

تحلیل نتایج ریزمقیاس‌نمایی فراسنج‌های آب‌وهوایی برای آینده ایران

مریم بیات ورکشی* - استادیار آبیاری و زهکشی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران
روژین فصیحی - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۴

وصول: ۱۳۹۶/۰۹/۰۴

چکیده

برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری آگاهانه در مورد استفاده از آب در آینده و مدیریت بهینه آن در راستای توسعه کشاورزی پایدار، مستلزم اطلاعات از تغییر اقلیم است. در این پژوهش، اثرات تغییر اقلیم بر تغییرات دما، تابش خورشیدی و بارش، به‌عنوان مهم‌ترین فراسنج‌های هواشناسی کشور، طی سال‌های آینده بررسی شد. بدین منظور، اطلاعات روزانه هواشناسی ۳۰ ایستگاه سینوپتیک کشور طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۰ مورد استفاده قرار گرفت. برای تولید داده‌های آتی، مدل گردش عمومی هد سی‌ام، سه در مدل ریزمقیاس‌کننده لارس دلبیو.جی. با سناریوهای A1B، A2 و B1 برای سه دوره ۳۴ ساله از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۵، ۲۰۴۶ تا ۲۰۷۹ و ۲۰۸۰ تا ۲۱۱۳ به کار برده شد. نتایج ارزیابی مدل در دوره پایه نشان داد که بیشترین دقت مدل به دمای حداکثر و کمترین آن به بارش تعلق داشت. به طوری که مقدار آماره مجذور میانگین مربعات خطای نرمال و ضریب همبستگی (R) برای دمای حداکثر به ترتیب برابر ۰/۰۰۵٪ و ۰/۹۹۹ و برای بارش برابر ۰/۰۷۹٪ و ۰/۹۹۶ بودند. پیش‌بینی فراسنج‌های هواشناسی طی سال‌های آینده نشان‌دهنده افزایش دما و تابش خورشیدی در سطح کشور خواهد بود. ضمن آنکه افزایش دمای هوا در دوره سرد سال در همه سناریوها محسوس‌تر از دوره گرم بود؛ اما در تغییرات بارش دریافتی، روند یکسانی مشاهده نشد. در بین سناریوهای مورد مطالعه سناریو A2 به‌عنوان بحرانی‌ترین سناریو بود که افزایش ۲/۱۳ درصدی تابش و ۲۴/۵۶ درصدی دمای هوا و کاهش ۱۱/۵۹ درصدی بارش تا سال ۲۱۱۳ را پیش‌بینی کرد. در مجموع، ادامه روند حاضر و پیش‌بینی تغییر اقلیم آینده، لزوم مدیریت بهینه در بخش کشاورزی و منابع آب را می‌رساند.

واژگان کلیدی: هد سی‌ام، سه، سناریو A2، تابش خورشیدی، دمای هوا، بارش.

مقدمه

توسعه برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری آگاهانه در مورد استفاده آب در آینده و همچنین اتخاذ استراتژی مناسب در راستای توسعه پایدار کشاورزی، به اطلاعات تغییر اقلیم نیاز دارند (هاشمی و همکاران، ۲۰۰۹). افزایش دمای سطح زمین و تغییر در الگوهای بارندگی، پدیده‌های غالب در تغییر اقلیم است که این دو، کمابیش تمام فعالیت‌ها و برنامه‌ریزی‌های گوناگون بشر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. انجام مطالعات تغییر اقلیم بر منابع مختلف در دوره‌های آتی، مستلزم پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی تحت تأثیر تغییرات گازهای گلخانه‌ای است. پیش‌بینی تغییرات اقلیم در دهه‌های آتی با استفاده از روش‌های مختلف از جمله مدل‌های گردش عمومی جو^۱ انجام می‌گیرد. یکی از دلایل کاربرد این مدل‌ها، عملکرد سریع و آسان آنها نسبت به سایر روش‌ها و دقت بالای مدل است (کوهستانی و همکاران، ۱۳۹۶).

یکی از کاربردی‌ترین مدل‌هایی که در زمینه ریزمقیاس‌نمایی استفاده می‌شود، مدل مولد داده لارس دلبیو.جی.^۲ است. رجبی و همکاران (۲۰۱۰)، با مقایسه دو مدل ریزمقیاس‌نمایی اس.دی.اس.ام.^۳ و لارس دلبیو.جی. در ریزمقیاس کردن داده‌های جوی استان کرمانشاه، اظهار داشتند مدل لارس دلبیو.جی. در ریزمقیاس‌نمایی آماری، نسبت به اس.دی.اس.ام. عملکرد بهتری دارد. مقایسه دو مدل ریزمقیاس‌نمایی ارس دلبیو.جی. و دلبیو.جی.ای.ان.^۴ توسط سمنو و بارو^۵ (۲۰۰۲)، در ایالات متحده آمریکا، اروپا و آسیا، نشان داد که مدل لارس دلبیو.جی. از توانایی خوبی در تولید داده‌های آب‌وهوای مختلف برخوردار است. کاربرد مدل لارس دلبیو.جی. در بررسی تغییر اقلیم استان‌های مختلف کشور از سوی پژوهشگران مختلف گزارش شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعه جهانبخش اصل و همکاران (۱۳۹۵)، در اثر تغییر اقلیم بر دما و بارش حوضه شهرچای ارومیه، غزل و همکاران (۲۰۱۴)، در تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای هیدرولوژیکی استان تهران، گودرزی و همکاران (۱۳۹۴)، در پیش‌بینی فراسنج‌های هواشناسی حوضه قره‌سو استان گلستان، رضایی و همکاران (۱۳۹۳)، در پیش‌بینی بارش استان کرمان، غلام‌پور (۱۳۹۳)، در بررسی تغییر اقلیم ایستگاه شیراز، مظفری و شفیع (۱۳۹۳)، در پیش‌بینی وضعیت خشکسالی در استان سیستان و بلوچستان، صالح‌نیا و همکاران (۱۳۹۳)، در پیش‌بینی بارش و دمای مشهد و خلیلی اقدم و همکاران (۱۳۹۱)، در پیش‌بینی برخی از فراسنج‌های جوی سندج اشاره کرد.

همه مطالعات صورت گرفته، به پیش‌بینی برخی فراسنج‌های هواشناسی در منطقه خاص پرداخته و نتایج متفاوتی ارائه داده‌اند؛ این در حالی است که به دلیل تنوع اقلیمی ایران و توزیع جغرافیایی آن، در فصل‌های مختلف سال، پیش‌بینی فراسنج‌های هواشناسی تحت تأثیر سامانه‌های فشار مختلف با رفتارهای متفاوت است (براتی و همکاران، ۱۳۹۵)؛ بنابراین، تصمیم‌گیری بهینه، مستلزم اطلاع جامعی از وضعیت اقلیمی آن در همه مناطق به صورت گسترده است. ضمن آنکه مطالعات اندک صورت گرفته در سطح کشور نیز، بیشتر به بررسی دما و بارش پرداخته‌اند که نتایج متفاوتی ارائه کرده‌اند؛ به‌عنوان نمونه، عباسی و همکاران (۱۳۸۹)، با پیش‌بینی دما و بارش کشور در سال‌های آینده، افزایش دمای هوای کشور تا سال ۲۱۰۰ را گزارش نمودند. در حالی که بابائیان و همکاران (۱۳۸۸)، به افزایش آستانه بارش‌های حدی کشور طی سال‌های آینده اشاره کرده‌اند؛ بنابراین، انجام مطالعات بیشتر با لحاظ سایر پارامترهای هواشناسی در اقلیم‌های مختلف کشور، ضروری به نظر می‌رسد.

1- General Circulation Mode (GCM)

2- LARS-WG

3- Statistical Downscaling model (SDSM)

4- Weather Generator (WGEN)

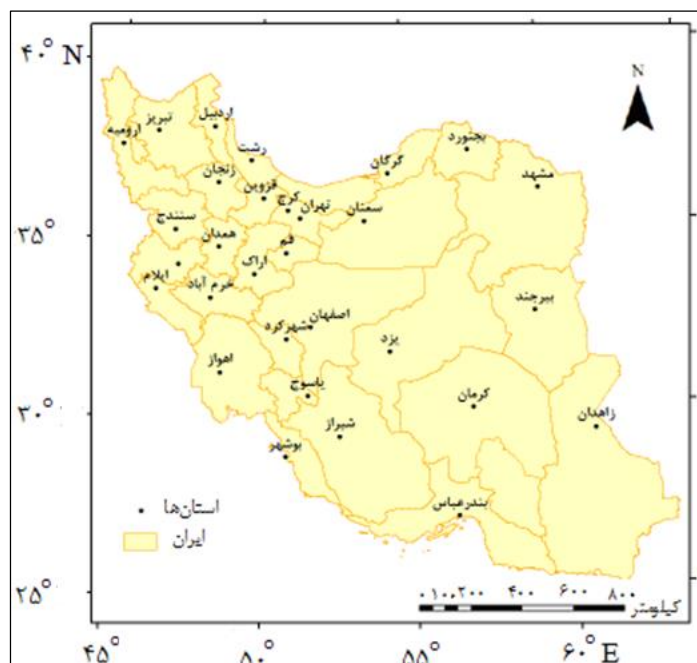
5- Semenov & Barrow

با توجه به اثرات مستقیم مولد داده‌های آب‌وهوایی بر پیش‌بینی و ارزیابی تغییر اقلیم در هر منطقه و عدم مطالعه جامع در سطح کشور به‌منظور پیش‌بینی فراسنج‌های هواشناسی به‌ویژه تابش خورشیدی، این مطالعه با هدف پیش‌بینی فراسنج‌های دما، بارش و تابش به‌عنوان مهم‌ترین فراسنج‌های اقلیمی، با کاربرد مدل لارس دبلیو.جی. با سناریوهای مختلف تا سال ۲۱۱۳ در سطح استان‌های مختلف کشور انجام شد. نتایج مطالعه می‌تواند در مدیریت و برنامه‌ریزی بخش‌های مختلف منابع آب، محیط‌زیست، صنعت، بهداشت، کشاورزی و همه سیستم‌هایی که در کنش با سیستم اقلیم هستند، مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

