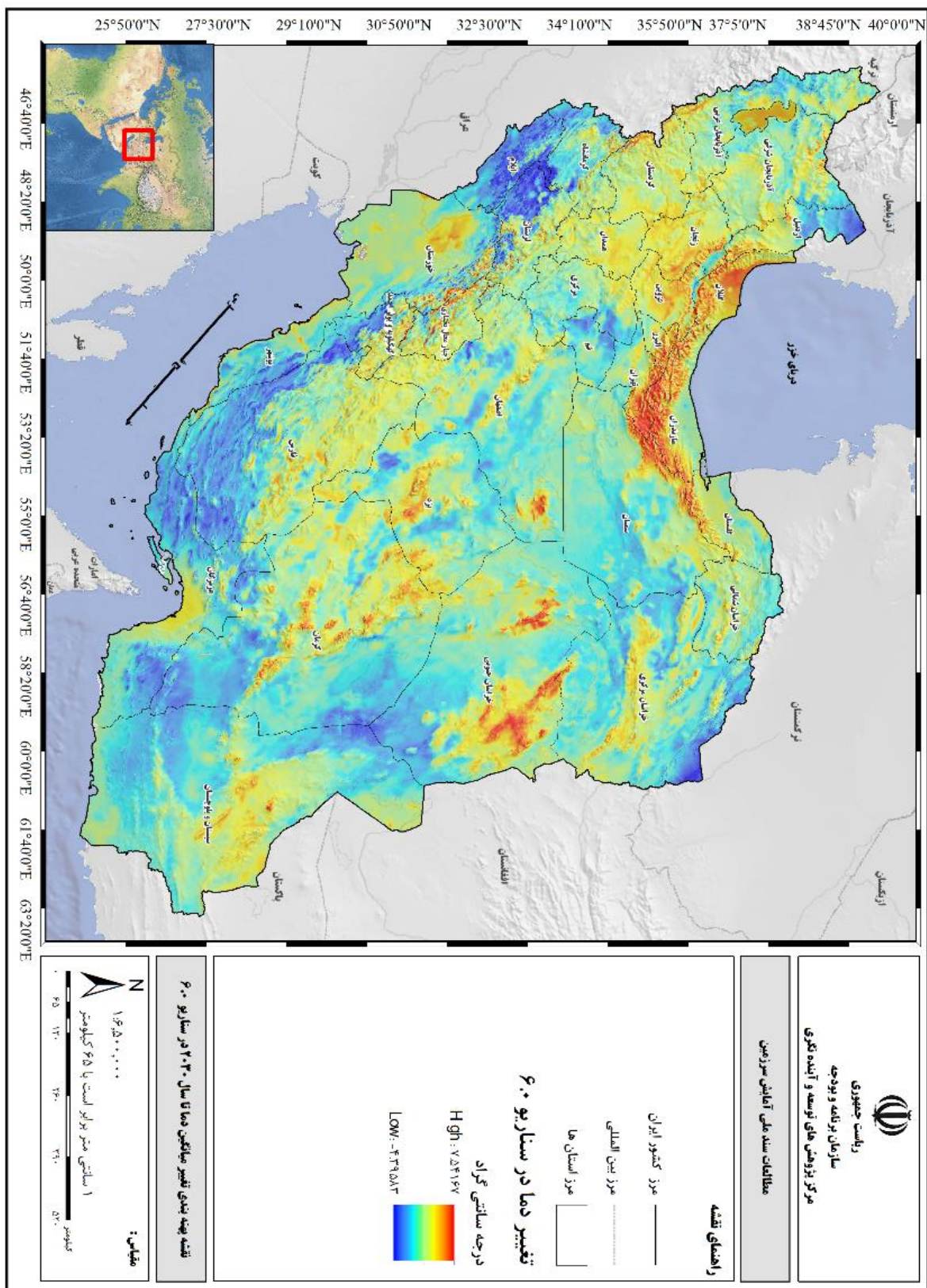


نقشه ۱۵: پراکنش فضایی تغییرات دما در کشور در سناریو ۲.۶ مدل منتخب تا سال ۲۰۳۰

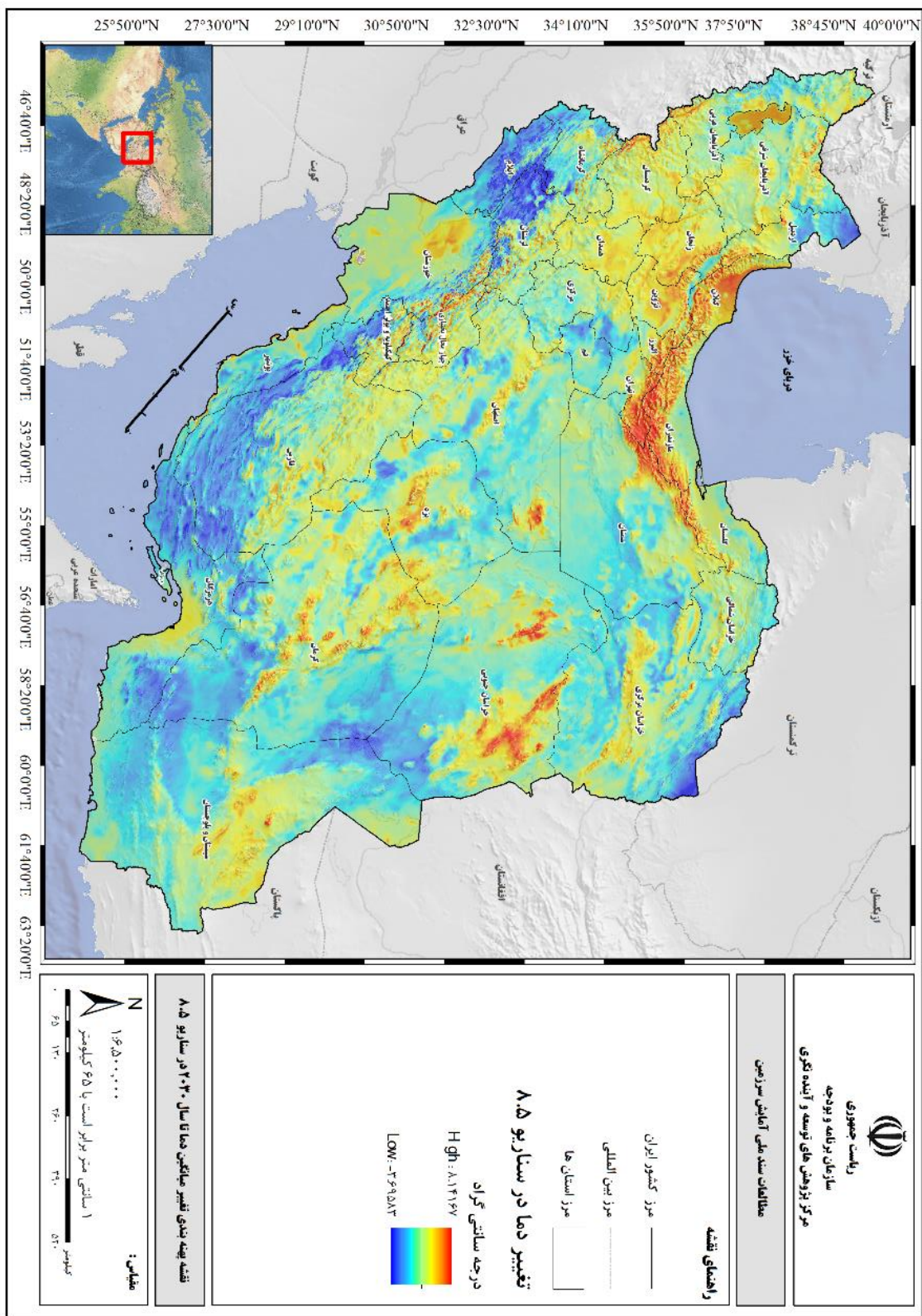


نقشه ۱۶: پراکنش فضایی تغییرات دما در کشور در سناریو ۴,۵ مدل منتخب تا سال ۲۰۳۰

تغییرات اقلیمی (جلد دوم) - ارزیابی روند پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم در ایران



