

رویکردی متفاوت در ریزمقیاس‌نمایی و پیش‌یابی اقلیمی مؤلفه دما (مطالعه موردی استان گلستان)

غلامرضا روشن^{۱*} و عبدالعظیم قانقرمه^۱

۱. استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

(دریافت: ۹۳/۱۰/۳۰، پذیرش نهایی: ۹۴/۷/۱۴)

چکیده

پیش‌یابی تغییرپذیری زمانی- مکانی متغیرهای اقلیمی در مقیاس محلی و منطقه‌ای برای برنامه‌ریزی‌های آتی در سراسر جهان، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است؛ بنابراین پژوهش حاضر سعی دارد با استفاده از رویکردی جدید، به پیش‌یابی و سپس ریزمقیاس‌نمایی مقادیر مؤلفه دمایی ایستگاه‌های هواشناسی استان گلستان برای دوره آماری ۱۳۹۱ تا ۱۴۵۰ بپردازد. در روش پیشنهادی جهت پیش‌یابی و ریزمقیاس‌نمایی مؤلفه دما، از پیش‌بینی‌کننده ۲۶ مؤلفه مدل گردش عمومی جو HadCM3 برای ۱۵ پیکسل که ابعاد هر پیکسل به 2.5×3.75 درجه است، استفاده شد که بر این اساس تعداد پیش‌بینی‌کننده‌ها به ۳۹۰ مؤلفه بسط داده شد. در ادامه این تحقیق برای بررسی عملکرد مدل پیشنهادی از ۵ ایستگاه شاهد با توجه به شرایط متفاوت توپوگرافی و اقلیمی در سطح استان استفاده شد که نتایج مؤید اعتبار و تطبیق بالای داده‌های شبیه‌سازی‌شده در مقایسه با داده‌های مشاهداتی سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۰ است. در نهایت خروجی‌ها نشان داده است که با توجه به تغییرات اقلیمی دهه‌های آتی، افزایش دما برای بیشتر ماه‌های سال انکارناپذیر بوده است، به‌گونه‌ای که در مقایسه بین ماه‌های مختلف سال نیز این نتیجه استنتاج شد که پهنه‌های دمایی استان در ماه‌های اردیبهشت، مرداد، شهریور و بهمن بر اساس سناریوها و مؤلفه‌های مختلف دمایی، بیشینه مساحت را از لحاظ افزایش دما در مقایسه با سایر ماه‌های سال تجربه خواهند کرد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، ریزمقیاس‌نمایی آماری، شبیه‌سازی، مدل‌های گردش عمومی جو.

۱. مقدمه

متغیرهای اقلیمی منطقه مورد نظر دارد و برخی فرایندها مثل تولید رواناب به این تغییرپذیری حساسند؛ بنابراین جهت کاوش مقادیر مؤلفه‌های اقلیمی و نیز دستیابی به تصویری واضح از تغییرات احتمالی اقلیم آتی در مناطق مختلف زمین، خروجی بزرگ‌مقیاس مدل‌های گردش عمومی جو، ریزمقیاس‌نمایی می‌شوند. قبل از سناریوسازی برای اقلیم آتی، دانستن این نکته که چگونه می‌توان پیش‌یابی مناسبی از اقلیم محلی داشت، اهمیت بسزایی دارد؛ بنابراین ارزیابی خروجی مدل‌های گردش عمومی جو و نیز خروجی روش‌هایی که برای ریزگردانی خروجی مدل‌های گردش عمومی جهت تهیه داده‌های محلی به کار می‌روند، ضروری است. به‌منظور دستیابی به این مهم، باید از مدل‌های مختلف ریزگردانی در تولید داده‌های روزانه شناخت کافی داشت؛ چرا که

بررسی مقادیر مؤلفه‌های اقلیمی، به دلیل مشخص بودن تأثیر معنادار آن‌ها بر جوامع انسانی و سیستم‌های طبیعی، همواره از اهمیت روزافزونی برخوردار بوده است؛ بنابراین پیش‌یابی تغییرپذیری زمانی- مکانی این متغیرها در مقیاس محلی و منطقه‌ای جهت برنامه‌ریزی‌های آتی در سراسر جهان، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است (قانقرمه و همکاران، ۲۰۱۳). برای این منظور، سری‌های زمانی طولانی‌مدت داده‌های هواشناسی موردنیاز است که اغلب به راحتی در دسترس نیستند. خروجی سناریوهای جهانی اقلیمی حاصل از پیش‌بینی‌های بزرگ‌مقیاس (معمولاً شبکه‌های ۱۲۵ تا ۵۰۰ کیلومتر) مدل‌های گردش عمومی جو نیز برای چنین کاربردی مناسب نیست؛ چرا که تغییرپذیری فضایی کوچک‌مقیاس به دلیل عواملی مانند پوشش سطحی، توپوگرافی، و غیره، تأثیر زیادی بر

به‌کارگیری روش‌های نامناسب یا استفاده نادرست از مدل‌ها، می‌تواند باعث افزایش عدم قطعیت گردد (فرج‌زاده و همکاران، ۲۰۱۴). تکنیک‌های ریزگردانی آماری که از برقراری روابط آماری بین مشاهدات محلی و متغیرهای بزرگ‌مقیاس بهره می‌گیرد، فقدان قدرت تفکیک مکانی میان آنچه مدل‌های اقلیمی کنونی قادر به تولید آن‌ها هستند و آنچه را که برای ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم مورد نیاز است پر می‌کنند (دبیک و کولایالی، ۲۰۰۶؛ ویلی و داوسن، ۲۰۱۲). این روش‌ها به تصحیح بخشی از خطاهای سیستماتیک خروجی مدل‌های گردش عمومی جو از قبیل اربب در میانگین و غیره، قادرند و به افزایش دقت خروجی مدل‌های گردش عمومی جو تا ابعاد ایستگاهی می‌انجامند. از آنجا که مطالعات بسیاری در زمینه ریزگردانی در نقاط مختلف دنیا صورت گرفته است، در بررسی‌های زیر به تحقیقات مرجع که به لحاظ اهمیت، تقریباً در بیشتر منابع ریزمقیاس‌نمایی تک به آن‌ها ارجاع داده شده بود، پرداخته می‌شود. از مهم‌ترین مطالعات نظام‌مند و جامع تطبیقی در این زمینه، می‌توان به مطالعات ویلی و همکاران (۲۰۰۲) و وود و همکاران (۲۰۰۲) اشاره کرد. آن‌ها توابع تبدیل تجربی، مولدهای هواشناسی و طرح‌های طبقه‌بندی آب‌وهوایی را با استفاده از شبیه‌سازی‌های تغییر اقلیم و نیز داده‌های مشاهداتی در یک منطقه جغرافیایی بررسی کردند. نتایج مفیدی از این مطالعات حاصل شد، اما به دلیل آنکه آن‌ها به‌جای توصیه روشی خاص در مقایسه با روش‌های دیگر، به دنبال مهارت‌ها و کاستی‌های روش‌های مختلف بودند، نیازمند ارزیابی دقیق‌تر بود.

شبکه‌های عصبی که در حال حاضر در همه پدیده‌ها و به‌ویژه در موارد غیرخطی به کار می‌روند، در مسائل ریزگردانی نیز از ارزش زیادی برخوردارند؛ تراکم شبکه برآورد مشروط (کدن) که بر پایه شبکه عصبی چندلایه استوار است، در مطالعات بسیاری جهت ریزگردانی از جمله برای مقادیر حدی دما و بارش استفاده شده است. کتن (۲۰۱۲) با به‌کارگیری این الگوریتم و اجرای نمونه موردی در حوضه رود فریزر در بریتیش کلمبیا، به توسعه بسته نرم‌افزاری کیدنس در محیط نرم‌افزار R پرداخت که

شرایط مساعدی را برای ریزگردانی تصادفی مقادیر اقلیمی فراهم می‌سازد (کتن، ۲۰۱۲).

مولدهای هواشناسی تصادفی، روشی پرکاربرد در تولید سری‌های زمانی روزانه‌اند. یکی از جالب‌ترین رویکردهای این روش، مدل‌های تعمیم‌یافته خطی (Generalized Linear Model (GMLs)) است (فورر و کیتز، ۲۰۰۷). رویکرد کوانتایل-مچینگ، مدت‌زمان زیادی است که شناخته شده و در مطالعات مختلف از رویکردهای توسعه‌یافته آن استفاده شده است. یکی از این رویکردها، روش ریزگردانی آماری با نام تبدیل-تابع توزیع تجمعی (CDF) است که به‌منظور تولید توابع توزیع تجمعی متغیرهای اقلیمی سطح زمین، با به‌کارگیری پیش‌بینی‌کننده‌های بزرگ‌مقیاس، توسعه داده شد (مایکلانجلی و همکاران، ۲۰۰۹). یکی از کارهای بنیادی در زمینه ریزگردانی کار فراستو و همکاران (۲۰۱۱) است. آن‌ها شش روش ریزگردانی آماری را، به‌منظور ریزگردانی بارش روزانه در ۳۰ ایستگاه باران‌سنج جنوب شرقی استرالیا، با هم مقایسه کردند. روش‌های بررسی‌شده، در بازتولید طیف وسیعی از آمارها که نقش مهمی در مطالعات هیدرولوژیکی دارند -از جمله تغییرپذیری درون سالانه و وابستگی مکانی با استفاده از داده‌های NCEP/NCAR و خروجی مدل‌های گردش عمومی- آزمایش شدند (فراستو و همکاران، ۲۰۱۱). در مطالعه‌ای دیگر توسط متخصصان محیط زیست کانادا (۲۰۱۲)، پنج روش ریزگردانی آماری تک‌ایستگاهی و چندایستگاهی شامل ریزگردانی آماری رگرسیونی اتوماتیک، تصحیح بایاس تفکیک مکانی، شبکه‌های عصبی رگرسیون کوانتال، تری جن و ریزگردانی بسط‌یافته به‌منظور ریزمقیاس‌نمایی مقادیر حدی منطقه با توپوگرافی پیچیده -کوهستانی، دشتی و ساحلی- در غرب کانادا، ارزیابی شدند (برگر و همکاران، ۲۰۱۲). در ایران نیز تحقیقاتی در این زمینه صورت گرفته است که در نمونه‌هایی از آن‌ها سلطانی و همکاران (۲۰۰۰) WGEN را برای شبیه‌سازی پارامترهای مختلف هواشناسی از جمله دماهای ماکزیمم و مینیمم در ایستگاه تبریز به کار

