

چشم‌اندازی از مناطق اقلیمی ایران به روش کوپن-گایگر در سده بیست و یکم

طیب رضیئی^{*۱}

^۱استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۳/۰۹، تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۹/۱۳)

چکیده

در این پژوهش از میانگین دمای ماهانه CRU، میانگین بارش ماهانه GPCC در دوره‌های آماری ۱۹۵۱-۲۰۰۰ و داده‌های دما و بارش ماهانه شبیه‌سازی شده TYNSC2.03 در سده بیست و یکم میلادی (دوره ۲۰۰۱-۲۱۰۰) استفاده شده است. برای بررسی جابه‌جایی مناطق اقلیمی کشور تحت تأثیر تغییرات اقلیمی پیش‌بینی شده برای سده بیست و یکم، از میانگین (Ensemble) اجرای مدل‌های اقلیمی HadCM3، NCAR-PCM، CGCM2، CSIRO2 و ECHam4 برای چهار سناریو A2، B1، B2 و A1F1 استفاده شد. با استفاده از روش کوپن-گایگر، منطقه‌بندی اقلیمی ایران برای دوره‌های آماری ۱۹۵۱-۲۰۰۰، ۱۹۷۶-۲۰۰۰ (سده بیستم) و چهار دوره ۲۵ ساله ۲۰۰۱-۲۰۲۵، ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ (سده بیست یکم) انجام و با یکدیگر مقایسه گردید. مقایسه نقشه‌های اقلیمی دو دوره ۱۹۵۱-۲۰۰۰ و ۱۹۷۶-۲۰۰۰ نشان از جابه‌جایی گروه‌های اقلیمی در برخی از مناطق کشور (شمال غرب) دارد که در آن اقلیم برفی و معتدل جای خود را به اقلیم نیمه بیابانی سرد داده است. در مناطق مرکزی و شرقی کشور نیز اقلیم بیابانی سرد به اقلیم بیابانی گرم تبدیل شده است. نتایج به دست آمده از سناریوهای مختلف نیز نشان از گسترش اقلیم بیابانی گرم در ایران مرکزی و گرایش شدید شمال غرب ایران به سوی بیابانی شدن دارند. این جابه‌جایی‌ها در سناریو بدبینانه‌تر A1F1 به شکل گسترده‌تری صورت خواهد پذیرفت. بر اساس این سناریو در نیمه دوم سده بیست و یکم قلمرو اقلیم معتدل Csb در غرب ایران به کوچکترین سطح ممکن خواهد رسید و این اقلیم بشدت به سوی عرض‌های جغرافیایی شمالی‌تر و مرزهای غربی کشور پسروی خواهد کرد و جای خود را به اقلیم نیمه‌بیابانی سرد و یا اقلیم نیمه‌بیابانی گرم خواهد داد. در بخش‌های گسترده‌ای از منطقه کوهستانی غربی و شمال‌شرقی ایران نیز اقلیم نیمه‌بیابانی سرد جای خود را به اقلیم نیمه‌بیابانی گرم خواهد داد. این جابه‌جایی‌ها بویژه در دوره ۲۵ ساله پایانی سده بیست و یکم به صورت گسترده‌تری روی خواهد داد و در پایان این دوره اقلیم نیمه بیابانی گرم بر تمامی منطقه کوهستانی غربی و شمال شرق ایران چیره خواهد شد و اقلیم نیمه بیابانی سرد را به عرض‌های بالاتر از ۳۵ درجه جغرافیایی پس خواهد راند.

واژه‌های کلیدی: منطقه‌بندی اقلیمی، کوپن-گایگر، CRU، GPCC، TYNSC2.03، تغییر اقلیم، ایران

۱ مقدمه

سال‌هاست که از مدل‌های گردش کلی جو (GCMs) و مدل‌های جفت شده جوی-اقیانوسی (AOGCMs) برای مطالعه تغییرات اقلیمی استفاده می‌شود. میزان کارایی این مدل‌ها در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی مانند دمای هوا یا بارش نیز معمولاً با مقایسه نتایج مدل با داده‌های مشاهده‌ای انجام می‌شود. آینده‌نگاری و یا نمایش چشم‌اندازی (Projection) از شدت و توزیع مکانی تغییرات اقلیمی ناشی از فعالیتهای انسانی زمان کنونی در آینده و ارزیابی شدت احتمالی تأثیرات ناشی از این تغییرات بر روی محیط زیست جهانی در دهه‌های آینده از موضوعات اصلی پژوهشی در زمینه تغییرات اقلیمی است (دی‌کاسترو و همکاران، ۲۰۰۷). امروزه مدل‌های جهانی و منطقه‌ای بسیار زیادی در دسترس پژوهشگران اقلیم‌شناسی و هواشناسی قرار دارد که با استفاده از آنها می‌توان پاسخ اقلیم‌های منطقه‌ای و جهانی به فعالیتهای انسانی زمان حاضر و دهه‌های آینده را ارزیابی نمود. اولین مرحله در ارزیابی توانمندی یک مدل اقلیمی در بازتاباندن تغییرات اقلیمی احتمالی به دهه‌های آینده، ارزیابی میزان توانمندی مدل در بازآفرینی فرآیندهای مهم سامانه اقلیمی است. مقایسه آماری توزیع مکانی متغیرهای شبیه‌سازی شده به وسیله یک مدل با داده‌های واقعی، یکی از روش‌هایی است که بیشترین استفاده را در ارزیابی توانمندی مدل‌های اقلیمی دارد. کریستینسن و کوهری (۲۰۰۰) و اشبرگر و همکاران (۲۰۰۳) از این روش برای ارزیابی توانایی مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای (RCM) در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در مناطقی از اروپای شمالی استفاده کردند؛ اما استفاده از این روش نیازمند مقایسه سری زمانی کاملی از نقشه‌های تمامی متغیرهای شبیه‌سازی و مشاهده‌ای در طول دوره مورد بررسی است. استفاده ترکیبی از متغیرهای شبیه‌سازی شده به وسیله مدل‌های اقلیمی، جایگزین مناسبی است که با استفاده از آن می‌توان توانایی یک مدل

را در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی سنجید. به عنوان مثال، در صورت استفاده از یکی از روش‌های طبقه‌بندی اقلیمی می‌توان به طور همزمان کارایی مدل را در شبیه‌سازی متغیرهای دما و بارش ارزیابی کرد. استفاده از این روش، کار ارزیابی توانمندی مدل‌ها را ساده‌تر می‌کند. با استفاده از این روش می‌توان بزرگی نسبی و توزیع مکانی آشفتگی‌های اقلیمی را تحت تأثیر سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بهتر ارزیابی کرد. به عنوان مثال، در هر یک از سناریوهای تغییر اقلیم می‌توان اثر افزایش دمای هوا به همراه افزایش و یا کاهش بارش را به شکل تغییر در رژیم‌های اقلیمی و یا جابه‌جایی مناطق اقلیمی جستجو کرد.

تغییرات اقلیمی می‌تواند باعث افزایش و یا کاهش گستره یک منطقه اقلیمی و در نتیجه جابه‌جایی مناطق اقلیمی شود و تنش‌هایی را در جوامع گیاهی و جانوری آن مناطق پدید آورد (چن و چن ۲۰۱۳؛ وانگ و اورلند، ۲۰۰۴). با توجه به استفاده از ترکیب دو متغیر اقلیمی مهم دما و بارش در بسیاری از روش‌های طبقه‌بندی اقلیمی مانند روش کوپن (۱۹۳۶)، دانشمندان زیادی در سال‌های گذشته از این روش برای بررسی امکان جابه‌جایی مناطق اقلیمی بر اثر پدیده گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال، گوتر و کوترباخ (۱۹۹۰)، لومان و همکاران (۱۹۹۳)، فریدریش و همکاران (۲۰۰۱) و دی‌کاسترو و همکاران (۲۰۰۷) از روش طبقه‌بندی کوپن برای ارزیابی مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی گرمایش جهانی استفاده کردند. کلیدن و همکاران (۲۰۰۰) نیز با روش طبقه‌بندی کوپن و شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی اثر تغییرات پوشش گیاهی در اقلیم جهانی را بررسی و ارزیابی نمودند. دیاز و ایشد (۲۰۰۷) گستره اقلیمی توندرای آلپی منطقه کوهستانی غرب آمریکا را برای دوره‌های ۱۹۰۱-۱۹۳۰ و ۱۹۸۷-۲۰۰۶ مقایسه کردند و دریافتند که منطقه توندرای آلپی نسبت به گذشته در

حدود ۷۳ درصد کاهش یافته است. کیم و همکاران (۲۰۰۸) هم با مقایسه دو دوره ۱۹۵۱-۱۹۷۰ و ۱۹۸۱-۲۰۰۰ دریافتند که منطقه شمال چین به سوی اقلیمی خشکتر و گرمتر در حال تغییر است. پیل و همکاران (۲۰۰۱) نیز با روش طبقه‌بندی کوپن تغییرات زمانی رواناب سالانه در مقیاس قاره‌ای را ارزیابی نمودند. روبل و کوتک (۲۰۱۰) نیز با استفاده از داده‌های شبکه‌بندی شده دمای ماهانه CRU و بارش ماهانه GPCC، جابه‌جایی‌های مناطق اقلیمی جهان بر اثر تغییرات اقلیمی را بررسی نمودند. یینگ و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از داده‌های مدل RegCM3 و تحت سناریو A1B جابه‌جایی‌های احتمالی در مناطق اقلیمی چین (به روش کوپن) در قرن بیست و یکم را بررسی کردند و نشان دادند که مناطق اقلیمی چین جابه‌جایی‌های معنی‌داری را در آینده تجربه خواهند کرد که مهمترین آنها کاهش شدید مناطق اقلیمی سرد مانند توندرا و کاهش مناطق مرطوب جنب حاره‌ای است. چن و چن (۲۰۱۳) هم با استفاده از داده‌های شبکه‌بندی شده دانشگاه دلاور (Delaware) برای بازه زمانی ۱۹۰۱-۲۰۱۰ با روش طبقه‌بندی کوپن، تغییرات بلندمدت و تغییرپذیری کوتاه‌مدت اقلیمی در سطح جهان را بررسی نمودند. چان و همکاران (۲۰۱۶) نیز با استفاده از داده‌های شبکه‌بندی شده دانشگاه دلاور در دوره زمانی ۱۹۸۰-۱۹۹۹، کشور پهناور چین را به روش کوپن-گایگر منطقه‌بندی کردند و آثار تغییر اقلیم در جابه‌جایی مناطق اقلیمی منطقه مورد مطالعه را بررسی و ارزیابی نمودند. کوتک و همکاران (۲۰۰۶) هم با استفاده از داده‌های شبکه‌بندی شده دمای ماهانه واحد تحقیقات اقلیمی دانشگاه ایست‌آنگلیا (CRU) و بارش ماهانه مرکز اقلیم‌شناسی بارش جهانی (GPCC) برای بازه زمانی ۱۹۵۱-۲۰۰۰، نقشه اقلیمی جهان را به روش کوپن-گایگر به روز رسانی کردند. پیل و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از داده‌های بلندمدت بارش و دمای شبکه داده‌های تاریخی اقلیم جهانی (GHCN2) نقشه