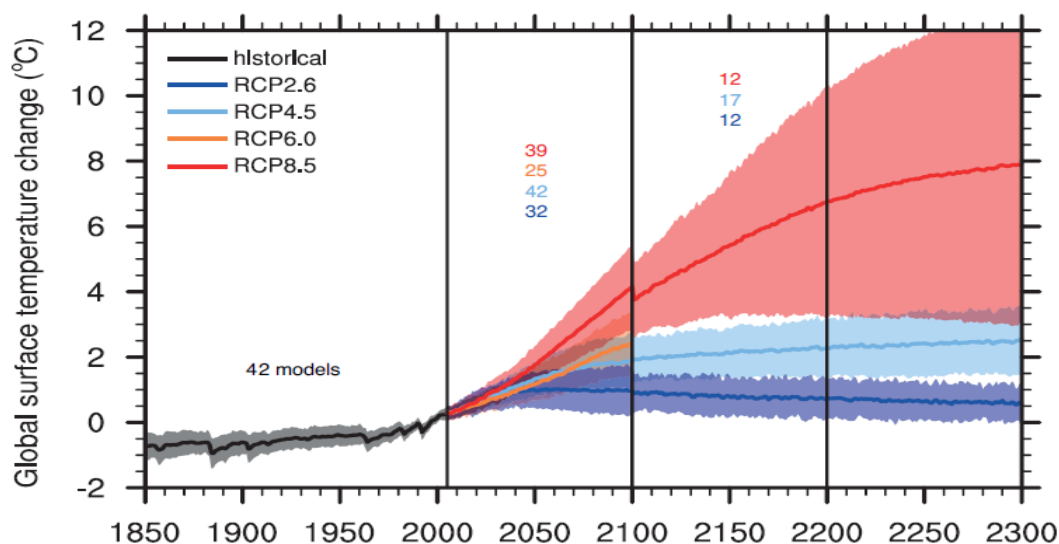
نقشه ۱۷: پراکنش فضایی تغییرات دما در کشور در سناریو ۶.۰ مدل منتخب تا سال ۲۰۳۰



نقشه ۱۸: پراکنش فضایی تغییرات دما در کشور در سناریو ۸.۵ مدل منتخب تا سال ۲۰۳۰

۵- بحث و نتیجه‌گیری و ارائه راهکارها

بر اساس نتایج مدل‌ها، دمای کره زمین بر اساس تمامی سناریوهای RCP تا انتهای قرن ۲۱ افزایش خواهد بود. اما در سناریوی RCP2.6 (که در آن نقش معاهدات بین‌المللی در کاهش گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفته شده است) با وجود افزایش دمای کره زمین تا انتهای قرن ۲۱، این افزایش کمتر از میزان افزایش خطرناک (افزایش ۲ درجه سلسیوس نسبت به دوره ۱۸۵۰-۱۹۰۰) برای دمای کره زمین است که نقش معاهدات بین‌المللی در کاهش گازهای گلخانه‌ای را نشان می‌دهد. این در حالی است که در بقیه سناریوها (RCP4.5، RCP6، RCP8.5) مقادیر دمای میانگین کره زمین نسبت به دوره ۱۸۵۰-۱۹۰۰ بیش از ۲ درجه افزایش یافته و حتی در سناریوی RCP8.5 این افزایش در انتهای قرن ۲۱ مقدار ۴ درجه خواهد بود. افزایش دما تا سال ۲۲۰۰ و ۲۳۰۰ در سناریوهای RCP8.5 تا بیش از ۶ و تا ۸ درجه افزایش خواهد یافت. شکل ۱ سری زمانی تغییرات دمای کره زمین را تا سال ۲۳۰۰ میلادی تحت سناریوهای مختلف نسبت به میانگین دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۵ نشان می‌دهد. در این شکل در هر قسمت تعداد مدل‌های به کار رفته برای شبیه‌سازی دما نشان داده شده است. همچنین از سال ۲۱۰۰ به بعد خروجی تنها دو مدل AOGCM-AR5 تحت RCP6 موجود بوده که در شکل نشان داده نشده است.



شکل ۱: تغییرات دمای میانگین کره زمین تا سال ۲۳۰۰ میلادی نسبت به دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۵

{بر اساس جدیدترین مدل‌های AOGCM-AR5 تحت سناریوهای مختلف RCP (منطقه هاشور خورده محدود ۵ تا ۹۵ درصد اطمینان مدل‌ها و خط وسط میانگین بین شبیه‌سازی‌های تمامی مدل‌ها است)}