تصویر روشنی از تغییرات اقلیمی آینده برای منطقه مورد مطالعه است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. معرفی روش پیشنهادی جهت پیش‌یابی

مؤلفه‌های آب و هوایی حداکثر و حداقل دما

در این پژوهش، به منظور پیش‌یابی اقلیمی از پیش‌بینی‌کننده‌های مدل گردش عمومی جو HadCM3 با دو سناریوی A2 و B2 استفاده شده است. شایسته توضیح است که پیش‌بینی‌کننده‌های مدل گردش عمومی جو HadCM3، شامل ۲۶ مؤلفه گردش عمومی جو است که با مقیاس روزانه برای کل کره زمین و با قدرت تفکیک 2.5×3.75 درجه برای دهه‌های گذشته و آینده تهیه شده است. شایان ذکر است که مدل HadCM3 بر مبنای انتقالات فیزیکی، ماده و انرژی پایه‌گذاری شده است (شمسی‌پور، ۱۳۹۲).

پیش‌بینی‌کننده‌های بیست‌وشش‌گانه مدل HadCM3 شامل میانگین سطح فشار دریا، جریان هوا، سرعت مداری باد، سرعت نصف‌النهاری، چرخندگی، جهت باد، واگرایی، ارتفاع سطح فشار، رطوبت نسبی، رطوبت ویژه و دمای ارتفاع ۲ متری از سطح زمین است که برای سه سطح فشار سطح دریا، ارتفاع ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال در نظر گرفته شده است (جدول ۱). این مطلب شایان ذکر است که در مراحل بعدی از این ۲۶ مؤلفه به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده استفاده شد.

بر مبنای جدول ۱، ملاحظه می‌شود که تمامی پیش‌بینی‌کننده‌های مدل HadCM3، از مؤلفه‌های پیوسته دینامیک جوی هستند؛ بنابراین امکان پیش‌گویی یا ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای پیوسته جوی به نحو بهتری خواهد بود.

در ادامه این موضوع قابل تأمل است که ۲۶ مؤلفه پیش‌گویی‌کننده در یک فضای 2.5×3.75 درجه به منظور پیش‌یابی و تعیین دمای آن موقعیت، نمی‌تواند راهکاری مناسب برای پیش‌یابی و ریزمقیاس‌نمایی باشد. معمولاً تغییرپذیری دمای یک محل متأثر از

بردند. مرادی و نصرتی (۲۰۰۲) CLIMGEN را برای شبیه‌سازی دماهای حداکثر و حداقل و همچنین تابش خورشید در چند ایستگاه ایران به کار بردند. همچنین در پژوهشی دیگر از مولد هواشناسی CLIMGEN برای شبیه‌سازی تصادفی دماهای بیشینه و کمینه ۱۰ ایستگاه هواشناسی ایران با شرایط متفاوت اقلیمی استفاده شد که بعد از ارزیابی آماری نتایج، مشخص گردید که داده‌های شبیه‌سازی‌شده انطباق مناسبی با داده‌های مشاهداتی دارند (نصرتی و همکاران، ۱۳۸۶).

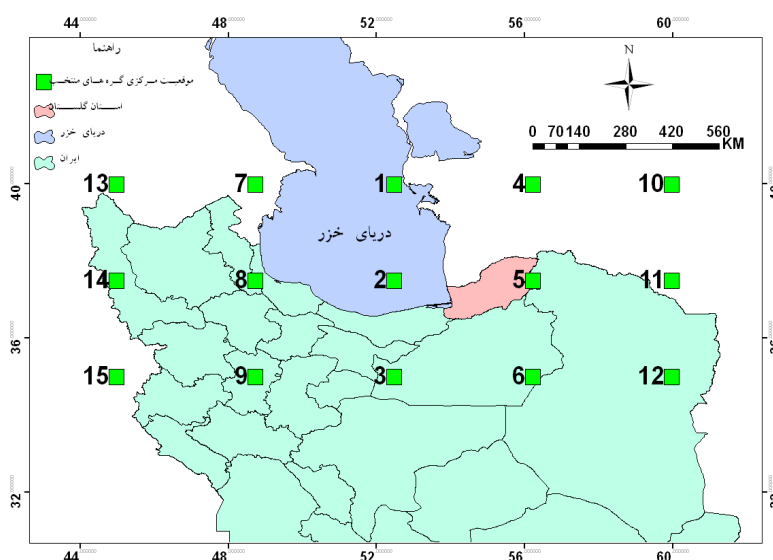
نصرتی و همکاران (۲۰۰۵) در تحقیقی به نام ارزیابی روش شبیه‌سازی تصادفی برای تولید داده‌های هواشناسی به‌منظور شبیه‌سازی تصادفی دماهای بیشینه و کمینه، از یک مولد هواشناسی به نام CLIMGEN برای تولید داده‌های دما استفاده کردند. آذرانفر و همکاران (۱۳۸۶) برای ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر بارش و دما در حوضه آبریز زاینده‌رود با استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی، خروجی این مدل‌ها را ریزگردانی آماری کردند. آشفته و مساح بوانی (۱۳۸۹) به‌منظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر دبی‌های حداکثر، مقادیر دما و بارش مدل‌های جوی-اقیانوسی را از طریق روش‌های مکانی تناسبی و زمانی عامل تغییر، ریزگردانی کردند. روشن و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای با استفاده از روش آماری ریزمقیاس‌نمایی Lars-WG، نقش گرمایش جهانی بر منحنی شدت و فراوانی بارش در شمال غرب ایران را ارزیابی کردند. همچنین در تحقیقی دیگر جهت شبیه‌سازی اثر گرمایش جهانی بر تقاضای انرژی در شمال غرب کشور از روش آماری ریزگردانی LARS-WG استفاده شد (روشن و همکاران، ۲۰۱۳).

پژوهش حاضر سعی دارد با استفاده از رویکردی جدید، به پیش‌یابی و سپس ریزگردانی مقادیر مؤلفه‌های ماهانه حداکثر و حداقل دمای ایستگاه‌های هواشناسی استان گلستان در بستر تغییرات اقلیم احتمالی ناشی از فعالیت‌های انسانی، در سده آتی بپردازد؛ بنابراین از این رو تا حد ممکن، سعی در ارائه

سامانه‌های همدیدی است که از مناطق دیگر نفوذ می‌کنند و از دیدگاه همدیدی ابعاد این سیستم‌ها چیزی بیشتر از یک پیکسل $3,75 \times 2,5$ درجه است. بدین منظور آزمون‌های متوالی جهت انتخاب بهترین محدوده برای ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای اقلیمی استان گلستان ارائه شد که شامل محدوده‌ای با ۱۵ فضای کاری (۱۵ پیکسل) است که در شکل ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. خروجی بیست‌وشش‌گانه مدل HadCM3 برای سه سطح SLP، ارتفاع ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال

ردیف	مؤلفه‌های گردشی	ردیف	مؤلفه‌های گردشی
۱	Mean sea level pressure	۱۴	500 hPa geopotential height
۲	500 hPa airflow strength	۱۵	850 hPa geopotential height
۳	500 hPa zonal velocity	۱۶	Surface airflow strength
۴	500 hPa meridional velocity	۱۷	Surface zonal velocity
۵	500 hPa vorticity	۱۸	Surface meridional velocity
۶	500 hPa wind direction	۱۹	Surface vorticity
۷	500 hPa divergence	۲۰	Surface wind direction
۸	850 hPa airflow strength	۲۱	Surface divergence
۹	850 hPa zonal velocity	۲۲	Relative humidity at 500 hPa
۱۰	850 hPa meridional velocity	۲۳	Relative humidity at 850 hPa
۱۱	850 hPa vorticity	۲۴	Near surface relative humidity
۱۲	850 hPa wind direction	۲۵	Surface specific humidity
۱۳	850 hPa divergence	۲۶	Mean temperature at 2m



شکل ۱. ۱۵ پیکسل پیشنهادی برای ۲۶ مؤلفه پیش‌یابی‌کننده، به‌منظور پیش‌یابی مؤلفه‌های حداقل و حداکثر دمای استان گلستان

۲.۲. روش ریزمقیاس‌نمایی

در این تحقیق به منظور ریزمقیاس‌نمایی از داده‌های دمایی ۴۸ ایستگاه همدید، کليما تولوژی و تبخیرسنجی استان گلستان، پس از بازسازی داده‌ها برای یک دوره مشترک از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۰ و کنترل کیفیت داده‌ها با استفاده از ران تست و کولموگرووف-اسمیرنوف استفاده شد. به این معنی که برای پیش‌یابی حداقل و حداکثر دمای ماهانه در هر ایستگاه، ابتدا میانگین ماهانه ۲۶ مؤلفه پیش‌یابی‌کننده در ۱۵ فضای کاری که معادل ۳۹۰ مؤلفه می‌شود، استفاده شده است. این فرایند برای داده‌های مشاهداتی سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۰ انجام پذیرفت و سپس در گام بعدی پس از برازش مدل مناسب، از این مدل جهت پیش‌یابی و ریزمقیاس‌نمایی دما در اندازه ایستگاهی استفاده شد. نکته قابل اذعان اینکه برای انجام این فرایند از نرم‌افزار MatLab و از بخش Regstate استفاده شد. همچنین در ادامه به منظور ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، از روش‌های میانگین خطای مطلق (MAE)، ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص توافقی ویلموت (d)، مقدار R-square، statistic F و P value استفاده شد. شایان ذکر است که با توجه به شناخته‌شده بودن روش‌های بالا و فضای کم مقاله از آوردن

معادلات گفته‌شده، اجتناب شده است و پیشنهاد می‌شود جهت دسترسی به جزئیات این روش‌ها به کار برنت یارنال (۱۹۹۳) مراجعه شود.

