



سال شانزدهم، شماره ۵۶
زمستان ۱۳۹۵، صفحات ۹۵-۱۱۳

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی

حسین محمدی^۱
قاسم عزیزی^۲
فاطمه ربانی^۳
داریوش مظاهری^۴

پیش بینی دراز مدت متغیرهای اقلیمی در ساحل شمالی ایران با تأکید بر عدم قطعیت مدل های اقلیم جهانی

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۰۵

چکیده

تغییر اقلیم در دوره های آتی می تواند تبعات منفی گوناگونی بر منابع آب، کشاورزی، محیط زیست، بهداشت، اقتصاد و... برجای گذارد. هدف این پژوهش، بررسی وضعیت اقلیم آینده در ساحل شمالی ایران است. داده های مورد استفاده شامل داده های روزانه بارش، دمای بیشینه، دمای کمینه و ساعت آفتابی مربوط به ۱۰ ایستگاه سینوپتیک حاشیه دریاچه خزر و داده های ماهانه دما و بارش مدل های جفت شده جوی-اقیانوسی می باشد. عدم قطعیت و عملکرد مدل های اقلیم جهانی با استفاده از معیارهای دقت برای دوره پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۰) بررسی و اعتبارسنجی مدل مولد تصادفی داده های آب و هوایی با استفاده از آزمون های آماری کلموگراف-سمیرنوف، T و F در تمام ایستگاه ها ارزیابی گردید. اقلیم آینده منطقه خزری براساس مدل های Mpeh و Nccsm برای دوره های آماری ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و ۲۰۴۶-۲۰۶۵ تحت سه سناریوی A1B، A2 و B1 پیش بینی شده است. نتایج حاصل از پیش بینی دما و بارش در منطقه خزری نشان داد که روند دما در آینده افزایشی است و این افزایش برای دمای حداقل بیش تر از

E-mail: hmmohammadi@yahoo.com

۱- استاد گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه تهران.

۲- دانشیار گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه تهران.

۳- دانشجوی دکتری دانشگاه تهران.

۴- استاد گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشگاه تهران.

دمای حداکثر می‌باشد. بیش‌ترین افزایش دما نسبت به دوره مشاهداتی، در دوره اول در ماه‌های سپتامبر، اکتبر و نوامبر (فصل پاییز) و در دوره دوم در ماه‌های ژوئیه، اوت و سپتامبر (فصل تابستان) مشاهده شده است. همچنین بررسی‌های فصلی و ماهانه بارش نشان می‌دهد که در منطقه خزری در دوره آتی بارش پاییزه افزایش و بیش‌ترین بارش با یک ماه تأخیر نسبت به دوره کنونی در ماه نوامبر رخ خواهد داد. بارش در فصل زمستان به‌ویژه در ماه فوریه نسبت به دوره مشاهداتی افزایش و در فصل تابستان ۱۳ درصد و در بهار حدود ۵ درصد کاهش خواهد یافت.

کلید واژه‌ها: تغییر اقلیم، مدل‌های جفت شده جوی-اقیانوسی، مدل مولد تصادفی آب‌وهوا، منطقه خزری.

مقدمه

تغییر آب‌وهوا یکی از پیچیده‌ترین چالش‌هایی است که بشر در حال حاضر و در آینده با آن مواجه بوده و خواهد بود. گزارش‌ها هیات بین‌الدول تغییر اقلیم نشان می‌دهد که دمای زمین تا سال ۲۱۰۰ در مقایسه با سال ۱۹۹۰ حدود ۱/۴ تا ۵/۸ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت (گزارش هیات بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۰۱: ۱۳). این افزایش ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای انسان منشأ می‌باشد و چنانچه در حال حاضر این انتشار متوقف شود، تغییر اقلیم تا اواخر قرن بیست‌ویک ادامه خواهد یافت (گزارش کارگروه ۲ هیات بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۰۷: ۱۹).