شکل ۲ مقادیر تغییرات دمای کره زمین در دوره‌های آتی بر اساس سناریوهای مختلف RCP را نسبت به دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۵ نشان می‌دهد (لازم به ذکر است به منظور تبدیل تغییرات دمای نسبت به دوره ۱۸۵۰-۱۹۰۰ مقدار ۰/۶۱ باید به مقادیر جدول اضافه کرد. این در حالی است که برای تبدیل به دوره پایه ۱۹۶۱-۱۹۹۰ مقدار ۰/۳ و برای تبدیل به دوره پایه ۱۹۸۰-۱۹۹۹ مقدار ۰/۱۱ باید اضافه شود). نتایج جدول مذکور بر اساس سناریوی RCP2.6 در هیچ دوره‌ای در آینده (تا سال ۲۳۰۰) دمای کره زمین بیش از ۲ درجه نسبت به دوره ۱۸۵۰-۱۹۰۰ افزایش نخواهد یافت. این در حالی است که بر اساس سناریوی RCP4.5 و RCP6.0 در دوره میانی قرن ۲۱ (۲۰۴۶-۲۰۶۵) افزایش دمای کره زمین به آستانه بحرانی ۲ درجه افزایش نسبت به دوره ۱۸۵۰-۱۹۰۰ خواهد رسید. بر اساس نتایج این جدول، میزان تغییرات دما در کره زمین یکسان نبوده و بیشترین تغییرات دما به ترتیب مربوط به قطب شمال، قسمت خاکی زمین، مناطق استوایی، اقیانوس‌ها و قطب جنوب است.

	RCP2.6 (ΔT in $^{\circ}C$)	RCP4.5 (ΔT in $^{\circ}C$)	RCP6.0 (ΔT in $^{\circ}C$)	RCP8.5 (ΔT in $^{\circ}C$)
Global: 2046-2065	1.0 ± 0.3 (0.4, 1.6)	1.4 ± 0.3 (0.9, 2.0)	1.3 ± 0.3 (0.8, 1.8)	2.0 ± 0.4 (1.4, 2.6)
2081-2100	1.0 ± 0.4 (0.3, 1.7)	1.8 ± 0.5 (1.1, 2.6)	2.2 ± 0.5 (1.4, 3.1)	3.7 ± 0.7 (2.6, 4.8)
2181-2200	0.7 ± 0.4 (0.1, 1.3)	2.3 ± 0.5 (1.4, 3.1)	3.7 ± 0.7 (-, -)	6.5 ± 2.0 (3.3, 9.8)
2281-2300	0.6 ± 0.3 (0.0, 1.2)	2.5 ± 0.6 (1.5, 3.5)	4.2 ± 1.0 (-, -)	7.8 ± 2.9 (3.0, 12.6)
Land: 2081-2100	1.2 ± 0.6 (0.3, 2.2)	2.4 ± 0.6 (1.3, 3.4)	3.0 ± 0.7 (1.8, 4.1)	4.8 ± 0.9 (3.4, 6.2)
Ocean: 2081-2100	0.8 ± 0.4 (0.2, 1.4)	1.5 ± 0.4 (0.9, 2.2)	1.9 ± 0.4 (1.1, 2.6)	3.1 ± 0.6 (2.1, 4.0)
Tropics: 2081-2100	0.9 ± 0.3 (0.3, 1.4)	1.6 ± 0.4 (0.9, 2.3)	2.0 ± 0.4 (1.3, 2.7)	3.3 ± 0.6 (2.2, 4.4)
Polar: Arctic: 2081-2100	2.2 ± 1.7 (-0.5, 5.0)	4.2 ± 1.6 (1.6, 6.9)	5.2 ± 1.9 (2.1, 8.3)	8.3 ± 1.9 (5.2, 11.4)
Polar: Antarctic: 2081-2100	0.8 ± 0.6 (-0.2, 1.8)	1.5 ± 0.7 (0.3, 2.7)	1.7 ± 0.9 (0.2, 3.2)	3.1 ± 1.2 (1.1, 5.1)

شکل ۲: تغییرات دمای میانگین کره زمین در سال‌های آتی (تا سال ۲۳۰۰) نسبت به دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۵