۳. یافته‌های تحقیق

۳.۱. ارزیابی عملکرد مدل

با توجه به آزمون‌های متوالی برای تعیین محدوده کاری (تعداد پیکسل‌ها) مشخص شد که انتخاب ۱۵ پیکسل با ۳۹۰ مؤلفه اثرگذار بر دمای استان گلستان بر مبنای جدول ۲، مناسب‌ترین راهکار است؛ به‌طوری که از این جدول مشخص می‌شود، هرچه تعداد پیکسل‌های محدوده مورد مطالعه افزایش پیدا می‌کند، خطای مطلق داده‌ها به کمترین مقدار خود می‌رسد؛ به‌عنوان نمونه، بیشینه خطای حداکثر دما برای ایستگاه گرگان (۱٫۶۱ درجه سانتی‌گراد) مربوط به زمانی است که فقط از یک پیکسل جهت ریزمقیاس‌نمایی استفاده شده و کمینه خطای آن (۰٫۶۶ درجه سانتی‌گراد) با ۱۵ پیکسل حاصل می‌گردد. هرچند اگر این محدوده یا تعداد پیکسل‌ها افزایش یابد، پیش‌بینی بهتری انتظار می‌رود، اما این محدودیت نیز وجود دارد که انتخاب پیکسل‌های بیشتر مقدار محاسبات را خیلی زیاد و پیچیده می‌کند.

جدول ۲. ارزیابی خطای مطلق بیشینه و کمینه دما (سانتی‌گراد) جهت ریزمقیاس‌نمایی بر مبنای تعداد پیکسل‌های مختلف

گرگان	غفارحاجی	درازنو	چات	چاپارقومیه	حداکثر دما
۱٫۶۱	۱٫۶۵	۱٫۶	۲٫۱۸	۲٫۴	پیکسل ۱
۱٫۴۹	۱٫۵	۱٫۴۴	۲٫۰۱	۲٫۱۹	پیکسل ۲
۱٫۴۴	۱٫۴۶	۱٫۴۱	۱٫۹۵	۲٫۱۷	پیکسل ۳
۱٫۰۹	۱٫۱	۱٫۰۸	۱٫۶۱	۱٫۷۹	پیکسل ۴
۰٫۶۶	۰٫۶۴	۰٫۶	۰٫۹۳	۱٫۲۱	پیکسل ۱۵
گرگان	غفارحاجی	درازنو	چات	چاپارقومیه	حداقل دما
۱٫۴۳	۱٫۶۶	۱٫۳۷	۱٫۷۹	۱٫۹۴	پیکسل ۱
۱٫۲۷	۱٫۵۷	۱٫۲۳	۱٫۶۸	۱٫۸۳	پیکسل ۲
۱٫۲۲	۱٫۵۳	۱٫۲	۱٫۶۳	۱٫۷۷	پیکسل ۳
۰٫۸۸	۱٫۱۳	۰٫۸۹	۱٫۲۴	۱٫۳	پیکسل ۴
۰٫۵۴	۰٫۶۲	۰٫۵۶	۰٫۷۱	۰٫۸	پیکسل ۱۵

به منظور ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، آماره‌های F statistic، R-square، MAE، RMSE و شاخص توافق ویلموت (d)، ۵ ایستگاه نمونه چابارقویمه (جلگه‌ای)، چات (بیابانی)، درازنو (کوهستانی)، غفارحاجی (ساحلی) و گرگان (کوهپایه‌ای) که معرف شرایط متفاوت توپوگرافی و جغرافیایی استان گلستان بودند، انتخاب شدند و نتایج از واکاوی آماره‌های مورد نظر ارائه شد (جدول‌های ۳ و ۴).

۳.۲. اعتبارسنجی عملکرد مدل در شبیه‌سازی مؤلفه‌های حداکثر و حداقل دمای ماهانه

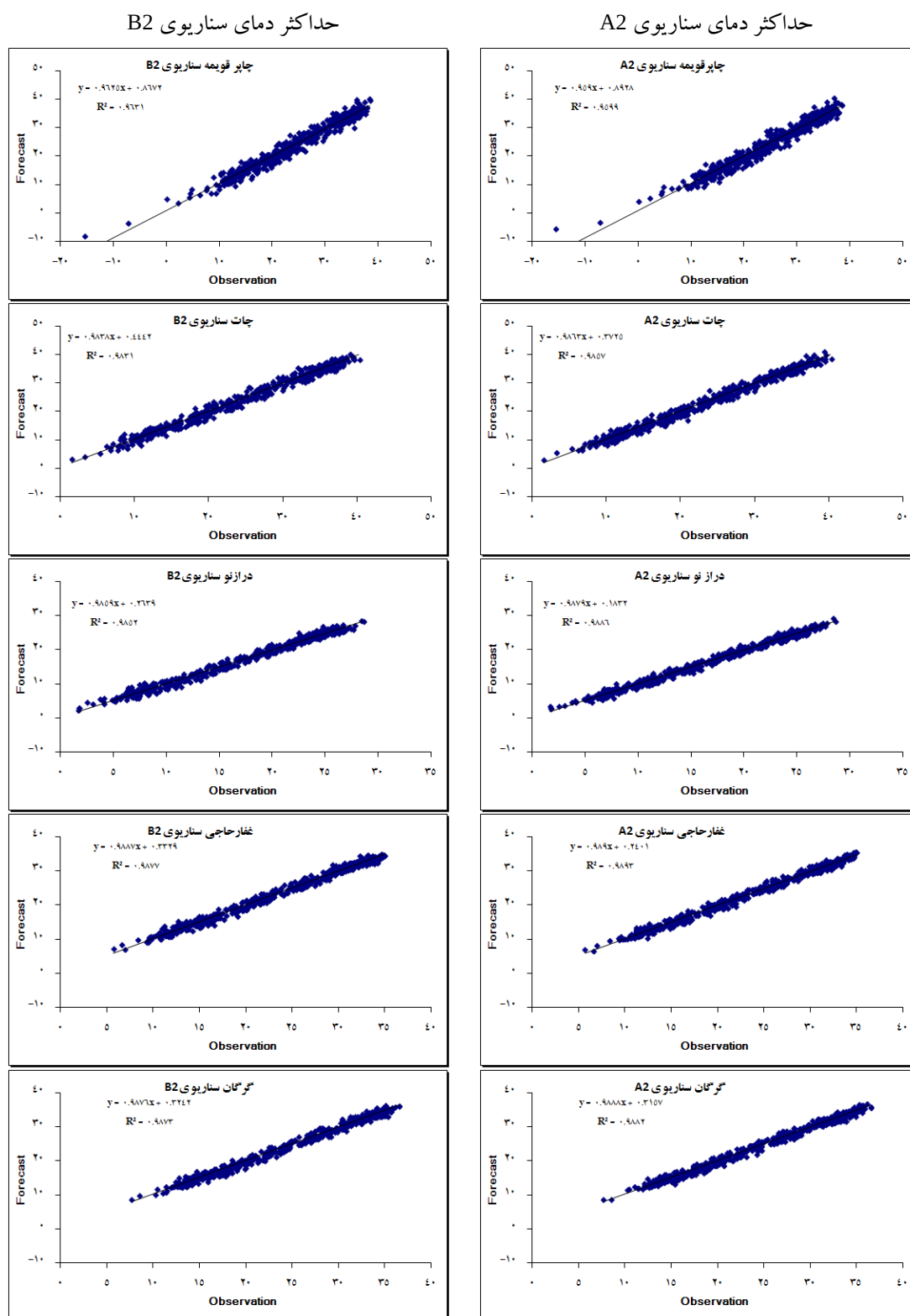
در این قسمت از تحقیق، جهت ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، داده‌های حداکثر و حداقل دما برای یک دوره مشاهداتی به صورت ماه-سال از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۰، بازسازی و با داده‌های واقعی مقایسه شد؛ بنابراین بر مبنای ۳۹۰ متغیر برای مجموع ۱۵ پیکسل مورد مطالعه، مقادیر مؤلفه حداکثر و حداقل دما شبیه‌سازی شد و بر مبنای آماره‌های استفاده شده در این تحقیق، خروجی‌ها واکاوی شدند (جدول‌های ۳ و ۴). همان‌طور که از جدول‌های ۳ و ۴ برای مؤلفه حداکثر و حداقل دما ملاحظه می‌شود، خروجی آماره‌ها برای تمام ایستگاه‌های مطالعاتی، مؤید

وجود انطباق معنادار بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی است؛ به‌طوری که بر مبنای سناریوی A2 و B2، شاخص توافق ویلموت برای تمام ایستگاه‌ها ۱ است که مؤید توافق داده‌های مشاهداتی با داده‌های پیش‌بینی شده است؛ یا اینکه مقدار P value برای تمام ایستگاه‌ها صفر محاسبه شده است که در کنار R-square که برای همه ایستگاه‌ها بیش از ۰/۹۵ می‌باشد، باز هم این آماره‌ها مؤید وجود ارتباط معنادار و انطباق مناسب بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی است.

