

ارزیابی تغییرات و پیش‌بینی دمای کمینه در غرب استان مازندران با استفاده از مدل ریزمقیاس نمایی آماری SDSM

حسین عساکره^۱، علی شاهبایی کوتنایی^{۱*} و مجید فرومدی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۹/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۳)

چکیده

در قسمت اعظم کره زمین، چشم‌اندازی که اکنون در معرض دید است، عمدتاً مصنوع تفکر و ساخته و پرداخته دست انسان است. برخورد و اثر انسان در محیط طبیعی در دوره‌های کوتاه و بلندمدت به‌صورت آشکاری ویژگی‌های گوناگون فضاها و جغرافیایی را دگرگون ساخته است. یکی از نتایج تأثیرگذاری انسان بر محیط طبیعی طی دوره حاضر، پدیده تغییر اقلیم است. از جمله فراسنج‌های اقلیمی که نقش مهمی در مسائل کشاورزی، انرژی، شهری، گردشگری و حمل و نقل جاده‌ای دارد، دمای کمینه است. در پژوهش حاضر تلاش شد با استفاده از داده‌های دمای کمینه پنج ایستگاه هواشناسی غرب استان مازندران و همچنین داده‌های مدل HADCM3، نحوه تغییرات این فراسنج در دوره‌های آتی با استفاده از مدل SDSM شبیه‌سازی شود. بر این اساس بعد از انتخاب متغیرهای جوی مناسب و انجام واسنجی مدل، دقت مدل ایجاد شده در کل دوره پایه مورد ارزیابی قرار گرفت و بعد از حصول اطمینان از دقت کافی مدل، بر اساس داده‌های دو سناریوی A2 و B2 شرایط دمای کمینه تا سال ۲۱۰۰ شبیه‌سازی شد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها مشخص شد که مقادیر دمای کمینه در منطقه طی سال‌های آینده، روندی افزایشی خواهند داشت به‌گونه‌ای که میانگین فصلی این فراسنج در دوره‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۳۹، ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۹ و ۲۰۷۰ تا ۲۰۹۹ نسبت به دوره پایه به‌طور متوسط ۱/۸، ۳/۵ و ۶ درصد افزایش خواهد یافت. بیشترین میزان افزایش دمای کمینه در بخش‌های غربی و جنوبی منطقه رخ خواهد داد. همچنین مشخص شد برخلاف سایر ماه‌های سال، دمای کمینه در ماه ژانویه دارای روندی کاهشی خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: ریزمقیاس نمایی، شبیه‌سازی، غرب مازندران، مدل رگرسیون، SDSM

۱. گروه آب‌وهواشناسی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان

۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: shahbai2008@yahoo.com

مقدمه

تغییر اقلیم عبارت است از تغییرات رفتار آب و هوایی یک منطقه نسبت به رفتاری که طی یک افق زمانی بلندمدت از اطلاعات مشاهده شده یا ثبت شده در آن منطقه مورد انتظار است (۱۰). پدیده تغییر اقلیم به‌طور مستقیم بر عوامل مختلف مرتبط با زندگی بشر تأثیرگذار است و اولین گام در بررسی این اثرات، مطالعه تأثیر تغییر اقلیم بر فراسنج‌های اقلیمی است (۱۴). دما از نمایه‌های مهم اقلیمی است که تأثیرات مهمی بر زندگی انسان‌ها و سایر موجودات زنده دارد (۲۱). افزایش میانگین دمای کره زمین و تغییرات آن نشانه‌ای از تغییرات اقلیمی است که در تمامی نظریه‌های تغییر اقلیم به آن توجه شده است. در واقع افزایش دما می‌تواند الگوهای متداول آب و هوایی را تغییر دهد و موجب بالا آمدن سطح آب دریاها، تغییر در آستانه‌های آب و هوایی، گسترش خشکسالی‌ها و تأثیر بر منابع آب شود. در حال حاضر سرعت افزایش درجه حرارت نسبت به گذشته افزایش چشمگیری داشته است، به‌طوری‌که این افزایش در تاریخ بشر بی‌سابقه بوده است. طبق بررسی‌های انجام شده، دمای سطح زمین بر اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای بین ۰/۳ تا ۰/۶ درجه سلسیوس افزایش داشته و پیش‌بینی شده تا سال ۲۱۰۰ میزان این افزایش دما به رقمی بین یک تا ۳/۵ درجه سلسیوس برسد (۱۷). با توجه به اهمیت فراسنج‌های مختلف دمایی در جنبه‌های گوناگون زندگی بشر، بررسی ویژگی‌ها، روند زمانی و پیش‌بینی آینده این فراسنج‌ها از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. روشی که در این زمینه بسیار مورد توجه واقع شده و میزان به‌کارگیری آن طی سال‌های اخیر به‌شدت افزایش یافته است، شبیه‌سازی و مدل‌سازی پارامترهای اقلیمی است. مدل‌های اقلیمی در پی همانندسازی فرایندهای بسیار زیادی هستند که اقلیم را پدید می‌آورند. در واقع هدف از مدل‌سازی آن است که این فرایندها شناخته شده و اثر تغییرات آنها و روابط متقابلشان با یکدیگر پیش‌بینی شود (۱۳). به‌منظور بررسی پدیده تغییر اقلیم، مدل‌های گردش عمومی جو یا GCMها (General Circulation Model) شالوده تمامی

مطالعات در این زمینه هستند. این مدل‌ها به کمک روابط ریاضی اقدام به فرموله کردن اصول فیزیکی حاکم بر جو می‌کنند. خروجی این مدل‌ها عموماً دارای مقیاس مکانی بسیار بزرگی (عموماً ۵۰۰۰۰ کیلومتر مربع) هستند. مدل‌های GCM به‌طور وسیع برای ارزیابی تغییر اقلیم در یک مقیاس جهانی استفاده می‌شوند؛ اما خروجی این مدل‌ها برای ارزیابی تغییرات اقلیمی در سطح محلی و منطقه‌ای کافی و دقیق نیست (۵) لذا تفکیک مکانی این خروجی‌ها، یکی از نقاط ضعف این مدل‌ها است، چرا که در مطالعات ناحیه‌ای، مدل‌ها نیاز به ورودی‌هایی با مقیاس کوچک‌تر از خروجی‌های GCM دارند، لذا باید توان تفکیک خروجی این مدل‌ها با انجام زیرمقیاس‌نمایی (Downscaling) افزایش یابد. فرایند زیرمقیاس‌نمایی به دو روش اصلی آماری و دینامیک صورت می‌گیرد. ریزمقیاس‌نمایی آماری تکنیکی است که به ما اجازه می‌دهد تا با استفاده از روابط و روش‌های آماری مانند رگرسیون چندگانه و شبکه‌های عصبی، وضوح خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی جو را افزایش داده و در مقیاس‌های منطقه‌ای و محلی از آنها استفاده کنیم. فرض اساسی در کاربرد ریزمقیاس‌نمایی آماری آن است که روابط ریاضی بین متغیرهای جوی-اقیانوسی که در مدل‌های GCM وجود دارند، عیناً در مورد آب و هوای محلی نیز وجود داشته و تغییر نمی‌کنند. در روش ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی، معادلات حاکم بر بسته هوا در شبکه‌های ریزتری از شبکه مدل گردش عمومی جو با استفاده از روش‌های آنالیز عددی و بر اساس قوانین فیزیکی لایه‌های گوناگون جو حل می‌شوند و با این فرایند دقت خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی افزایش می‌یابد (۱۱). استفاده از روش‌های آماری خصوصاً در مواقعی که هزینه کمتر و ارزیابی سریع‌تر عوامل مؤثر بر تغییرات آب و هوایی مورد نیاز باشد، از مزیت‌ها و قابلیت‌های بیشتری برخوردار است (۱). یکی از مدل‌های مورد استفاده در فرایند ریزمقیاس‌نمایی، مدل SDSM (Statistical Downscaling Model) است. SDSM یک مدل آماری است که به‌منظور بهینه کردن و ریزمقیاس کردن

استفاده از داده‌های بزرگ‌مقیاس مدل‌های CGCM₂ و HADCM₃ و داده‌های NCEP به‌عنوان داده‌های ورودی به SDSM و تحلیل آماری خروجی‌های این مدل به این نتیجه رسیدند که نتایج مدل SDSM با داده‌های NCEP از دقت بالاتری نسبت به داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو برخوردار است. هر چند در تمامی نتایج عدم قطعیت و تفاوت مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر مشاهده شده، مشهود بوده است. خان و همکاران (۱۶) به‌منظور ارزیابی دقت و میزان عدم قطعیت، سه گروه داده بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه کانادا را در قالب سه مدل SDSM، LARS-WG و شبکه عصبی مورد شبیه‌سازی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که در بین سه مدل ذکر شده، مدل SDSM بهترین دقت را در شبیه‌سازی داده‌ها از خود نشان داد. چنگ و همکاران (۶) با استفاده از روش‌های آماری و دینامیکی به کوچک مقیاس‌سازی خروجی مدل‌های چرخه عمومی جو به‌منظور شبیه‌سازی متوسط ماهانه دما و بارش در بخش‌های مرکزی و جنوبی کانادا پرداختند و به این نتیجه رسیدند که روش‌های آماری دارای عملکرد خوبی در تولید متغیرهای هواشناسی در مقیاس ایستگاهی هستند. جایسوال و همکاران (۱۵) با هدف ارزیابی چگونگی تغییرات دمای کمینه در منطقه ریپور هند طی دهه‌های آینده، اقدام به ریزمقیاس‌نمایی داده‌های CGCM توسط مدل SDSM کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که دمای کمینه طی دوره‌های ۲۰۳۵-۲۰۲۰، ۲۰۶۴-۲۰۴۶ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ در محدوده مورد مطالعه روندی افزایشی خواهد داشت و بیشترین میزان افزایش نیز در ماه‌های فصل تابستان رخ خواهد داد. ژوفا و همکاران (۲۶) با استفاده از مدل‌های SDSM و NHMM اقدام به شبیه‌سازی تغییرات بارش در یک حوضه آبخیز در مناطق خشک چین کردند و با مقایسه نتایج آنها، بیان کردند که تفاوت معنی‌داری بین نتایج این دو مدل وجود ندارد. متکیا و همکاران (۱۹) با استفاده از داده‌های Hadcm₃ در محیط مدل SDSM، آثار تغییر اقلیم بر شرایط آینده متغیرهای دما و بارش رودخانه وادی در تانزانیا را مطالعه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که

برونداد مدل‌های گردش عمومی و صدور پیش‌بینی و انجام شبیه‌سازی شرایط اقلیمی در یک نقطه خاص به‌کار می‌رود. این مدل بر پایه رگرسیون کمترین مربعات، بین پیش‌بینی‌های مقیاس محلی و پیش‌بینی‌کننده‌های مقیاس منطقه‌ای رابطه تجربی برقرار می‌کند (۲۰). نکته مهم در محاسبات این مدل، استفاده از ضرایب وزنی معادلات خطی روند داده‌های مدل و دیده‌بانی شده نسبت به زمان (سال) است که مدل رگرسیونی مورد استفاده را به یک مدل وزنی خاص تبدیل می‌کند (۱۵). در واقع این مدل یک روش ریزمقیاس‌نمایی بر اساس رگرسیون چندگانه است که توسط ویلی و همکاران (۲۵) برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و شبیه‌سازی تغییرات آن در آینده، ایجاد شد. مدل SDSM توانایی کار با طیف وسیعی از داده‌ها و سناریوهای اقلیمی مختلف را داراست. از سال ۲۰۰۷ و با انتشار گزارش چهارم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) و سناریوهای منطبق با آن، از داده‌های مدل‌های AR₄ به‌عنوان ورودی این مدل استفاده می‌شد اما در سال ۲۰۱۳ و با عرضه گزارش پنجم IPCC (AR₅) به جوامع علمی، به تدریج از داده‌ها و سناریوهای مربوط به این گزارش به‌عنوان جایگزین داده‌های گزارش چهارم در ورود داده‌ها به SDSM استفاده شد.