اقلیم کره زمین در طول تاریخ همواره در حال تغییر بوده است که با شروع انقلاب صنعتی، نقش بشر در تغییرات اقلیمی افزایش پیدا کرد. این امر به طور عمده به علت افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی، شهرنشینی، جنگل‌زدایی و بیابان‌زایی است (Cutforth et al., 1999). تغییر جنگل‌ها و مراتع به اراضی کشاورزی امروزه به یکی از نگرانی‌های قابل توجه در سطح دنیا در زمینه تخریب محیط‌زیست و تغییر اقلیم جهانی تبدیل شده است. عوامل مختلفی باعث برهم خوردن شرایط حاکم بر اجزاء مختلف سیستم اقلیم کره زمین می‌شود که می‌تواند تأثیراتی را بر اجزاء دیگر بگذارد. در بین این عوامل تنها عاملی که به صورت غیرطبیعی بر اقلیم کره زمین تأثیر می‌گذارد، افزایش گازهای گلخانه‌ای است (Gregory et al., 2007). تغییرات اقلیمی آینده به شدت گرمایش جهانی بستگی داشته و پیش‌بینی دمای آینده زمین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با این‌که پیش‌بینی‌های موجود در مورد میزان افزایش دما در قرن حاضر بسیار متنوع است، ولی در تمامی برآوردها، بالا رفتن دما قطعی می‌باشد و برخی از محققان افزایش دمای کره زمین را بین ۱/۷ تا ۴/۹ درجه سلسیوس تا

پایان قرن جاری پیش‌بینی کرده‌اند (Miller, Bashford, & Strem, 2001). برای ده‌ها سال، بیشتر تحلیل‌ها در مورد تغییرات اقلیمی درازمدت جهانی با استفاده از داده‌های دما و بارش مشاهداتی بر تغییرات در مقادیر میانگین متمرکز شده است (Jones & Moberg, 2003).

جمهوری اسلامی ایران با مصرف بی‌رویه انرژی جزء ده کشور اول انتشاردهنده گازهای گلخانه‌ای است که این موضوع تأثیرات و پیامدهای متعدد هم در حوزه ملی و بین‌المللی برای کشور به ارمغان می‌آورد. با وجود قوانین بالادستی در کشور از جمله سیاست‌های اصلاح الگوی مصرف انرژی ابلاغی مقام معظم رهبری، سیاست‌های زیست‌محیطی ابلاغی مقام معظم رهبری، سیاست‌های پیشگیری از سوانح و بلایای طبیعی که در هر یک از آنها به وضوح به پدیده تغییر اقلیم، پیامدهای آن، اقتصاد کم‌کربن و کاهش مصرف انرژی اشاره شده است تاکنون عزم ملی برای رویارویی با این پدیده صورت نگرفته است. در حال حاضر کشور ما با معضلات مختلفی از جمله کاهش منابع آب، امنیت غذایی و محصولات کشاورزی، خشکسالی، گرد و غبار دست به گریبان است و این مهم، توجه ویژه به مسئله تغییر اقلیم در کلیه طرح‌های کلان ملی و توسعه‌ای کشور را می‌طلبد. از این‌رو راهکارهای زیر به عنوان سازگاری بخش‌های مختلف تغییر اقلیم معرفی می‌شود. درنهایت با توجه به شرایط، آثار و پیامدهای تغییرات اقلیم، ضروری است راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم مورد توجه ویژه قرار گیرد و جایگاه قانونی برای آن تعیین شود. لذا با نگاه ویژه نسبت به معضلات پیش روی کشور در این خصوص پیشنهاد می‌گردد لایحه مدیریت تغییرات اقلیمی تهیه و به تصویب مراجع ذی‌صلاح برسد.

جدول ۳: راهکارهای پیشنهادی جهت به کار بستن در اهداف، سیاست‌ها و راهبردهای سند ملی آمایش سرزمین

ردیف	پیامدهای تغییر اقلیم	راهکارهای پیشنهادی
۱	آب و فرسایش	<ul style="list-style-type: none"> - بررسی و مدل‌سازی تولید آب در مناطق مختلف و تعیین سازوکارهای مناسب با هر منطقه - لایروبی و تخلیه آبراه‌ها در مناطق پربارش پیش‌بینی شده - آبخیزداری و جنگل‌کاری در مناطق مستعد سیل و لغزش - تقویت ساختار مدیریت بخشی و نهادینه‌سازی همکاری فرابخشی مدیریت آب کشور - ارتقاء آگاهی، دانش فنی و فرهنگ سازگاری با پدیده تغییر اقلیم - مدیریت پایدار منابع تأمین (عرضه) و تقاضای (مصرف) آب با هدف ایجاد تعادل بین منابع و مصارف آب و ارتقای سطح سازگاری با تغییر اقلیم توسعه
۲	کشاورزی و امنیت غذایی	<ul style="list-style-type: none"> - مدیریت آب در بخش کشاورزی مناطق کم بارش - بازنگری و توسعه سیاست‌گذاری‌های کلان بخش کشاورزی با رویکرد به هم پیوستگی و سازگاری با تغییر اقلیم - توانمندسازی (فنی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی) سازگار با اثرات تغییر اقلیم - افزایش تعاملات بین‌المللی و کسب تجارب بین‌المللی - ظرفیت‌سازی و سیاست‌گذاری و سازگاری در ترویج و استفاده از گیاهان زراعی مقاوم - برنامه‌ریزی در راستای توسعه سازگاری محور زراعت و باغبانی - ظرفیت‌سازی و سیاست‌گذاری‌های سازگاری