دیگری از طبقه‌بندی اقلیمی جهان به روش کوپن-گایگر ارائه کردند. استرن و همکاران (۲۰۰۰) هم با انجام اصلاحاتی در روش طبقه‌بندی کوپن و استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی استرالیا توانستند نقشه طبقه‌بندی اقلیمی کوپن را برای این کشور تهیه کنند. اسپاروک و همکاران (۲۰۰۷) هم با استفاده از ۱۳۴۲ ایستگاه هواشناسی پراکنده در گستره کشور برزیل و کشورهای همسایه آن، این منطقه از جهان را به روش کوپن-گایگر طبقه‌بندی اقلیمی نمودند و نتیجه را با نقشه‌های اقلیمی قبلی، که در مقیاس جهانی تهیه شده است، مقایسه کردند. انگلبرشت و انگلبرشت (۲۰۱۶) نیز با استفاده از میانگین گروهی از مدل‌های اقلیمی و بر اساس سناریو A2، جابه‌جایی‌های اقلیمی احتمالی قاره آفریقا را برای دهه‌های آینده، بررسی و ارزیابی نمودند. این بررسی نشان داد که تغییرات اقلیمی پیش‌بینی شده برای سده بیست و یکم جابه‌جایی‌های زیادی را در مناطق اقلیمی آفریقا پدید خواهد آورد که مهمترین آنها گسترش منطقه استپی گرم به سوی منطقه استپی سرد و در نتیجه کاهش گستره اقلیمی مناطق بیابانی و استپی سرد در این قاره است. بررسی‌ها نشان داد که استفاده از روش‌های طبقه‌بندی اقلیمی-پوشش گیاهی یکی از روش‌های مناسب برای ارزیابی میزان تأثیرات ناشی از تغییرات اقلیمی بر روی محیط زیست جهانی در دهه‌های آینده است (دی‌کاسترو و همکاران، ۲۰۰۷). آشکارسازی آثار تغییر اقلیم با استفاده از این رویکرد می‌تواند برای برنامه‌ریزی ملی و منطقه‌ای بسیار سودمند باشد.

اولین نقشه منطقه‌بندی اقلیمی ایران به شیوه کوپن در سال ۱۳۳۴ به وسیله گنجی ارائه شد. برای تهیه این نقشه از ۵۶ ایستگاه هواشناسی پراکنده در سطح کشور، که طول دوره آماری کوتاهی در زمان مطالعه داشتند، استفاده شده بود. چند سال بعد عدل (۱۳۳۹) نیز با ۶۶ ایستگاه هواشناسی پراکنده در سطح کشور، ایران را به شیوه کوپن

بیابانی سرد در این مناطق می‌شود. از همه مهمتر اینکه اقلیم نیمه بیابانی سرد به سرعت در حال گسترش به سوی منطقه شمال غرب ایران و پس راندن گروه‌های اقلیمی برفی و معتدل از این منطقه از کشور است. رحیمی و همکاران (۲۰۱۳) نیز با استفاده از روش دمارتون اصلاح شده، منطقه‌بندی اقلیمی دیگری از ایران تهیه کردند و با استفاده از داده‌های مدل‌های گردش کلی جو در دو سناریو اقلیمی AIB و A2 به ارزیابی جابه‌جایی مناطق اقلیمی به دست آمده بر اثر تغییرات اقلیمی پیش‌بینی شده برای دهه‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ پرداختند و نشان دادند که اقلیم بیشتر مناطق ایران به سوی گرم‌تر شدن و بیابانی شدن گرایش دارد. این پژوهش با هدف تکمیل پژوهش‌های انجام شده بوسیله رضی (۱۳۹۵) و رحیمی و همکاران (۲۰۱۳) در ارزیابی اثر تغییرات اقلیمی بر روی مناطق اقلیمی ایران و امکان جابه‌جایی این مناطق در سده بیست و یکم انجام شده است.

۲ داده‌ها و روش‌ها

برای انجام این پژوهش از داده‌های شبکه‌بندی شده دمای ماهانه CRU و بارش ماهانه GPCC و خروجی چند مدل اقلیمی گردش کلی جو (GCMs) به شرح بند ۲-۱ استفاده شده است. چگونگی ارزیابی اثر تغییرات اقلیمی پیش‌بینی شده برای سده بیست‌یکم بر جابه‌جایی مناطق اقلیمی ایران نیز در بند ۲-۲ ارائه شده است.

۲-۱ داده‌ها

برای انجام این پژوهش از داده‌های شبکه‌بندی شده دمای ماهانه CRU و بارش ماهانه GPCC در دوره آماری ۱۹۵۱-۲۰۰۱ و داده‌های دما و بارش ماهانه شبیه‌سازی شده TYN2.03 برای دوره ۲۰۰۱-۲۱۰۰ استفاده شده است. دقت مکانی داده‌های دمای ماهانه CRU، بارش ماهانه GPCC و داده‌های شبیه‌سازی شده

منطقه‌بندی کرد. جوادی (۱۹۶۶) هم در سال ۱۳۴۵ با استفاده از روش کوپن منطقه‌بندی دیگری از ایران ارائه داد که اگر چه در جزئیات کمی با دو نقشه قبلی تفاوت دارد، ولی در نمایش ساختار کلی مناطق اقلیمی ایران با آنها کاملاً هماهنگ است (خلیلی و همکاران، ۱۳۷۰). مسعودیان و کاویانی (۱۳۸۷) هم با استفاده از پایگاه داده اسفزاری که از درونیابی داده‌های بارش و دمای ایستگاه‌های هواشناسی پراکنده در سطح کشور در دوره آماری ۱۳۴۰-۱۳۸۳ به دست آمده است، نقشه‌ای از مناطق اقلیمی ایران به روش کوپن ارائه دادند که در مقایسه با نقشه‌های اقلیمی ارائه شده به وسیله گنجی (۱۳۳۴)، عدل (۱۳۳۹) و جوادی (۱۹۶۶) جزئیات بیشتری از مناطق اقلیمی ایران را نمایش می‌دهد. رضی (۱۳۹۵) نیز با استفاده از میانگین بارش و دمای ماهانه ۱۵۵ ایستگاه همدیدی پراکنده در گستره کشور در دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۱۴، نقشه اقلیمی ایران را به روش کوپن-گایگر به روز رسانی کرد و جابه‌جایی‌های مناطق اقلیمی کشور را بر اثر تغییرات اقلیمی دهه‌های گذشته مورد ارزیابی قرار داد. او با استفاده از داده‌های دمای ماهانه CRU و بارش ماهانه GPCC نقشه اقلیمی ایران را برای پنج دوره ۲۵ ساله ۱۹۰۱-۱۹۲۵، ۱۹۲۶-۱۹۵۰، ۱۹۵۱-۱۹۷۵، ۱۹۷۶-۲۰۰۰ و ۱۹۹۰-۲۰۱۴ تهیه و با یکدیگر مقایسه کرد و نشان داد که گروه‌های اقلیمی موجود در ایران در گذشته ۱۱ مورد بوده است که دو مورد از آنها بر اثر تغییرات اقلیمی، ناپدید شده‌اند و جای خود را به گروه اقلیمی دیگری داده‌اند. او نشان داد که جابه‌جایی‌های اقلیمی، بیشتر در مناطق مرزی گروه‌های اقلیمی روی داده است و زیرگروه‌های اقلیم برفی بیشترین پسروری را در سال‌های گذشته داشته‌اند. نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که بخش زیادی از مناطق کوهستانی کشور که پیشتر اقلیم برفی داشته‌اند، امروزه دارای اقلیم معتدل با تابستان‌های گرم هستند و اقلیم بیابانی گرم به سرعت جایگزین اقلیم

استفاده شده است. یادآوری می‌شود که در تهیه داده‌های GPCC علاوه بر داده‌های ایستگاه‌های زمینی از داده‌های ماهواره‌ای، داده‌های CRU و داده‌های GHCN2 نیز استفاده می‌شود. علاوه بر این، میری و همکاران (۱۳۹۵) نیز نشان داده‌اند که داده‌های بارش GPCC برآورد بسیار خوبی از بارش ماهانه نقاط مختلف ایران به دست می‌دهد و می‌توان از آن به جای داده‌های زمینی استفاده کرد.

داده‌های دما و بارش ماهانه شبیه‌سازی شده TYNSC2.03 از میانگین (Ensemble) اجرای پنج مدل گردش کلی جو (GCMs) برای چهار سناریو مختلف از انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان سده بیست و یکم (۲۰۰۱-۲۱۰۰) به دست آمده است. این سناریوها که در دهه ۱۹۹۰ تعریف و توسعه داده شده‌اند، بر اساس چهار داستان‌پردازی مختلف از ارتباط میان عوامل مؤثر در تولید گازهای گلخانه‌ای و تغییرات آن طی زمان به دست آمده است (آرنل و همکاران، ۲۰۰۴). هر یک از این داستان‌پردازی‌ها تصویر متفاوتی از آینده برای جهان پیش‌بینی می‌کند. سناریو A1 تصویری را از آینده نشان می‌دهد که در آن اقتصاد جهان به سرعت رشد می‌کند و همراستای آن فناوریهای روز نیز به سرعت توسعه پیدا می‌کنند. در مقابل، سناریو A2 جهانی ناهمگون برای آینده پیش‌بینی می‌کند که در آن بیشتر مردم جهان به ارزش‌های خانواده و سنت‌های محلی پایبند هستند. سناریو B1، جهانی بدون مادی‌گرایی را برای آینده پیش‌بینی می‌کند که در آن فناوری‌های پاک جایگزین فناوریهای آلوده کننده می‌شوند. در همین راستا، سناریو B2، جهانی را برای آینده پیش‌بینی می‌کند که در آن تمرکز اصلی بر روی پیدا کردن راه‌حل‌های محلی برای دستیابی به توسعه اقتصادی و بوم‌شناختی پایدار است. در تعریف سناریوهای یاد شده به ترتیب رشد جمعیت، توسعه اقتصادی، مصرف انرژی، بهره‌وری مصرف انرژی و ترکیبی از فناوری‌های مصرف انرژی در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی و