در سال‌های اخیر، جهت شناخت تغییرات آب‌وهوا و پیامدهای آن در دهه‌ها و قرن‌های بعد، استفاده از مدل‌های جفت شده جوی-اقیانوسی مورد توجه قرار گرفته است. این مدل‌ها ابزار شناخته شده‌ای برای مطالعه اقلیم آینده هستند (ایکسو^۵، ۱۹۹۹: ۲۳۰) و قادرند متغیرهای اقلیمی را برای دوره طولانی با استفاده از سناریوهای مختلف مدل‌سازی نمایند (عباسی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۱۸). مدل‌های گردش عمومی قادر به آشکارسازی رفتار اقلیم در مقیاس کوچک نیستند، لذا بایستی خروجی این گونه مدل‌ها را به مقیاس کوچک و منطقه‌ای تبدیل کرد. از جمله ابزارهای مطالعه اقلیم آینده در مقیاس کوچک و محلی، استفاده از مدل‌های مولد داده‌های آب‌وهوایی است. این مدل‌ها قادر برای پیش‌بینی وضع هوا یا اقلیم نیستند بلکه جهت بررسی اثرات و ارزیابی اقلیم دهه‌های آتی طراحی شده‌اند.

دلایل متعددی برای گسترش مولدهای آب‌وهوایی تصادفی و استفاده از داده‌های مصنوعی به‌جای داده‌های مشاهداتی وجود دارد. اولین دلیل، تولید سری زمانی طولانی مدت داده‌های آب‌وهوایی است که برای ارزیابی ریسک در مطالعات هیدرولوژی و کشاورزی کاربرد دارد. داده‌های آب‌وهوایی مشاهداتی روزانه مهم‌ترین ورودی برای مدل‌های ریاضی در مطالعات هیدرولوژی، کشاورزی و کاربری اراضی است؛ اما طول سری زمانی داده‌ها اغلب ناکافی است که امکان تخمین خوب وقایع حدی را نمی‌دهند. دومین دلیل این‌که، مولدهای آب‌وهوایی در

مکان‌هایی که داده‌های آب‌وهوایی مشاهداتی در دسترس نیستند میانگین‌های متغیرهای اقلیمی را شبیه‌سازی می‌کنند. این کار با درون‌یابی پارامترهای حاصل از مولد آب‌وهوایی بین مکان‌ها و با استفاده از تکنیک‌های میان‌یابی نظیر کریجینگ یا اسپیلاین به‌دست می‌آید. بخش سوم از کاربرد مولدهای آب‌وهوایی که اخیراً توسعه یافته است، مربوط به مطالعات تغییر اقلیم است. با استفاده از این مولدها می‌توان بروندهای مدل‌های گردش عمومی جو را که به دلیل تفکیک فضایی زیاد قابل استفاده نمی‌باشند، در مقیاس کوچک‌تر استفاده نمود. علاوه بر این، مولدهای آب‌وهوایی از ابزار محاسباتی کم‌هزینه برای تولید سناریوهای تغییر اقلیم استفاده می‌کنند (زمف و بارو^۶، ۱۹۹۷: ۳۹۸). تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه بررسی نوسانات اقلیمی و تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های جفت شده جو-اقیانوسی و مدل‌های مولد داده‌های هواشناسی انجام شده است. مساح بوانی و همکاران (۱۳۸۴)، اثر تغییر اقلیم بر دما، بارندگی و رواناب حوضه آبریز زاینده‌رود را با استفاده از برونداد مدل HadCM3 و دو سناریوی A2 و B2 برای دو دوره آماری ۳۰ ساله (۲۰۱۰-۲۰۳۹ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰) مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این مطالعه، تأثیر تغییر اقلیم بر جریان ورودی سد چادگان با استفاده از تکنیک شبکه عصبی مصنوعی^۷ و شبیه‌سازی رواناب بررسی گردید. نتایج نشان داد که جریان آب رودخانه ۵/۸ درصد کاهش و ضریب تغییر جریان تا ۳ برابر افزایش خواهد یافت. به‌علاوه مقایسه سناریوهای A2 و B2 نشان از وضعیت بحرانی‌تر سناریوی A2 در این حوضه داشته است. باباییان و همکاران (۱۳۸۸)، با استفاده از مدل ECHO-G و داده‌های ۴۳ ایستگاه سینوپتیک ایران، تغییر اقلیم ایران را برای دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۹ میلادی بررسی نمودند. بررسی آن‌ها نشان داد که در دوره مطالعاتی مذکور، بارش حدود ۹ درصد کاهش و میانگین سالانه دما به میزان ۰/۵ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. محمدی و همکاران (۱۳۸۹)، تغییرات بارش و دمای ایران را با استفاده از مدل ارزیابی گازهای گلخانه‌ای^۸ و ۸ سناریو بررسی نمودند. نتایج این بررسی افزایش دما به‌ویژه برای نواحی جنوبی و مرکزی ایران و کاهش بارش در تمامی نواحی ایران را نشان داد. بوبرگ و همکاران (۲۰۱۰)، با استفاده از هفت مدل منطقه‌ای و تحت سناریوی A1B در هشت منطقه اروپا، کاهش در روزهای با بارش متوسط و افزایش روزهای با بارش شدید را نتیجه گرفتند. چن و همکاران (۲۰۱۳)، با استفاده از تکنیک ریز مقیاس نمایی آماری به پیش‌بینی بارش و دما در سودان پرداختند. در این بررسی، با استفاده از ۷ مدل گردش عمومی و سناریو SRA2، مشخص گردید که بارش سودان در فصل بارانی و به‌ویژه در جنوب سودان روندی افزایشی خواهد داشت.