راهکارهای پیشنهادی	پیامدهای تغییر اقلیم	ردیف
<ul style="list-style-type: none"> - حفاظت و ارتقاء ظرفیت‌های بومی دامپروری با توجه به توان طبیعی سرزمین - ارتقاء بهره‌وری در ساختارهای تولید دامی - مدیریت ذخایر آبزیان (دریای خزر، خلیج فارس، دریای عمان و آب‌های شیرین) - مدیریت آبی‌پروری در مناطق کم بارش 		
<ul style="list-style-type: none"> - مدیریت جنگل و تغییر کاربری اراضی - توسعه منطقه‌ای و روستایی اقلیم محور - استقرار نظام مدیریتی سازگار با تغییر اقلیم - ایجاد نظام اقدامات جبرانی و حمایتی - توسعه اقدامات تحقیقاتی، ترویجی، فرهنگی، آموزش عمومی و تربیت نیروی انسانی - توسعه همکاری‌های منطقه‌ای و بین‌المللی - مدیریت کربن در بخش پسماند و فاضلاب 	محیط‌زیست و منابع طبیعی	۳
<ul style="list-style-type: none"> - ارتقاء نظام سلامت و تاب‌آوری به منظور مقابله با اثرات ناشی از تغییر اقلیم - بررسی بیماری‌های جدید در اثر تغییر اقلیم - ارتقاء دانش تخصصی و فرهنگ عمومی سازگاری در بخش سلامت - توسعه همکاری‌های بین‌المللی - ترویج و مدیریت بهداشت آب در مناطق خشک تر 	بهداشت	۴
<ul style="list-style-type: none"> - بررسی تغییر مصرف سوخت و پایش تغییرات آن - معرفی انرژی‌های نو در مناطق با افزایش دما - افزایش کارایی انرژی - افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد سوخت کشور - افزایش سهم انرژی‌های کم‌کربن در سبد سوخت کشور - اصلاح سیاست‌های قیمتی/ تشویقی/ تنبیهی به منظور افزایش کارایی انرژی و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر - استفاده از تکنولوژی‌های کم‌کربن در واحدهای فرایندی 	انرژی و فرایندهای صنعتی	۵
<ul style="list-style-type: none"> - بررسی تغییرات دمایی و مصرف انرژی ناشی از تغییرات اقلیمی - تدوین سناریوها در مناطقی که در اثر تغییر اقلیم خالی سکنه خواهند شد. - توسعه سکونتگاه‌های در مناطق مستعد اقلیمی 	تغییرات جمعیتی و امنیت ملی	۶