در این قسمت به دلیل محدودیت حجم مقاله، همان‌طور که پیش‌تر نیز ذکر شد، خروجی‌های عملکرد مدل فقط برای ۵ ایستگاه شاهد استان، در قالب شکل ارائه شده است. همان‌طور که شکل ۲ برای این ایستگاه‌های شاهد نشان می‌دهد، خروجی مدل پیشنهادی به‌خوبی توانسته است مقادیر داده‌های مشاهداتی را برای تمام ایستگاه‌ها شبیه‌سازی کند؛ به‌گونه‌ای که ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بر اساس دو سناریوی A2 و B2 و برای هر دو مؤلفه حداکثر و حداقل دما در تمام ایستگاه‌ها در سطح ۹۹ درصد معنادار است که این به معنای قوت عملکرد و اعتبار مدل پیشنهادی در شبیه‌سازی داده‌هاست.

جدول ۳. آماره‌های استفاده شده جهت ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی به منظور بازسازی مؤلفه‌های حداکثر دما بر اساس سناریوی A2 و B2

سناریوی A2	Station	R-square	F statistic	P-value	MAE	RMSE	d
	چابارقویمه	۰/۹۶۰	۵/۸۳۳	۰/۰۰۰	۲/۲۲	۳/۴۸	1
	چات	۰/۹۸۶	۱۶/۸۹۹	۰/۰۰۰	۰/۹۳	۱/۱۵	1
	درازنو	۰/۹۶۰	۲۱/۱۶۲	۰/۰۰۰	۰/۶	۰/۷۴	1
	غفارحاجی	۰/۹۸۹	۲۲/۵۵۱	۰/۰۰۰	۰/۶۴	۰/۸	1
	گرگان	۰/۹۸۸	۲۰/۴۳۳	۰/۰۰۰	۰/۶۶	۰/۸۲	1
	Station	R-square	F statistic	P-value	MAE	RMSE	d
سناریوی B2	چابارقویمه	۰/۹۶۳	۳/۳۶۵	۰/۰۰۰	۱/۳۱	۱/۶۹	1
	چات	۰/۹۸۳	۱۴/۱۷۹	۰/۰۰۰	۱	۱/۲۵	1
	درازنو	۰/۹۸۵	۱۶/۳۱۰	۰/۰۰۰	۰/۶۸	۰/۸۴	1
	غفارحاجی	۰/۹۸۸	۱۹/۵۵۹	۰/۰۰۰	۰/۶۹	۰/۸۷	1
	گرگان	۰/۹۸۷	۱۸/۹۳۷	۰/۰۰۰	۰/۶۸	۰/۸۵	1
	Station	R-square	F statistic	P-value	MAE	RMSE	d



شکل ۲. مقایسه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۰ برای ایستگاه‌های شاهد در استان گلستان

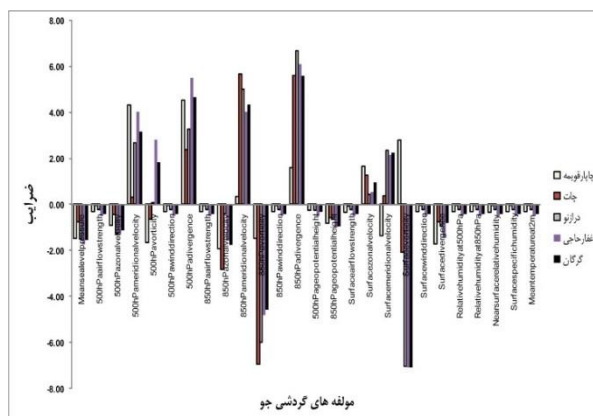
جدول ۴. آماره‌های استفاده‌شده جهت ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی به منظور بازسازی مؤلفه‌های حداقل بر اساس سناریوی A2 و B2

سناریوی A2	Station	R-square	F statistic	P-value	MAE	RMSE	D
	چاپار قویمه	۰/۹۸۱	۱۲/۷۱۲	۰/۰۰۰	۰/۹۵	۱/۲۲	1
	چات	۰/۹۸۷	۱۸/۶۶۳	۰/۰۰۰	۰/۷۱	۰/۹	1
	درازنو	۰/۹۸۶	۱۷/۴۵۱	۰/۰۰۰	۰/۵۶	۰/۷۱	1
	غفار حاجی	۰/۹۹۱	۲۸/۰۹۷	۰/۰۰۰	۰/۶۲	۰/۷۸	1
	گرگان	۰/۹۹۲	۲۸/۵۹۱	۰/۰۰۰	۰/۵۴	۰/۶۷	1
سناریوی B2	Station	R-square	F statistic	P-value	MAE	RMSE	D
	چاپار قویمه	۰/۹۸۰	۱۱/۷۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۱	۱/۲۸	1
	چات	۰/۹۸۵	۱۶/۰۵۷	۰/۰۰۰	۰/۷۸	۰/۹۷	1
	درازنو	۰/۹۸۸	۲۰/۰۶۵	۰/۰۰۰	۰/۵۳	۰/۶۶	1
	غفار حاجی	۰/۹۸۷	۱۸/۸۵۱	۰/۰۰۰	۰/۶۵	۰/۸	1
	گرگان	۰/۹۹۱	۲۷/۴۲۵	۰/۰۰۰	۰/۵۶	۰/۶۹	1

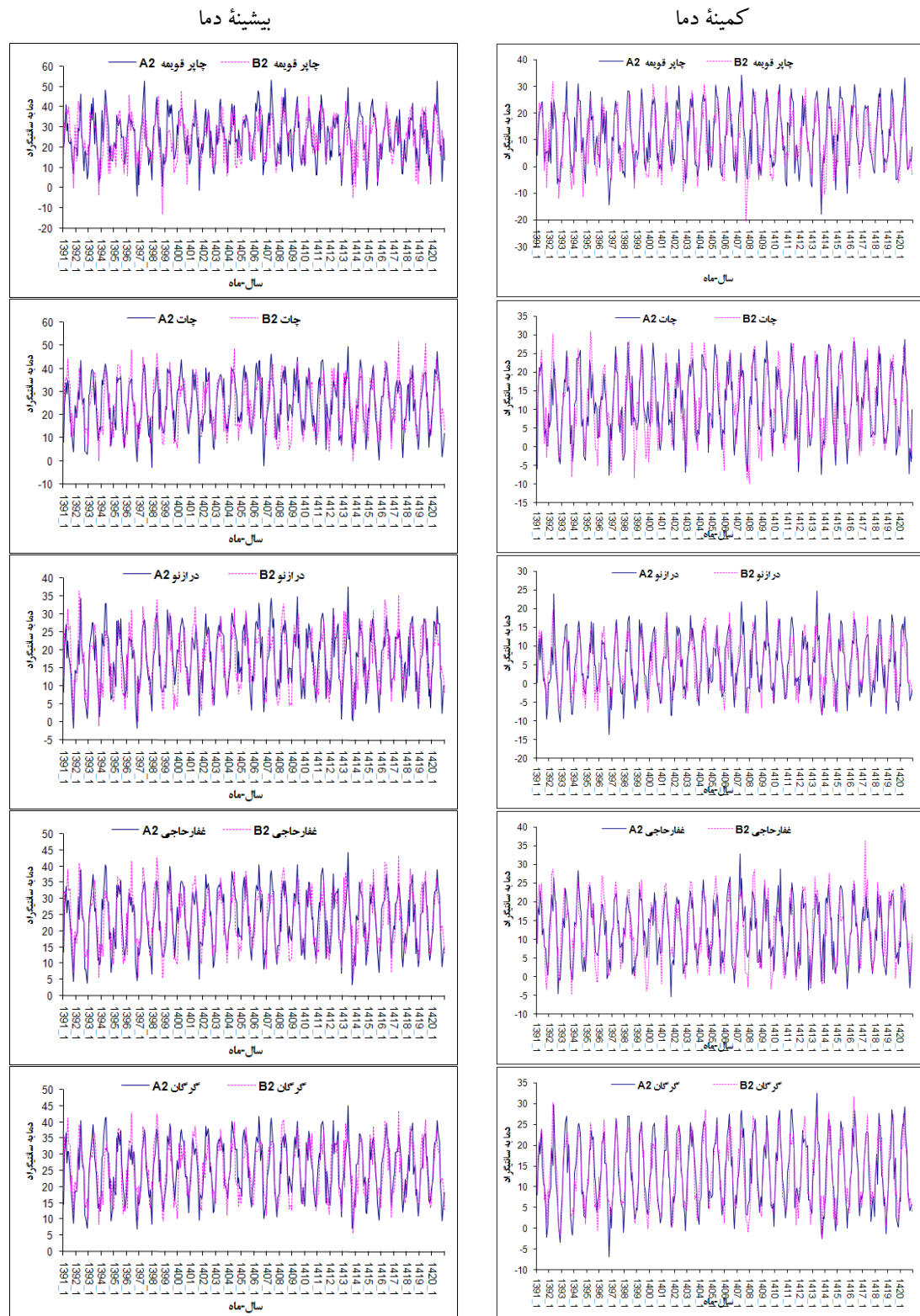
۳.۲.۱. آنالیز حساسیت

هدف از آنالیز حساسیت داده‌ها، تعیین مقدار تأثیر داده‌های هر پارامتر ورودی بر داده‌های خروجی با تعیین ضریب آن‌هاست. در صورتی که این ضریب کم باشد، داده‌های مربوط به آن پارامتر ورودی، تأثیر کمتری در استحصال خروجی دارند. با توجه به تعریف آنالیز حساسیت در مدل‌های رگرسیونی مشخص می‌گردد که از تعداد زیاد مؤلفه‌های اثرگذار، بعضی مؤلفه‌ها دارای اثر خنثی، مثبت و حتی منفی‌اند. در این مدل ریزمقیاس‌نمایی به منظور برآورد داده‌های اقلیمی از ۲۶ مؤلفه گردشی برای ۱۵ گره مشابه استفاده شد؛ بنابراین مشخص شد در

هریک از ایستگاه‌ها برای دما مؤلفه‌های میانگین فشار سطح دریا، ارتفاع فشار ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال و همچنین سرعت باد مداری، نصف‌النهاری، چرخندگی، واگرایی در سه سطح دریا، ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال بیشترین اثر را دارند، در حالی که مؤلفه‌های قدرت جریان هوا، جهت باد و رطوبت نسبی در سه سطح دریا، ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال و همچنین دمای ۲ متری و رطوبت ویژه سطح زمین اثر کمتری دارند. در شکل ۳، ضرایب مربوط به آنالیز حساسیت برای سناریوی A2 و مؤلفه بیشینه دما، به‌عنوان نمونه ارائه شده است.