TYNSC2.03 مورد استفاده در این پژوهش ۰/۵ درجه جغرافیایی است. داده‌های CRU از درون‌یابی و سپس شبکه‌بندی داده‌های مشاهده‌ای متغیرهای مختلف اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی سراسر جهان به دست می‌آیند که در مرکز پژوهش‌های اقلیمی دانشگاه ایست‌آنگلیا انگلستان تهیه می‌شود (میچل و جونز، ۲۰۰۵). در این پژوهش از داده‌های دمای ماهانه CRU و بارش ماهانه GPCC استفاده شده است. در مرکز پژوهش‌های اقلیمی دانشگاه ایست‌آنگلیا انگلستان، کیفیت و همگنی زمانی داده‌های ایستگاه‌ها پیش از استفاده در فرآیند درون‌یابی با استفاده از روش‌های خودکار به دقت کنترل می‌شود (میچل و جونز، ۲۰۰۵). داده‌های بارش ماهانه GPCC نیز به وسیله مرکز جهانی اقلیم‌شناسی بارش، که در آلمان قرار دارد، تهیه می‌شوند. این مرکز نیز پس از دریافت داده‌های بارش ایستگاه‌های همدیدی سراسر جهان، داده‌های ماهواره‌های مختلف و داده‌های بارش موجود در دیگر پایگاه‌های داده‌ای مانند CRU، GHCN (شبکه جهانی داده‌های تاریخی اقلیم‌شناسی) و سازمان خواروبار جهانی (FAO)، آنها را مورد کنترل کیفی قرار می‌دهد و سپس با درون‌یابی این داده‌ها سری زمانی داده‌های بارش ماهانه خشکی‌های کره زمین را در شبکه‌بندی‌هایی با دقت مکانی ۱، ۰/۵ و ۰/۲۵ درجه جغرافیایی تولید می‌کند. داده‌های ایستگاه‌های مورد استفاده در GPCC پیش از ورود به مرحله درون‌یابی و شبکه‌بندی داده‌ها، از چندین مرحله کنترل کیفی خودکار گذر می‌کنند تا احتمال استفاده از ایستگاه‌های ناهمگن در درون‌یابی و شبکه‌بندی داده‌ها به کمترین میزان برسد (اشنایدر و همکاران، ۲۰۰۸). اگرچه CRU علاوه بر داده‌های دما، داده‌های بارش را نیز با همین دقت مکانی دارا می‌باشد، ولی با توجه به اینکه GPCC تغییرات مکانی بارش در سطح جهان را با دقت بیشتری شبیه‌سازی می‌کند، در این پژوهش از داده‌های بارش GPCC به جای داده‌های بارش CRU

این روش پیشنهاد شد و به همین دلیل نسخه‌های مختلفی از روش کوپن وجود دارد که تا حدودی با یکدیگر متفاوت هستند. در این پژوهش به پیروی از کوتک و همکاران (۲۰۰۶) و روبل و کوتک (۲۰۱۰) از روش طبقه‌بندی کوپن-گایگر برای شناسایی مناطق اقلیمی ایران استفاده شد تا نتیجه به دست آمده قابلیت مقایسه با نتایج پژوهش‌های اخیر را داشته باشد. در این روش پنج اقلیم اصلی کوپن-گایگر با عنوان اقلیم بارانی استوایی (A)، اقلیم خشک (B)، اقلیم معتدل بارانی (C)، اقلیم جنگلی برفی (D) و اقلیم قطبی (E) بر اساس بارش و دمای سالانه تعیین و هر یک از آنها بر اساس تغییرات فصلی بارش به مناطق اقلیمی کوچکتری تقسیم می‌شود. دومین حرف در طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر که بر اساس بارش تعیین می‌شود فصل بارش ایستگاه را تعیین می‌کند. بر این اساس، s به معنای تابستان خشک، w به معنای زمستان خشک و f به معنای نبود فصل خشک و یا اقلیم کاملاً مرطوب است. از این رو، با توجه به جدول ۱ در روش طبقه‌بندی کوپن-گایگر دو حرف اول نقش اصلی را در تعریف مناطق اقلیمی دارند. حرف سوم از طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر نیز شرایط دمایی ایستگاه را بیان می‌کند که بر اساس آن هر اقلیم به زیر گروه‌های کوچکتری تقسیم می‌شود. چگونگی تعیین سومین حرف از طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر در جدول ۲ ارائه شده است. در این جدول Tmon میانگین دمای ماهانه را به درجه سلسیوس نشان می‌دهد.

از پنج گروه اقلیمی کوپن-گایگر چهار گروه A، C، D و E تنها بر اساس معیار دما شناسایی می‌شوند؛ در حالی که برای تعیین گروه اقلیمی B از ترکیب مجموع بارش سالانه و میانگین دمای سالانه ایستگاه استفاده می‌شود (پیل و همکاران، ۲۰۰۷). در جدول ۱ میانگین دمای سالانه با Tann و میانگین دمای گرمترین و سردترین ماه سال به ترتیب با Tmax و Tmin نمایش داده شده است. همچنین

تولید داده‌های TYN2.03 علاوه بر سناریوهای A2، B1 و B2، سناریوی A1F1 نیز مورد توجه قرار گرفته است که در آن مصرف سوخت‌های فسیلی در جهان بسیار شدید پیش‌بینی شده است.

برای شبیه‌سازی داده‌های بارش و دما در سناریوهای یاد شده از پنج مدل گردش کلی جوی به شرح زیر استفاده شده است:

۱- نسخه سوم مدل جفت شده مرکز هدلی (HadCM3)؛

۲- مدل اقلیمی مرکز ملی تحقیقات جوی (NCAR-PCM)؛

۳- دومین نسل از مدل جفتی اقلیم جهانی (CGCM2)؛

۴- نسخه دوم مدل اقلیمی سازمان پژوهش‌های صنعتی (CSIRO2)؛

۵- نسخه چهارم مدل اقلیمی مرکز اروپایی هامبورگ (ECHam4).

از آنجایی که دقت مکانی مدل‌های اقلیمی (GCMs) یاد شده بسیار کمتر از دقت مکانی داده‌های CRU و GPCC (۵/۰ درجه جغرافیایی) است، میچل و همکاران (۲۰۰۴) با ایجاد ارتباط بین داده‌های مدل‌های اقلیمی یاد شده و دمای مشاهده‌ای دوره پایه ۱۹۶۱-۱۹۹۰، آنها را با استفاده از روش مثلثاتی دلاونی (Delaunay) به شبکه‌ای از نقاط با دقت ۵/۰ درجه جغرافیایی ریزمقیاس کردند. سپس با استفاده میانگین (Ensemble) پنج مدل گردش کلی جوی (GCMs) یاد شده، مقدار بارش و دمای کره زمین را برای چهار سناریو A2، B1، B2 و A1F1 برآورد کردند.

۲-۲ روش‌ها

از زمانی که کوپن روش طبقه‌بندی اقلیمی را ارائه داد تا سال ۲۰۰۰ تغییراتی توسط پژوهشگران مختلف برای بهبود

یادآوری می‌شود که در روش طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر واحد بارش و دمای هوا به ترتیب میلیمتر و درجه سلسیوس است:

$$P_{th} = \begin{cases} 2\{Tann\} & \text{دوسوم بارش سالانه در زمستان} \\ 2\{Tann\} + 28 & \text{دوسوم بارش سالانه در تابستان} \\ 2\{Tann\} + 14 & \text{فصل تمرکز بارش نامشخص} \end{cases} \quad (1)$$

مجموع بارش سالانه و مجموع بارش خشکترین ماه سال نیز به ترتیب با P_{min} و P_{ann} نشان داده شده است. کمترین و بیشترین بارش تابستانه و زمستانه نیز به ترتیب با P_{wmin} و P_{wmax} ، P_{smin} ، P_{smax} است. در این جدول P_{th} آستانه درجه خشکی است که از آن برای شناسایی مناطق خشک (B) استفاده می‌شود. رابطه (۱) چگونگی تعیین این آستانه را نشان می‌دهد.

جدول ۱. گروه‌های اصلی طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر، ویژگی‌ها و معیارهای شناسایی آنها (کوتک و همکاران، ۲۰۰۶).

نوع اقلیم	توضیح	معیار شناسایی
A	اقلیم استوایی	$T_{min} \geq +18\text{ C}^\circ$
Af	اقلیم استوایی جنگلی بسیار مرطوب	$P_{min} \geq 60\text{ mm}$
Am	اقلیم استوایی موسمی	$P_{ann} \geq 25(100 - P_{min})$
As	اقلیم استوایی ساوانا با تابستان‌های خشک	$P_{min} < 60\text{ mm in summer}$
Aw	اقلیم استوایی ساوانا با زمستان‌های خشک	$P_{min} < 60\text{ mm in winter}$
B	اقلیم‌های خشک	$P_{ann} < 10\text{ Pth}$
BS	اقلیم استپ یا نیمه خشک	$P_{ann} > 5\text{ Pth}$
BW	اقلیم بیابانی	$P_{ann} \leq 5\text{ Pth}$
C	اقلیم‌های گرم معتدل	$-3\text{ C}^\circ < T_{min} < +18\text{ C}^\circ$
Cs	اقلیم گرم معتدل با تابستان خشک	$P_{smin} < P_{wmin}$, $P_{wmax} > 3\text{ P}_{smin}$ and $P_{smin} < 40\text{ mm}$
Cw	اقلیم گرم معتدل با زمستان خشک	$P_{wmin} < P_{smin}$ and $P_{smax} > 10\text{ P}_{wmin}$
Cf	اقلیم گرم معتدل بسیار مرطوب	neither Cs nor Cw
D	اقلیم‌های برفی	$T_{min} \leq -3\text{ C}^\circ$
Ds	اقلیم برفی با تابستان‌های خشک	$P_{smin} < P_{wmin}$, $P_{wmax} > 3\text{ P}_{smin}$ and $P_{smin} < 40\text{ mm}$
Dw	اقلیم برفی با زمستان‌های خشک	$P_{wmin} < P_{smin}$ and $P_{smax} > 10\text{ P}_{wmin}$
Df	اقلیم برفی بسیار مرطوب	اقلیمی که نه Ds است و نه Dw
E	اقلیم‌های قطبی	$T_{max} < +10\text{ C}^\circ$
ET	اقلیم تندرا	$0\text{ C}^\circ \leq T_{max} < +10\text{ C}^\circ$
EF	اقلیم یخبندان	$T_{max} < 0\text{ C}^\circ$

جدول ۲. چگونگی تعیین شرایط دمایی (سومین حرف) گروه‌های اقلیمی کوپن-گایگر (کوتک و همکاران، ۲۰۰۶).