منابع

- بری، راجر گراهام و آیلین هال مک‌کیم (۱۳۹۴). مبانی سامانه اقلیمی زمین، کرمانشاه: دانشگاه رازی کرمانشاه.
- توفیق، فیروز (۱۳۸۴). آمایش سرزمین تجربه جهانی و انطباق آن با وضع ایران، تهران: وزارت مسکن و شهرسازی، مرکز مطالعات و تحقیقات شهرسازی و معماری ایران.
- دولابیان، شهاب (۱۳۹۶). بررسی اثر تغییر اقلیم بر بارش و دمای مناطق مختلف کشور ایران بر اساس سناریوهای RCP پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- ذوالفقاری، حسن، حمید رحیمی، روح‌اوجی (۱۳۹۶). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر درجه روزهای گرمایشی و سرمایشی ایران. جغرافیا و پایداری محیط. سال هفتم، شماره ۱.
- شمسی‌پور، علی‌اکبر (۱۳۹۲). مدل‌سازی آب و هوایی: نظریه و روش. تهران: مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه تهران.
- عزیزی، قاسم (۱۳۸۳). تغییر اقلیم. تهران: قومس.
- فرج‌زاده اصل، منوچهر، محمد احمدی، هوشنگ قائمی و ایمان باباییان (۱۳۸۸). طراحی مدل تجربی پتانسیل بارش‌زایی سیستم‌های سینوپتیک. برنامه‌ریزی و آمایش فضا، پیاپی ۶۲.
- مؤمنی فراهانی، فرشید (۱۳۸۳). اثر گلخانه‌ای و نقش آن در گرمایش جهانی. تهویه مطبوع، شماره ۲۳، ۹۹-۹۶.
- Easterling, W. E. (2007). Climate change and the adequacy of food and timber in the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol.104, No.50, 19679-19679.
- Griggs, D. J., & Noguer, M. (2002). Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Weather*, Vol.57, No.8, 267-269.
- Houghton, J. T., Ding, Y. D. J. G., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., ... & Johnson, C. A. (2001). *Climate change 2001: the scientific basis*. The Press Syndicate of the University of Cambridge.
- Jeffrey, S., Rotstayn, L., Collier, M., Dravitzki, S., Hamalainen, C., Moeseneder, C., ... & Syktus, J. (2013). Australia's CMIP5 submission using the CSIRO-Mk3. 6 model. *Aust. Meteor. Oceanogr. J*, Vol.63, No.1, 1-14.
- Jones, P. D., & Moberg, A. (2003). Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001. *Journal of climate*, Vol.16, No.2, 206-223.
- Labriet, M., Kanudia, A., & Loulou, R. (2012). Climate mitigation under an uncertain technology future: A TIAM-World analysis. *Energy Economics*, Vol.34, S366-S377.
- Lee, J. Y., & Wang, B. (2014). Future change of global monsoon in the CMIP5. *Climate Dynamics*, Vol.42, No.1-2, 101-119.
- Linnerud, K., Mideksa, T. K., & Eskeland, G. S. (2011). The impact of climate change on nuclear power supply. *The Energy Journal*, Vol.32, No.1.
- McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J., & White, K. S. (Eds.). (2001). *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third*

- assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Vol. 2). Cambridge University Press.
- Miller, N. L., Bashford, K. E., & Strem, E. (2001). Climate change sensitivity study of California hydrology: a report to the California Energy Commission. *Lawrence Berkeley National Laboratory Technical Report*, (49110).
- National Research Council. (2001). *Climate change science: An analysis of some key questions*. National Academies Press.
- Parry, M., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Fischer, G., & Livermore, M. (1999). Climate change and world food security: a new assessment. *Global environmental change*, Vol.9, S51-S67.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., ... & Rafaj, P. (2011). RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic change*, Vol.109, No.1, 33-57.
- Sperber, K. R., Annamalai, H., Kang, I. S., Kitoh, A., Moise, A., Turner, A., ... & Zhou, T. (2013). The Asian summer monsoon: an intercomparison of CMIP5 vs. CMIP3 simulations of the late 20th century. *Climate dynamics*, Vol.41, No.9-10, 2711-2744.
- Stocker, T. (Ed.). (2014). *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge university press.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American meteorological Society*, Vol.93, No.4, 485-498.
- 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*, Vol.109, No.1, 5-31.
- Wang, X., Chen, D., & Ren, Z. (2010). Assessment of climate change impact on residential building heating and cooling energy requirement in Australia. *Building and environment*, Vol.45, No.7, 1663-1682.
- Yukimoto, S., Adachi, Y., Hosaka, M., Sakami, T., Yoshimura, H., Hirabara, M., ... & Kitoh, A. (2012). A new global climate model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3—Model description and basic performance—. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 90, 23-64.