بررسی روند تغییرات اقلیمی و پیش‌بینی آن طی سال‌های آینده، مستلزم به‌کار گرفتن داده‌های طولانی مدت برای تعداد بیشتری از ایستگاه‌هاست. تغییرات این دو عامل، به‌طور معمول، در جهت عکس یکدیگر است، به‌طوری که با افزایش طول دوره آماری، از تعداد ایستگاه‌های دارای آمار طولانی‌مدت کاسته می‌شود؛ از طرفی، همواره تأکید بر استفاده از ایستگاه‌های دارای آمار کامل با طول دوره آماری بلندمدت برای حفظ دقت و کیفیت نتایج است (زارع ابیانه و بیات ورکشی، ۱۳۹۱). در این مطالعه، داده‌های روزانه ۳۰ ایستگاه سینوپتیک با طول دوره آماری ۲۰ سال از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۰ از آرشیو سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. علت انتخاب این تعداد ایستگاه، استفاده از آمار طولانی‌مدت، مورد توجه مباحث اقلیم‌شناسی به‌منظور کسب دقت و اعتبار نتایج به‌دست‌آمده، بود. ایستگاه‌های انتخابی با توجه به داده‌های ۲۰ سال، توان پوششی بیشتر مناطق بارشی کشور را دارند. موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۱ آورده شده است.

با در نظر گرفتن اطلاعات روزانه ۳۰ ایستگاه سینوپتیک در سطح کشور، طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۰ به‌عنوان دوره پایه، به ریزمقیاس‌نمایی فراسنج‌های هواشناسی اقدام شد. بدین منظور، از خروجی مدل اقلیمی هد سی‌ام. سه^۱ در مدل تولید داده لارس دبلیو.جی. استفاده شد.



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه

مدل گردش عمومی جو هد سی.ام. سه، یکی از مدل‌های جفت‌شده اقیانوسی جوئی است که توسط مرکز تحقیقات و پیش‌بینی اقلیمی هادلی در بریتانیا طراحی شده است. قدرت تفکیک جوئی این مدل شبکه‌ای، با ابعاد ۲/۷۵ درجه عرض جغرافیایی و ۳/۷۵ درجه طول جغرافیایی و قدرت تفکیک اقیانوسی آن ۱/۲۵ درجه عرض جغرافیایی و ۱/۲۵ درجه طول جغرافیایی است (سهرایان و همکاران، ۱۳۹۴). سناریوهای تغییر اقلیم مورد تأیید هیئت بین‌دولت تغییر اقلیم^۱ سناریوهای A1B، A2 و B1 هستند که A1B ترسیم‌کننده جهانی با رشد سریع اقتصادی و بدبینانه جمعیتی است به طوری که بیشینه رشد جمعیت، در نیمه قرن رخ داده و پس از آن، روند افزایش جمعیت، کاهشی خواهد بود؛ همچنین، رشد سریع فناوری‌های نوین و مؤثر، بر اساس این سناریو در دوره‌های آتی رخ خواهد داد.

سناریوی A2 که بیانگر رشد سریع جمعیت جهان اما همراه با رشد اقتصادی ناهمگن در مناطق مختلف بوده و بنابراین، تغییر اقلیم متوسطی برای دوره‌های پیشرو را ترسیم می‌کند. بر اساس سناریوی B1 نیز در دهه‌های آتی، همگرایی جمعیت در سطح جهان رخ خواهد داد و تغییر در ساختار اقتصادی با کاهش مواد آلاینده و معرفی منابع فناوری پاک و مؤثر، صورت خواهد گرفت (هیئت بین‌دولت تغییر اقلیم، ۲۰۰۷).

اولین مرحله در کاربرد مدل لارس دلبیو.جی. پیش‌بینی فراسنج‌های هواشناسی در دوره پایه است؛ با در نظر گرفتن فراسنج‌های دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و ساعت آفتابی روزانه هر ایستگاه، از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۰ به‌عنوان ورودی مدل، اقدام به پیش‌بینی فراسنج‌های متناظر شد. لازم به ذکر است، مدل به‌صورت خودکار، ساعات آفتابی را تبدیل به تابش خورشیدی می‌کند (بحری و همکاران، ۱۳۹۴). به همین خاطر، کالیبراسیون مدل در قالب چهار فراسنج دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و تابش خورشیدی صورت گرفت. ارزیابی نتایج پیش‌بینی مدل در دوره پایه با شاخص مجذور میانگین مربعات خطای نرمال^۲ و ضریب همبستگی^۳ انجام شد. رابطه ۱ و ۲، بیانگر نحوه محاسبه شاخص‌های یادشده هستند.

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{O} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 (P_i - \bar{P})^2}} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این روابط، O_i : مقدار فراسنج مشاهداتی، \bar{O} : میانگین مقدار فراسنج مشاهداتی، P_i : مقدار فراسنج پیش‌بینی شده، \bar{P} : میانگین مقدار فراسنج پیش‌بینی شده و n تعداد داده‌ها است.

پس از کسب اطمینان از قابلیت مدل لارس دلبیو.جی. در پیش‌بینی داده‌های هواشناسی، ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های مدل گردش عمومی جو هد سی.ام. سه و تولید داده مصنوعی برای سه دوره ۳۴ ساله از سال ۲۰۱۱ تا ۲۱۱۳ با سناریوهای A1B، A2 و B1 تأییدشده توسط هیئت بین‌دولت تغییر اقلیم اجرا و مقادیر روزانه فراسنج‌های دمای میانگین، تابش خورشیدی و بارش برای دوره آتی تولید شد. دوره اول، از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۵، دوره دوم از سال ۲۰۴۶ تا ۲۰۷۹ و دوره سوم از سال ۲۰۸۰ تا ۲۱۱۳ بودند. تجزیه و تحلیل نتایج، برای هر

1- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

2- Normal Root Mean Square Error (NRMSE)

3- Coefficient Of Correlation (r)

ایستگاه به‌طور مجزاً صورت گرفت. لازم به ذکر است، به دلیل اهمیت فراسنج دمای هوا و نقش بسزای آن در اقلیم هر منطقه، به‌منظور بررسی‌های جزئی‌تر، نتایج پیش‌بینی دمای هوا به تفکیک دو دوره گرم (فصل بهار و تابستان) و سرد (فصل پاییز و زمستان) انجام گرفت. هدف از این تقسیم‌بندی، آشکارسازی تغییرات دمای هوا در دوره‌های گرم و سرد سال بود. به‌منظور تعمیم نتایج در سطح کشور، پهنه‌بندی فراسنج‌های اقلیمی پیش‌بینی‌شده طی سال‌های آینده با روش زمین‌آمار انجام شد. هدف از انجام این کار، بررسی توزیع مکانی تغییرات هر یک از فراسنج‌های هواشناسی طی سال‌های آتی بود. برای این منظور، از روش عکس فاصله^۱ به درون‌یابی مقدار فراسنج‌های هواشناسی در قالب نرم‌افزار آرک جی.آی.اس^۲ اقدام شد. کاربرد روش عکس فاصله در برآورد توزیع مکانی متغیرهای هیدرولوژی و هواشناسی در مطالعات توکلی (۱۳۹۰) و نظری‌فرد و همکاران (۲۰۰۷) نیز گزارش شده است. در نهایت، نقشه‌های پهنه‌بندی با در نظر گرفتن فراسنج‌های دما، بارش و تابش در هر یک از سناریوها، طی سال‌های آینده ترسیم شد.