نوع اقلیم	ویژگی	معیار شناسایی
h	استپ/بیابان گرم	$T_{ann} \geq +18\text{ C}^\circ$
k	استپ/بیابان سرد	$T_{ann} < +18\text{ C}^\circ$
a	تابستان بسیار گرم	$T_{max} \geq +22\text{ C}^\circ$
b	تابستان گرم	اقلیمی که a نیست و حداقل چهار ماه از سال دمای ماهانه آن بیشتر از 10 درجه سلسیوس است.
c	تابستان خنک و زمستان سرد	اقلیمی که b نیست و دمای کمینه آن بزرگتر از -38 درجه سلسیوس است.
d	بی‌نهایت قاره‌ای	همانند اقلیم c است؛ ولی دمای کمینه آن برابر و یا کمتر از -38 درجه سلسیوس است.

۳ یافته‌ها

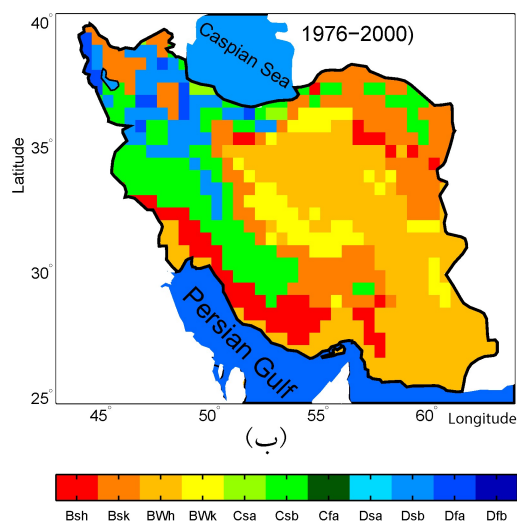
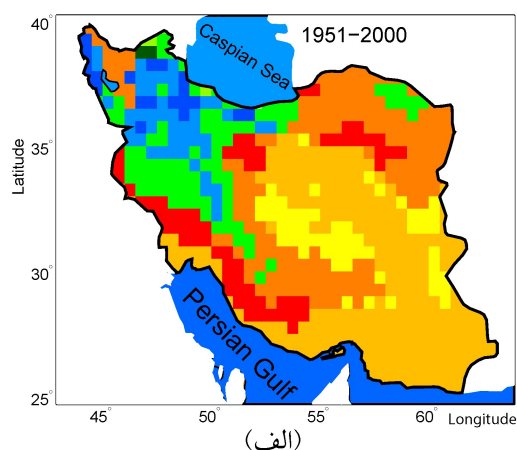
با استفاده از روش طبقه‌بندی کوپن-گایگر گروه اقلیمی نقاط شبکه داده‌های مورد استفاده تعیین و به صورت نقشه در بندهای ۱-۳ و ۲-۳ ارائه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۱-۳ مناطق اقلیمی ایران در زمان حاضر

مناطق اقلیمی ایران که با استفاده از داده‌های شبکه‌بندی شده دمای CRU و بارش GPCC برای دوره آماری ۱۹۵۱-۲۰۰۰ و ۱۹۷۶-۲۰۰۰ به دست آمده، در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱-الف مناطق کوهستانی زاگرس و البرز در غرب و شمال کشور دارای اقلیم معتدل با تابستان خشک و گرم (Csb) است که در ارتفاعات و عرض‌های شمالی‌تر به یکی از زیرگروه‌های اقلیم برفی (Ds) تبدیل می‌شود. در این نقشه دامنه‌های شرقی زاگرس، بخشی از زاگرس جنوبی و نیز مناطق کوهستانی شمال شرق و شمال غرب کشور با اقلیم نیمه-بیابانی سرد (Bsk) نمایش داده شده‌اند. دامنه‌های غربی زاگرس میانی و جنوبی و بخش‌های پراکنده‌ای از کوهپایه‌های البرز در غرب خراسان رضوی، استان قم و گلستان نیز دارای اقلیم نیمه بیابانی گرم (Bsh) می‌باشند. بخش‌های مرکزی، جنوبی و جنوب شرقی ایران نیز با اقلیم بیابانی خشک و گرم (BWh) مشخص شده‌اند که در برخی نقاط کوهستانی به اقلیم بیابانی خشک و سرد (BWk) تبدیل می‌شود. با توجه به این نقشه، در ایران اقلیم بیابانی خشک و سرد قلمرو اقلیم بیابانی خشک و گرم را از اقلیم نیمه بیابانی سرد جدا می‌سازد. این نقشه همچنین نشان می‌دهد که اقلیم معتدل با تابستانهای خشک و بسیار گرم (Csa) و اقلیم معتدل پر باران با تابستانهای گرم (Cfa) تنها در چند نقطه پراکنده در شمال و شمال غرب کشور دیده می‌شوند که نشان‌دهنده کوچک بودن قلمرو این دو گروه اقلیمی در ایران است.

در شکل ۱-ب مناطق اقلیمی ایران برای دوره آماری ۱۹۷۶-۲۰۰۰ نشان داده شده است. مقایسه شکل‌های ۱-الف و ۱-ب نشان می‌دهد که اقلیم معتدل با تابستان خشک و گرم (Csb)، به سمت جنوب گسترش بیشتری پیدا کرده است و نقاط بیشتری از شمال شرق کشور را نیز در بر گرفته است (شکل ۱-ب). شاید استفاده CRU و GPCC از تعداد ایستگاه‌های بیشتری از ایران در این دوره آماری این تفاوت را پدید آورده است. نقشه (۱-ب) هماهنگی بیشتری با ناهمواری‌های ایران دارد و مناطق اقلیمی ایران را بهتر نمایش می‌دهد. شکل ۱-ب همچنین از هماهنگی بیشتری با نقشه منطقه‌بندی اقلیمی ایران دارد که رضیئی (۱۳۹۵) با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های همدیدی کشور و به شیوه کوپن-گایگر تهیه کرده است. از این رو شکل ۱-ب را می‌توان معرف منطقه‌بندی اقلیمی ایران برای زمان حاضر دانست. با توجه به این شکل از ۳۱ گروه اقلیمی کوپن-گایگر، هشت گروه اقلیمی آن در ایران وجود دارد. گروه اقلیمی معتدل پر باران با تابستان-های گرم (Cfa)، که در شکل ۱-الف دیده می‌شود، در این شکل ناپدید شده است. همچنین گروه اقلیمی (Dsa) که رضیئی (۱۳۹۵) با استفاده از داده‌های زمینی برای برخی نقاط غرب کشور به دست آورده است در این نقشه دیده نمی‌شود. در مقابل گروه اقلیمی (Dfa) که در شکل‌های ۱-الف و ۱-ب دیده می‌شود در نقشه اقلیمی رضیئی (۱۳۹۵) وجود ندارد. پیدایش گروه اقلیمی (Dfa) در شکل‌های ۱-الف و ۱-ب می‌تواند نتیجه استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در تولید داده‌های CRU و GPCC باشد که سبب نمایش بهتر اقلیم ارتفاعات در مناطق شمالی و شمال غربی ایران شده است؛ در حالی که بیشتر ایستگاه-های همدیدی مورد استفاده به وسیله رضیئی (۱۳۹۵) در نقاط کم ارتفاع (مناطق شهری) قرار دارند و به همین دلیل، شبکه ایستگاهی مورد استفاده به وسیله ایشان اطلاعی از وضعیت دما و بارش نقاط مرتفع کوهستانی به

اختلاف موجود بین آنها نتیجه استفاده از تعداد بیشتری از ایستگاه‌های ایرانی در تولید داده‌های دوره آماری ۲۰۰۰-۱۹۷۶ و بهره‌گیری بیشتر از داده‌های ماهواره‌ای در این دوره است.



شکل ۱. مناطق اقلیمی ایران به روش کوپن-گایگر بر اساس (الف) دوره آماری ۱۹۵۱-۲۰۰۰ و (ب) دوره آماری ۱۹۷۶-۲۰۰۰.

دست نداده است تا اثر آن در نقشه منطقه‌بندی اقلیمی ایران منعکس شود. با توجه به اینکه تعداد ایستگاه‌های ایرانی مورد استفاده به وسیله CRU و GPCC برای درونیابی دما و بارش بر روی ایران از ۱۹۵۱ تا ۲۰۰۰ در تغییر بوده است، برخی از ناهم‌هنگی‌های موجود بین شکل‌های ۱-الف و ۱-ب را می‌توان به تعداد متغیر ایستگاه‌های ایرانی مورد استفاده برای تولید این داده‌ها در این دو دوره نسبت داد و یا طبق نتیجه‌گیری رضیعی (۱۳۹۵) می‌تواند نتیجه جابه‌جایی گروه‌های اقلیمی بر اثر تغییرات اقلیمی روی داده در دهه‌های گذشته باشد. درصد مساحت گروه‌های اقلیمی کوپن-گایگر در ایران برای دوره‌های آماری ۱۹۵۱-۲۰۰۰ و ۱۹۷۶-۲۰۰۰ از نقشه-های شکل‌های ۱-الف و ۱-ب استخراج و در جدول ۳ نمایش داده شده است. با توجه به درصد مساحت گروه-های اقلیمی ایران در دوره آماری ۱۹۷۶-۲۰۰۰ پیداست که گروه اقلیمی بیابانی گرم (Bwh) با رقمی در حدود ۳۶ درصد از کل مساحت ایران پهناورترین گروه اقلیمی کشور است. اقلیم نیمه بیابانی سرد (Bsk) و اقلیم معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم (Csa) نیز به ترتیب با رقمی در حدود ۲۲ و ۱۶ درصد از مساحت کشور به عنوان دومین و سومین گروه اقلیمی پهناور کشور به شمار می‌روند. دیگر گروه‌های اقلیمی نمایش داده شده در شکل ۱ و جدول ۳ کمتر از ۱۰ درصد از مساحت ایران را در بر می‌گیرند. درصد مساحت گروه‌های اقلیمی دوره آماری ۱۹۵۱-۲۰۰۰ تفاوت معنی‌داری با مقادیر متناظر آن در دوره آماری ۱۹۷۶-۲۰۰۰ نشان نمی‌دهند و اندک

جدول ۳. درصد مساحت گروه‌های اقلیمی کوپن-گایگر در ایران در دوره‌های آماری ۱۹۵۱-۲۰۰۰ و ۱۹۷۶-۲۰۰۰.