مجموعه مطالعات پشتیبان تدوین سند ملی آمایش سرزمین

شماره	عنوان
۱	تلفیق مطالعات سند ملی آمایش سرزمین
۲	پیوست ۱: ساختار، تعاریف و انتظارات از سند ملی آمایش سرزمین
۳	پیوست ۲: مدل و فرآیند تلفیق و فرآیند اجرایی مطالعات سند ملی آمایش سرزمین
۴	پیوست ۳: الگوی استقرار مطلوب فعالیت و زیرساخت‌ها
۵	پیوست ۴: حساسیت اکولوژیکی سرزمین و توازن بهره‌برداری از آن
۶	پیوست ۵: الگوی نظام سکونتگاهی شبکه‌ای چندسطحی - چندمرکزی - چندعملکردی در افق ۱۴۲۴
۷	بررسی تطبیقی برنامه‌ریزی فضایی (آمایش سرزمین) در کشورهای منتخب
۸	روند گذشته، وضعیت فعلی و آینده‌نگری جمعیت ایران تا افق ۱۴۲۵
۹	مطالعات ژئوپلیتیک
۱۰	ملاحظات پدافند غیرعامل، امنیتی و دفاعی
۱۱	اطلس نقشه‌های مخاطرات زمین‌شناختی
۱۲	ارزیابی توان اکولوژیکی
۱۳	تغییرات اقلیمی (جلد اول - ارزیابی تأثیرات تغییرات اقلیمی)
۱۴	تغییرات اقلیمی (جلد دوم - ارزیابی روند و پیش‌نگری اثرات تغییرات اقلیم در ایران)
۱۵	آینده پیش رو: کلان‌روندهای حوزه انرژی
۱۶	آینده پیش رو: انقلاب صنعتی چهارم و تحولات فناوری
۱۷	آینده پیش رو: چالش‌های حکمرانی
۱۸	آینده پیش رو: کلان‌روند گسترش شهرنشینی و شهرهای آینده
۱۹	آینده پیش رو؛ کلان‌روندهای منتخب برای ارزیابی توسعه منطقه‌ای ایران
۲۰	آینده پیش رو؛ تولید و اشتغال در افق ۱۴۲۴
۲۱	آینده‌نگاری موقعیت راهبردی ایران در منطقه و جهان؛ حکمرانی در فضای رقابت جهانی و چشم‌انداز آن
۲۲	آینده‌نگاری سرزمین (جلد اول - اهداف بنیادین و چشم‌انداز)
۲۳	آینده‌نگاری سرزمین (جلد دوم - سناریونگاری)
۲۴	مروری بر تحولات منطقه بندی فضایی و سیاسی در ایران
۲۵	ارزیابی تغییرات کاربری - پوشش اراضی ایران (۲۰۱۵-۱۹۹۳)
۲۶	محیط‌زیست و منابع طبیعی
۲۷	مطالعه بخش آب (جلد اول - تحلیل اسناد فرادست)
۲۸	مطالعه بخش آب (جلد دوم - تحلیل وضع موجود)
۲۹	مطالعه بخش آب (جلد سوم - برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری)
۳۰	اقتصاد کلان
۳۱	صنعت، معدن و بازرگانی (جلد اول - تحلیل اسناد فرادست)
۳۲	صنعت، معدن و بازرگانی (جلد دوم - صنعت و معدن)
۳۳	صنعت، معدن و بازرگانی (جلد سوم - بازرگانی)
۳۴	صنعت، معدن و بازرگانی (جلد چهارم - برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری)
۳۵	تدوین و تحلیل الگوی داده - ستانده به منظور شناسایی فعالیت‌های کلیدی وضع موجود استانی
۳۶	مطالعه بخش کشاورزی
۳۷	مطالعه بخش انرژی (جلد اول - تحلیل اسناد فرادست)

مطالعه بخش انرژی (جلد دوم- مطالعه وضع موجود)	۳۸
مطالعه بخش انرژی (جلد سوم- برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری)	۳۹
مطالعه بخش حمل و نقل (جلد اول- تحلیل اسناد فرادست)	۴۰
مطالعه بخش حمل و نقل (جلد دوم- مطالعه وضع موجود)	۴۱
مطالعه بخش حمل و نقل (جلد سوم- برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری)	۴۲
مطالعه بخش میراث فرهنگی و گردشگری	۴۳
توسعه در ترازوی فرهنگ	۴۴
بخش نظام سکونتگاهی (جلد اول- تحلیل اسناد فرادست)	۴۵
بخش نظام سکونتگاهی (جلد دوم- مطالعه وضع موجود)	۴۶
بخش نظام سکونتگاهی (جلد سوم- توصیف و تحلیل پیوندهای اصلی بین سکونتگاه‌ها)	۴۷
بخش نظام سکونتگاهی (جلد چهارم- برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری)	۴۸
مطالعه بخش فناوری اطلاعات و ارتباطات	۴۹
مطالعه بخش بهداشت و درمان	۵۰
مطالعه بخش علم و فناوری	۵۱
سرمایه اجتماعی	۵۲
اطلس نقشه‌های سند ملی آمایش سرزمین	۵۳
آمایش سرزمین؛ رویکردی در تحقق جهش تولید در ایران	۵۴