نتایج

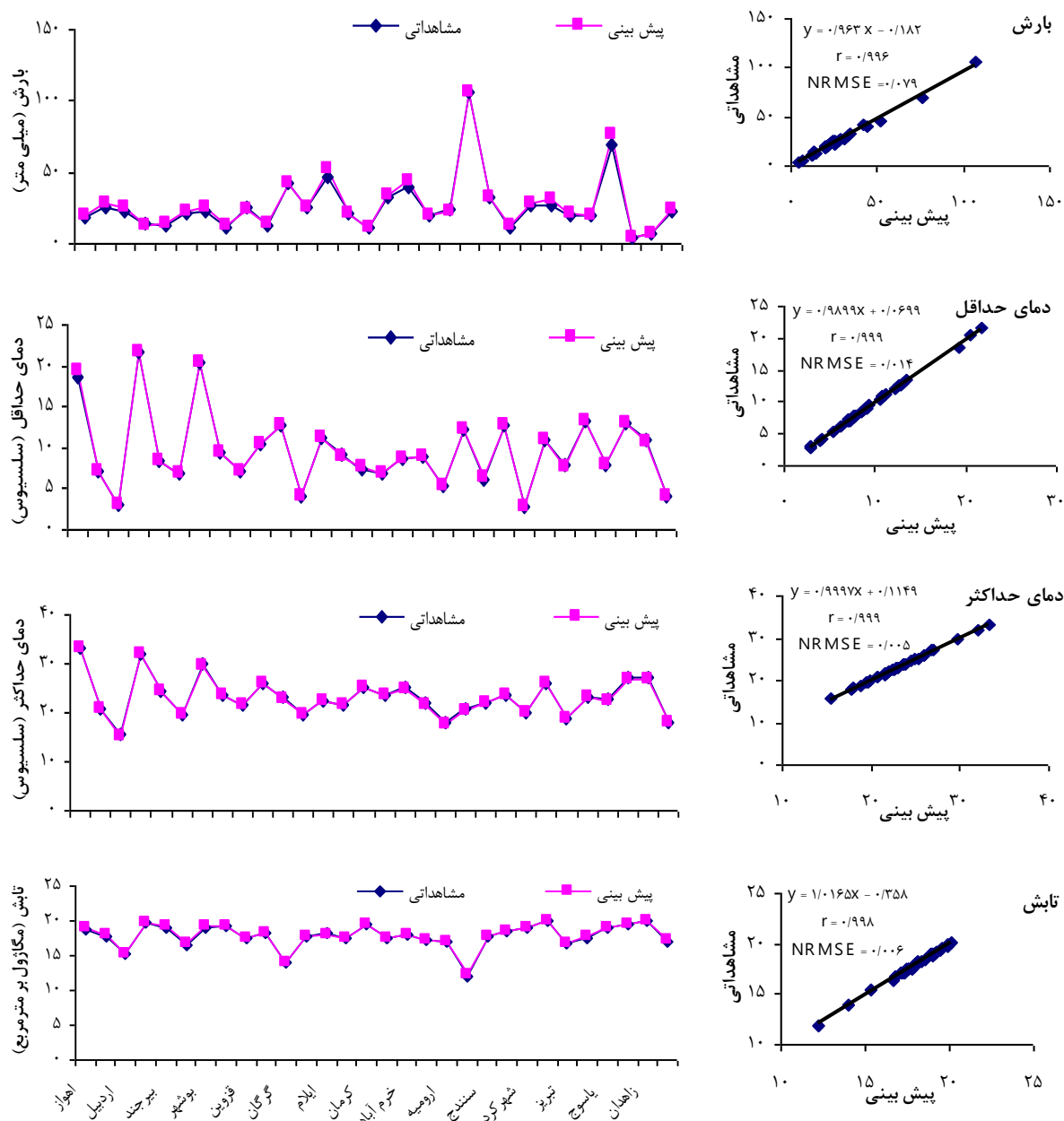
با در نظر گرفتن میانگین فراسنج‌های هواشناسی هر استان در مرحله کالیبراسیون مدل، نتایج نهایی به‌صورت سری زمانی و برازش مدل رگرسیونی در شکل ۲ آورده شد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقدار آماره خطاسنجی مجذور میانگین مربعات خطای نرمال و ضریب همبستگی (R) هر یک از فراسنج‌های هواشناسی مورد استفاده در مرحله کالیبراسیون برای دوره پایه آمده است.

مرحله کالیبراسیون مدل با اعمال داده‌های هواشناسی طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۰، در همه استان‌های مورد مطالعه با دقت بالا انجام شد (شکل ۲). همان‌گونه که استنباط می‌شود، خطای مدل در پیش‌بینی بارش در همه استان‌های کشور به‌طور میانگین ۰/۰۷۹٪ است که با مقدار ضریب همبستگی ۰/۹۹۶ بیانگر عملکرد مناسب مدل است. نمودار سری زمانی بارش مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده در مرحله کالیبراسیون در هر استان نیز نتیجه بالارا تأیید می‌کند. انطباق مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده بارش در هر استان نشان‌دهنده دقت بالای مدل است. این امر، در خصوص پیش‌بینی دمای حداقل نیز صادق است؛ اما دقت پیش‌بینی دمای حداقل بیش از بارش است. به‌طوری که مقدار آماره‌های مجذور میانگین مربعات خطای نرمال و ضریب همبستگی دمای حداقل به‌ترتیب برابر ۰/۰۱۴٪ و ۰/۹۹۹ است.

پیش‌بینی دمای حداکثر در مرحله کالیبراسیون نسبت به دمای حداقل، از دقت بیشتری برخوردار است. مقدار مجذور میانگین مربعات خطای نرمال و ضریب همبستگی پیش‌بینی دمای حداکثر به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۵٪ و ۰/۹۹۹ است که از میان فراسنج‌های هواشناسی مورد مطالعه، بیشترین دقت را دارد. پیش‌بینی تابش خورشیدی در مرحله کالیبراسیون بیانگر آن است که مدل، دقت مناسبی در پیش‌بینی تابش خورشیدی دارد. مقدار ضریب همبستگی و مجذور میانگین مربعات خطای نرمال نیز مؤید این امر هستند. در مجموع، ارزیابی مدل در پیش‌بینی فراسنج‌های هواشناسی در دوره پایه در همه استان‌های مورد مطالعه نشان‌دهنده کالیبراسیون موفق مدل است. پس از حصول اطمینان از عملکرد مناسب مدل در مرحله کالیبراسیون، به پیش‌بینی تغییرات هر یک از فراسنج‌های هواشناسی در قالب سه سناریو A1B، A2 و B1 اقدام شد (شکل ۳). همان‌گونه که گفته شد، بازه زمانی پیش‌بینی‌شده سه بازه ۳۴ ساله شامل سال‌های ۲۰۴۵-۲۰۱۱، ۲۰۷۹-۲۰۴۶ و ۲۱۱۳-۲۰۸۰ است.

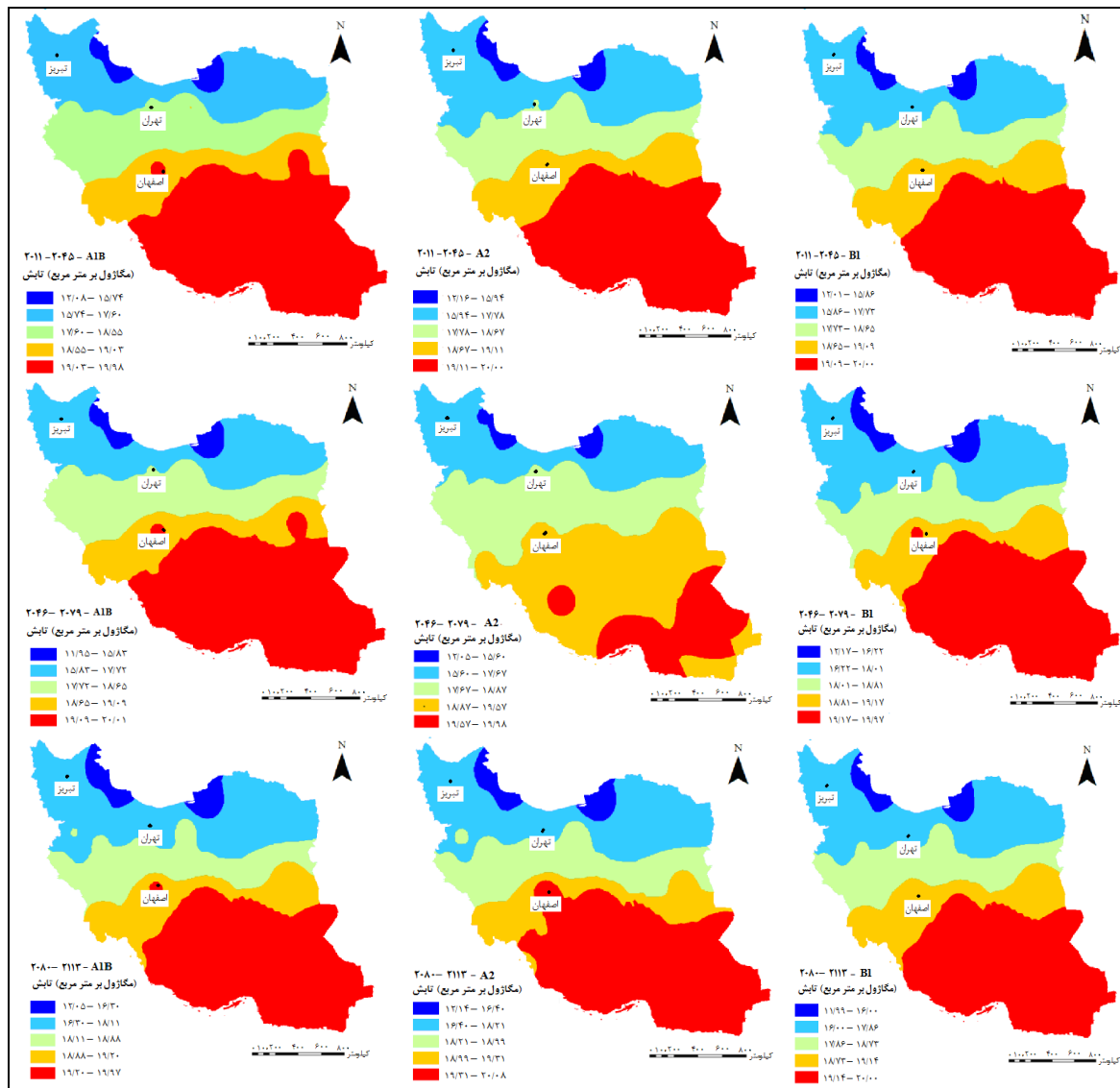
1- Inverse Distance Weight (IDW)