گروه اقلیمی	Dsb	Dsa	Dfb	Dfa	Csa	Cfa	BWk	BWh	Bsk	BSh
۱۹۵۱-۲۰۰۰	۲/۷	۷/۴	-	۰/۳	۱۲/۸	۰/۳	۸/۷	۳۴/۰	۲۴/۰	۹/۸
۱۹۷۶-۲۰۰۰	۱/۳	۶/۹	-	۰/۲	۱۵/۹	۱/۰	۸/۲	۳۵/۹	۲۲/۴	۸/۳

۲-۳ مناطق اقلیمی ایران در سده بیست و یکم

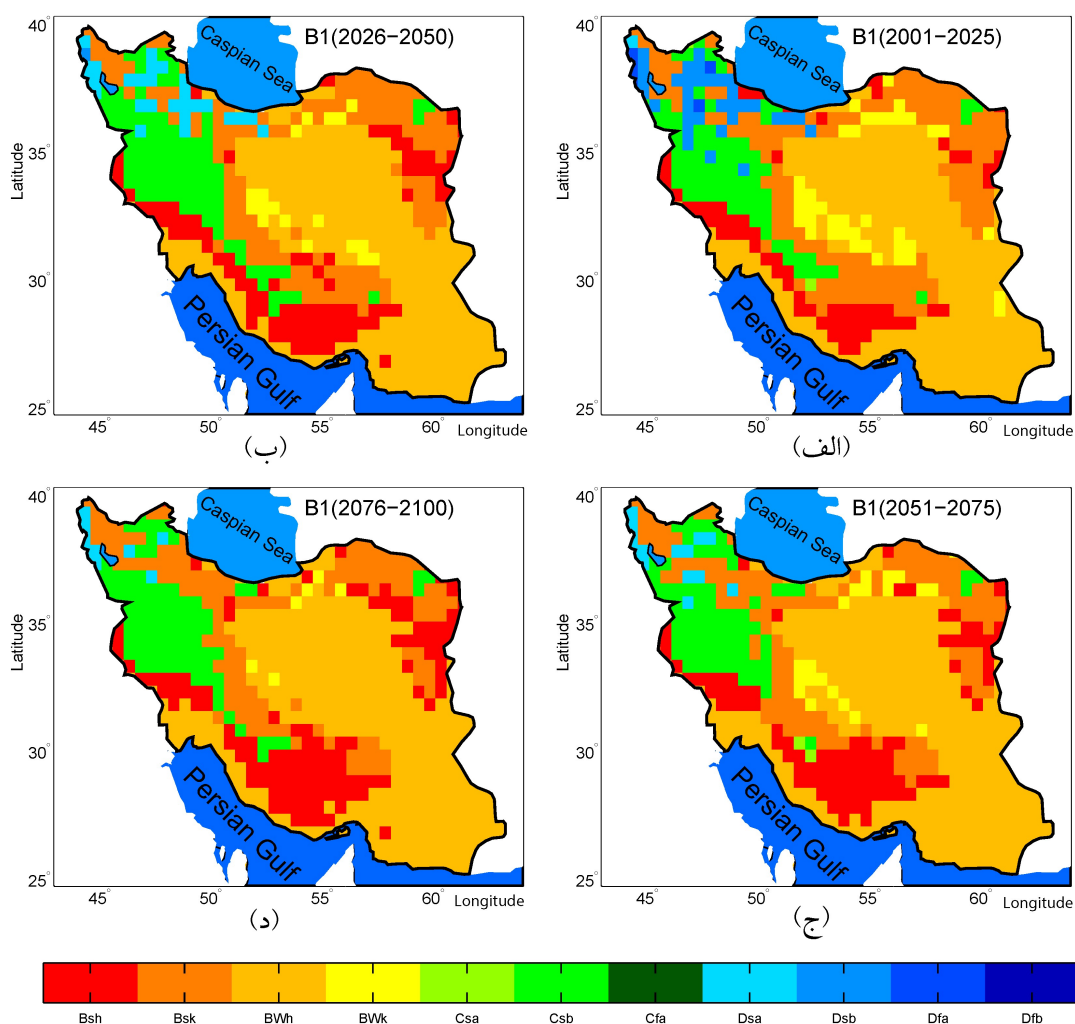
منطقه‌بندی اقلیمی ایران به روش کوپن-گایگر به ترتیب برای چهار سناریو B1، B2، A2 و A1F1 در چهار دوره ۲۵ ساله ۲۰۰۱-۲۰۲۵، ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ در شکل‌های ۲ تا ۵ نشان داده شده است. مقایسه نقشه‌های مختلف هر یک از این شکل‌ها (الف تا د) با یکدیگر به روشنی روند تغییرات و جابه‌جایی مناطق اقلیمی کشور را بر اثر تغییرات اقلیمی روی داده در دوره‌های مختلف سده بیست و یکم نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲-الف، که به زمان حاضر نزدیکتر است، ملاحظه می‌شود که بخش زیادی از شمال غرب ایران دارای اقلیم برفی Dfa و Dsb است که در دوره بعدی (شکل ۲-ب) به اقلیم برفی Dsa که تابستان‌های خشکتر و گرمتری دارد تبدیل می‌شود. شکل‌های ۲-ج و ۲-د نیز نشان می‌دهند که در دوره‌های ۲۵ ساله ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ قلمرو اقلیم برفی Dsa در شمال غرب ایران به شدت کاهش یافته و جای خود را به اقلیم نیمه‌بیابانی سرد (Bsk) داده است. مقایسه این دو شکل با شکل‌های ۲-الف و ۲-ب نشان می‌دهد که از قلمرو اقلیم معتدل Csb در غرب ایران به شدت کاسته شده و این اقلیم به سود اقلیم بیابانی گرم (Bsh) به سوی عرض‌های جغرافیایی بالاتر پسروری می‌کند. مقایسه این نقشه‌ها همچنین نشان‌دهنده پسروری شدید اقلیم بیابانی سرد (Bsk) به سوی عرض‌های جغرافیایی بالاتر و جایگزینی آن با اقلیم بیابانی گرم (Bsh) در دوره‌های ۲۵ ساله ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ است. مقایسه نقشه‌های مختلف (شکل ۲) با یکدیگر نیز نشان می‌دهد که از دوره ۲۵ ساله نخست تا دوره ۲۵ ساله چهارم (شکل ۲-د) به تدریج از قلمرو اقلیم بیابانی سرد (BWk) به سود اقلیم بیابانی گرم (BWh) کاسته می‌شود و به احتمال بسیار زیاد اقلیم بیابانی سرد نیز تا پایان سده بیست و یکم از گستره ایران زمین رخت بر خواهد بست. روند تغییرات مناطق اقلیمی ایران در سده بیست و یکم بر اساس

سناریوی B2 (شکل ۳) نیز همانند روند تغییرات نقشه‌های شکل ۱ است که بر اساس سناریو B1 به دست آمده است. نقشه‌های شکل ۳ نیز جابه‌جایی مناطق اقلیمی ایران در سده بیست و یکم را تأیید می‌کند.

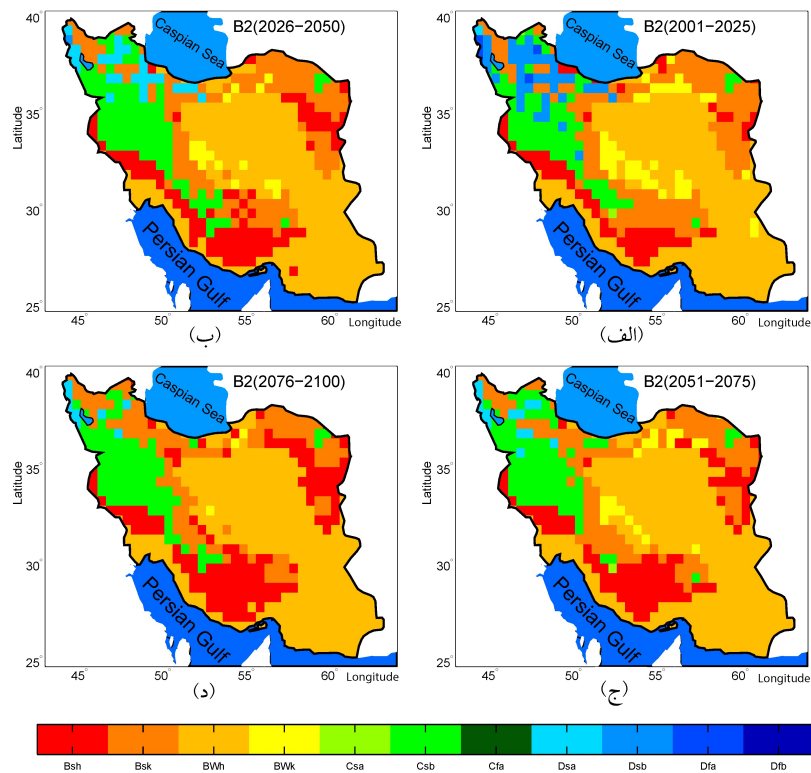
سناریو A2 تغییر و جابه‌جایی در مناطق اقلیمی ایران را با شدت و گستردگی بیشتری پیش‌بینی می‌کند (شکل ۴). با توجه به شکل‌های ۴-ج و ۴-د پداست که قلمرو اقلیم معتدل Csb در غرب ایران به شکل گسترده‌تری به سوی عرض‌های جغرافیایی شمالی‌تر پسروری کرده و جای خود را به اقلیم نیمه‌بیابانی سرد داده است. این دو نقشه همچنین نشان می‌دهند که قلمرو اقلیم نیمه‌بیابانی گرم نیز به سرعت به سوی قلمرو اقلیم نیمه‌بیابانی سرد پسروری کرده و در بسیاری از نقاط کشور بویژه در منطقه کوهستانی غربی و شمال شرقی ایران جایگزین آن خواهد شد. شکل ۴-د نیز نشان‌دهنده این واقعیت است که در دوره ۲۵ ساله پایانی قرن بیست و یکم اقلیم بیابانی سرد (BWk) به طور تقریباً کاملی از ایران رخت بر خواهد بست و جای خود را به اقلیم بیابانی گرم (BWh) خواهد داد. شکل‌های ۴-ج و ۴-د همچنین نشان می‌دهند که در سناریو A2، شمال غرب ایران با شدت و گستردگی بیشتری به سوی بیابانی شدن خواهد رفت و در پایان سده بیست و یکم اقلیم نیمه‌بیابانی سرد به طور تقریباً کاملی بر این منطقه از کشور چیره خواهد شد. با توجه به شکل ۵ و مقایسه آن با نقشه‌های شکل ۴ ملاحظه می‌شود که سناریو A1F1 جابه‌جایی‌های بیشتری در مناطق اقلیمی ایران برای سده بیست و یکم پیش‌بینی می‌کند. بر اساس این سناریو در نیمه دوم قرن بیست و یکم قلمرو اقلیم معتدل Csb در غرب ایران به کوچکترین سطح ممکن در بین سناریوهای مختلف خواهد رسید (شکل‌های ۵-ج و ۵-د). با توجه به شکل ۵ (شکل‌های ۵-ج و ۵-د) اقلیم معتدل Csb در غرب ایران به شدت به سوی عرض‌های جغرافیایی شمالی و مرزهای غربی کشور پسروری خواهد کرد و جای خود را به اقلیم

غربی و شمال شرقی ایران چیره خواهد شد و اقلیم نیمه بیابانی سرد را به بالای عرض جغرافیایی ۳۵ درجه پس خواهد راند. این سناریو نیز پیش‌بینی می‌کند که منطقه شمال غرب ایران با شدت و سرعت بیشتری به سوی بیابانی شدن پیش خواهد رفت و حتی اقلیم نیمه بیابانی گرم بر برخی از نقاط این منطقه از ایران چیره خواهد شد.