در زمینه مدل‌سازی و شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی با این مدل تحقیقات مختلفی در داخل و خارج کشور صورت گرفته است از جمله تیتوس و همکاران (۲۴) با استفاده از مدل SDSM داده‌های بارش و دما در یکی از حوضه‌های آبخیز کشور کانادا را مورد شبیه‌سازی قرار دادند و نتایج آن را با یک مدل شبکه عصبی مقایسه کردند و نشان دادند که نتایج هر دو روش مشابه بوده و نسبت به هم تفاوت چندانی ندارند. هارفام و ویلی (۱۲) چند مدل ریزمقیاس‌نمایی (از جمله SDSM) را برای شبیه‌سازی بارش انگلستان مورد استفاده قرار دادند و نتیجه گرفتند که نتایج مدل SDSM نسبت به سایر مدل‌ها از دقت بیشتری برخوردار بوده است. دیبایک و همکاران (۸) با استفاده از مدل SDSM به ارزیابی عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های بارش و دما در پنج ایستگاه هواشناسی کانادا پرداختند. آنها با

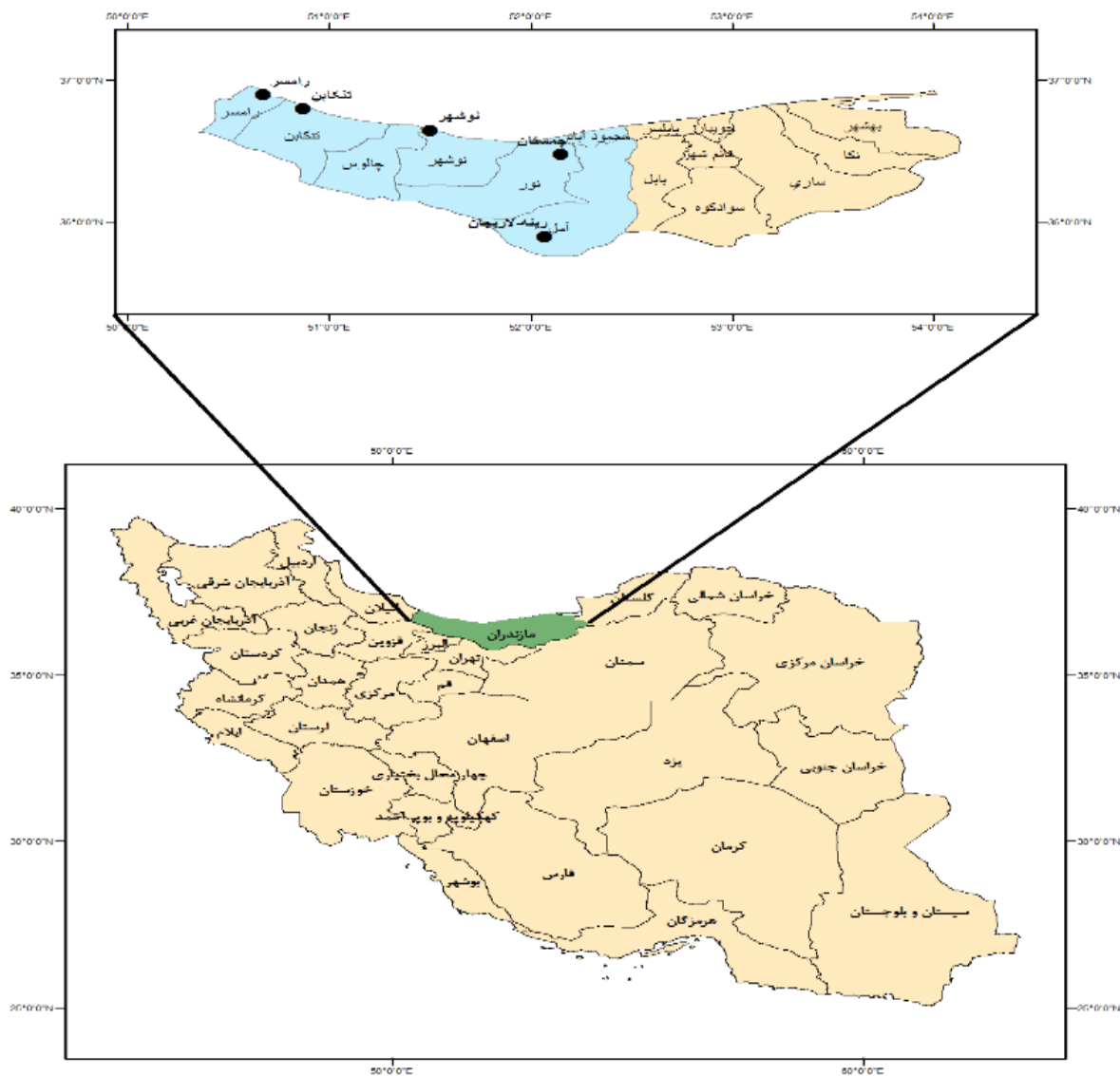
و ترسیمی مورد ارزیابی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که مقادیر دما در منطقه رو به افزایش و مقادیر بارش رو به کاهش هستند. مقدار افزایش دمای کمینه در سال‌های آینده بین ۰/۳ تا ۱/۴، دمای بیشینه بین ۰/۷ تا ۲/۷ خواهد بود. میزان کاهش بارش در منطقه مورد مطالعه بین شش تا ۱۷ میلی‌متر برآورد شده است.

نتایج اکثر مطالعات انجام شده در ایران و سایر نقاط جهان حاکی از افزایش اندازه شاخص‌های گوناگون دمایی در سال‌های آینده هستند که این موضوع یکی از نمودهای مهم پدیده تغییر اقلیم در سال‌های آینده است. یکی از فراسنج‌های مهم دمایی که تأثیرات زیادی بر زندگی و فعالیت انسان‌ها بر جای می‌گذارد، دمای کمینه است. این فراسنج اقلیمی در کشوری به وسعت ایران دارای اهمیت ویژه‌ای است و در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، زیرساخت‌های شهری و روستایی، حمل و نقل و جاده‌ها، گردشگری و غیره تأثیرگذار است و گاهی اوقات با خارج شدن از شرایط عادی خود، موجب بروز مشکلات مختلف و گاهی اوقات خسارت در بخش‌های ذکر شده می‌شود.

با توجه به اینکه نتایج اکثر تحقیقات در مورد ویژگی‌های آب و هوای کشور در آینده، وقوع پدیده تغییر اقلیم و بروز آثار نامناسب آن را نشان داده‌اند، مطالعه و مدل‌سازی تغییرات آینده دمای کمینه به‌عنوان یکی از متغیرهای مهم اقلیمی می‌تواند کمک شایانی به بهبود فرایندهای برنامه‌ریزی برای افزایش بهره‌وری و کاهش خسارات و همچنین استفاده از فرصت‌های احتمالی در بخش‌های مختلف باشد. در بیشتر تحقیقات انجام شده، به‌ویژه پژوهش‌های داخلی به‌دلیل گوناگون، شبیه‌سازی‌های انجام شده در یک نقطه (یک یا دو ایستگاه همدید) متمرکز بوده و مطالعات کمی به‌صورت پهنه‌ای انجام شده است. با توجه به اینکه مطالعات نقطه‌ای نسبت به مطالعات پهنه‌ای و منطقه‌ای از قطعیت پایین‌تری برخوردار هستند و بر اساس اهمیت مناطق غربی استان مازندران در امور کشاورزی و گردشگری در سطح کشور، در

میزان بارش منطقه طی دهه‌های آینده به‌میزان قابل توجهی کاهش خواهد یافت. دمای بیشینه، روندی افزایشی پیدا خواهد کرد و مقادیر دمای کمینه نیز کاهش خواهد بود و با توجه به این شرایط احتمال وقوع سیل یا خشکسالی‌های ادواری در منطقه افزایش خواهد یافت. تاتسومی و همکاران (۲۳) با استفاده از مدل SDSM اقدام به ریزمقیاس‌نمایی داده‌های دما در منطقه شیکوکو ژاپن کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد بر اساس بیشتر سناریوهای تغییر اقلیم، دمای منطقه به‌ویژه در دوره ۲۰۷۱-۲۰۹۹ نسبت به دوره پایه، افزایش محسوسی خواهد داشت. عباس‌نیا و همکاران (۲) با ریزمقیاس‌نمایی داده‌های CGCM^۳ و HADCM^۳ توسط مدل SDSM تغییرات دمایی کمینه ایران در دوره‌های ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۰۹۹-۲۰۷۱ را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج این پژوهش مشخص شد که حداکثر دما در ایستگاه‌های مورد مطالعه تا پایان قرن حاضر بین یک تا دو درجه افزایش می‌یابد. آبکار و همکاران (۳) با استفاده از داده‌های دمای ایستگاه کرمان و داده‌های مدل‌های گردش عمومی CGCM^۳ و HADCM^۳ اقدام به ارزیابی کارایی مدل SDSM و شبیه‌سازی دمای ایستگاه کرمان تا سال ۲۱۰۰ کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل مذکور از توانایی خوبی برای شبیه‌سازی شاخص‌های دمایی برخوردار است و در منطقه مورد مطالعه در سال‌های آینده سیر تغییرات دما دارای روندی افزایشی خواهد بود. رضایی و همکاران (۲۰) با استفاده از داده‌های دمای کمینه، بیشینه و میانگین ایستگاه‌های همدید کرمان و بم و همچنین داده‌های NCEP و HADCM^۳ کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM در مناطق خشک و فراخشک در شبیه‌سازی داده‌های دما را مورد ارزیابی قرار دادند. بر اساس نتایج این پژوهش مشخص شد که مدل SDSM در منطقه خشک، نسبت به منطقه فراخشک از کارایی بالاتر و دقت بیشتری برای پیش‌بینی دما برخوردار است.