2- Arc GIS



شکل ۲. نتایج کالیبراسیون مدل در پیش بینی فراسنج‌های اقلیمی در سطح کشور

تغییرات تابش خورشیدی در سطح کشور، در همه سناریوها نشان می‌دهد که حداکثر تابش خورشیدی در جنوب شرقی کشور و حداقل آن، در سواحل شمالی دریای خزر است (شکل ۳). این امر، با توجه به شرایط اقلیمی حاکم در مناطق یادشده، منطقی به نظر می‌رسد. در سناریوی AIB تغییرات تابش خورشید از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴ بین ۱۲/۰۸ تا ۱۹/۹۸ مگاژول بر مترمربع است که به‌طور یکنواخت، از شمال کشور به سمت جنوب، روند افزایشی دارد. از آنجا که میانگین تابش خورشیدی در دوره پایه (۱۹۹۱ تا ۲۰۱۰) ۱۷/۸۲۶ مگاژول بر مترمربع است، اما پیش‌بینی میانگین تابش خورشیدی برای ۳۴ سال آینده برابر ۱۷/۸۹۱ مگاژول بر مترمربع خواهد بود. این بدان معنی است که با در نظر گرفتن سناریو AIB، مقدار تابش خورشیدی در ۳۴ سال آینده به میزان ۰/۳۶٪ افزایش خواهد یافت.

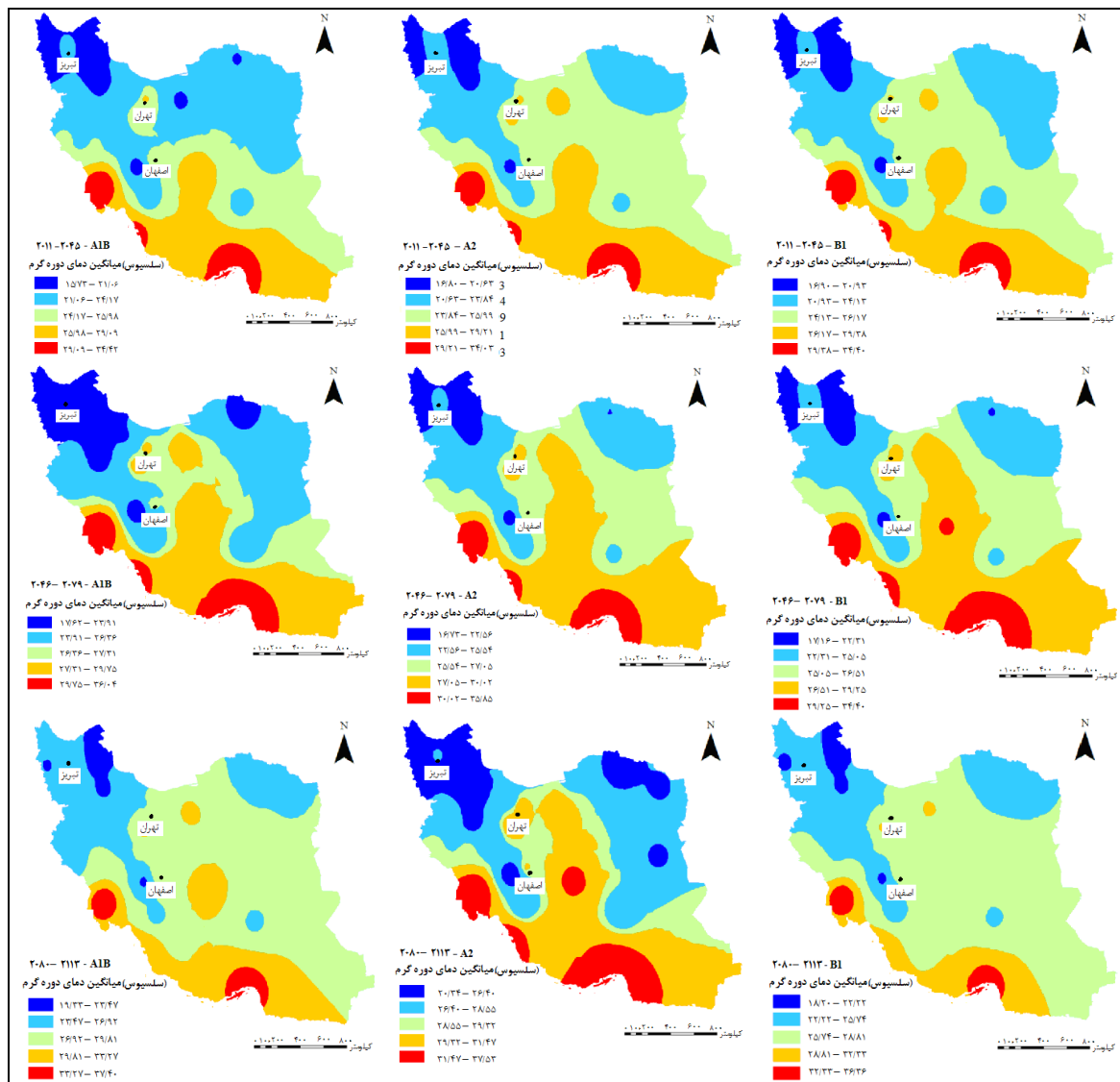


شکل ۳. پیش‌بینی توزیع مکانی تابش خورشیدی

این افزایش تا ۳۴ سال بعدی نیز ادامه خواهد داشت. به طوری که در ۳۴ سال دوم (از سال ۲۰۴۶ تا ۲۰۷۹)، میانگین تابش خورشیدی ۱۷/۹۶۵ مگاژول بر متر مربع خواهد بود که نسبت به دوره پایه، ۰/۷۷٪ افزایش را نشان می‌دهد. پیش‌بینی تابش خورشیدی از سال ۲۰۸۰ تا ۲۱۱۳، بیانگر افزایش تابش خورشیدی با سناریوی A1B است. میانگین تابش خورشیدی در این دوره، به ۱۸/۰۵۶ مگاژول بر متر مربع خواهد رسید که افزایش ۱/۲۹ درصدی تابش خورشیدی نسبت به دوره پایه را تأیید می‌کند. مقایسه مقادیر پیش‌بینی تابش خورشیدی تحت سناریو A2، بیانگر آن است که تغییرات تابش خورشیدی مشابه سناریو A1B از شمال به جنوب کشور روند افزایشی دارد؛ اما دامنه تغییرات آن محسوس‌تر از سناریو A1B است. با اعمال سناریو A2، مقدار میانگین تابش خورشیدی طی ۳۴ سال اول، ۱۷/۸۹۸ مگاژول بر متر مربع خواهد بود که نسبت به دوره پایه، ۰/۴۰٪ افزایش را نشان می‌دهد. پیش‌بینی میانگین تابش خورشیدی طی ۳۴ ساله دوم نیز بیانگر افزایش آن به میزان ۱۷/۹۰۸ مگاژول بر متر مربع است که افزایش ۰/۴۶ درصدی را تأیید می‌کند. میانگین تابش خورشیدی پیش‌بینی شده در ۳۴ ساله سوم نیز برابر ۱۸/۲۰۶ مگاژول بر متر مربع است که بیانگر افزایش ۲/۱۳ درصدی آن نسبت به دوره پایه

است. بررسی تابش خورشیدی پیش‌بینی‌شده در سناریو B1 نشان می‌دهد میانگین تابش خورشیدی پیش‌بینی‌شده طی سه دوره ۳۴ ساله، به ترتیب برابر ۱۷/۸۵۹، ۱۷/۹۸۱ و ۱۷/۹۲۳ مگاژول بر متر مربع است. ارقام بالا، ضمن تأیید افزایش تابش خورشیدی دوره ۳۴ ساله دوم یعنی از سال ۲۰۴۶ تا ۲۰۷۹ را محسوس‌تر از دوره ۳۴ ساله سوم نشان می‌دهد. در مجموع، می‌توان اظهار داشت با اعمال هر سه سناریو، افزایش تابش خورشیدی نسبت به دوره پایه پیش‌بینی می‌شود؛ اما سناریو A2 تغییرات شدیدتر تابش خورشیدی را نشان می‌دهد.