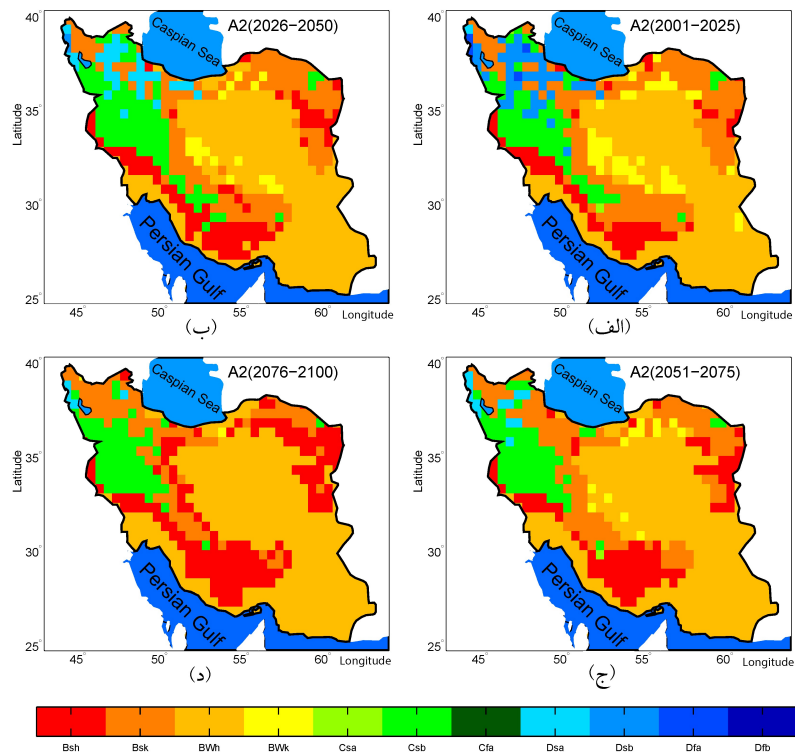
نیمه‌بیابانی سرد و یا اقلیم نیمه‌بیابانی گرم خواهد داد. بر اساس این سناریو در بخش‌های گسترده‌ای از منطقه کوهستانی غربی و شمال شرقی ایران، اقلیم نیمه بیابانی سرد جای خود را به اقلیم نیمه بیابانی گرم خواهد داد. این جابه‌جایی بویژه در دوره ۲۵ ساله پایانی سده بیست و یکم به صورت گسترده‌تری روی خواهد داد و در پایان این دوره اقلیم نیمه بیابانی گرم بر تمامی منطقه کوهستانی



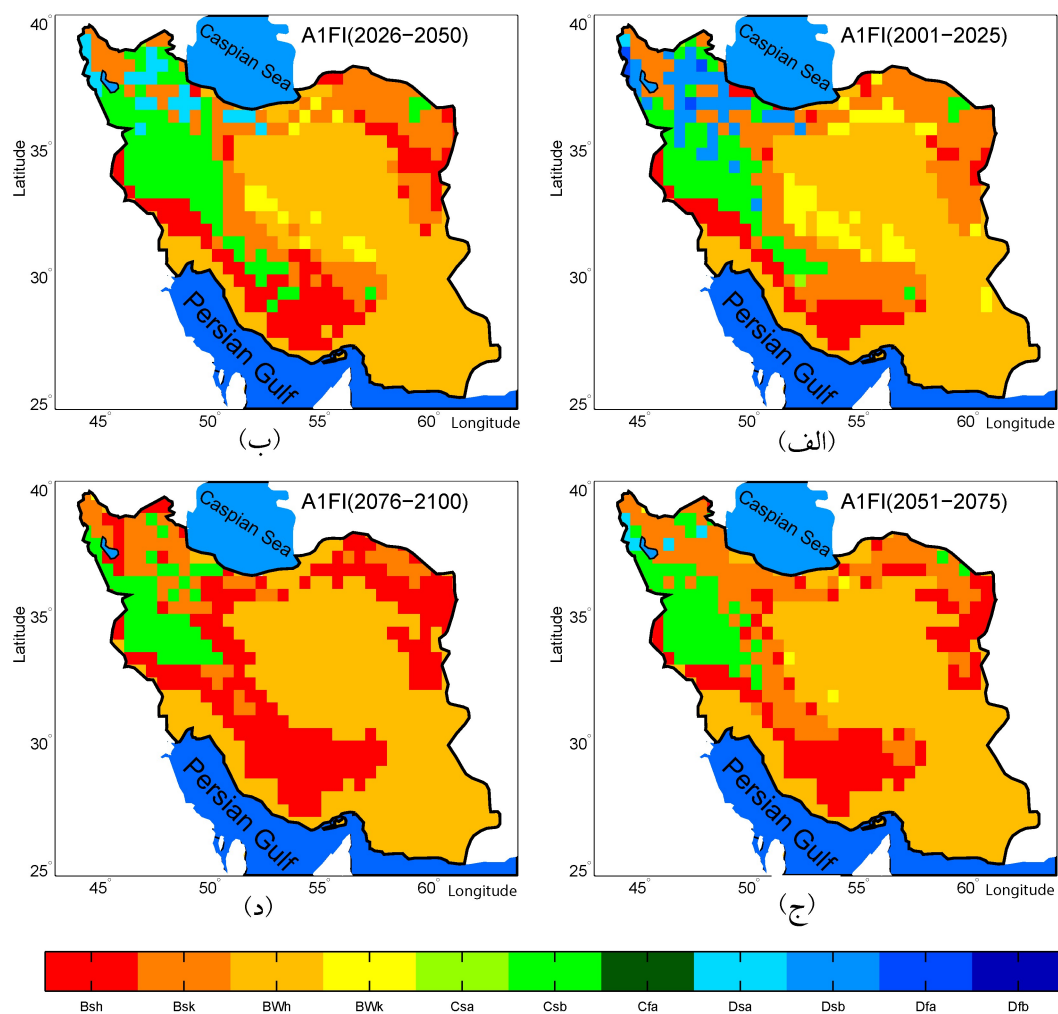
شکل ۲. چشم‌اندازی از مناطق اقلیمی ایران در سده بیست و یکم تحت سناریو B1



شکل ۳. چشم‌اندازی از مناطق اقلیمی ایران در سده بیست و یکم تحت سناریو B2.



شکل ۴. چشم‌اندازی از مناطق اقلیمی ایران در سده بیست و یکم تحت سناریو A2.

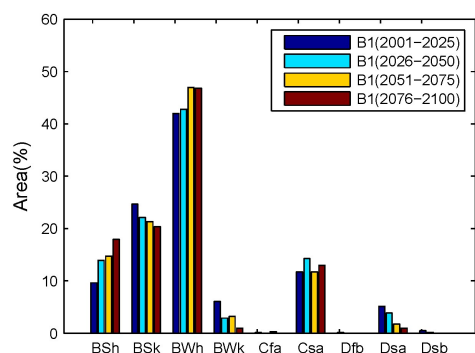


شکل ۵. چشم‌اندازی از مناطق اقلیمی ایران در سده بیست و یکم تحت سناریو A1FI.

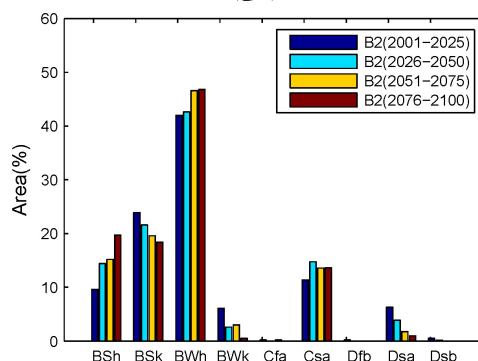
۴ بحث

مقایسه نقشه‌های منطقه‌بندی اقلیمی ایران به روش کوپن-گایگر که با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده برای چهار سناریو B1، B2، A2 و A1FI و در چهار دوره ۲۵ ساله ۲۰۰۱-۲۰۲۵، ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ به دست آمده است، نشان داد که گروه اقلیمی نقاط بسیار زیادی از کشور در طول سده بیست و یکم دستخوش تغییر خواهد شد. تغییرات پیش‌بینی شده در همه سناریوها برای دوره ۲۵ ساله اول، که به زمان حاضر نزدیک است، کمتر، ولی در دوره‌های ۲۵ ساله سوم و چهارم به طور چشمگیری افزایش پیدا می‌کند.