طائی و همکاران (۲۲) مدل آماری SDSM را در شبیه‌سازی و پیش‌بینی دمای بیشینه، کمینه و بارش برای دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۰ در حوزه آبخیز بار نیشابور با استفاده از دو روش آماری



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش

مازندران است (شکل ۱). این محدوده دارای وسعت تقریبی ۱۰ هزار کیلومتر مربع بوده و در مختصات ۳۵ درجه و ۵۴ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۵۴ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۴ دقیقه طول شرقی قرار دارد. مناطق غربی استان مازندران به دلیل ویژگی‌های خاص جغرافیایی و فاصله کم با کوهستان و دریا دارای اقلیمی معتدل با بارش‌های قابل ملاحظه و دمای معتدل در طول سال است. در این محدوده به دلیل رطوبت نسبی بالا و زیاد بودن تعداد روزهای پوشیده از ابر،

پژوهش حاضر تلاش شده تا با استفاده از داده‌های ۳۰ ساله پنج ایستگاه همدید و اقلیم‌شناسی این مناطق و همچنین استفاده از داده‌های HADCM3، روند تغییرات دمای کمینه در این منطقه طی سال‌های آینده شبیه‌سازی شود.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی

محدوده مورد بررسی در این پژوهش شامل نیمه غربی استان

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش

ردیف	نام ایستگاه	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	میانگین دما (درجه سلسیوس)	ارتفاع (متر)	نوع ایستگاه	دوره پایه
۱	خشکه‌داران- تنکابن	۳۶/۴۸	۵۰/۵۲	۱۶	-۲	اقلیم‌شناسی	۱۹۷۲-۲۰۰۱
۲	چمستان- نور	۳۶/۲۹	۵۲/۰۹	۱۵/۸	۷۳	اقلیم‌شناسی	۱۹۸۰-۲۰۰۱
۳	رامسر	۳۶/۵۴	۵۰/۴۰	۱۵/۶	-۲۰	همدید	۱۹۷۲-۲۰۰۱
۴	رینه - آمل	۳۵/۵۴	۵۲/۰۴	۱۵	۱۹۵۰	اقلیم‌شناسی	۱۹۷۲-۲۰۰۱
۵	نوشهر	۳۶/۳۹	۵۱/۳۰	۱۵/۸	-۲۱	همدید	۱۹۷۷-۲۰۰۱

است که در سال ۲۰۰۰ توسط ویلی و همکاران (۲۵) ایجاد شد و از آن زمان تاکنون در نسخه‌های مختلفی توسعه داده شده است. از این مدل، برای شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی در یک یا چند ایستگاه خاص در شرایط حال حاضر و در شرایط آینده تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم به کار می‌رود. داده‌های مورد استفاده این مدل به صورت سری‌های زمانی روزانه برای یک سری زمانی از متغیرهای اقلیمی مانند بارندگی، حداقل و حداکثر دما و سایر پارامترهای جوی هستند (۲۰). این مدل عملیات ریزمقیاس‌نمایی و شبیه‌سازی داده‌ها را در پنج مرحله اصلی شامل: ۱- غربال‌سازی متغیرها و انتخاب بهترین متغیرهای مستقل، ۲- واسنجی مدل و تشخیص الگوی داده‌ها، ۳- بازتولید داده‌های مشاهده‌ای به صورت مصنوعی، ۴- تولید داده‌های جوی تحت سناریوهای تغییر اقلیم و ۵- آنالیز آماری برآوردها انجام می‌دهد. فرایند کار در این مدل در شکل (۲) نمایش داده شده است.

بعد از جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های ایستگاهی، به منظور حصول اطمینان از صحت داده‌ها، ابتدا توسط نرم‌افزار SPSS کنترل کیفیت آماری روی داده‌ها صورت گرفت. در ادامه تلاش شد یاخته مناسب برای به‌کارگیری داده‌های NCEP و HADCM3 مشخص شود. محدوده مورد مطالعه از لحاظ جغرافیایی در یاخته ۲۰Y ۱۵X داده‌های NCEP و HADCM3 واقع شده است؛ اما به منظور مشخص کردن بهترین یاخته که داده‌های آن دارای همبستگی بالا با داده‌های ایستگاهی باشند، همبستگی داده‌های یاخته‌ای و ایستگاهی در چند یاخته مجاور

دمای هوا معتدل و دامنه دمایی محدود است که این وضعیت منجر به تابستان‌های نسبتاً گرم و مرطوب و زمستان‌های معتدل با یخبندان‌های اتفاقی در این منطقه شده است (۱۸). داده‌های مشاهداتی (ایستگاهی) مورد استفاده در این پژوهش شامل داده‌های دمای کمینه است که برای ایستگاه‌های خشکه‌داران، تنکابن، چمستان نور، رامسر، رینه (آمل) و نوشهر از سازمان هواشناسی کشور اخذ شده است (جدول ۱).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

به منظور انتخاب متغیرهای مستقل، آشکارسازی مدل رگرسیونی موجود بین داده‌ها و انجام شبیه‌سازی‌ها، از داده‌های NCEP و HADCM3 با توان تفکیک $3/75 \times 2/5$ درجه متناسب با طول دوره آماری پژوهش استفاده شد. این داده‌ها شامل اطلاعات ۲۶ متغیر جوی هستند که غیر از برای باد (به دلیل ماهیت برداری آن) مقادیر بقیه متغیرها، استاندارد شده است. تفاوت اصلی این دو گروه داده این است که داده‌های NCEP بر اساس شرایط واقعی و برای زمان حاضر (۲۰۰۱-۱۹۶۱) تولید شده‌اند اما داده‌های HADCM3 با توجه به شرایط تعریف شده در سناریوهای مختلف (A2 و B2) برای دوره ۱۹۶۱ تا ۲۰۹۹ تولید شده‌اند.

در پژوهش حاضر برای انجام شبیه‌سازی و پیش‌بینی مقادیر دمای کمینه، از مدل آماری SDSM استفاده شده است. مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM در واقع ترکیبی از دو روش تولید داده‌های آب و هوایی غیر قطعی و روش رگرسیون خطی

بررسی قرار می‌گیرند، اگر هر کدام از آنها سطح معنی‌داری خود را از دست داده باشند، قبل از ورود متغیر جدید، آن متغیر از معادله خارج می‌شود و در پایان عملیات، هر متغیری که سطح معنی‌داری کمتری از سطح تعیین شده داشته باشد، در معادله حضور نخواهد داشت (۹). درنهایت پس از انجام رگرسیون گام به گام روی متغیرهای مستقل انتخاب شده در مراحل قبل و با مقایسه ضرایب R^2 و آماره F درنهایت پنج متغیر برای انجام مراحل بعدی انتخاب شدند (جدول ۲).

بعد از مشخص شدن متغیرهای مستقل، تعداد مناسب برآوردها تعیین شد. نرم‌افزار SDSM از این توانایی برخوردار است که در هر مرتبه شبیه‌سازی بین یک تا ۱۰۰ برآورد مختلف از داده‌های شبیه‌سازی شده ارائه کند. انتخاب تعداد مناسب این برآوردها با استفاده از روش‌های آماری مختلفی امکان‌پذیر است. در پژوهش حاضر از ضریب تعیین (R^2) رابطه (۲) و خطای استاندارد (RMSE) برای تشخیص تعداد مناسب برآوردها استفاده شده است. به این صورت که مدل در دفعات متعدد با تعداد برآوردهای گوناگون (۱، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ...، ۹۰ و ۱۰۰) اجرا شده و در هر مرتبه ضریب تعیین و خطای برآوردها محاسبه و درنهایت با یکدیگر مقایسه شد و تعداد برآوردهایی که دارای مقادیر بیشتر ضریب تعیین و مقادیر کمتر خطا بودند، برای انجام واسنجی و ارزیابی مدل مناسب تشخیص داده شدند. در بخش بعد داده‌های ایستگاهی (متغیر وابسته) و جوی (متغیرهای مستقل) بر اساس تعداد برآوردهای تعیین شده، مورد واسنجی قرار گرفتند تا مدل رگرسیونی موجود در داده‌ها آشکار شود. در ادامه با مدل به دست آمده، برای دوره ۳۰ ساله پایه (۲۰۰۱-۱۹۷۲) شبیه‌سازی داده‌های دمای کمینه انجام شد. سپس از طریق مقایسه داده‌های برآورد شده توسط مدل با داده‌های مشاهداتی، میزان کارایی مدل، مشخص شد. در واقع هدف ارزیابی کارایی مدل این است که مشخص شود مدل ایجاد شده در بخش واسنجی، تا چه حد برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی داده‌ها مناسب بوده و دقت آن در چه حدی است. در این پژوهش برای سنجش کارایی مدل از

محدوده مورد بررسی به دست آمد و درنهایت، با مقایسه همبستگی‌های به دست آمده، مشخص شد یاخته شماره ۲۱Y ۱۴X بهترین مقادیر همبستگی را دارا است و به عنوان مبنای کار در مراحل بعد انتخاب شد. در بخش بعد متغیرهای مستقل (پیش‌بینی‌کننده) مشخص شدند. در انتخاب متغیرهای مستقل همواره باید به وجود هم‌خطی (همبستگی‌های پنهان) بین متغیرها توجه داشت. وجود هم‌خطی بین متغیرها موجب می‌شود میزان خطای برآوردها افزایش یافته و دقت شبیه‌سازی‌ها و پیش‌بینی‌های متعاقب آنها کاهش یابد. برای کاهش میزان هم‌خطی بین داده‌ها باید تا آنجا که امکان دارد، تعداد متغیرهای مستقل ورودی به مدل، کاهش یابد. در این بخش برای انتخاب متغیرهای مستقل، مراحل زیر طی شده است:

ابتدا همبستگی میان متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (ایستگاهی) محاسبه شد و متغیری که دارای بالاترین میزان همبستگی کلی بود به عنوان اولین متغیر مستقل انتخاب شد. در ادامه به منظور انتخاب بهترین متغیرها با کمترین میزان هم‌خطی، متغیرهایی که دارای سه شرط همبستگی کلی بین $0/2$ تا $0/8$ ، همبستگی جزئی نسبتاً قابل توجه (بیش از $0/1$) و شاخص PR (رابطه ۱) کوچک بوده‌اند به عنوان متغیرهای بعدی انتخاب شدند. شاخص PR، یکی از شاخص‌های سنجش میزان هم‌خطی داده‌ها بوده و با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$PR = \frac{R_P - R_A}{R_A} \quad (1)$$

در رابطه بالا R_P همبستگی جزئی و R_A همبستگی کلی است. مقدار نهایی این شاخص هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده هم‌خطی کمتر بین داده‌ها خواهد بود. در مرحله آخر، متغیرهای انتخاب شده به یک مدل رگرسیون گام‌به‌گام در نرم‌افزار SPSS وارد شدند تا متغیرهای نهایی مشخص شوند. در این روش متغیرها به ترتیب اهمیت و بر اساس مقدار سطح معنی‌داری یا آماره F متناظر با آن وارد مدل می‌شوند ولی با ورود هر متغیر جدید، کلیه متغیرهای موجود در معادله مورد

جدول ۲. متغیرهای انتخابی برای ریزمقیاس نمایی و انجام شبیه‌سازی

ردیف	متغیر	همبستگی کلی	همبستگی جزئی	PR
۱	میانگین فشار تراز دریا	-۰/۶۷۱	-۰/۵۲۹	۰/۲۱
۲	تاوایی سطحی	-۰/۲۴۷	-۰/۲۰۴	۰/۱۷
۳	ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال	۰/۸۳۹	۰/۶۴۳	۰/۲۳
۴	ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال	-۰/۲۶۹	۰/۲۵۶	۰/۰۵
۵	میانگین دما در ارتفاع دو متری	۰/۸۸۲	۰/۸۳۳	۰/۰۵

یک آزمون ترسیمی ساده و مناسب برای سنجش نیکویی برازش و مقایسه چندک‌های حاصل از مقادیر (تجربی) و چندک‌های حاصل از توزیع مورد نظر است. در واقع این نمودار نوعی پراکنش‌نگار است. خط راست این نمودار بر اساس دو مقدار ابتدایی و انتهایی مقادیر مورد انتظار تعیین می‌شود (۴). شاخص‌های MAE و RMSE به‌عنوان روش‌هایی برای ارزیابی دقت پارامترهای گوناگون در یک مدل به‌کار می‌روند. مقادیر این پارامترها هرچه کوچک‌تر و به صفر نزدیک‌تر باشد، نشانه شایستگی بیشتر مدل خواهد بود. شاخص NSE در واقع بیانگر میزان تطبیق مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی نسبت به خط رگرسیون با شیب یک است و هرچه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، نشانه انطباق بیشتر داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی خواهد بود.