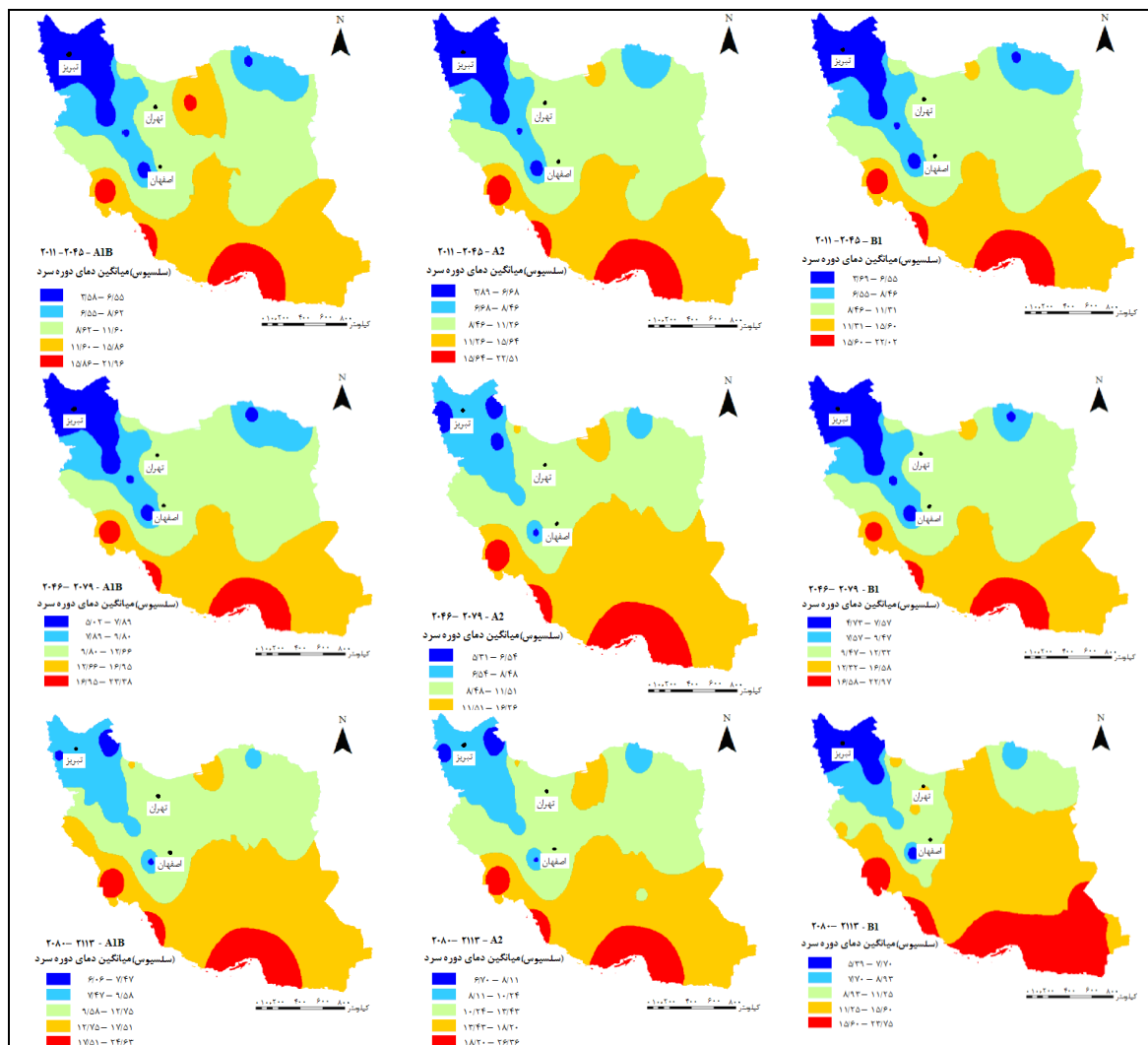
پیش‌بینی میانگین دمای هوا به تفکیک دوره سرد و گرم سال، تحت سه سناریوی مختلف از سال ۲۰۱۱ تا ۲۱۱۳ انجام گرفت (شکل ۴ و ۵). بررسی توزیع مکانی دمای هوا در دوره گرم سال، طی سال‌های آینده برای هر سه سناریو بیانگر آن است که حداقل دما در نیمه شمالی کشور و حداکثر آن در سواحل خلیج فارس واقع در جنوب و جنوب غربی کشور قابل مشاهده است (شکل ۴). در سناریوی AIB، میانگین دمای هوا در دوره گرم سال، از ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۵، ۲۳/۷۹ درجه سلسیوس پیش‌بینی شده است. این در حالی است که میانگین دمای هوا در فصل‌های گرم سال، طی دوره پایه (۱۹۹۱ تا ۲۰۱۰) درجه سلسیوس است؛ بنابراین، افزایش دمای هوا به میزان ۱/۲۳٪ طی ۳۴ سال آینده در سناریوی بالا تأیید می‌شود.



شکل ۴. پیش‌بینی توزیع مکانی دمای هوا در دوره گرم تحت سناریوهای مختلف

میانگین دمای هوا در ۳۴ ساله دوم و سوم در سناریوی یادشده، به ترتیب ۲۵/۷۷ و ۲۷/۳۲ درجه سلسیوس است. مشابه تغییرات تابش خورشیدی، پیش‌بینی دمای هوا در سال‌های آینده تحت سناریوی A2 بیش از سناریوی A1B است. به طوری که دامنه تغییرات دمای هوای پیش‌بینی‌شده در این سناریو، از ۱۵/۸۱ تا ۳۷/۵۳ درجه سلسیوس است که به طور میانگین، طی سه دوره ۳۴ ساله به ترتیب ۲۴/۰۵، ۲۶/۶۹ و ۲۸/۱۸ درجه سلسیوس پیش‌بینی شده است. مقایسه دمای هوا طی سال‌های آینده با اعمال سناریو B1 نشان می‌دهد که میانگین دمای هوای کشور در سه دوره ۳۴ ساله مورد بررسی، به ترتیب ۲۴/۰۴، ۲۵/۲۹ و ۲۶/۰۸ درجه سلسیوس خواهد بود. مقایسه دمای هوای آینده، با دمای هوای دوره پایه نشان‌دهنده افزایش دما طی سال‌های آینده است، اما این افزایش، در سناریو B1 کمتر از سناریو A1B است. در مقابل، بیشترین افزایش دمای هوای کشور در فصل‌های گرم سال در سناریوی A2 قابل مشاهده است. در مجموع، بیشترین افزایش دما به سال‌های ۲۰۸۰-۲۱۱۳ تحت سناریو A2 تعلق دارد که افزایش ۱۹/۹۱ درصدی میانگین هوای کشور را پیش‌بینی کرده است (شکل ۵).

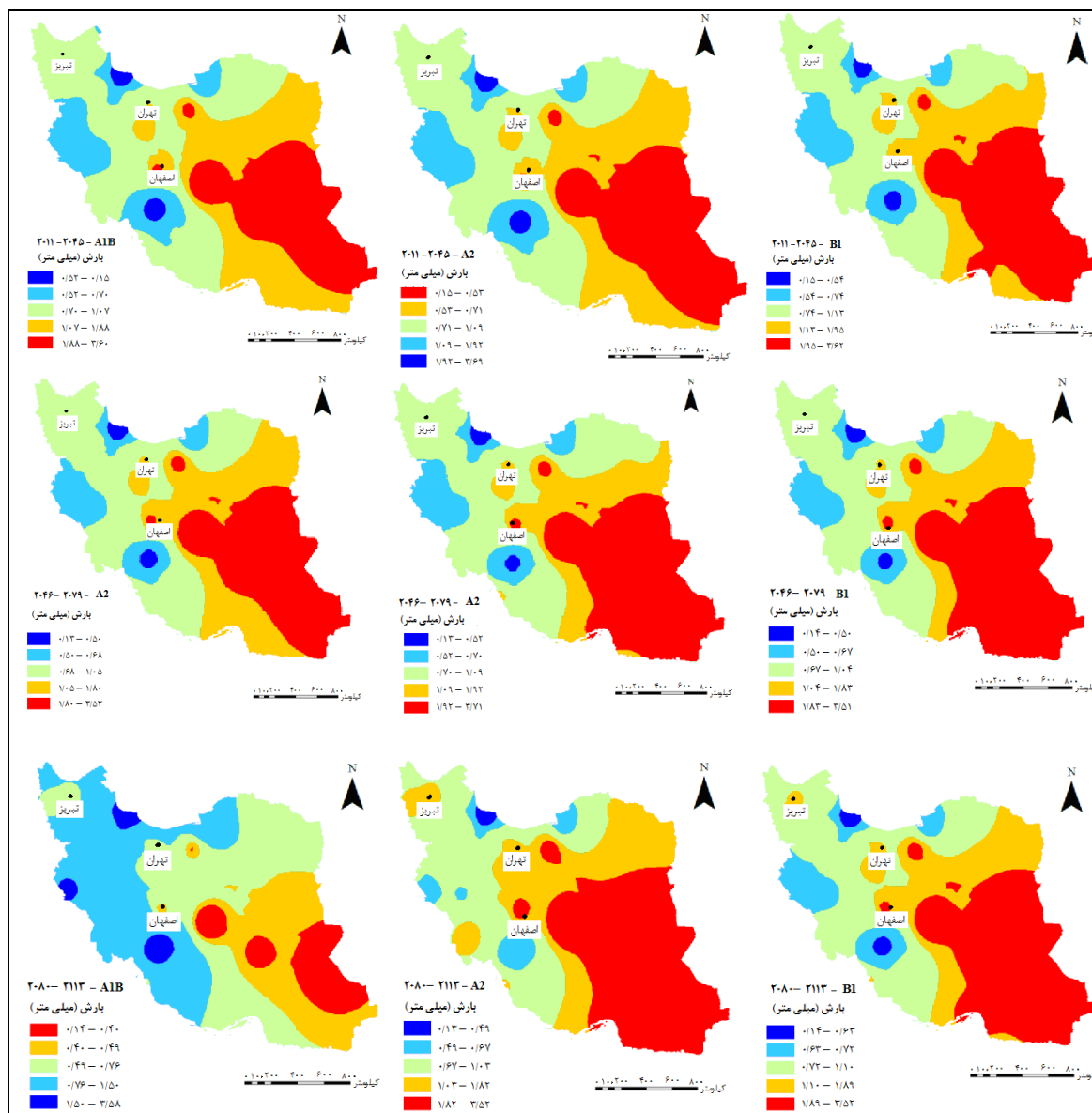
ارزیابی تغییرات مکانی دمای هوا در دوره سرد، طی سال‌های آینده بیانگر تشابه آن با توزیع مکانی دمای هوا در دوره گرم سال است. با این تفاوت که در سناریو B1، برای سال‌های ۲۰۸۰-۲۱۱۳، افزایش دمای هوا به جنوب شرقی کشور نیز گسترش یافته است.