تغییرات اقلیمی گسترده در سطح جهان و پیامدهای آن، لزوم مطالعه اثرات تغییر اقلیم را به‌ویژه برای برنامه‌ریزان کشورها جهت ارزیابی و پیش‌بینی اقلیم دهه‌های آتی در بخش‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی و برنامه‌ریزی‌های استراتژیک بیش‌ازپیش نمایان می‌سازد. مطالعه حاضر بر آن است تا وضعیت اقلیم آینده را در ساحل شمالی ایران

6- Semenov and Barrow

7- Artificial Neural Network (ANN)

8- Magicc Scengen

بررسی نماید. استان‌های شمالی ۹/۷۵ درصد از جمعیت کل کشور (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۰: ۳۹) و ۱۱/۰۶ درصد از سطح زیر کشت اراضی زراعی کشور (آمارنامه کشاورزی، ۱۳۹۰: ۶) را دارا می‌باشند. از طرف دیگر منابع آب و کشاورزی نقش اساسی در وضعیت اقتصادی و اجتماعی مردم این منطقه دارد. بنابراین، هرگونه تغییری در پارامترهای اقلیمی می‌تواند بر منابع آب، محیط‌زیست، محصولات کشاورزی، سلامت انسان و... تأثیر داشته باشد. گرچه تحقیقات بسیاری در زمینه تغییر اقلیم ایران صورت پذیرفته است، لکن در این تحقیق سعی شده تا رفتار اقلیم آینده در ساحل شمال ایران با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی جو بررسی گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی این تحقیق حاشیه دریاچه خزر است که شامل استان‌های گیلان، مازندران و گلستان می‌باشد. در این مطالعه، از جامعه آماری موجود ایستگاه‌هایی مورد توجه قرار گرفتند که طول دوره آماری آن‌ها جهت پیش‌بینی کافی باشد و توزیع جغرافیایی ایستگاه‌ها تمام حاشیه دریاچه خزر را شامل شود. (جدول ۱) ویژگی‌های جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب را نشان می‌دهد. ایستگاه‌های بندر انزلی، رشت، بابلسر، رامسر، نوشهر و گرگان با طول دوره آماری ۳۰ سال (۱۹۸۱-۲۰۱۰)؛ و به‌منظور بررسی دقیق‌تر اقلیم آینده و به لحاظ این‌که مدل مولد داده‌های آب‌وهوایی می‌تواند برای ایستگاه‌هایی با دوره آماری ۱۵ سال نیز داده تولید نمایند، ایستگاه‌های آستارا (۲۴ سال)، قراخیل قائمشهر (۲۶ سال)، منجیل و مراوه تپه (۱۷ سال) با طول دوره آماری کم‌تر از ۳۰ سال مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

منطقه	ایستگاه	نوع	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع (متر)	طول دوره آماری
ایران	آستارا	سینوپتیک	۴۸° ۵۲'	۳۸° ۲۵'	-۱۸/۰	۱۹۸۶-۲۰۱۰
	بندر انزلی	سینوپتیک	۴۹° ۲۷'	۳۷° ۲۹'	-۲۳/۶	۱۹۵۱-۲۰۱۰
	بابلسر	سینوپتیک	۵۲° ۳۹'	۳۶° ۴۳'	-۲۱	۱۹۵۱-۲۰۱۰
	رامسر	سینوپتیک	۵۰° ۴۰'	۳۶° ۵۴'	-۲۰	۱۹۵۵-۲۰۱۰
	رشت	سینوپتیک	۴۹° ۳۷'	۳۷° ۱۹'	-۸/۶	۱۹۵۶-۲۰۱۰
	گرگان	سینوپتیک	۵۴° ۲۴'	۳۶° ۵۴'	۰	۱۹۵۲-۲۰۱۰
	قراخیل قائمشهر	سینوپتیک	۵۲° ۴۶'	۳۶° ۲۷'	۱۴/۷	۱۹۸۴-۲۰۱۰
	منجیل	سینوپتیک	۴۹° ۲۵'	۳۶° ۴۴'	۳۳۸/۳	۱۹۹۳-۲۰۱۰
	مراوه تپه	سینوپتیک	۵۵° ۵۷'	۳۷° ۵۴'	۴۶۰	۱۹۹۳-۲۰۱۰
	نوشهر	سینوپتیک	۵۱° ۳۰'	۳۶° ۳۹'	-۲۰/۹	۱۹۷۷-۲۰۱۰