بعد از اطمینان از کارایی و دقت مدل ایجاد شده در دوره ۳۰ ساله پایه، در بخش‌هایی این پژوهش بر اساس داده‌های HADCM۳ و تحت سناریوهای A۲ و B۲ اقدام به شبیه‌سازی مقادیر دمای کمینه در منطقه مورد مطالعه برای دوره‌های (۲۰۳۹-۲۰۱۶)، (۲۰۶۹-۲۰۴۰) و (۲۰۹۹-۲۰۷۰) شد و نتایج شبیه‌سازی در قالب نمودارهای ماهانه برای ایستگاه‌ها و سناریوهای مختلف نمایش داده شد و در پایان با انجام میان‌یابی بین اندازه‌های دمایی شبیه‌سازی شده در ایستگاه‌های منطقه، نقشه‌های هم‌ارزش مقادیر دما به همراه ناهنجاری آن نسبت به دوره پایه ترسیم شد و به وسیله آن نحوه تغییرات دمای کمینه در پهنه مورد بررسی طی سال‌های آینده مورد تحلیل گرفت.

روش‌های تحلیل مانده‌های رگرسیون (رابطه ۳) با استفاده از نمودارهای پراکنش‌نگار و چندک-چندک (Q-Q)، میانگین خطای مطلق (MAE) (رابطه ۴)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۵)، ضریب ناش-ساتکلیف (NSE) (رابطه ۶) استفاده شده است.

$$R^2 = \left(\frac{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n (p_i - \bar{p})(o_i - \bar{o})}{\sigma_p * \sigma_o} \right)^2 \quad (2)$$

$$y - \hat{y} = e \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{iob} - x_{ie}| \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{n}} \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (o_i - p_i)^2}{\sum_{t=1}^n (o_i - \bar{o})^2} \quad (6)$$

در روابط بالا y ، x_{iob} و o مقدار مشاهده شده متغیر مورد نظر؛ \hat{y} ، x_{ie} و p مقادیر شبیه‌سازی شده متغیر مورد نظر، n تعداد داده‌ها، σ_p و σ_o انحراف معیار داده‌های مشاهداتی و برآورد شده است.

مانده (خطا)های ناشی از اعمال مدل رگرسیون بر داده‌ها را می‌توان به‌صورت نمودار نشان داد. در پژوهش حاضر پس از محاسبه مانده‌های روزانه، نتایج آن در قالب نمودارهای پراکنش‌نگار و Q-Q نمایش داده شده است. پراکنش‌نگار نموداری است که به وسیله آن می‌توان میزان همبستگی کلی بین دو متغیر را نشان داد. در این نمودار تغییرات مقادیر دو متغیر، مرتبط با هم در نظر گرفته می‌شود (۴). نمودار Q-Q نیز

جدول ۳. رابطه ضریب تعیین و خطای استاندارد با تعداد مختلف برآوردها در ایستگاه رامسر

تعداد شاخص	۱	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
R ²	۰/۷۷	۰/۸۶	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۷	۰/۸۸
RMSE	۳/۴۳	۲/۶۴	۲/۵۷	۲/۵۳	۲/۵۴	۲/۵۳	۲/۵۲	۲/۵۲	۲/۵۲	۲/۵۲	۲/۵۲

جدول ۴. نتایج سنجش کارایی مدل در دوره پایه

شاخص	ایستگاه خشک‌داران	چمستان	رامسر	رینه	نوشهر	میانگین
MAE	۲/۲۴	۲/۱۹	۲/۰۳	۳/۱۹	۱/۹۶	۲/۳۲
NS	۰/۸۵	۰/۸۶	۰/۸۷	۰/۷۳	۰/۸۸	۰/۸۴
RMSE	۲/۸۴	۲/۸۰	۲/۵۷	۴/۲۲	۲/۴۸	۲/۹۸

نتایج و بحث

تعیین تعداد مناسب برآوردها

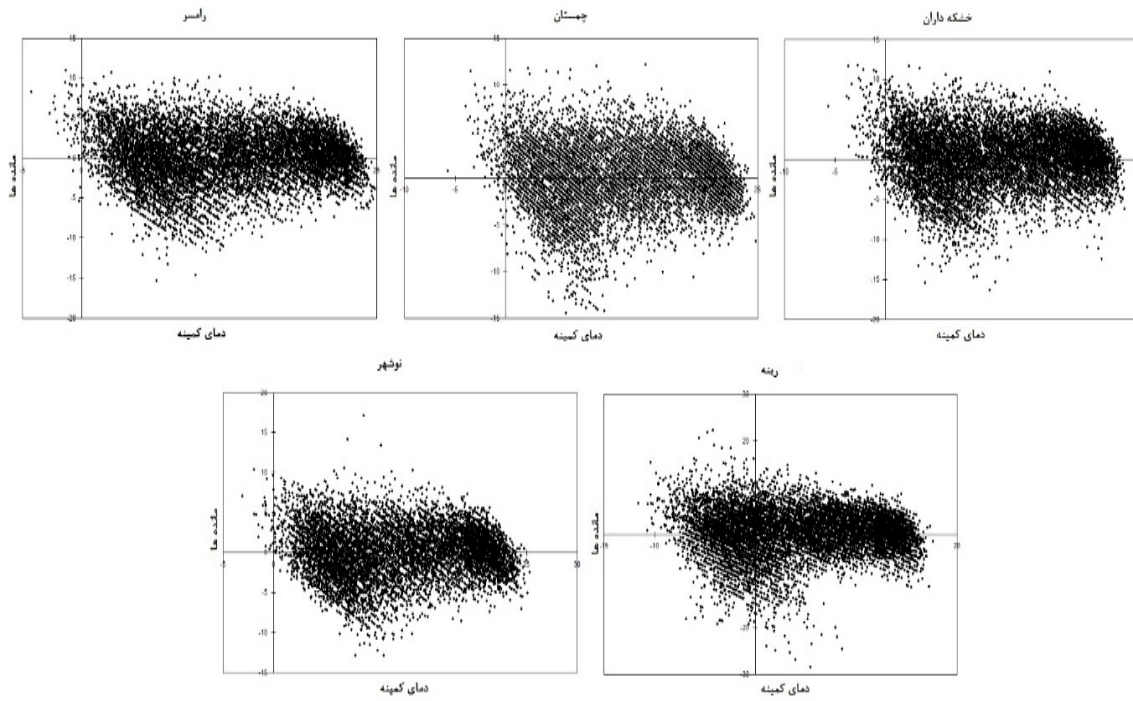
همان‌طور که قبلاً ذکر شد برای انتخاب تعداد مناسب برآوردها از شاخص‌های ضریب تعیین و خطای استاندارد استفاده شده است که نتایج آن برای ایستگاه رامسر (به‌عنوان نمونه) در جدول ۳ درج شده است.

بر اساس مقادیر جدول، مشخص است که تغییرات ضریب تعیین و خطای استاندارد در برآوردهای مختلف ناچیز است. به‌صورت کلی غیر از تعداد یک برآورد، مدل نسبت به تغییر تعداد برآوردها حساسیت خاصی نشان نداده است و مقادیر به هم نزدیک هستند. با این حال در تعداد ۶۰ برآورد و بالاتر از آن، میزان ضریب تعیین که ارتباط متغیرهای برآورد شده با داده‌های ایستگاهی را نمایش می‌دهد، در عدد ۰/۸۸ و مقدار خطا نیز در میزان ۲/۵۲ ثابت شده‌اند. بنابراین به‌دلیل اینکه در تعداد یاد شده بیشترین ضریب تعیین و کمترین میزان خطا رخ داده و بعد از آن تغییری در آنها رخ نداده است، تعداد مناسب برآوردها ۶۰ تشخیص داده شده است. شایان ذکر است که نتایج این بررسی در سایر ایستگاه‌های منطقه، مشابه با ایستگاه رامسر بوده است.

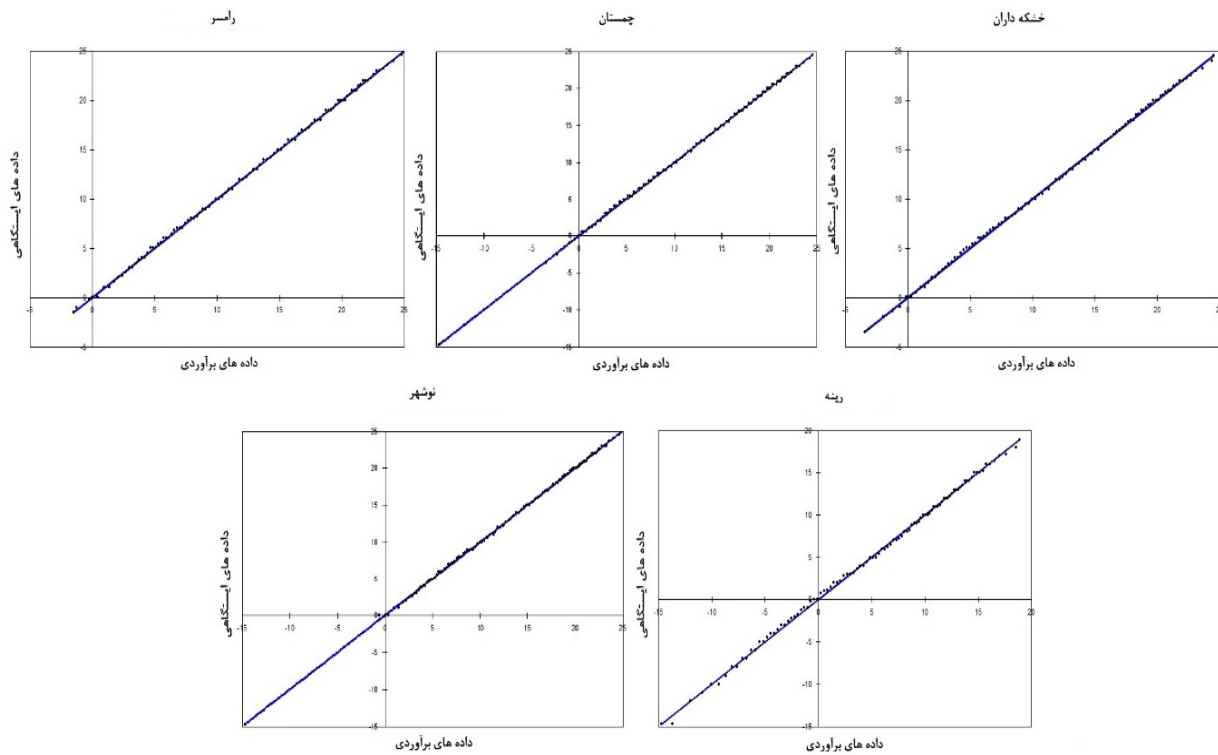
ارزیابی مدل

بعد از مشخص شدن تعداد مناسب برآوردها و انجام واسنجی مدل برای دوره پایه هر ایستگاه، در این بخش برخی شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل، محاسبه و در قالب جدول ۴ و شکل‌های (۲) و (۳) نمایش داده شده است.