شکل ۵. پیش‌بینی توزیع مکانی دمای هوا در دوره سرد با سناریوهای مختلف

ضمن آنکه حداقل دمای هوا نیز به بخش شمال غربی کشور محدود شده است. میانگین دمای هوا در دوره سرد سال تحت هر سه سناریو A1B، A2 و B1 از سال ۲۰۱۱ تا ۲۱۱۳ به ترتیب ۱۱/۱۲، ۱۱/۵۴ و ۱۰/۵۴ درجه سلسیوس است. این امر، ضمن آشکارسازی تفاوت دمای هوای کشور در دو دوره سرد و گرم، افزایش ۱۸/۳۹، ۱۹/۵۷ و ۱۳/۳۳ درصدی دمای هوا در دوره سرد نسبت به دوره پایه را نمایان می‌سازد. کمترین دمای هوای پیش‌بینی شده کشور در دوره سرد سال، به سناریو A1B در سال‌های ۲۰۴۵-۲۰۱۱ تعلق دارد که برابر ۳/۵۸ درجه سلسیوس است. در مقابل، بیشترین مقدار در سال‌های ۲۰۸۰-۲۱۱۳ با سناریو A2 مشاهده می‌شود که برابر ۲۵/۳۷ درجه سلسیوس است. پیش‌بینی میانگین بارش روزانه کشور طی سال‌های آینده تحت سه سناریوی A1B، A2 و B1 صورت گرفت (شکل ۶).

توزیع مکانی بارش روزانه در سطح کشور در سال‌های آینده نشان می‌دهد که کمترین بارش دریافتی به بخش جنوب شرقی کشور و بیشترین آن، به سواحل دریای خزر و ناحیه جنوب غربی کشور تعلق دارد. این روند، مشابه روند فعلی است که طی سال‌های آینده نیز حفظ خواهد شد.



شکل ۶. پیش‌بینی توزیع مکانی بارش تحت سناریوهای مختلف

با سناریوی A1B میانگین بارش روزانه کشور طی هر سه دوره ۳۴ ساله به ترتیب ۰/۹۳، ۰/۸۸ و ۰/۹۰ میلی‌متر در روز خواهد بود که نسبت به سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۰ (دوره پایه) افزایش ۶/۹، ۱/۱۵ و ۳/۴۵٪ بارندگی را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در سناریو A1B آن است که در این سناریو، بیشترین افزایش بارش به نیمه غربی کشور تعلق دارد که در سال‌های ۲۰۸۰-۲۱۱۳ مشهود است. در مقابل، بیشترین کاهش بارش در جنوب شرقی کشور با اعمال سناریوهای A2 و B1 پیش‌بینی شده است. میانگین بارش کشور در سناریوی A2 طی دوره‌های ۳۴ ساله به ترتیب ۰/۹۴، ۰/۹۱ و ۰/۷۸ میلی‌متر در روز است. بر این اساس، سناریوی بالا، کاهش ۱۱/۵۹٪ بارش از سال ۲۰۸۰ تا ۲۱۱۳ را نشان می‌دهد. با توجه به پیش‌بینی افزایش دما طی سال‌های آینده، این نتیجه منطقی به نظر می‌رسد. پیش‌بینی بارش تحت سناریوی B1 نشان می‌دهد، میانگین بارش وارده بر کشور، طی سال‌های آینده نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت؛ همان‌گونه که از شکل ۶ مشاهده می‌شود، میانگین بارش روزانه کشور طی دوره‌های ۳۴ ساله مورد مطالعه به ترتیب ۰/۹۵، ۰/۸۷ و ۰/۹۱ میلی‌متر در روز پیش‌بینی شده است. مقایسه این ارقام، با میانگین بارش دوره پایه، نشان‌دهنده افزایش بارش است. اگرچه از سال ۲۰۴۶ تا ۲۰۷۹ میانگین بارش دریافتی کشور نسبت به دوره پایه تغییر محسوسی ندارد. در مجموع، می‌توان اظهار داشت سناریو A2 با توجه به پیش‌بینی کاهش بارش طی سال‌های آینده به‌عنوان بحرانی‌ترین سناریو معرفی می‌شود.

بحث

در این پژوهش، با توجه به قابلیت مدل لارس دلبیوجی، به پیش‌بینی فراسنج‌های هواشناسی در سطح کشور اقدام شد. از آنجا که دقت برآورد این مدل به نحوه کالیبراسیون آن در دوره پایه بستگی دارد؛ بنابراین، ارزیابی عملکرد آن با شاخص‌های خطاسنجی در دوره پایه صورت گرفت. همان‌طور که در پژوهش‌های گذشته نیز بدان اشاره شده بود، دقت پیش‌بینی فراسنج‌های هواشناسی در دوره پایه در همه استان‌های کشور مناسب و قابل اطمینان بود (عجم‌زاده و ملاتی‌نیا، ۱۳۹۵؛ نصیری و یارمرادی، ۱۳۹۶؛ زاینده‌رودی و همکاران، ۱۳۹۲). در بین فراسنج‌های پیش‌بینی‌شده در مرحله کالیبراسیون، دقت مدل در پیش‌بینی دمای حداکثر نسبت به سایر فراسنج‌ها بیشتر بود. ضمن آنکه دقت تابش خورشیدی بیش از دمای حداقل و دقت بارش نیز کمتر از دمای حداقل بود. نتایج برخی مطالعات نیز بیانگر دقت بالای مدل لارس دلبیوجی. در پیش‌بینی دمای هوا نسبت به سایر فراسنج‌های هواشناسی است (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۴؛ اخوان و همکاران، ۱۳۹۴). اگرچه در مطالعه انصاری و همکاران (۱۳۹۳) و نصیری و یارمرادی (۱۳۹۶)، دقت پیش‌بینی دمای حداقل با مدل لارس دلبیوجی. بیش از دمای حداکثر بود، اما اختلاف نتایج را می‌توان ناشی از وسعت منطقه مورد مطالعه دانست. در این مطالعه، میانگین فراسنج‌های هواشناسی پیش‌بینی‌شده در همه استان‌ها مد نظر قرار گرفته است، در حالی که نتایج به‌صورت موردی، می‌تواند متفاوت باشد. ضمن آنکه شرایط کالیبره کردن مدل و بازه زمانی دوره پایه نیز می‌تواند از دیگر عوامل تأثیرگذار در حصول نتایج متفاوت، باشد (مرادی و همکاران، ۱۳۹۴).