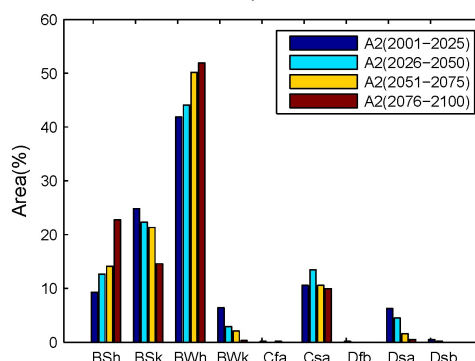
جابه‌جایی‌های اقلیمی مشاهده شده بیشتر در مناطق مرزی بین گروه‌های اقلیمی (جایی که گروه اقلیمی آن خیلی پایدار نیست) روی می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در دوره‌های ۲۵ ساله اول و دوم سده بیست و یکم گروه‌های اقلیمی برفی و معتدل منطقه کوهستانی غرب کشور بیشتر از هر گروه اقلیمی دیگری جابه‌جا خواهد شد. جابه‌جایی در گروه‌های اقلیمی در نیمه دوم سده بیست و یکم با شدت و گستردگی بیشتری ادامه پیدا خواهد کرد و بخش بسیار بزرگی از کشور را تحت تأثیر قرار خواهد داد. شکل ۶ نشان می‌دهد که درصد مساحت گروه‌های اقلیمی ایران از دوره ۲۵ ساله ۲۰۰۱-۲۰۲۵ تا



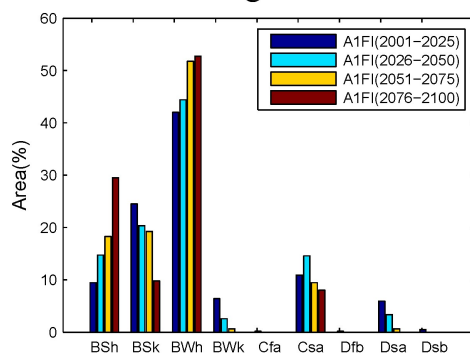
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۶. تغییرات درصد مساحت گروه‌های اقلیمی کوپن-گایگر در ایران در دوره‌های زمانی ۲۵ ساله اول تا چهارم سده بیست و یکم که به وسیله سناریوهای مورد استفاده در این پژوهش پیش‌بینی شده است.

دوره ۲۵ ساله پایانی سده بیست‌یکم در هر چهار سناریو مورد استفاده در این پژوهش دستخوش تغییرات زیادی خواهد شد که شدت این تغییرات به وسیله سناریو A1F1 (شکل ۶-د) بسیار بیشتر پیش‌بینی می‌شود. با توجه به این شکل پیش‌بینی می‌شود که تا پایان سده بیست و یکم بین ۱۰ تا ۱۵ درصد به مساحت گروه اقلیمی بیابانی گرم (Bwh) در ایران افزوده شود. این شکل همچنین نشان می‌دهد که اقلیم نیمه‌بیابانی گرم (Bsh) در ایران به شدت گسترش خواهد یافت و در حدود ۳۰ درصد به مساحت آن افزوده خواهد شد. با توجه به شکل‌های ۶-الف تا ۶-د کاملاً پیداست که گسترش اقلیم بیابانی گرم (Bwh) و اقلیم نیمه‌بیابانی گرم (Bsh) در کشور موجب پسروری چشمگیر اقلیم بیابانی سرد (Bwk) و اقلیم نیمه‌بیابانی سرد (Bsk) خواهد شد. این شکل‌ها همچنین روند کاهشی گستره گروه‌های اقلیم برفی (Ds) را به خوبی نمایش می‌دهند که نتیجه آن حذف این گروه اقلیمی در ایران خواهد بود.

ناپدید شدن گروه‌های اقلیمی برفی از شمال غرب ایران و گرایش شدید این بخش از کشور به سوی بیابانی شدن که از آغاز سده بیست و یکم میلادی خود را نمایان ساخته است با هر چهار سناریو مورد استفاده در این پژوهش تأیید شده است. بر اساس سناریوهای مورد استفاده در این پژوهش در نیمه دوم سده بیست و یکم میلادی اقلیم معتدل به سوی عرض‌های جغرافیایی بالاتر پسروری خواهد کرد و جای خود را به اقلیم نیمه‌بیابانی گرم خواهد داد و از گستره اقلیم بیابانی سرد نیز به سود اقلیم بیابانی گرم پیوسته کاسته خواهد شد. البته رضی (۱۳۹۵) نشانه‌هایی از جابه‌جایی در گروه‌های اقلیمی ایران را در همان سده بیستم میلادی پیدا کرده و به این نتیجه رسیده است که شمال غرب ایران در پایان سده بیستم و ابتدای سده بیست و یکم (دوره ۲۵ ساله ۱۹۹۰-۲۰۱۴) به شدت به سوی بیابانی شدن گرایش پیدا کرده است. او

همچنین نشان داده است که اقلیم بسیاری از مناطق کوهستانی کشور به بیابانی شدن گرایش دارد و در بخش مرکزی ایران نیز اقلیم بیابانی سرد به سود اقلیم بیابانی گرم در حال پسروی است. نتایج به دست آمده در این پژوهش با نتایج رحیمی و همکاران (۲۰۱۳)، که با استفاده از روش دومارتون گسترش یافته به منطقه‌بندی اقلیمی ایران در نیمه دوم سده بیست و یکم پرداخته‌اند، هماهنگ است. آنها با استفاده از دو سناریو A2 و A1B پیش‌بینی کرده‌اند که اقلیم بیشتر مناطق ایران در نیمه دوم سده بیست و یکم گرمتر و خشکتر خواهد شد و اقلیم معتدل فراخشک و اقلیم فراخشک گرم بر بخش بسیار بزرگتری از ایران چیره خواهد شد. با توجه به وجود مسأله گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی که نشانه‌های آن در نقاط مختلف کره زمین مشاهده می‌شود، قلمرو و گستره مناطق اقلیمی کشور نیز پایدار نخواهد بود و با گذر زمان تغییر خواهد کرد. از این رو، ضروری است تا از هم اکنون برنامه‌ریزی‌های کلان ملی و منطقه‌ای برای مدیریت بهینه منابع آب و انرژی و سازگاری با اقلیمی خشکتر و گرمتر از اقلیم امروز مد نظر مدیران ارشد کشور قرار گیرد.

۵ نتیجه‌گیری

در این پژوهش از میانگین دمای ماهانه CRU و میانگین بارش ماهانه GPCC در دوره‌های آماری ۱۹۵۱-۲۰۰۰ و ۱۹۷۶-۲۰۰۰ و نیز داده‌های دما و بارش ماهانه شبیه‌سازی شده TYN2.03 در سده بیست و یکم میلادی (دوره ۲۰۰۱-۲۱۰۰) استفاده شده است. به منظور بررسی جابه‌جایی مناطق اقلیمی کشور تحت تأثیر تغییرات اقلیمی پیش‌بینی شده برای سده بیست و یکم، از میانگین مجموع (Ensemble) اجرای پنج مدل گردش کلی جو (GCMs) برای چهار سناریو A2، B1، B2 و A1F1 استفاده شد. با استفاده از روش کوپن-گایگر منطقه‌بندی اقلیمی ایران برای دوره‌های آماری ۱۹۵۱-۲۰۰۰، ۱۹۷۶-۲۰۰۰ (سده

بیستم) و چهار دوره ۲۵ ساله ۲۰۰۱-۲۰۲۵، ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۷۱ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ (سده بیست یکم) انجام و با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. مقایسه نقشه اقلیمی دوره آماری ۱۹۵۱-۲۰۰۰ با نقشه اقلیمی دوره آماری ۱۹۷۶-۲۰۰۰ نشان داد که در مناطق اقلیمی برخی بخش‌های کشور مانند شمال غرب ایران جابه‌جایی‌های قابل توجهی صورت گرفته است. این مقایسه نشان از پسروی گسترده اقلیم برفی و معتدل در منطقه شمال غربی کشور و جایگزین شدن آن با اقلیم نیمه‌بیابانی سرد در زمان حاضر دارد. مقایسه این دو دوره همچنین نشان‌دهنده پسروی اقلیم بیابانی سرد به سود اقلیم بیابانی گرم در مناطق مرکزی و شرقی کشور است. نتایج به دست آمده از سناریوهای مختلف مورد استفاده در این پژوهش نیز کم و بیش نشان از گسترش اقلیم بیابانی گرم در ایران مرکزی و گرایش شدید شمال غرب ایران به سوی بیابانی شدن دارند. این جابه‌جایی‌های اقلیمی در سناریوی A1F1 که سناریو بدبینانه‌تری است به شکل گسترده‌تری صورت خواهد پذیرفت. بر اساس این سناریو در نیمه دوم سده بیست و یکم قلمرو اقلیم معتدل Csb در غرب ایران به کوچکترین سطح ممکن در بین سناریوهای مختلف خواهد رسید و این اقلیم به شدت به سوی عرض‌های جغرافیایی شمالی و مرزهای غربی کشور پسروی خواهد کرد و جای خود را به اقلیم نیمه‌بیابانی سرد و یا اقلیم نیمه-بیابانی گرم خواهد داد. بر اساس این سناریو همچنین در بخش‌های گسترده‌ای از منطقه کوهستانی غربی و شمال-شرقی ایران، اقلیم نیمه بیابانی سرد جای خود را به اقلیم نیمه‌بیابانی گرم خواهد داد. این جابه‌جایی بویژه در دوره ۲۵ ساله پایانی سده بیست و یکم به صورت گسترده‌تری روی خواهد داد و در پایان این دوره اقلیم نیمه‌بیابانی گرم بر تمامی منطقه کوهستانی غربی و شمال شرقی ایران چیره خواهد شد و اقلیم نیمه‌بیابانی سرد را به عرض‌های بالاتر از ۳۵ درجه جغرافیایی پس خواهد راند. نتایج این پژوهش

عدل، ا.ح.، آب و هوای ایران: ۱۳۳۹، انتشارات دانشگاه تهران.

گنجی، م.ح.، ۱۳۵۳، ۳۲ مقاله جغرافیایی: مؤسسه جغرافیایی و کارتوگرافی سحاب. تهران، ۱۰۱-۱۳۹. مسعودیان، س.ا.، و کاویانی، م.ر.، ۱۳۸۷، اقلیم شناسی ایران: انتشارات دانشگاه اصفهان، ۱۷۹ صفحه.

میری، م.، رضیئی، ط.، و رحیمی، م.، ۱۳۹۵، ارزیابی و مقایسه آماری داده‌های بارش TRMM و GPCC با داده‌های مشاهده‌ای در ایران: مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۲(۳)، ۶۵۷-۶۷۲.

Achberger, C., Linderson, M. L., and Chen, D., 2003, Performance of the Rossby centre regional atmospheric model in Southern Sweden: comparison of simulated and observed: Theoretical and Applied Climatology, 76, 219-234.

Arnell, N. W., Livermore, M. J. L., Kovats, S., Levy, P. E., Nicholls, R., Parry, M. L., and Gaffin, S. R., 2004, Climate and socio-economic scenarios for global scale climate change impacts assessments: Characterising the SRES storylines, Global Environmental Change, 14, 3-20.

Chan, D., Wu, Q., Jiang, G., and Dai, X., 2016, Projected Shifts in Köppen Climate Zones over China and Their Temporal Evolution in CMIP5 Multi-Model Simulations: Advances in Atmospheric Sciences, 33, 283-293.

Chen, D., and Chen, H. W., 2013, Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901-2010, Environmental Development, 6, 69-79.