بر اساس نتایج درج شده در جدول (۵) می‌توان گفت به‌صورت کلی، مدل ایجاد شده در بخش واسنجی برای تمام ایستگاه‌ها مناسب و قابل قبول است. مقدار شاخص MAE در بیشتر ایستگاه‌ها در حدود دو است و تنها در ایستگاه رینه (به خاطر محیط کوهستانی ایستگاه و تغییرپذیری زیاد مقادیر دمای کمینه) میزان آن به ۳/۱۹ رسیده است. در این ایستگاه شاخص‌های NS و RMSE نیز نسبت به ایستگاه‌های دیگر، مقادیر متفاوتی به خود گرفته‌اند. با این حال بررسی سایر شاخص‌ها و نمودارها حاکی از تناسب مدل ایجاد شده برای این ایستگاه با داده‌های دمایی مربوط به آن است. میانگین شاخص‌های MAE، NS و RMSE در کلیه ایستگاه‌های مورد بررسی به‌ترتیب ۲/۳۲، ۰/۸۴ و ۲/۹۸ به‌دست آمده است که برای پذیرش مدل ایجاد شده مناسب است و نشان می‌دهد که این مدل کارایی خوبی در ریزمقیاس دمایی و پیش‌بینی داده‌های دمای کمینه در سطح منطقه خواهد داشت. شکل (۲) نحوه



شکل ۲. پراکنش مانده‌های مدل در برابر دمای کمینه



شکل ۳. نمودار چندک-چندک (Q-Q) پراکنش داده‌های ایستگاهی در برابر داده‌های برآوردی

چشمگیر نیست. میانگین افزایش دما در دوره‌های ذکر شده به ترتیب ۰/۱ تا ۰/۲، ۰/۱ تا ۰/۳ و ۰/۳ تا ۰/۶ درجه سلسیوس محاسبه شده است. با توجه به نمودارها مشخص است که میزان افزایش میانگین دما در دوره‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۳۹ و ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۹ کمتر است، اما به سمت انتهای دوره (۲۰۷۰ تا ۲۰۹۹) به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش میانگین دمای کمینه در ایستگاه رامسر و طی دوره ۲۰۷۰ تا ۲۰۹۹ رخ خواهد داد که مقدار آن ۰/۶ درجه نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت.

در سال‌های آینده در اغلب ماه‌های سال روند افزایشی دمای کمینه رخ می‌دهد؛ به‌نحوی که میزان دما در ماه‌های آوریل تا ژوئن و آگوست تا دسامبر (به‌ویژه در دوره‌های دوم و سوم شبیه‌سازی) افزایش می‌یابد. میزان افزایش دما در این ماه‌ها برای دوره‌های سه‌گانه پیش‌بینی به ترتیب ۰/۱ تا ۰/۵، ۰/۱ تا ۰/۱ و ۰/۴ تا ۱/۹ درجه سلسیوس است. نکته بسیار مهم در این نمودارها این است که بیشترین میزان افزایش دما در بیشتر ایستگاه‌ها طی ماه اکتبر رخ خواهد داد؛ به گونه‌ای که میانگین این افزایش ۰/۴ (۲۰۳۹-۲۰۱۶)، ۰/۹ (۲۰۴۰-۲۰۶۹) و ۱/۵ (۲۰۹۹-۲۰۷۷) درجه خواهد بود. این مسئله می‌تواند تا حدودی افزایش طول تابستان به سمت ابتدای فصل پاییز را نشان دهد. برخلاف ماه‌های ذکر شده، روند تغییرات دما در ماه ژانویه، رو به کاهش خواهد بود و به‌طور متوسط ۰/۲ درجه در هر دوره کاهش خواهد یافت. همچنین میزان دما در ماه‌های فوریه و مارس نیز به میزان ناچیزی افزایش خواهد یافت؛ به گونه‌ای که می‌توان آن را بدون تغییر در نظر گرفت. مقایسه نمودارهای دو سناریوی A۲ و B۲ همچنین نشان داد که میزان افزایش دما در سناریوی A۲ بیش از سناریوی B۲ برآورد شده است که یکی از دلایل اصلی این موضوع می‌تواند تفاوت در شرایط تعریف شده سناریوی B۲ نسبت به A۲ باشد. البته به‌طورکلی هر دو سناریو بر افزایش دما در تمام ماه‌ها به‌جز ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس تأکید دارند.

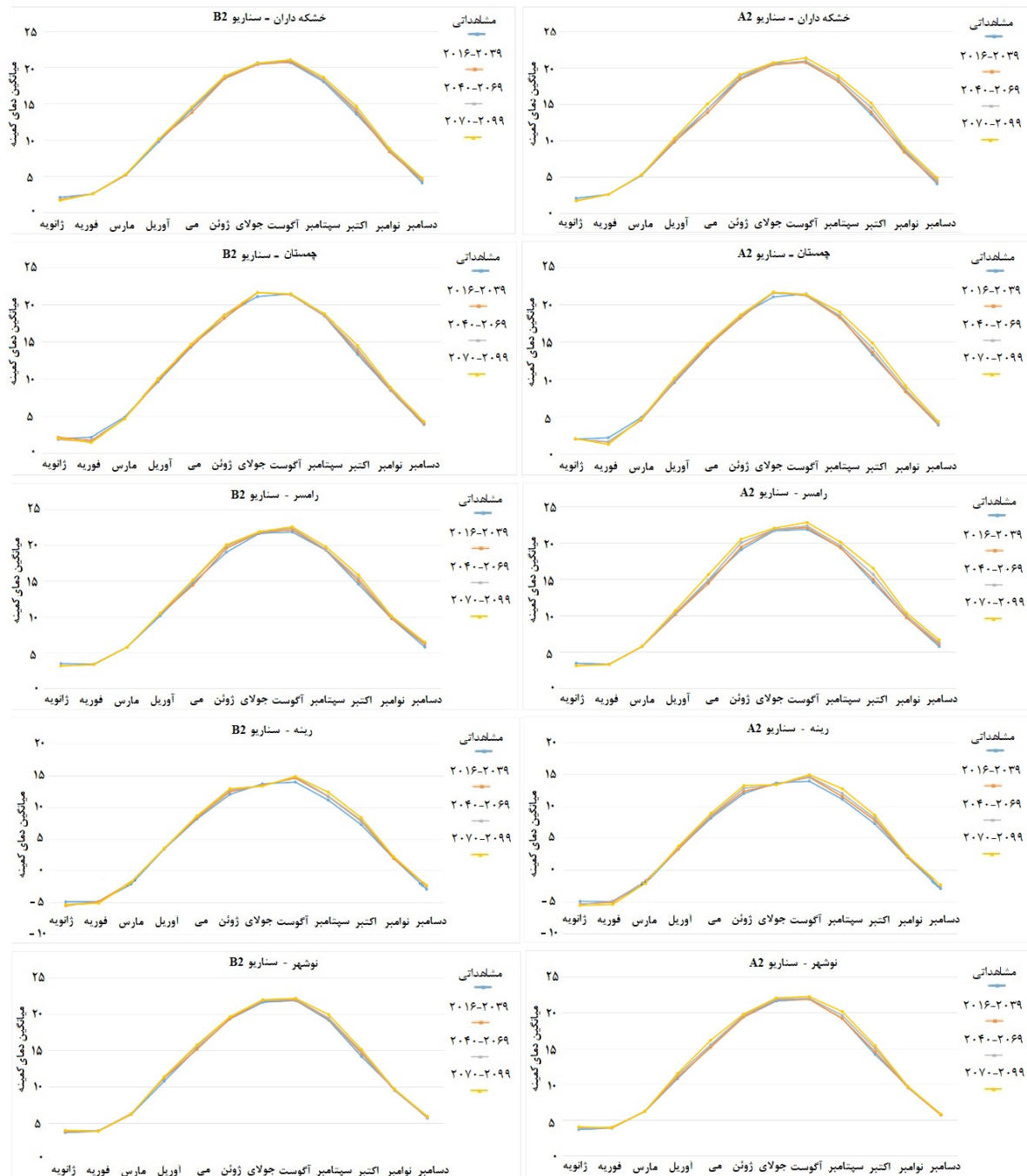
نقشه‌های موجود در شکل‌های (۵) تا (۷) میانگین فصلی دمای

پراکنش مانده‌های مدل نسبت به پارامتر دمای کمینه ایستگاهی را نمایش می‌دهد. بر اساس این نمودار، مانده‌ها در تمامی ایستگاه‌ها فاقد روند خاصی بوده و در اطراف محور X تمرکز پیدا کرده‌اند. در شکل (۳) نیز در تمام ایستگاه‌ها، داده‌های برآوردی و مشاهده‌ای بر هم منطبق شده‌اند و اختلاف محسوسی مشاهده نشده است. عدم وجود روند در مانده‌ها (تصادفی بودن آنها) و تطبیق داده‌ها در واقع تأییدکننده نتایج شاخص‌های محاسبه شده در جدول (۵) هستند. در ادامه اختلاف بین میانگین دمای کمینه شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای محاسبه و مشخص شد که اختلاف این دو گروه داده در تمام ایستگاه‌ها کمتر از ۰/۱ درجه و نزدیک به صفر است که تأییدی بر صحت برآوردها و دقت مدل است.

نکته مهمی که در تمامی شاخص‌ها و نمودارهای این بخش مشخص است این است که با وجود تناسب برآوردها و داده‌های مشاهده‌ای در تمامی ایستگاه‌ها، در ایستگاه‌های رامسر و نوشهر شاهد مقادیر مناسب‌تری از شاخص‌ها و انطباق مناسب‌تر داده‌ها نسبت به سایر ایستگاه‌های منطقه هستیم که این موضوع به دلیل موقعیت جغرافیایی این دو ایستگاه و نزدیکی به دریای خزر و آب و هوای متعادل‌تر در این ایستگاه‌ها نسبت به بقیه ایستگاه‌های منطقه است. در واقع می‌توان گفت که مدل به‌دست آمده با وجود شایستگی به کارگیری برای تمامی منطقه، بهترین و بهینه‌ترین برآوردها را در نواحی ساحلی ارائه خواهد داد.

شبیه‌سازی ماهانه و فصلی تغییرات دمای کمینه تا سال ۲۱۰۰
نمودارهای شکل (۴)، مقادیر شبیه‌سازی شده دمای کمینه در سه دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۳۹، ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۹ و ۲۰۷۰ تا ۲۰۹۹ در سناریوهای A۲ و B۲ به همراه مقادیر دمای مشاهداتی طی دوره پایه در ایستگاه‌های منطقه را نمایش می‌دهند.