در این پژوهش نیز، در راستای تحقیقات قبلی، فراسنج‌های هواشناسی دمای هوا و بارندگی تحت سناریوهای مختلف، طی سال‌های آینده پیش‌بینی شد؛ اما به برآورد تابش خورشیدی نیز به‌عنوان فراسنج هواشناسی مهم و مؤثر در انرژی سطح زمین پرداخته شد. پیش‌بینی تابش خورشیدی تحت همه سناریوها نشان‌دهنده افزایش مقدار آن طی سال‌های آینده بود که درصد افزایش در سناریو A1B طی سه دوره زمانی ۳۴ ساله، نسبت به دوره پایه به ترتیب ۰/۳۶، ۰/۷۷ و ۱/۲۹٪، در سناریو A2، ۰/۴۰، ۰/۴۶ و ۲/۱۳ و در سناریو B1 نیز به ترتیب برابر ۰/۱۹، ۰/۸۷ و ۰/۵۴٪ بود. بیشترین افزایش تابش خورشیدی به دوره ۲۰۸۰-۲۱۱۳ سناریو A2 تعلق داشت که برابر

۲/۱۳٪ افزایش تابش خورشیدی در سطح کشور بود. در مطالعه نصیری و یارمرادی (۱۳۹۶) و سیاری و همکاران (۱۳۹۰) نیز، شرایط بحرانی تغییر اقلیم در سناریو A2 مشاهده شد. با این وجود، تغییرات تابش خورشیدی طی سال‌های آینده در مقایسه با تغییرات دما و بارش ناچیز بود؛ اگرچه تغییرات تابش خورشیدی در مقایسه با سایر فراسنج‌ها ناچیز است، اما ذکر این نکته ضروری است که تغییرات اندک تابش خورشیدی، اثرات قابل ملاحظه‌ای بر مقدار انرژی دریافتی در سطح زمین خواهد داشت (کمالی و آقا شریعتمداری، ۱۳۹۶). هم‌سو با افزایش تابش خورشیدی طی سال‌های آینده، افزایش دما تحت هر سه سناریو، مسئله وقوع تغییر اقلیم در کشور را تأیید می‌کند. پژوهش‌های گذشته نیز وقوع تغییر اقلیم طی سال‌های آینده را به اثبات رسانده‌اند (فرزان‌منش و همکاران، ۲۰۱۲؛ کریمی و همکاران، ۲۰۱۵). عوامل متعددی در وقوع این پدیده تأثیرگذار است که یکی از آن دلایل، می‌تواند افزایش جمعیت شهری و تولید گازهای گلخانه‌ای باشد که در مطالعه براتی و همکاران (۱۳۹۶) نیز بدان اشاره شده است. به دلیل اهمیت دمای هوا در مباحث تغییر اقلیم، پیش‌بینی این متغیر به تفکیک دوره‌های سرد و گرم سال صورت گرفت. نتایج بیانگر آن بود که افزایش دمای هوا در دوره سرد، در همه سناریوها محسوس‌تر از دوره گرم خواهد بود. از آنجا که بیشتر بارش‌های دریافتی کشور در فصل سرد سال اتفاق می‌افتد، این امر لزوم توجه بیشتر به مدیریت آب در دوره سرد سال را می‌رساند.

پیش‌بینی تغییرات بارندگی نشان داد که تغییرات بارش کشور طی سال‌های آینده از روند یکسان و یکنواختی پیروی نمی‌کند؛ به طوری که در برخی سال‌ها، به صورت افزایشی و در برخی دیگر، کاهش‌ی خواهد بود. بابائیان و همکاران (۱۳۸۸) و عباسی و همکاران (۱۳۸۹) نیز، نتایج مشابهی از تغییرات نوسانات بارندگی ایران، طی سال‌های آینده، گزارش کردند. پیچیدگی فرایند بارش و وجود عوامل متعدد مؤثر در وقوع آن را می‌توان از عوامل محدودکننده پیش‌بینی بارش تلقی نمود. وجود بی‌نظمی و نوسانات زیاد در سری زمانی بارندگی، می‌تواند از دلایل اصلی کمبود آب و وقوع دوره‌های بلندمدت خشکسالی باشد که از سوی زاینده‌رودی و همکاران (۱۳۹۲) و انصاری و همکاران (۱۳۹۳) نیز، گزارش شده است؛ از طرفی، اگرچه در بیشتر سناریوهای مورد بررسی، افزایش بارش کشور مشاهده شد، اما در سناریو A2 برای سال‌های ۲۰۸۰-۲۱۱۳ کاهش بارش به میزان ۹/۳٪ پیش‌بینی گردید. بیشترین افزایش بارش نیز به سناریو B1 برای ۳۴ سال آینده تعلق داشت که معادل ۱۰/۴۷٪ خواهد بود؛ همچنین، هم‌سو با تحقیقات انجام‌شده، بیشترین کاهش بارش در جنوب شرقی کشور و بیشترین افزایش آن، در نیمه غربی مشاهده شد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۴؛ عباسی و همکاران، ۱۳۸۹؛ اخوان و همکاران، ۱۳۹۴). هم‌زمانی بسیار بالای نواحی غربی کشور با نفوذ یا گسترش پرفشار دریای سیاه، یکی از دلایل افزایش بارش این نواحی است. همان‌گونه که حسینی و همکاران (۱۳۹۴) بیان کردند، ریخت‌شناسی، توپوگرافی و موقعیت جغرافیایی ویژه مناطق غربی کشور در تقویت و هدایت زبانه‌هایی از سامانه پرفشار دریای سیاه به این بخش از کشور نقش بسزایی دارد؛ از طرفی، برای بارش، نه تنها وجود بخار آب و رطوبت در هوا لازم است، بلکه مکانیزمی برای سرد شدن هوا تا رسیدن به فشار بخار اشباع نیز ضروری است؛ بنابراین، با توجه به افزایش دمای هوا به‌ویژه در نیمه جنوبی کشور، پیش‌بینی کاهش بارندگی منطقی به نظر می‌رسد.

نتیجه‌گیری

پیش‌بینی فراسنج‌های هواشناسی طی سال‌های آینده در سطح کشور با اعمال سناریوهای مختلف در مدل لارس دلبلیو.جی. نشان‌دهنده افزایش دما و تابش خورشیدی و نوسان بارش بود؛ اگرچه تغییرات دما بیشتر از سایر فراسنج‌ها مشاهده شد؛ به طوری که حداکثر مقدار آن می‌تواند به ۴/۰۴ درجه سلسیوس نیز برسد. توزیع مکانی

تغییر اقلیم آینده نیز بیانگر آن بود که این امر، در نیمه جنوبی کشور با شدت بیشتری به وقوع خواهد پیوست که لزوم انجام اقدامات صحیح برای سازگاری و استفاده بهینه از شرایط آینده را می‌رساند. ذکر این نکته ضروری است که پیش‌بینی وضعیت آینده، بر اساس شرایط فعلی و با لحاظ عدم قطعیت، امری اجتناب‌ناپذیر است. کاهش عدم قطعیت، مستلزم اندازه‌گیری و مطالعات بیشتر است که افزایش تعداد ایستگاه‌های تحت مطالعه در اقلیم‌های مختلف، می‌تواند یکی از راهکارهای مؤثر باشد. با این حال، ادامه روند حاضر و پیش‌بینی تغییر اقلیم آینده، اعمال مدیریت بهینه در بخش کشاورزی و منابع آب را دوجندان می‌کند. از طرفی، پیش‌بینی افزایش تابش خورشیدی می‌تواند در جهت مدیریت بهینه انرژی و استفاده از انرژی خورشیدی به‌منظور تولید نیرو در سال‌های آینده مورد توجه قرار گیرد که می‌تواند نقش بسزایی در مدیریت منابع آبی کشور داشته باشد؛ بنابراین، لازم است، با توجه به این امر و آگاهی از تبعات منفی تغییرات اقلیمی، برنامه‌ریزان، به‌ویژه در بخش‌های مدیریت منابع آب، کشاورزی، محیط‌زیست، بهداشت و سلامت و همچنین، بخش‌های اقتصادی و منابع طبیعی راهکارهای لازم برای کاهش پیامدها و سازگاری با شرایط آب‌وهوایی جدید را اتخاذ نمایند تا ضمن استفاده بهینه از منابع موجود، از وقوع خسارات در آینده نیز جلوگیری به عمل آید.

منابع

- اخوان، سمیرا؛ قبائی سوق، محمد؛ مساعدی، ابوالفضل (۱۳۹۴) بررسی اثر تغییر اقلیم بر مقدار نیاز خالص آبیاری محصولات عمده دشت همدان - بهار با استفاده از نتایج مدل ریزمقیاس LARS-WG 5، پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۵-۴۶، صص. ۴۶-۲۵.
- انصاری، حسین؛ خدیوی، مهدی؛ صالح‌نیا، نسرین؛ بابائیان، ایمان (۱۳۹۳) بررسی عدم قطعیت مدل LARS تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 در پیش‌بینی بارش و دما (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک مشهد)، آبیاری و زهکشی ایران، ۸ (۴)، صص. ۶۷۲-۶۶۴.
- بابائیان، ایمان؛ نجفی نیک، زهرا؛ زایل عباسی، فاطمه؛ حبیبی نوخندان، مجید؛ ادب، حامد؛ ملبوسی، شراره (۱۳۸۸) ارزیابی تغییر اقلیم کشور در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ میلادی با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHO-G، جغرافیا و توسعه، ۷ (۱۶)، صص. ۱۵۲-۱۳۵.
- بحری، معصومه؛ دستورانی، محمدتقی؛ گودرزی، مسعود (۱۳۹۴) بررسی خشکسالی‌های دهه ۲۰۳۰-۲۰۱۱ تحت اثر تغییر اقلیم، مطالعه موردی: حوزه آبخیز اسکندری، استان اصفهان، مهندسی و مدیریت آبخیز، ۷ (۲)، صص. ۱۵۷-۱۷۱.
- براتی، غلامرضا؛ احمدی، محمود؛ میرزایی، ابراهیم؛ بیتار، محمد (۱۳۹۵) ترازبایی زبانه‌های پر فشار سیبری هنگام رخداد سرماهای بحرانی در ایران مرکزی، جغرافیا و پایداری محیط، ۷ (۲۶)، صص. ۱۲۹-۱۱۷.
- براتی، غلامرضا؛ احمدی، محمود؛ میرزایی، ابراهیم؛ پژوه، فرشاد (۱۳۹۶) تحلیل روابط ابرناکی شبانه و رخداد شب‌های گرم در ایران مرکزی، جغرافیا و پایداری محیط، ۷ (۲۳)، صص. ۱۱-۱.
- توکلی، احسان (۱۳۹۰) برآورد تبخیر و تعرق مرجع در شرایط کمبود داده (مطالعه موردی: خراسان شمالی)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: دکتر بیژن قهرمان، دانشگاه فردوسی، مشهد.
- جهانبخش اصل، سعید؛ خورشیددوست، علی محمد؛ عالی‌نژاد، محمد حسین؛ پوراصغر، فرناز (۱۳۹۵) تأثیر تغییر اقلیم بر دما و بارش با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی (مطالعه موردی: حوضه شهرچای ارومیه)، هیدروژئومورفولوژی، ۲ (۷)، صص. ۱۲۲-۱۰۷.
- حسینی، سیدمحمد؛ مسعودیان؛ سید ابوالفضل؛ موحدی، سعید (۱۳۹۴) بررسی هم‌زمانی پر فشار رخداد دریای سیاه و بارش