داده‌های مورد استفاده شامل داده‌های روزانه بارش، دمای بیشینه، دمای کمینه و ساعت آفتابی است که از سازمان هواشناسی کشور به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل مولد داده‌های آب‌وهوایی و داده‌های ماهانه دما و بارش مدل‌های گردش عمومی جو برای دوره آماری ۱۹۸۱-۲۰۰۰ (دوره پایه) از مرکز سناریوی تغییر اقلیم کانادا^۹ جهت بررسی عملکرد مدل‌های گردش عمومی جو استخراج شده‌اند.

برای فائق آمدن به نقیصه تفکیک فضایی کم در مدل‌های گردش عمومی جو از تکنیک ریزمقیاس‌نمایی برای تبدیل خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی به متغیرهایی در مقیاس محلی استفاده شده است. روش‌های ریزمقیاس‌نمایی برونداد مدل‌های گردش عمومی عبارتند از: روش تناسبی، روش درونیابی اطلاعات سلول مجاور، ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی با استفاده از مدل‌های اقلیم منطقه‌ای^{۱۰} و ریزمقیاس‌نمایی آماری (کمال و مساح بوانی، ۱۳۹۱: ۱۸۰). در میان این روش‌ها، ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی با استفاده از مدل‌های اقلیم منطقه‌ای و ریزمقیاس‌نمایی آماری روش‌های پرکاربرد و شناخته شده‌ای هستند. مدل‌های اقلیم منطقه‌ای با استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی، فرآیندهای جوی را برای مقیاس کوچک‌تر با تفکیک‌پذیری مکانی دقیق‌تر (مقیاس زمانی روزانه با قدرت تفکیک ۵۰ کیلومتر) شبیه‌سازی می‌کنند. از نظر محاسباتی، مدل‌های منطقه‌ای پرهزینه هستند و معمولاً برونداد آن‌ها برای بسیاری از مناطق و سناریوها در دسترس نمی‌باشد. در مقایسه با این روش، روش ریزمقیاس‌نمایی آماری کم‌هزینه بوده و برای تخمین اثرات محلی تغییر اقلیم بسیار مناسب است (ویلبای، ۲۰۰۷: ۷). تکنیک‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری برونداد گردش عمومی جو عبارتند از: روش‌های مبتنی بر الگوی آب‌وهوا، روش‌های تصادفی و روش‌های وایازی. روش مولد تصادفی داده‌های آب‌وهوایی^{۱۱} برای ریزمقیاس‌نمایی امتیاز بیشتری دارد. این روش سری‌های طولانی‌مدتی را تولید می‌کند و عدم قطعیت نوسانات اقلیمی را کاهش می‌دهد (زمف و همکاران، ۲۰۰۲: ۲). در این روش علاوه بر تغییر در میانگین، تغییر در نوسانات نیز نشان داده می‌شود (پرادهم و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۱۳۸).

در مطالعه حاضر جهت ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های گردش عمومی جو، از مدل مولد تصادفی داده‌های آب‌وهوایی لارس^{۱۲} استفاده شده است. مدل لارس برای شبیه‌سازی داده‌های آب‌وهوایی در مکان معین تحت شرایط اقلیم پایه و آینده استفاده می‌شود. در این مدل با استفاده از داده‌های آب‌وهوایی مشاهده شده روزانه مربوط به مکانی معین، سری‌های روزانه دمای بیشینه، دمای کمینه، بارش، تابش و تبخیر و تعرق تولید می‌شود. مدل لارس از توزیع نیمه تجربی برای مدل‌سازی طول دوره‌های خشک و تر، بارش روزانه و سری‌های تابش استفاده می‌کند (زمف و همکاران، ۱۹۹۸: ۹۶).