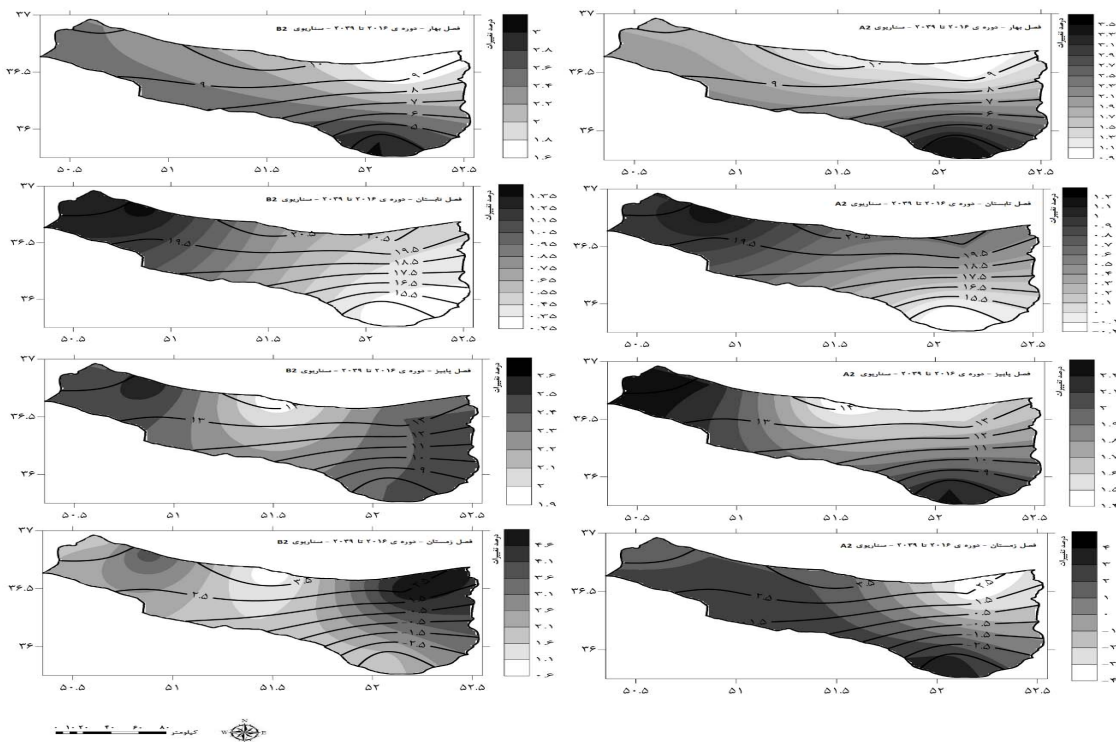
بر اساس نمودارها می‌توان گفت به‌صورت کلی، دمای کمینه در تمام ایستگاه‌های منطقه و در بیشتر ماه‌ها، روندی افزایشی خواهد داشت؛ هرچند میزان این افزایش چندان



شکل ۴. تغییرات دمای کمینه در دوره‌های شبیه‌سازی در مقایسه با دوره پایه

هم‌مقدار، بیانگر میانگین دمای کمینه و رنگ‌های پس‌زمینه نشان‌دهنده درصد ناهنجاری دمایی نسبت به دوره پایه هستند. بر اساس نقشه‌های شکل (۵) (دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۳۹)، با توجه

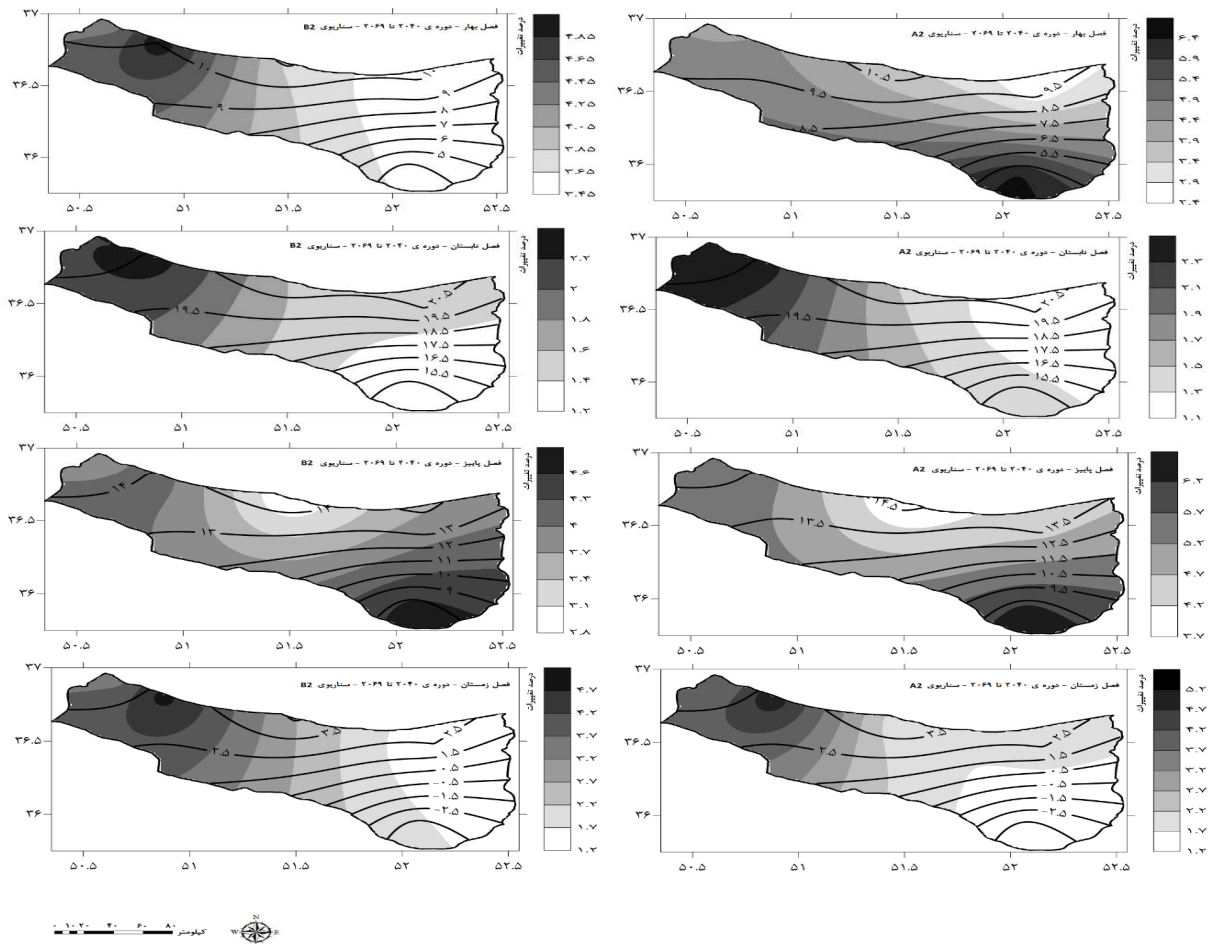
کمینه در دوره‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۳۹، ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۹ و ۲۰۷۰ تا ۲۰۹۹ را به‌همراه درصد تغییرات (ناهنجاری) آن نسبت به دوره پایه (۱۹۷۲ تا ۲۰۰۱) نمایش می‌دهند. در این نقشه‌ها خطوط



شکل ۵. میانگین و درصد تغییرات فصلی دمای کمینه در پهنه مورد بررسی (۲۰۱۶-۲۰۳۹)

غرب منطقه، بر درصد افزایش دما، افزوده خواهد شد. البته همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در کل مقدار افزایش دما در این فصل کم است. در فصل پاییز دامنه تغییرات دما بین ۸ تا ۱۴ درجه در نوسان است. درصد افزایش دما در این فصل نسبت به تابستان بیشتر است و در حدود ۱/۴ تا ۲/۶ درصد قرار دارد. طی این فصل الگوی افزایش دما دارای دو مرکز بیشینه (یکی در غرب و دیگری در شرق و جنوب شرق منطقه) است. این در حالی است که در بخش‌های مرکزی (شهرهای نور، نوشهر و چالوس) میزان افزایش دما نسبت به دوره پایه کمتر از ۱/۵ درصد است. بالاترین درصد های افزایش دما در دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۳۹ در فصل زمستان برآورد شده است. دامنه افزایش دما در این فصل، بر اساس سناریوی A2 ± 4 درصد و بر اساس سناریوی B2 بین ۰ تا ۴/۶ درصد خواهد بود. طی این فصل در بخش بزرگی از جنوب، مرکز و غرب محدوده مورد بررسی، میزان دمای کمینه بین دو تا چهار درصد افزایش می‌یابد و در بخش‌هایی از شمال شرق منطقه (قسمت‌هایی از آمل، نور و