- روزانه در ایران زمین، تحقیقات جغرافیایی، ۳۰ (۱)، صص. ۱۶-۱.
- خلیلی اقدم، نبی؛ مساعدی، ابوالفضل؛ سلطانی، افشین؛ کامکار، بهنام (۱۳۹۱) ارزیابی توانایی مدل LARS-WG در پیش‌بینی برخی از پارامترهای جوی سنندج، پژوهش‌های حفاظت آب‌و‌خاک، ۱۹ (۴)، صص. ۱۰۲-۸۵.
- رضایی، مریم؛ نهتانی، محمد؛ آبکار، علیجان؛ رضایی، معصومه؛ میرکازهی ریگی، مهری (۱۳۹۳) بررسی کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM) در پیش‌بینی پارامترهای دمایی در دو اقلیم خشک و فراخشک (مطالعه موردی: کرمان و بم)، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۵ (۱۰)، صص. ۱۳۱-۱۱۷.
- زارع ایبانه، حمید؛ بیات ورکشی، مریم (۱۳۹۱)، مطالعه تأثیرپذیری تعداد روزهای بارانی از پدیده انسو در ایران، پژوهش‌های حفاظت آب‌و‌خاک، ۱۹ (۱)، صص. ۴۰-۲۱.
- زاینده‌رودی، فروغ؛ یزدان‌پناه، نجمه؛ سیاری، نسرين (۱۳۹۲) پیش‌بینی تغییرات بارش سه دوره ۳۰ ساله آینده با استفاده از مدل ریزمقیاس LARS-WG5 و مدل گردش عمومی Hadcm3 (مطالعه موردی: شهر کرمان)، اولین همایش ملی چالش‌های منابع آب و کشاورزی انجمن آبیاری و زهکشی ایران - دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان اصفهان، صص. ۸-۱.
- سهرابیان، الهه؛ مفتاح هلقی، مهدی؛ قربانی، خلیل؛ گلین، سعید؛ ذاکری‌نیا، مهدی (۱۳۹۴) بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر آبدهی حوضه با دخالت مدل هیدرولوژی (مطالعه موردی: حوضه گالیکش در استان گلستان)، پژوهش‌های حفاظت آب‌و‌خاک، ۲۲ (۲)، صص. ۱۲۵-۱۱۱.
- سیاری، نسرين؛ علیزاده، امین؛ بنایان اول، محمد؛ فریدحسینی، علیرضا؛ حسامی کرمانی، مسعودرضا (۱۳۹۰) مقایسه دو مدل گردش عمومی جو در پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی و نیاز آبی گیاهان تحت تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه کشف‌رود)، آب‌و‌خاک، ۲۵ (۴)، صص. ۹۲۵-۹۱۲.
- صالح‌نیا، نسرين؛ علیزاده، امین؛ سیاری، نسرين (۱۳۹۳) مقایسه دو مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG و ASD در پیش‌بینی بارش و دما تحت شرایط تغییر اقلیم و در وضعیت‌های آب‌وهوایی متفاوت، آبیاری و زهکشی ایران، ۸ (۲)، صص. ۲۴۵-۲۳۳.
- عباسی، فاطمه؛ بابائیان، ایمان؛ حبیبی نوخندان، مجید؛ گلی مختاری، لیلی؛ ملبوسی، شراره؛ عسکری، شمس‌الله (۱۳۸۹) ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر دما و بارش ایران در دهه‌های آینده، با کمک مدل MAGICC-SCENGEN، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۲۰ (۷۲)، صص. ۱۰۹-۹۱.
- عجم‌زاده، علی؛ ملائی‌نیا، محمودرضا (۱۳۹۵) ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه فیروزآباد استان فارس، با ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های گردش جوی به‌وسیله نرم‌افزارهای SDSM و LARS-WG، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۲ (۱)، صص. ۱۰۹-۹۵.
- غلام‌پور، زهرا (۱۳۹۳) بررسی تغییر اقلیم ایستگاه شیراز در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی مدل گردش عمومی جو (AOGCM)، نخستین همایش ملی کاربرد مدل‌های پیشرفته تحلیل فضایی در آمایش سرزمین، صص. ۹-۱.
- کمالی، سعیده؛ آقا شریعتمداری، زهرا (۱۳۹۶) بررسی میزان تأثیر آلاینده‌های جوی بر کارایی رابطه آنگستروم - پرسکات در برآورد تابش خورشید (مطالعه موردی: کرج)، تحقیقات آب‌و‌خاک ایران، ۴۸ (۵)، صص. ۱۰۶۱-۱۰۵۳.
- کوهستانی، شاپور؛ اسلامیان، سید سعید؛ بسالت‌پور، علی‌اصغر (۱۳۹۶) تأثیر تغییر اقلیم بر درجه حرارت حوضه آبریز زاینده‌رود با استفاده از محاسبات نرم‌یادگیری ماشینی بی‌زین، علوم آب‌و‌خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۱ (۱)، صص. ۲۱۶-۲۰۳.
- گودرزی، مسعود؛ خسروانپان، جهانتاب؛ حجازی، سید اسداله (۱۳۹۴) کاربرد مدل LARS-WG در پیش‌بینی پارامترهای

هواشناسی حوضه قره‌سو، نشریه فضای جغرافیایی، ۱۵ (۵۱)، صص. ۲۶۳-۲۷۹.

مرادی، میلاد؛ غیائی، ماندانا؛ بابایی، آزاده؛ رهنما، محمدباقر (۱۳۹۴) ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی با استفاده از مدل LARS-WG (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک کرمان)، دومین همایش ملی راهکارهای پیشروی بحران آب در ایران و خاورمیانه، شیراز، صص. ۷-۱.

مظفری، غلامعلی؛ شفیعی، شهاب (۱۳۹۳) ارزیابی شرایط خشکسالی در استان سیستان و بلوچستان طی (۱۴۱۰-۱۳۹۱) با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو، اطلاعات جغرافیایی، ۲۴ (۹۳)، صص. ۱۱۴-۱۰۱.

نصیری، بهروز؛ یارمرادی، زهرا (۱۳۹۶) پیش‌بینی تغییرات پارامترهای اقلیمی استان لرستان در ۵۰ سال آتی با استفاده از مدل HADCM3، اطلاعات جغرافیایی، ۲۶ (۱۰۱)، صص. ۱۵۴-۱۴۳.

- Farzanmanesh, R., Abdullah, A. M., Shakiba, A. R., Amanollahi, J. (2012) Impact Assessment of Climate Change in Iran Using LARS-WG Model, **Pertanika Journal Science. & Technology**, 20 (2), pp. 299-311.
- Ghazal, R., Ardeshir, A., Zahedi Rad, I. (2014) Climate Change and Stormwater Management in Tehran, **Procedia Engineering**, 89, pp. 780-787.
- Hashmi, M. Z., Shamseldin, A. Y., Melville, B. W. (2009) Downscaling of Future Rainfall Extreme Events: Aweather Generator Based Approach, **18th World IMACS/ MODSIM Congress**, Cairns, Australia, pp. 13-17.
- IPCC (2007) Summary for Policy Makers Climate Change: The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Forth Assessment Report**, Cambridge University Press.
- Karimi, S., Yavari, A. R., Niksokhan, M. H. (2015) Prediction of Temperature and Precipitation in Damavand Catchment in Iran by Using LARS -WG in Future, **Earth Science**, 4 (3), pp. 95-100.
- Nazarifard, M., Seyfi, K., Moemeni, R. (2007) Evaluation of Geostatistical Methods and Tisen in Estimation of Evapotranspiration Changes (Case Study: Hamedan Province), **9th Irrigation and Evaporation Reducing**, Kerman, pp. 1-8.
- Rajabi, A. Sedghi, H. Eslamian, S., Musavi, H. (2010) Comparison of LARS-WG and SDSM Downscaling Models in Kermanshah (Iran). Ecology, **Environment and Conservation**, 16 (4), pp. 1-7.
- Semenov, M. A., Barrow, E. M. (2002) LARS-WG a Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies, **User's manual**, Version 3.0.