شکل ۳. ضرایب مربوط به آنالیز حساسیت ۵ ایستگاه منتخب، برای سناریوی A2 مؤلفه بیشینه دما



شکل ۴. شبیه‌سازی مقادیر مؤلفه‌های حداکثر و حداقل دما برای سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۴۲۰ ایستگاه‌های شاهد در استان گلستان

۳.۳. دورنمای اثر گرمایش جهانی بر مقادیر مؤلفه

دمایی استان گلستان

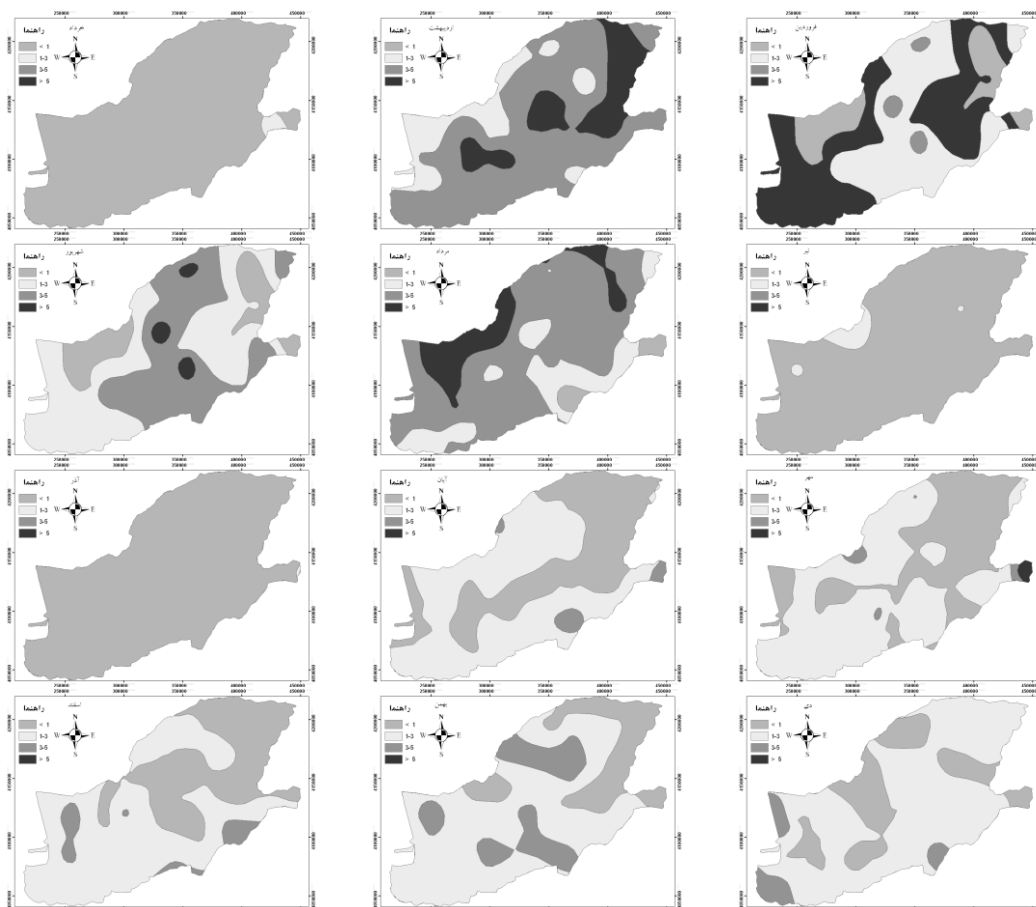
اما یکی از مهم‌ترین قسمت‌های این پژوهش، شبیه‌سازی مؤلفه‌های حداکثر و حداقل دما بر مبنای دو سناریوی A2

و B2 در بستر گرمایش جهانی دهه‌های آینده است. برای این منظور مقادیر دو مؤلفه دمایی، از ماه اول سال ۱۳۹۱ تا ماه دوازدهم ۱۴۲۰ شمسی شبیه‌سازی شد، اما به عنوان نمونه همانند قبل، خروجی‌های این پیش‌یابی در قالب

نمودار برای ۵ ایستگاه شاهد ارائه شده و سایر تحلیل‌ها در قالب نقشه‌هایی برای کل استان تهیه شده است.

در ادامه پژوهش حاضر می‌توان به نتایج مربوط به تغییرات حداکثر دمای استان بر مبنای سناریوی A2 و برای ماه‌های مختلف سال اشاره کرد. به‌طور کلی در ابتدا تغییرات افزایشی و کاهش دما برای دوره مطالعاتی ۱۳۹۱ تا ۱۴۲۰ نسبت به دوره پایه ۱۳۵۰ تا ۱۳۷۰ محاسبه شد و در گام بعدی این تغییرات برای هر ایستگاه، مشخص و نقشه پهنه‌بندی آن تهیه گردید؛ هر نقشه با ۴ طبقه دمایی که شامل طبقه یک با افزایش دمای کمتر از ۱ درجه، طبقه دوم با افزایش دمای بین ۱ تا ۳ درجه، طبقه سوم با افزایش دمای بین ۳ تا ۵ درجه و در نهایت طبقه چهارم با افزایش دمای بیش از ۵ درجه سانتی‌گراد است. در ابتدا یافته‌ها برای فروردین نشان می‌دهد که بیشینه پهنه با تغییرات افزایشی دما مربوط به طبقه دوم با مساحت ۴۶/۵ درصد از پهنه استان و کمینه آن با ۲/۶۱ درصد متعلق به طبقه

چهارم است. در حالی که در اردیبهشت اثری از طبقه یکم دیده نمی‌شود، اما بیشترین و کمترین پهنه به ترتیب مربوط به طبقات سوم و دوم با مساحت‌های ۶۴/۶۱ و ۱۶/۱۰ درصد از پهنه کل استان است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهند که غالب تغییرات دما برای دو ماه خرداد و تیر در طبقه یکم تمرکز یافته که این مساحت‌ها به ترتیب ۹۸/۹۵ و ۹۶/۷۰ درصد از پهنه استان را در بر گرفته است. ماه‌های مرداد و شهریور از جمله دوره‌هایی هستند که تمامی طبقات تغییرات دما را تجربه کرده‌اند؛ به‌طوری که از شکل ۵ مشخص می‌گردد در هر دو ماه بیشترین وسعت افزایشی دما مربوط به طبقه سوم و به ترتیب معادل ۶۶/۰۴ و ۶۱/۱۳ درصد از مساحت استان است. در مهرماه، تمامی طبقات تغییرات دما دیده می‌شود اما پهنه‌های مربوط به طبقات سوم و چهارم بسیار ناچیز و غالب تغییرات با ۶۰/۱۴ درصد برای طبقه دوم و ۳۷/۷۳ درصد برای طبقه اول ملاحظه می‌گردد.

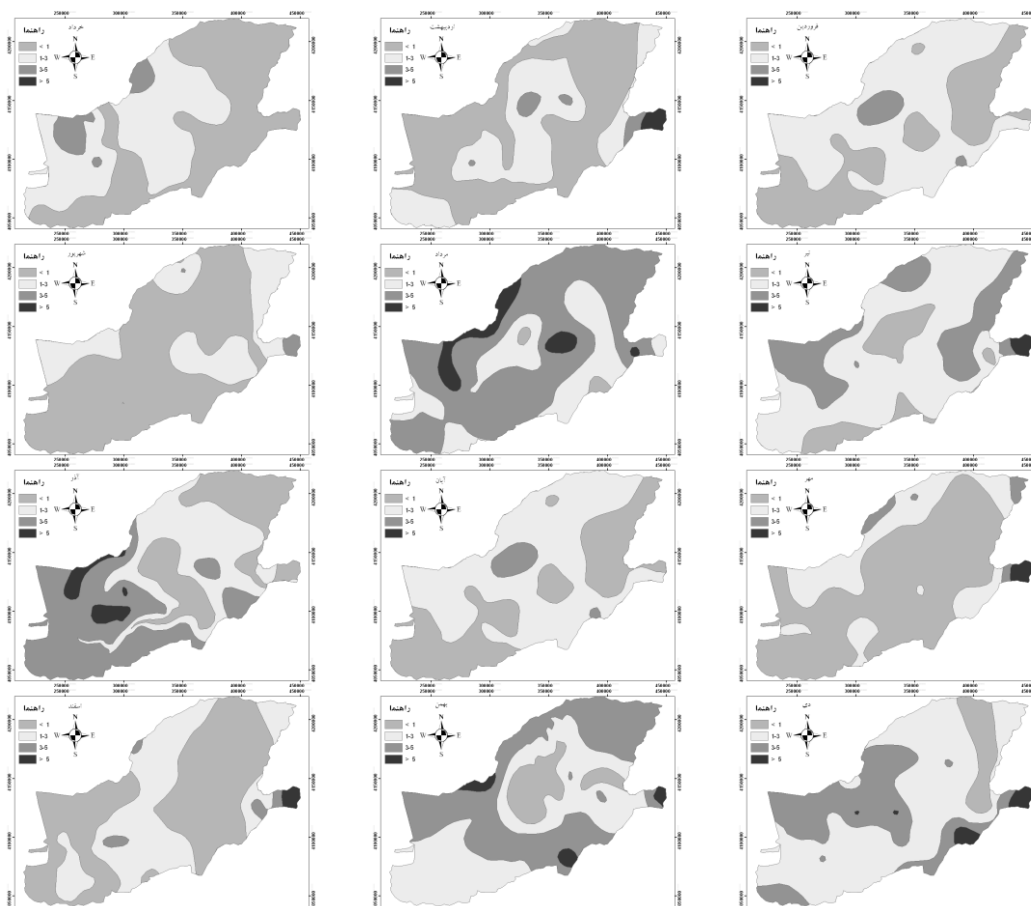


شکل ۵. شبیه‌سازی تغییرات حداکثر دما بر مبنای سناریوی A2، برای دوره مطالعاتی ۱۳۹۱ تا ۱۴۲۰ نسبت به دوره پایه ۱۳۵۰ تا ۱۳۷۰