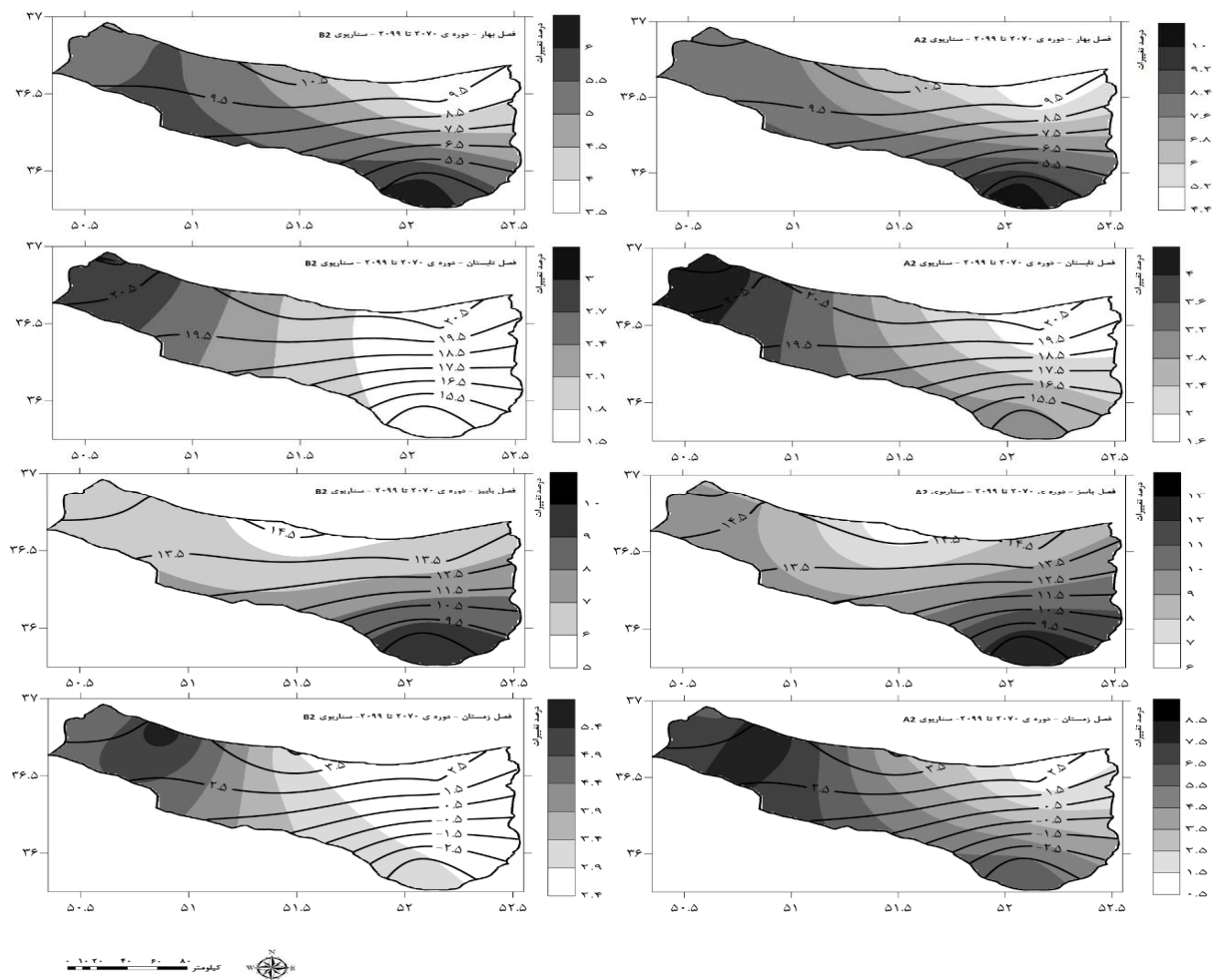
به موقعیت جغرافیایی منطقه و وضعیت طبیعی آن، در تمام فصل‌ها بالاترین مقادیر دما در بخش‌های جلگه‌ای و ساحلی مرکز و شمال منطقه و کمترین مقادیر دما در قسمت‌های جنوبی آن مشاهده می‌شود. در فصل بهار دامنه دما بین ۴ تا ۱۰ درجه سیلسیوس است. بالاترین درصد افزایش دما در این فصل سه درصد بوده که در بخش‌های کوهستانی جنوب منطقه رخ خواهد داد. به صورت کلی مقدار افزایش دما در سایر بخش‌ها بین دو تا سه درصد است و کمترین میزان افزایش (یک تا دو درصد) نیز در قسمت‌های شمال شرقی مشاهده می‌شود. در فصل تابستان دامنه تغییرات دما بین ۱۴/۵ تا ۲۰/۵ درجه سیلسیوس است که از سمت جنوب به شمال افزایش می‌یابد. در هر دو سناریو میزان تغییرات دمای این فصل نسبت به دوره پایه چندان محسوس نیست و حداکثر به ۱/۴ درصد می‌رسد که در بخش‌های غربی منطقه (حوالی رامسر و نوشهر) مشاهده می‌شود. میزان افزایش دما در بخش‌های جنوبی و شرقی، ناچیز و کمتر از ۰/۳ درصد است. طی این فصل با حرکت از شرق به



شکل ۶. میانگین و درصد تغییرات فصلی دمای کمینه در پهنه مورد بررسی (۲۰۴۰-۲۰۶۹)

نکته مهم در نقشه‌های شکل ۶ (دوره ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۹) افزایش میانگین دما و درصد تغییرات آن در سطح منطقه نسبت به دوره قبل (۲۰۱۶ تا ۲۰۳۹) و دوره پایه است. میانگین دما در فصل بهار بین ۴/۵ تا ۱۰/۵ درجه بوده که نسبت به دوره قبل ۵/۰ درجه افزایش یافته است. درصد افزایش دما نسبت به دوره پایه نیز بین ۲/۴ تا ۶/۴ است. بر اساس نتایج سناریوی A2، بیشترین درصد افزایش دما در بخش‌های جنوبی منطقه خواهد بود. در این نواحی دمای کمینه چیزی در حدود ۶/۵ درصد افزایش خواهد یافت. سایر بخش‌های مرکزی و غربی نیز بین چهار تا شش درصد افزایش دما رخ خواهد داد. کمترین درصد ناهنجاری دما در بخش‌های شمال شرقی و به میزان ۲/۵ درصد

محمودآباد) شاهد یک تا سه درصد کاهش در میانگین فصلی دمای کمینه خواهیم بود. نکته مهم در نقشه‌های این فصل، وجود اختلاف در برآورد محدوده تغییرات دما در دو سناریو است. درحالی‌که در سناریوی A2 بیشترین درصد کاهش در بخش‌های شمال شرقی مشاهده می‌شود، سناریوی B2 برای این قسمت‌ها و بخش‌هایی از غرب منطقه افزایش سه تا چهار درصدی دما را در نظر گرفته است. در رابطه با علت این موضوع می‌توان به دو مورد اشاره کرد: اول اینکه در فصل زمستان میزان تغییرپذیری دمای کمینه افزایش می‌یابد و مورد دوم مربوط به وجود خطا در برآورد مدل‌ها است. هر دو سناریو دامنه دمایی این فصل را $\pm 3/5$ درجه در نظر گرفته‌اند.



شکل ۷. میانگین و درصد تغییرات فصلی دمای کمینه در پهنه مورد بررسی (۲۰۷۰-۲۰۹۹)

است. به‌عنوان مثال خط هم‌دمای ۲۰/۵ درجه که در دوره ۲۰۱۶-۲۰۳۹ به موازات ساحل قرار گرفته بود، در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ کمی از ساحل فاصله گرفته و به سمت جنوب جابه‌جا شده است و این موضوع تا حدودی افزایش دما در سطح منطقه را نشان می‌دهد. طی فصل پاییز دامنه دما بین ۸/۵ تا ۱۴/۵ درجه بوده که نسبت به دوره قبل ۰/۵ درجه افزایش یافته است. از نظر جغرافیایی، هر دو سناریو بر این مسئله اتفاق نظر دارند که در این فصل در قسمت‌های شرقی و غربی منطقه افزایش دمایی بین چهار تا شش درصد (نسبت به دوره پایه) رخ خواهد داد. البته سناریوی A2 درصد افزایش دما را بیش از سناریوی B2 برآورد کرده

است. نتایج سناریوی B2 در فصل بهار، تا حدودی با سناریوی A2 تفاوت دارد. در این سناریو بالاترین درصد تغییرات در غرب منطقه رخ خواهد داد (حدود پنج درصد) و در نیمه شرقی حدود سه درصد افزایش دما ایجاد خواهد شد. در فصل تابستان درصد تغییرات در هر دو سناریو مشابه و بین یک تا ۲/۳ درصد است. از لحاظ جغرافیایی نیز در نیمه غربی منطقه حداکثر افزایش دما اتفاق خواهد افتاد (بیش از دو درصد). میانگین دمای منطقه بین ۱۴/۵ تا ۲۰/۵ درجه است که از لحاظ مقدار نسبت به دوره قبل تغییر خاصی نشان نداده است اما از لحاظ موقعیت خطوط هم‌دما، گستره پوشش مناطقی با دماهای بالاتر، قدری بیشتر شده

است. همچنین کمترین درصد افزایش دما در بخش‌های مرکزی (به‌ویژه قسمت‌های نزدیک ساحل) اتفاق خواهد افتاد که میزان آن بین دو تا سه درصد است.

نقشه‌های مربوط به فصل زمستان نیز افزایشی چهار تا پنج درصدی دما را برای غرب محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهند. در نیمه شرقی منطقه مقدار افزایش دما بین یک تا دو درصد خواهد بود. میانگین دما در این فصل از لحاظ مقدار تغییری نسبت به دوره قبل نیافته است اما از لحاظ موقعیت، خطوط هم‌دما تا حدودی به سمت جنوب جابه‌جا شده‌اند.

بر اساس نقشه‌های شکل (۷) (دوره ۲۰۷۰ تا ۲۰۹۹) میزان ناهنجاری دمای کمینه نسبت به دوره پایه در تمام فصول افزایشی نسبتاً چشمگیر خواهد یافت. در فصل بهار میانگین دمای کمینه نسبت به دوره قبل تغییر مشخصی پیدا نکرده است؛ هر چند خطوط هم‌دما تا حدی به سمت جنوب جابه‌جا شده‌اند. در این دوره نیز بیشترین درصد ناهنجاری مثبت دما در قسمت‌های جنوب و غرب منطقه مشاهده می‌شود. میزان این ناهنجاری در سناریوی A2، ۶ تا ۱۱ درصد و در سناریوی B2، ۴ تا ۷ درصد برآورد شده است. همان‌طور که در نقشه این فصل نیز مشخص است کمترین میزان ناهنجاری، مانند دوره‌های قبل در بخش‌های شمال شرقی محدوده وجود دارد که مقدار آن بین سه تا پنج درصد است.

مانند دوره‌های دیگر، در این دوره نیز کمترین میزان ناهنجاری دمایی در فصل تابستان رخ خواهد داد. درصد ناهنجاری دمای کمینه در این فصل بین ۱/۵ تا ۴ درصد است و بیشترین مقدار آن در نیمه غربی منطقه مشاهده می‌شود. تغییرات مقدار و موقعیت خطوط هم‌دما در سطح منطقه چندان محسوس نیست و تنها اندکی جابه‌جایی رو به جنوب در آنها (به‌ویژه خط هم‌دمای ۲۰/۵ درجه) مشاهده می‌شود. در نیمه شرقی منطقه، درصد افزایش دما (ناهنجاری دمایی) کمتر از دو درصد خواهد بود.

با تضعیف شرایط سکون نسبی تابستان، در فصل پاییز

درصد تغییرات دما به شدت افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که در قسمت‌های مختلف محدوده مورد مطالعه شاهد وقوع ۵ تا ۱۴ درصد ناهنجاری مثبت دمای کمینه در این فصل هستیم. در بخش‌های کوهستانی جنوب منطقه بین ۹ تا ۱۴ درصد افزایش دما رخ خواهد داد و کمترین میزان افزایش دما نیز در بخش‌های جلگه‌ای و مرکزی منطقه (پنج تا هفت درصد) وجود خواهد داشت. از لحاظ میانگین دما، خط هم‌دمای ۱۴/۵ درجه که در دوره‌های قبل به موازات نوار ساحلی قرار داشت، در این دوره از ساحل فاصله گرفته و در بخش‌هایی از غرب و شمال منطقه قرار گرفته است. نتایج هر دو سناریو برای فصل پاییز تقریباً مشابه است.

در فصل زمستان میانگین دما در منطقه بین $\pm 3/5$ درجه است که نسبت به دوره‌های قبل تغییر خاصی نیافته است. دامنه ناهنجاری دمایی در سناریوی A2 بین ۰/۵ تا ۸/۵ درصد و در سناریوی B2، ۲/۴ تا ۵/۴ درصد برآورد شده است. در این فصل بالاترین ناهنجاری دمایی در غرب منطقه (رامسر و نوشهر) رخ داده که میزان آن چهار تا هشت درصد است. کمترین ناهنجاری (۵/۰ تا ۳ درصد) نیز در بخش‌های شرقی (به‌ویژه شمال شرق) منطقه مشاهده می‌شود.