Christensen, J. H., and Kuhry, P., 2000, High-resolution regional climate model validation and permafrost simulation for the East European Russian Arctic: Journal of Geophysical Research 105(D24):29647-29658.

De Castro, M., Gallardo, C., Jylha, K., and Tuomenvirta, H., 2007, The use of a climate-type classification for assessing climate change effects in Europe from an ensemble of nine regional climate models: Climatic Change, 81, 329-341.

Diaz, H. F., and Eischeid, J. K., 2007, Disappearing alpine tundra Köppen climatic type in the western United States:

نشان از ناپایدار بودن اقلیم بسیاری از مناطق کشور دارد که امکان برنامه‌ریزی درازمدت را برای این مناطق با مشکل روبرو می‌کند. شمال غرب کشور از جمله این مناطق است که به شدت به سوی بیابانی شدن گرایش دارد که نتیجه آن بروز خشکسالی‌های پیاپی در نیمه دوم سده بیستم و آغاز سده بیست و یکم است که با مدیریت نادرست منابع آب در منطقه همراه و موجب مرگ دریاچه ارومیه شد. از این رو، با توجه به پدیده گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی انکارناپذیر که برای سده بیست و یکم پیش‌بینی شده، ضروری است تا آموزشهای لازم برای سازگاری با شرایط اقلیمی جدید، که از مهمترین نشانه‌های آن کم‌آبی و خشکسالی‌های درازمدت و پیاپی است، به مردم داده شود و در همه برنامه‌ریزی‌های ملی و منطقه‌ای کشور شرایط اقلیمی پیش‌بینی شده مورد توجه و استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش بخشی از دستاوردهای طرح تحقیقاتی منطقه‌بندی اقلیمی ایران بر اساس تغییرات زمانی و مکانی بارش و دما و بهره‌گیری از روشهای چند متغیره (با کد ۲۲-۸۷-۲۹-۲۹-۲) است که در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور به انجام رسیده است.

منابع

خلیلی، ع.، حجام، س.، و ایران‌نژاد، پ.، ۱۳۷۰، تقسیمات آب و هوایی ایران: انتشارات وزارت نیرو، طرح جامع آب کشور (جاماب)، ۲۵۹ صفحه و یک نقشه با مقیاس یک میلیونیم.

رضیئی، ط.، ۱۳۹۶، منطقه‌بندی اقلیمی ایران به روش کوپن-گایگر و بررسی جابه‌جایی مناطق اقلیمی کشور در سده بیستم: مجله فیزیک زمین و فضا (آماده انتشار).

- Mitchell, T. D., and Jones, P. D., 2005, An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids: *International Journal of Climatology*, **25**, 693–712.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., and McMahon, T. A., 2007, Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification: *Hydrology and Earth System Sciences*, **4**, 439–473.
- Peel, M. C., McMahon, T. A., Finlayson, B. L., and Watson, F. G. R., 2001, Identification and explanation of continental differences in the variability of annual runoff: *Journal of Hydrology*, **250**, 224–240.
- Rahimi, J., Ebrahimpour, M., and Khalili, A., 2013, Spatial changes of extended De Martonne climatic zones affected by climate change in Iran: *Theoretical and Applied Climatology*, **112**, 409–418.
- Rubel, F., and Kottek, M., 2010, Observed and projected climate shifts 1901–2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification: *Meteorologische Zeitschrift*, **19**, 135–141.
- Schneider, U., Fuchs, T., Meyer-Christoffer, A., and Rudolf, B., 2008, Global precipitation analysis products of the GPCC: Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), DWD, Internet Publication (<http://www.dwd.de>), 1–12.
- Sparovek, G., De Jong Van Lier, Q., and Dourado Neto, D., 2007, Computer assisted Köppen climate classification: a case study for Brazil: *International Journal of Climatology*, **27**, 257–266.
- Stern, H., de Hoedt, G., and Ernst, J., 2000, Objective classification of Australian climates: *Australian Meteorological Magazine*, **49**, 87–96.
- Wang, M., and Overland, J. E., 2004, Detecting Arctic climate change using Köppen climate classification: *Climatic Change*, **67**, 43–62.
- Ying, S., Xue-Jie, G., and Jia, W., 2012, Projected Changes in Köppen Climate Types in the 21st Century over China: *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, **5:6**, 495–498.
- Geophysical Research Letters **34**, L18707, <http://dx.doi.org/10.1029/2007GL031253>.
- Djavadi, C., 1966, *Les climats de l'Iran: Monographies de la météorologie nationale*, France, 54, 103 p.
- Engelbrecht, C. J., and Engelbrecht, F. A., 2016, Shifts in Köppen-Geiger climate zones over southern Africa in relation to key global temperature goals: *Theoretical and Applied Climatology*, **123**, 247–261.
- FAO-SDRN, 1997, Köppen's climate classification map 1997. <http://www.fao.org/sd/EIdirect/climate/EIsp0002.htm>
- Fraedrich, K., Gerstengarbe, F. W., and Werner, P.C., 2001, Climate shifts during the last century: *Climatic Change*, **50**, 405–417.
- Guetter, N. E., and Kutzbach, J. E., 1990, A modified Köppen classification applied to model simulations of glacial and interglacial climates: *Climatic Change*, **16**, 193–215.
- Kalvová, J., Halenka, T., Bezpalcová, K., and Nemešová, I. 2003, Köppen climate types in Observed and simulated climates: *Studia Geophysica et Geodaetica*, **47**, 185–202.
- Kim, H. J., Wang, B., Ding, Q., and Chung, I. U., 2008, Changes in arid climate over North China detected by the Köppen climate classification: *Journal of Meteorological Society of Japan*, **86** (6), 981–990.
- Kleidon, A., Fraedrich, K., and Heimann, M., 2000, A green planet versus a desert world: Estimating the maximum effect of vegetation on the land surface climate: *Climate Change*, **44**, 471–493.
- Köppen, W., 1936, *Das geographische System der Klimate*. In: Köppen W, Geiger R (eds) *Handbuch der Klimatologie*. Gebrüder Borntraeger, Berlin, 1–44.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., and Rubel, F., 2006, World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated: *Meteorologische Zeitschrift*, **15**(3), 259–263.
- Lohmann, U., Sausen, R., Bengtsson, L., Cubasch, U., Perlwitz, J., and Roeckner, E., 1993, The Köppen climate classification as a diagnostic tool for general circulation models: *Climate Research*, **3**, 177–193.

An outlook on the Iranian Köppen-Geiger climate zones in the 21st century

Tayeb Raziei^{*1}

¹ Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

(Received: 26 May 2016, Accepted: 03 December 2016)

Summary

The impacts of potential climate change on the surface climate variables can be appraised through the projections of the global circulation onto the target variables, considering that the observed climate shifts are commonly associated with the changing patterns of the general circulations (Fraedrich et al, 2001). Since a combination of climate variables are utilized to develop climate classification schemes, they are useful for validating the outputs of the general circulation models (GCMs). The Köppen climate classification (Köppen, 1936), as the widely used climate classification method, is well suited for simultaneously validating the temperature and precipitation model outputs, considering that it takes into account both precipitation and the near-surface air temperature as the major input variables, as well as their annual cycles and linkage with the natural vegetation patterns (Kalvova et al, 2003). Therefore, such a climate classification allows for an outlook on the possible future shifts in the climate zones under a changing climate. Many researchers applied the Köppen climate classification to the general circulation model outputs in order to assess the shifts in the climate zones caused by the foreseen climate changes, represented by the GCMs (Fraedrich et al, 2001; Diaz and Eischeid, 2007; De Castro et al, 2007; Ruble and Kottek, 2010; Chen and Chen, 2013; Chan et al, 2016; Engelbrecht and Engelbrecht, 2016). The present work aimed at investigating the shifts in the Iranian climate zones induced by the possible climate changes in the 21st century. Monthly total precipitation of the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) and the mean monthly temperature of the Climatic Research Unit (CRU) of the University of East Anglia, both having 0.5 degree spatial resolution, were used for computing present time (1951-2000 time period) Köppen-Geiger climate classification for Iran. Following Rubel and Kottek (2010), the global temperature and precipitation projections corresponding to the period 2001 to 2100 were also taken from the Tyndall Centre for Climate Change Research dataset, TYN2.03 (Mitchell et al., 2004), to compute Köppen-Geiger climate classification for the 21st century. The TYN2.03 consists of a total of 20 GCM runs, combining 4 possible future worlds of emission scenarios (A2, B1, B2, A1F1) described by SRES (ARNELL et al., 2004) with 5 state-of-the-art climate models, namely the Hadley Centre Coupled Model Version 3 (HadCM3), the National Center for Atmospheric Research-Parallel Climate Model (NCARPCM), the Second Generation Coupled Global Climate Model (CGCM2), the Industrial Research Organization-Climate Model Version 2 (CSIRO2) and the European Centre Model Hamburg Version 4 (ECHam4). The Köppen-Geiger climate types of the present time were computed on the basis of the GPCC precipitation and CRU temperature datasets for 1951-2000 and 1976-2000 time periods. The 21st century Köppen-Geiger climate types were further computed for 1901-1925, 1926-1950, 1951-1975 and 1976-2100 time sections of the TYN2.03 datasets.

The comparison of the climate classifications of 1951-2000 and 1976-2000 time periods highlighted certain signals of change in the Iranian climate zones in the latter half of the 20th century. The most obvious changes were the tendency of northwestern Iran to a drier climate and the extensive retreatment of BWk climate type in the central and eastern Iran in favor of BWh climate type in the last quartile of the 20th century. Shifts and changes in the climate zones of Iran were more profoundly observed in the climate classification maps of the 21st century, particularly in the final quarter of the century. Except for A2 and A1F1 pessimistic scenarios which showed the maximum climate shifts in Iran, all the scenarios considered in this study more or less agree in displaying moderate changes in the climate zones of Iran. In general, based on the pessimistic scenarios, northwestern Iran is extremely susceptible to an extensive climate shift in the future. Nevertheless, all the scenarios indicate that northwestern Iran tends to have a much drier and warmer climate in the second half of the 21st century. Moreover, the Csb climate type, currently the main climate type of most parts of the Zagros mountainous areas of western Iran, will be replaced by Bsk and Bsh climate types at the end of the 21st century. Obviously, the BWk climate type will disappear from the country at the end of the century due to the widespread invasion of the BWh climate type in the central and eastern Iran, indicating an anticipated widespread desertification in almost all parts of the country, particularly in the northwest of Iran, under a changing climate.

Keywords: climate classification, Köppen-Geiger, CRU, GPCC, TYN2.03, climate change, Iran

^{*}Corresponding author:

tayebrazi@yahoo.com