سه‌ماهه دوم سال، الگوی غالب در طبقه خاصی مشاهده نمی‌شود، به‌گونه‌ای که حداکثر وسعت پهنه تغییرات دمایی برای تیرماه در طبقه دوم معادل ۶۱ درصد، در مرداد برای طبقه سوم به مقدار ۶۴/۵۰ درصد و در شهریورماه در طبقه اول به مقدار ۷۱ درصد تمرکز یافته است. در فصل پاییز، بیشینه پهنه‌ها به تغییرات افزایشی دما، به ترتیب در مهرماه به طبقه اول با ۶۹/۷۳ درصد از مساحت استان، در آبان، به طبقه دوم با ۷۰/۶۳ درصد و در آذرماه با ۳۸ درصد از مساحت استان به طبقه سوم مربوط است. در فصل زمستان، تغییرات دمایی برای تمام طبقات تجربه شده است. با این تفاسیر کمینه درصد مساحت تغییرات دمایی برای هر سه ماه در طبقه چهارم ملاحظه می‌گردد، ولی بیشینه آن در دی و بهمن‌ماه مربوط به طبقه دوم است، ولی برای اسفندماه در طبقه سوم دیده می‌شود.

در ادامه به غیر از ماه آذر، در چهار ماه آبان، دی، بهمن و اسفند، تغییرات دمای استان محدوده‌های طبقه چهارم را تجربه نکرده است و بیشترین پهنه افزایشی دما به طبقه دوم اختصاص یافته، ولی در آذرماه تمام تغییرات به طبقه اول محدود شده است. در کل با توجه به شکل ۵، مشاهده می‌شود که در نیمه گرم سال که شامل فصول بهار و تابستان است، در مقایسه با نیمه سرد سال، رخداد تغییرات دمایی طبقه چهارم بیشتر خودنمایی می‌کند، ولی در نیمه سرد سال، بیشترین تغییرات در طبقه دوم تمرکز یافته است (شکل ۵).

بر مبنای شکل ۶، تغییرات ماهانه حداکثر دما بر اساس سناریوی B2، نمایش داده شده است. به ترتیب بر اساس سه ماه اول سال، بیشینه تغییرات دما به طبقه اول و دوم مربوط است، به‌طوری که مجموع آن در فروردین، اردیبهشت و خرداد به ترتیب ۹۶/۰۶، ۹۶/۹۳ و ۹۴/۲۸ درصد از مساحت کل استان را در بر گرفته است. اما در



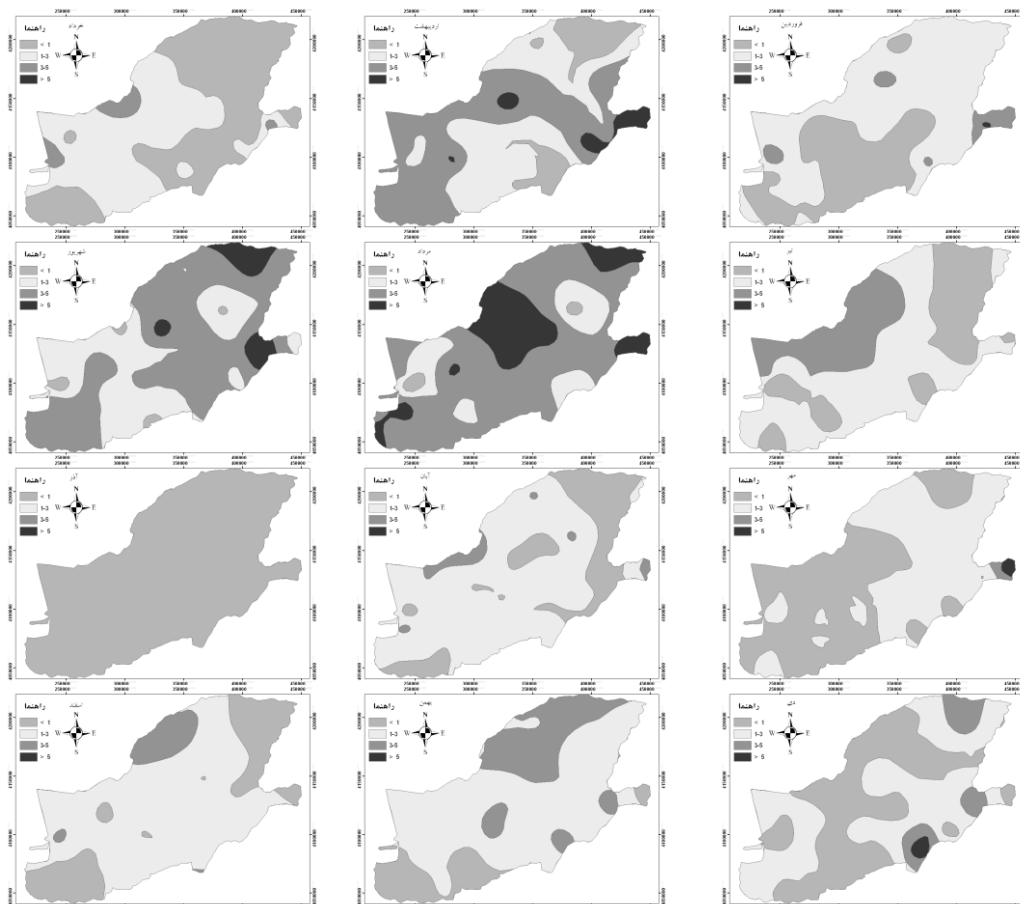
شکل ۶. شبیه‌سازی تغییرات حداکثر دما بر مبنای سناریوی B2، برای دوره مطالعاتی ۱۳۹۱ تا ۱۴۲۰ نسبت به دوره پایه ۱۳۵۰ تا ۱۳۷۰

دما به مقدار ۱ تا ۳ درجه سانتی گراد است، بیشینه پهنه تغییرات دمایی استان را به خود اختصاص داده است. در این فصل دی ماه با ۴۷/۵ درصد و بهمن و اسفند با ۶۴ و ۷۰ درصد از مساحت کل استان، بزرگترین تغییرات دمایی خود را برای این طبقه تجربه خواهند کرد. بهرحال نتایج این قسمت نشان می‌دهد که به ترتیب تابستان و بهار پتانسیل بیشتری از لحاظ رخداد مقادیر بزرگتر دما برای دهه‌های آینده دارند (شکل ۷).

در پی خروجی‌های این تحقیق برای مؤلفه حداقل دما و بر اساس سناریوی B2، دیده می‌شود که به جز دو ماه شهریور و اسفند که بیشینه پهنه استان از نظر تغییرات دمایی متعلق به طبقه اول است، در سایر ماه‌های سال غالب تغییرات پهنه‌های دمایی به طبقه دوم اختصاص یافته است.

در این قسمت، فرصت به ارزیابی نتایج تغییرات مؤلفه حداقل دما می‌رسد. در شکل ۷، تغییرات ماهانه مؤلفه حداقل دما بر اساس سناریوی A2، نشان داده شده است. در فصل بهار، بیشینه پهنه افزایشی دما به ترتیب در فروردین برای طبقه دوم، اردیبهشت طبقه سوم و خرداد برای طبقه دوم است. فصل تابستان، غالب تغییرات دما به دو طبقه سوم برای مرداد و شهریور و طبقه دوم برای تیرماه مربوط است. در دو ماه اول فصل پاییز، یعنی مهر و آبان، مجموع تغییرات دما برای دو طبقه اول و دوم به ترتیب در مهر ۹۹ درصد و در آبان ۹۶ درصد از مساحت کل استان را پوشش داده و نکته جالب توجه این است که تمام تغییرات دما در آذر ماه به طبقه اول محدود شده است.