نکته مهمی که در تفسیر نتایج مدل‌های شبیه‌سازی و پیش‌بینی باید به آن توجه داشت این است که در این مدل‌ها معمولاً با افزایش طول دوره شبیه‌سازی و فاصله گرفتن از دوره پایه، بر اثر تأثیرگذاری عوامل گوناگون و وجود برخی ضعف‌های ساختاری در روابط محاسباتی، دقت نتایج کاهش و میزان خطای آن افزایش می‌یابد. بنابراین در تفسیر خروجی‌های مدل‌ها همواره باید بخشی از نتایج به‌دست آمده را به حساب خطای مدل گذاشت. یافته‌های این پژوهش، نتایج پژوهش‌های عباس‌نیا و همکاران (۲)، جاییسوال و همکاران (۱۵)، طائی و همکاران (۲۲) و عساکره و اکبرزاده (۵) در مورد کارایی مناسب مدل SDSM در شبیه‌سازی و پیش‌بینی داده‌های دمایی و وجود روند افزایشی دما در دهه‌های آینده را مورد تأیید قرار داد.

نتیجه‌گیری

در منطقه، طی سال‌های آینده اقلیم بخش‌های غربی استان مازندران دست‌خوش تغییر خواهد شد. به‌صورت کلی دمای کمینه در تمام منطقه رو به افزایش خواهد بود اما در بعضی مناطق مانند بخش‌های شمال شرقی و مناطق ساحلی سرعت این افزایش کمتر خواهد بود که دلیل آن را می‌توان بالاتر بودن مقادیر فعلی دمای کمینه در این نواحی در نظر گرفت که در آینده نسبت به بخش‌های غربی و جنوبی به‌میزان کمتری افزایش خواهد یافت. نتایج این پژوهش مبنی بر افزایش دما، همچنین با گزارش پنجم IPCC (AR5) نیز مطابقت دارد. بر اساس خروجی مدل‌های AR5 دمای سطح زمین تا سال ۲۱۰۰ در سناریوهای انتشار مختلف بین ۰/۳ تا ۴/۸ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت که این نتیجه با نتایج پژوهش حاضر منطبق است. نکته مهمی که با تحلیل خروجی‌های مدل مشخص شد وقوع تغییرات ماهانه و فصلی دما در غرب مازندران (منطقه‌ای که در شرایط معمول دارای شرایط ثبات فراسنج‌های اقلیمی است) و روند افزایشی آن در سال‌های آینده علاوه بر تهدید شرایط معمول زیست‌محیطی و اقتصادی-اجتماعی در این منطقه، می‌تواند زنگ خطری برای وقوع تغییرات گسترده و شدیدتر فراسنج‌های مختلف اقلیمی به‌ویژه دما در سایر مناطق کشور باشد و این موضوع لزوم تدوین برنامه‌های بلندمدت برای مقابله و سازگاری با آثار تغییرات آب و هوایی را نشان می‌دهد.

بررسی آماره‌های ارزیابی مدل در ایستگاه‌های مختلف نشان داد که مدل ایجاد شده، در برآورد دمای مناطق ساحلی تا حدودی بهتر از مناطق کوهستانی عمل کرده است. دلیل این امر را می‌توان ثبات بیشتر شرایط دمایی در مناطق ساحلی در نظر گرفت. در نقاط ساحلی به‌دلیل همجواری با دریا، اندازه‌های دمایی از ثبات بیشتری برخوردار هستند و یافتن مدل بهینه برای آنها ساده‌تر است. اما در مناطق کوهستانی به‌دلیل وجود شرایط متغیر دمایی و وقوع شرایط خاص، میزان تغییرپذیری دما بالا بوده است و درصد خطای مدل در شبیه‌سازی اندازه‌های آینده آن افزایش می‌یابد. شبیه‌سازی مقادیر آینده دمای کمینه در سطح منطقه، این نکته را به‌خوبی روشن کرد که تغییرات دمای کمینه در آینده از روندی افزایشی تبعیت خواهد کرد. بیشترین درصد افزایش دمای کمینه در دوره‌های مختلف در بخش‌های غربی و جنوبی محدوده مورد بررسی، رخ خواهد داد. این موضوع بیانگر آن است که اقلیم این مناطق در سال‌های آینده دست‌خوش تغییرات جدی خواهد شد. در حال حاضر به‌طور معمول قسمت‌های جنوبی (به‌دلیل ماهیت کوهستانی) و غربی (به‌دلیل موقعیت خاص جغرافیایی و رطوبت و بارندگی بیشتر در طول سال) منطقه از دماهای کمینه نسبتاً پایین‌تری نسبت به شرق استان مازندران برخوردارند و نتایج تحلیل‌ها نشان داد که با وقوع تغییر اقلیم

منابع مورد استفاده

1. Abbasi, F., S. Malbousi, E. Babaeian, M. Athmari and R. Borhani. 2010. South Khorasan climate change prediction during the period 2039-2010 using the ECHO-G model output. *Water and Soil (Agriculture Science and Technology)* 24(2): 218-233.
2. Abbasnia, M., T. Tavousi and M. Khosravi. 2016. Assessment of future changes in the maximum temperature at selected stations in Iran based on HADCM3 and CGCM3 models. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 52: 371-377.
3. Abkar, A., M. Habibnejad, K. Soleymani and H. Naghavi. 2013. Checking the SDSM model performance to simulate temperature indices in arid and semi-arid regions. *Irrigation and Water Engineering* 4(14): 1-17.
4. Asakereh, H. 2011. *Fundamentals of Statistical Climatology*. Zanjan University Press. Zanjan.
5. Asakereh, H. and Y. Akbarzadeh. 2017. Simulation of temperature and precipitation variation of the synoptic station of Tabriz during 2010-2100 by using SDSM and CanEsm2 model's output. *Geography and Environmental Hazards* 21: 153-174.
6. Cheng, C. S., G. Li, Q. Li and H. Auld. 2008. Statistical downscaling of hourly and daily climate scenario for various meteorological variables in South – Central Canada. *Theoretical and Applied Climatology* 91: 129-147.

7. Coulibaly, P., Y. B. Dibike and F. Anctil. 2005. Downscaling precipitation and temperature with temporal neural networks. *American Meteorological Society Journal* 6(4): 483-496.
8. Dibike, Y. B., P. Gachon, A. St-Halare, T. B. Ouarda and T. V. Nguyen. 2008. Uncertainty analysis of statistically downscale temperature and precipitation regimes in northern Canada. *Theoretical and Applied Climatology* 91(1): 149-170.
9. Farajzadeh, M. 2010. *Climatology Techniques*. Samt Press. Third Edition. 14-55.
10. Hafezparast, M. and Z. Pourkheyrollah. 2017. Meteorological drought monitoring to maintain sustainability in radiation induced scenarios. Study area (duyraj dam basin). *Ecohydrology* 4(4): 1227-1239.
11. Haltiner, G. R. and R.T. Williams. 1980. *Numerical Prediction and Dynamic Meteorology*. John Wiley and Sons, US.
12. Harpham, C. and R. Wilby. 2005. Multy-site downscaling of heavy daily precipitation occurrence and amount. *Journal of Hydrology* 312: 235-255.
13. Henderson-Sellers, A. and K. Macgofi. 2001. *The First Step in Climate Modeling*. Translated by Masoudian, S. A. and H. Ghayour. Isfahan University Press. Isfahan.
14. Hoshmand, D. and M. J. Kordadi. 2014. Uncertainty study of AOGCM Models and distribution scenarios for estimating climate parameters (case study: synoptic station of Mashhad). *Geography and Environmental Hazards* 11: 77-92.
15. Jaiswal, R. K., H. L. Tiwari, A. K. Lohani and R.N. Yadava. 2018. Statistical downscaling of minimum temperature of raipur (C.G.) India. *Climate Change Impacts* 82: 35-45.
16. Khan, M. S., P. Coulibaly and Y. Dibike. 2006. Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. *Journal of Hydrology* 319(1-4): 357-382.
17. Lane, M. E., P. H. Kirshen and R. M. Vogel. 1999. Indicators of impact of global climate change on U.S. water resources. *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management* 125(4): 194-204.
18. Mazandaran Meteorology Organization Website. Available online at: www.mazmet.ir.
19. Metekiya, M. G. and M. M. Deogratias. 2017. Generation of climate change scenarios for precipitation and temperature at local scales using SDSM in Wami-Ruvu River Basin Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth* 100: 62-72.
20. Rezaei, M., M. Nohtani. A. Abkar. M. Rezaei and M. Mirkazehirigi. 2014. Efficiency study of SDSM Model for temperature parameters prediction in dry and very dry climates (Case study: Kerman and Bam). *Watershed Management* 5(10): 117-131.
21. Shahbaee, A. 2014. Synoptic analysis of winter cold waves in Iran. MSc. Thesis, Zanjan University, Zanjan.
22. Taisemiromi, S., H. R. Moradi and M. Kodagholi. 2014. Simulation and prediction of some climatic variables by SDSM multiple linear model and general atmospheric circulation models (Case study: Neishabour watershed). *Humans and the Environment* 28: 1-15.
23. Tatsumi, K., T. Oizumi and Y. Yamashiki. 2013. Introduction of daily minimum and maximum temperature change signals in the Shikoku region using the statistical downscaling method by GCM's. *Hydrological Research Letters* 7: 48-53.
24. Titus, M. L., J. Sheng, R. J. Greatbatch and I. Folkins. 2013. Improving statistical downscaling of general circulation models. *Atmosphere-Ocean* 51(2): 213-225.
25. Wilby, R. L. and C. W. Dawson. 2007. SDSM 4.2-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *User Manual* 94.
26. Zhaofa, L., Z. Xu, P. Stephen, G. F. Chales and L. Liu. 2011. Evaluation of two statistical downscaling models for daily precipitation over an arid basin in China. *Royal Meteorological Society* 31: 2006-2020.

Evaluating Changes and Forecasting Minimum Temperature in the West of Mazandaran Province Using Statistical Downscaling Model SDSM

H. Asakereh¹, A. Shahbaee Kotenaee^{1*} and M. Foroumadi²

(Received: December 4-2017 ; Accepted: March 14-2018)

Abstract

In the vast majority parts of the Earth, a prospect now visible is the mostly synthetic thinking and fabrication by the human hand. Collision and impact of humans on the natural environment in the short and long-term courses for obvious geographical features have changed a variety of spaces. One of the consequences of human impact on the natural environment during the current period is the phenomenon of climate change. One of the climatic parameters that plays an important role in agriculture, energy, urban, tourism and road transport is the minimum temperature. In this study, an attempt was made using the minimum temperature data from 5 meteorological stations in the West Mazandaran province, as well as HADCM3 model data, to show how to change this parameter in the future periods based on simulation by the SDSM model. Accordingly, after selection of the suitable climate variables and model calibration, the accuracy of the created model in the base period was evaluated; after ensuring the sufficient accuracy of the model according to A2 and B2 scenario, data minimum temperature in 2100 was simulated. Based on the simulation results showed that the values of minimum temperature in the region over the coming years would increase. This parameter was such that the average seasonal periods 2016 to 2039, 2040 to 2069 and 2070 to 2099, as compared to the baseline period would increase, on average, by 1.8, 3.5 and 6 percent. The largest increases in the minimum temperature in the western and southern parts of the region could occur. It was also found that unlike other months of the year, the minimum temperature in January would be a decreasing trend.

Keywords: Downscaling, Simulation, West Mazandaran, Regression model, SDSM

1. Department of Climatology, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: shahbai2008@yahoo.com