در آخر اینکه، در فصل زمستان تغییرات دما دارای الگویی منظم است، زیرا محدوده طبقه دوم که شامل افزایش

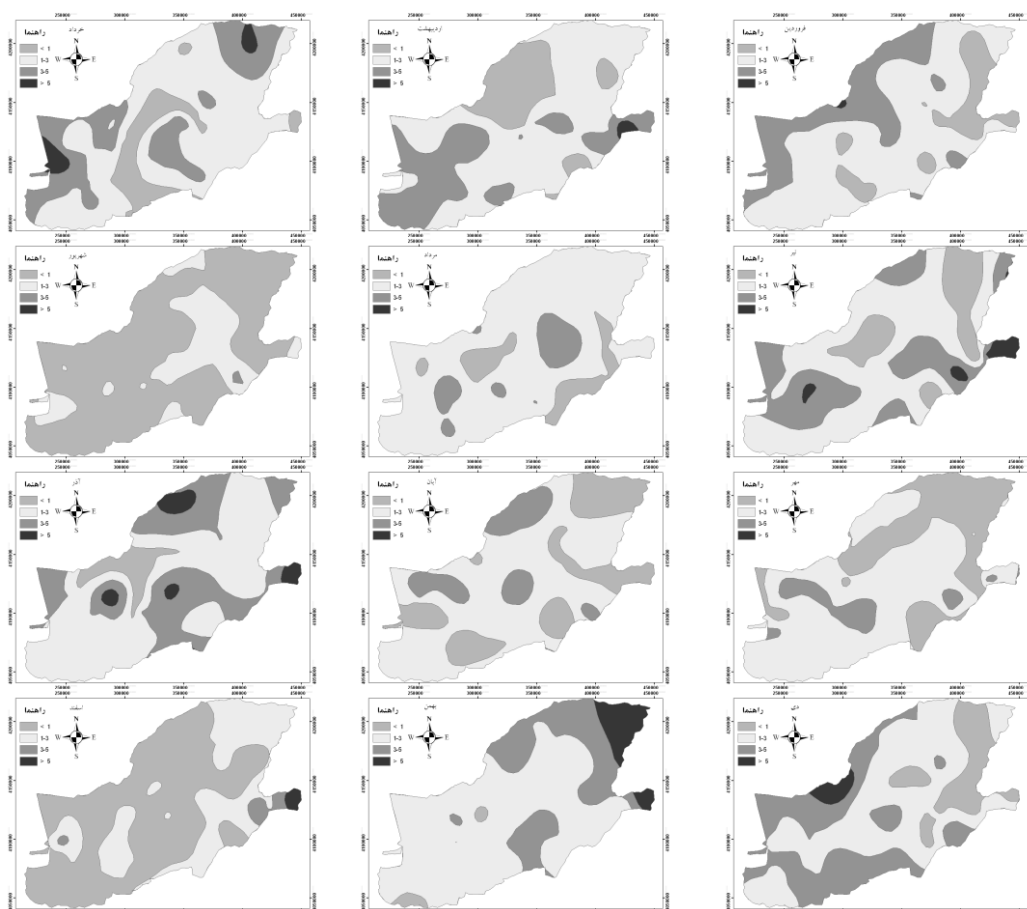


شکل ۷. شبیه‌سازی تغییرات حداقل دما بر مبنای سناریوی A2، برای دوره مطالعاتی ۱۳۹۱ تا ۱۴۲۰ نسبت به دوره پایه ۱۳۵۰ تا ۱۳۷۰.

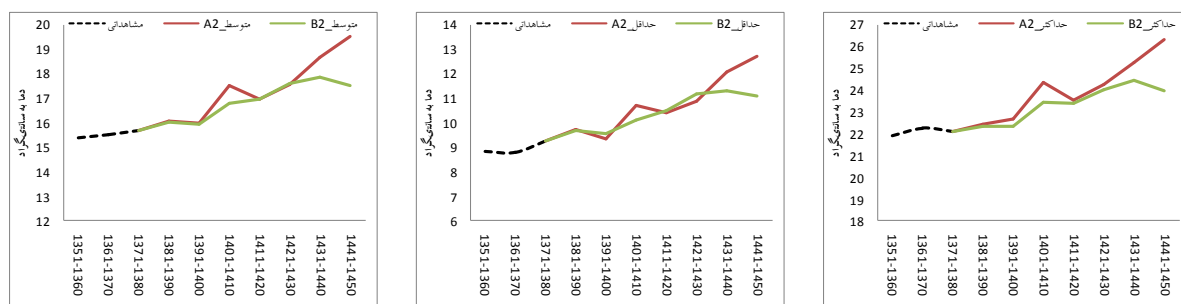
۴.۳. واکاوی تغییرات دهه‌ای مؤلفه دما برای میانگین کلی استان گلستان

در قسمت انتهای مقاله، به دلیل اهمیت شناخت از تغییرات دهه‌ای مؤلفه دما برای استان، میانگین کلی استان در قالب مؤلفه‌های حداقل، حداکثر و متوسط دما برای سال‌های ۱۳۵۱ تا ۱۴۵۰ ارزیابی شد. شایان توضیح است همان‌گونه که طول دوره آماری نیز نشان می‌دهد، این سری زمانی شامل دوره مشاهداتی و پیش‌یابی شده است.

در همین راستا شایان ذکر است که مرداد با اختصاص یافتن پهنه ۸۸ درصدی از مساحت استان گلستان به روند افزایشی آستانه دمایی بین ۱ تا ۳ درجه سانتی‌گراد، در مقایسه با سایر ماه‌ها در رتبه نخست قرار گرفته است. در مجموع بر مبنای شکل ۸، حتی در ماه‌های سرد سال نیز پهنه‌های افزایش دمایی مربوط به طبقه چهارم ملاحظه می‌شود که برای سه ماه مهر، بهمن و اسفند در مقایسه با برخی ماه‌های گرم سال وسعت بیشتری از استان گلستان به این محدوده افزایش دمایی اختصاص یافته است (شکل ۸).



شکل ۸. شبیه‌سازی تغییرات حداقل دما بر مبنای سناریوی B2، برای دوره مطالعاتی ۱۳۹۱ تا ۱۴۲۰ نسبت به دوره پایه ۱۳۵۰ تا ۱۳۷۰



شکل ۹. واسنجی روند تغییرات دهه‌ای مؤلفه حداکثر، حداقل و متوسط دما برای میانگین کلی استان از سال ۱۳۵۱ تا ۱۴۵۰

جدول ۵. متوسط تغییرات دهه‌ای مؤلفه‌های حداکثر، حداقل و متوسط دما برای میانگین کلی استان از سال ۱۳۵۱ تا ۱۴۵۰

سناریوها دهه‌ها	حداکثر دما-A2	حداکثر دما-B2	حداقل دما-A2	حداقل دما-B2	متوسط دما-A2	متوسط دما-B2
۱۳۵۱-۱۳۶۱	۲۱/۹۲	۲۱/۹۲	۸/۸۲	۸/۸۲	۱۵/۳۷	۱۵/۳۷
۱۳۶۱-۱۳۷۰	۲۲/۲۴	۲۲/۲۴	۸/۷۹	۸/۷۹	۱۵/۵۲	۱۵/۵۲
۱۳۷۱-۱۳۸۰	۲۲/۰۸	۲۲/۰۸	۹/۲۶	۹/۲۶	۱۵/۶۷	۱۵/۶۷
۱۳۸۱-۱۳۹۰	۲۲/۴۲	۲۲/۳۵	۹/۷۲	۹/۶۹	۱۶/۰۷	۱۶/۰۲
۱۳۹۱-۱۴۰۰	۲۲/۶۵	۲۲/۳۵	۹/۳۴	۹/۵۴	۱۵/۹۹	۱۵/۹۴
۱۴۰۱-۱۴۱۰	۲۴/۳۳	۲۳/۴۳	۱۰/۷۱	۱۰/۱۱	۱۷/۵۲	۱۶/۷۷
۱۴۱۱-۱۴۲۰	۲۳/۵۱	۲۳/۴۱	۱۰/۴۰	۱۰/۴۹	۱۶/۹۶	۱۶/۹۵
۱۴۲۱-۱۴۳۰	۲۴/۲۴	۲۴/۰۲	۱۰/۸۹	۱۱/۱۶	۱۷/۵۷	۱۷/۵۹
۱۴۳۱-۱۴۴۰	۲۵/۲۵	۲۴/۴۴	۱۲/۰۹	۱۱/۳۱	۱۸/۶۷	۱۷/۸۷
۱۴۴۱-۱۴۵۰	۲۶/۳۲	۲۳/۹۷	۱۲/۶۹	۱۱/۱۰	۱۹/۵۱	۱۷/۵۳

متوسط دما نیز با توجه به سناریوی A2، ۰/۴۶ درجه سانتی‌گراد افزایش نشان می‌دهد، ولی این خروجی برای سناریوی B2، ۰/۲۴ درجه سانتی‌گراد افزایش دما را برای کل استان شبیه‌سازی کرده است (جدول ۵).

۴. نتیجه‌گیری

یافته‌های مقاله حاضر نشان می‌دهد که با افزایش انتخاب تعداد پیکسل‌های محدوده مورد مطالعه، خطای ریزمقیاس‌نمایی با روندی کاملاً معنادار به کمترین مقدار خود می‌رسد؛ به گونه‌ای که بیشینه خطا مربوط به شرایطی است که فقط از داده‌های پیش‌بینی‌کننده یک پیکسل استفاده می‌شود، در حالی که کمینه خطا زمانی است که تعداد پیکسل‌ها به ۱۵ افزایش یافته است (جدول ۱).

بررسی نتایج حاصل از پیش‌یابی و ریزمقیاس‌نمایی مدل پیشنهادی مذکور بر اساس سناریوهای انتشار A2 و B2 در ایستگاه‌های شاخص استان گلستان نشان داد که روش پیشنهادی، از اعتبار مناسبی برخوردار است. به گونه‌ای که عملکرد آن در شبیه‌سازی داده‌های مشاهداتی ۵ ایستگاه شاهد برای دوره مطالعاتی ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۰، مؤید بیشترین تطبیق بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده

پس این مسئله توجیه‌پذیر است که نباید هیچ‌گونه تفاوتی بین منحنی‌های دما، بر مبنای دو سناریوی A2 و B2 تا انتهای دوره مشاهداتی وجود داشته باشد و از آن به بعد است که می‌توان تفاوت و تغییرات بین منحنی‌های دما را بر اساس این دو سناریو مشاهده کرد، اما در ابتدا همان‌گونه که شکل ۱۰ نشان می‌دهد، روند میانگین دهه‌ای استان برای هر سه مؤلفه حداقل، حداکثر و متوسط دما با توجه به هر دو سناریو در حال افزایش است. بر اساس هر دو سناریو و مؤلفه‌های مختلف دمایی، کمترین میانگین دهه‌ای دما به سری زمانی ۱۳۵۱ تا ۱۳۶۰ و بیشترین میانگین دهه‌ای دما به دهه ۱۴۴۱ تا ۱۴۵۰ مربوط است (جدول ۵). با عنایت به میانگین تغییرات دهه‌ای دما ملاحظه می‌گردد که بیشینه تغییرات افزایشی مؤلفه‌های دما به سناریوی A2 اختصاص یافته است، به‌طوری که برای مؤلفه حداکثر دما، میانگین افزایش تغییرات دهه‌ای دما برای سناریوی A2 و B2 به ترتیب ۰/۴۹ و ۰/۲۳ درجه سانتی‌گراد است و این خروجی برای حداقل دما نیز بر اساس سناریوی A2، افزایش ۰/۴۳ درجه سانتی‌گرادی و برای سناریوی B2، افزایش ۰/۲۵ درجه سانتی‌گرادی را نشان می‌دهد. در ادامه میانگین تغییرات دهه‌ای برای مؤلفه

نتایج را تا حدودی با ابهام مواجه می‌سازد. این عدم قطعیت‌ها که در پیش‌بینی‌های اقلیمی گریزناپذیرند، از عوامل بسیاری از قبیل عدم قطعیت‌های حاصل از مقادیر مشاهداتی در ایستگاه‌های هواشناسی، خروجی مدل‌های گردش عمومی جو و در نهایت عدم قطعیت ناشی از به‌کارگیری روش‌های ریزگردانی سرچشمه می‌گیرند. آنچه که در این مقوله اهمیت دارد، آگاهی از این عدم قطعیت‌ها و همچنین تلاش در کاهش آن‌ها تا حد ممکن و در نظر گرفتن آن‌ها در برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای است که همگی این موارد تا حد ممکن در این پژوهش در نظر گرفته شده‌اند.

قدردانی و تشکر

شایان ذکر است که این مقاله بخشی از یافته‌های پروژه تحقیقاتی ملی تحت عنوان "بررسی و ارزیابی تغییر یا دگرگونی اقلیمی بر منابع آب به منظور اعمال مدیریت ریسک به جای مدیریت بحران در شرایط واقعی و پیش‌بینی "با کد پروژه "GLW-91006" می‌باشد که با حمایت مالی شرکت آب منطقه‌ای گلستان صورت گرفته است. بنابراین نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که صمیمانه از حمایت‌های مالی و معنوی شرکت آب منطقه‌ای گلستان تقدیر و تشکر نمایند.

مراجع

آذرانفر، آ.، ابریشمچی، ا. و تجربی، م.، ۱۳۸۶، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر بارش و دما در حوضه آبریز زاینده‌رود با استفاده از خروجی مدل‌های چرخش عمومی، دومین همایش ملی منابع آب ایران، اصفهان. آشفته، پ. و مساح‌بوانی، ع.، ۱۳۸۹، تأثیر تغییر اقلیم بر دبی‌های حداکثر مطالعه موردی، حوضه آیدوغموش، آذربایجان شرقی، م. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۴(۵۳)، ۲۵-۳۹
شمسی‌پور، ع.، ۱۳۹۲، مدل‌سازی آب و هوایی نظریه و روش، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۲۹۷.

با داده‌های واقعی است و این موضوع، جدا از ارائه نتایج در قالب آزمون‌های آماری مختلف، بر مبنای اشکال گرافیکی شکل ۲ نیز به وضوح قابل مشاهده است. از نتایج پژوهش می‌توان به این مطلب اشاره کرد که به‌طور میانگین، افزایش در مقادیر مؤلفه دما، یعنی افزایش دماهای حداکثر و افزایش در دماهای حداقل، در سطح استان گلستان و بر اساس سناریوهای گفته‌شده انکارناپذیر است. در گام بعدی، خروجی‌های تحقیق حاضر برای سناریوی A2 نشان داد که بر اساس شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای دو مؤلفه حداقل و حداکثر دما، فصول گرم سال پتانسیل بیشتری از تجربه رخدادهای بزرگ دمایی را برای دهه‌های آتی خواهند داشت، اما در سناریوی B2، تجربه رخدادهای بزرگ دمایی به وسعت سناریوی A2 نیست و همچنین از لحاظ زمانی از الگوی منظمی تبعیت نمی‌کند و گاه به صورت هسته‌هایی کوچک و پراکنده برای بعضی ماه‌ها که حتی شامل ماه‌های سرد سال نیز می‌شود، مشاهده می‌گردد. آنچه مسلم است، این است که نتیجه یادشده با توجه به ماهیت سناریوی A2 که از خانواده سناریوهای بدبینانه است، تطبیق نشان می‌دهد، ولی نکته حائز اهمیت این است که در هر دو سناریو و برای هر دو مؤلفه حداقل و حداکثر دما، روند افزایشی دما در غالب ماه‌های سال مشاهده می‌شود که بیشینه پهنه استان با تغییرات دمایی به آستانه‌های دمایی ۱ تا ۳ درجه سانتی‌گراد اختصاص یافته است. همچنین خروجی نقشه‌ها برای تغییرات دمای دهه‌های آینده استان گلستان، مؤید این موضوع است که بیشینه افزایش دمای مناطق متفاوت استان، با توجه به ماه‌های مختلف سال از نظم خاصی پیروی نمی‌کند؛ به گونه‌ای که در هر ماه، الگوهای مکانی متفاوتی از تغییرات دما ملاحظه می‌شود.

با وجود این، ذکر این نکته حائز اهمیت است که بررسی نتایج روش پیشنهادی در پیش‌یابی و ریزگردانی مؤلفه‌های دمایی بر مبنای مدل گردش عمومی جو HadCM3، گویای این واقعیت است که پیش‌یابی‌های بلندمدت اقلیمی که ناشی از عوامل بسیاری است، این

- داده‌های هواشناسی، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۶۲، ۱-۹.
- Bürger, G., Murdock, T. Q., Werner, A. T., Sobie, S. R. and Cannon, A. J. 2012, Downscaling extremes - an intercomparison of multiple statistical methods for present climate, *Journal of Climate*, 25, 4366-4388.
- Cannon, A. J. 2012, Regression-guided clustering: a semisupervised method for circulation-to-environment synoptic classification, *Journal of Apply Meteorology and Climatology*, 51, 185-190.
- Dibike, Y. B. and Coulibaly, P., 2006, Temporal neural networks for downscaling climate variability and extremes, *Neural Networks*, 19, 135-144.
- Farajzadeh, M., Oji, R., Cannon, A. J., Ghavidel, Y. and Massah Bavani, A. R., 2014, An evaluation of single-site statistical downscaling techniques in terms of indices of climate extremes for the Midwest of Iran, *Theoretical and Applied Climatology*, 10.1007/s00704-014-1157-4.
- Frost, A. J., Charles, S. P. and Timbal, B., 2011, A comparison of multi-site daily rainfall downscaling techniques under Australian conditions, *Journal of Hydrology*, 408, 1-18.
- Furrer, E. M. and Katz, R. W., 2007, Generalized linear modeling approach to stochastic weather generators, *Climate Research*, 34, 129-144.
- Ghanghermeh, A., Roshan, G. R., Orosa, J., Calvo-Rolle, L. and Costa Ángel, M., 2013, New climatic indicators for improving Urban Sprawl: a case study of Tehran city, *Entropy*, 15, 999-1013.
- Roshan, G. R., Ghanghermeh, A., Nasrabadi, T. and Bahari Meimandi, J., 2013, Effect of global warming on intensity and frequency curves of precipitation, case study of Northwestern Iran, *Water Resour Manage*, ۱۳۸۶، ارزیابی روش شبیه‌سازی تصادفی برای تولید
doi: 10.1007/s11269-013-0258-7.
- Roshan, G. R., Ghanghermeh, A. and Orosa, J., 2013, Thermal comfort and forecast of energy consumption in Northwest Iran, *Arab J Geosci*, doi: 10.1007/s12517-013-0973-7.
- Michelangeli, P. A., Vrac, M. and Loukos, H., 2009, Probabilistic downscaling approaches: application to wind cumulative distribution functions, *Geophys Res Lett*, 36, L11708, doi: 10.1029/2009GL038401.
- Moradi, I. and Nosrati, K., 2002, Evaluation of stochastic simulation methods for generating meteorological data, *Proceeding of 3th International Iran and Russia Conference Agriculture and Natural Resources*, Moscow, 246-251.
- Soltani, A., Latifi, N. and Nasiri, M., 2000, Evaluation of WGEN for generation long term weather data for crop simulations, *Agric. For. Meteorol.*, 102: 1-12.
- Yarnal, B., 1993, *Synoptic climatology in environmental analysis*, Wiley Publisher. 256pp.
- Wilby, R. L., Dawson, C. W. and Barrow, E. M., 2002, A decision support tool for the assessment of regional climate Impacts, *Environmental Modeling & Software*, [http://dx.doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00060-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00060-3).
- Wilby, R. L. and Dawson, C. W., 2012, The statistical downscaling model: insights from one decade of application, *Int J Climatol.*, doi: 10.1002/joc.3544.
- Wood, A., Maurer, E., Kumar, A. and Lettenmaier, D. P., 2002, Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States, *J. Geophys. Res.*, 107. 4429, doi: 10.1029/2001JD000659.