9- CCCSN

10- RCMs

11- Weather Generator (WGs)

12- Lars-WG

در نسخه جدید مدل مولد داده‌های آب‌وهوایی لارس، پیش‌بینی‌ها با استفاده از ۱۵ مدل گردش عمومی جو براساس سناریوهای انتشار مختلف صورت می‌پذیرد. در میان ۱۵ مدل موجود در لارس، تنها ۶ مدل هر سه سناریوی A1B، A2 و B1 را دارا می‌باشند که در این مطالعه استفاده شده است (جدول شماره ۲). مدل‌های گردش عمومی نوعی مدل کامپیوتری برای شناخت و پیش‌بینی آب‌وهوا و تغییر اقلیم هستند که عمدتاً مدل‌های اقلیم جهانی نامیده می‌شوند. این مدل‌ها رفتار اقلیم را با تلفیق انواع معادلات دینامیک سیالات، شیمیایی و بیولوژیکی تشریح می‌کنند. دو نوع مدل با عنوان مدل‌های گردش عمومی جو و مدل‌های گردش عمومی اقیانوس وجود دارد. با جفت شدن این مدل‌ها، مدل‌های جفت شده گردش عمومی جو-اقیانوس^{۱۳} به وجود آمده است (گزارش کارگروه ۱ هیات بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۰۷: ۶۰۲).

جدول ۲- مشخصات مدل‌های گردش عمومی جو

ردیف	مدل‌های گردش عمومی	مرکز تحقیقات	قدرت تفکیک مکانی
۱	GFDL-CM2	این مدل در آزمایشگاه ژئوفیزیک دینامیک سیالات امریکا تولید شده است. در این مرکز مدل‌های زوجی جو-اقیانوس با قدرت بالا تولید می‌شوند.	$2^{\circ} \times 2.5^{\circ}$
۲	HadCM3	این مدل که در مرکز تحقیقات آب‌وهوایی هدلی انگلستان تهیه شده است، در سومین، چهارمین و پنجمین گزارش هیات بین‌المللی تغییر اقلیم به‌عنوان مهم‌ترین مدل جهت شبیه‌سازی اقلیم حاضر و آینده استفاده می‌شود.	$2.5^{\circ} \times 3.75^{\circ}$
۳	INCM3	در موسسه مدل‌سازی ریاضی- عددی روسیه از ترکیب سیستم اتمسفر، اقیانوس، یخ دریا، سطح زمین، پوشش گیاهی و تابش جو ساخته شده است.	$4^{\circ} \times 5^{\circ}$
۴	IPCM4	این مدل در موسسه پیرسایمون لاپلاس فرانسه با جفت شدن چهار سیستم اتمسفری، اقیانوسی، یخ دریا و سطح زمین ساخته شده است. در این مدل اثرات مستقیم و غیرمستقیم تمرکز ذرات سولفات و واداشت‌های مربوط به تمرکز آئروسول‌ها مورد توجه قرار گرفته است.	$2.5^{\circ} \times 3.75^{\circ}$
۵	MPEH5	در مرکز هواشناسی ماکس-پلانک آلمان تولید شده است. در این مرکز تغییر اقلیم با ترکیب مدل‌های سیستم زمین، جو و اقیانوس مدل‌سازی می‌شود.	$1.9^{\circ} \times 1.9^{\circ}$
۶	NCCCSM	این مدل مربوط به مرکز ملی تحقیقات اتمسفری آمریکا است که رفتار جو را در ارتباط با پدیده‌های فیزیکی، بیولوژیکی و سیستم‌های اجتماعی مطالعه می‌کند.	$1.4^{\circ} \times 1.4^{\circ}$

در سناریوی A1B با تأکید بر استفاده متعادل از انواع منابع انرژی، گویای جهانی است که در آن رشد اقتصاد و گسترش تکنولوژی بسیار سریع می باشد. در این سناریو، جمعیت جهان در نیمه قرن به اوج رسیده و سپس کاهش خواهد یافت. سناریوی A2 گویای جهانی نامتجانس است که در آن جمعیت جهان پیوسته در حال افزایش و رشد منطقه ای اقتصاد آهسته و منطقه محور می باشد. سناریوی B1 بر رشد سریع اقتصاد همراه با ارائه خدمات و اطلاعات، استفاده از منابع پاک، فناوری های نوین و کاهش مواد آلاینده تأکید دارد (چهارمین گزارش هیات بین الدول تغییر اقلیم، ۲۰۰۷).

در مطالعات تغییر اقلیم، نتایج نهایی می تواند از منابع مختلف عدم قطعیت نظیر عدم قطعیت برون داد گردش عمومی جو، عدم قطعیت روش های ریزمقیاس کردن و عدم قطعیت سناریوهای انتشار متأثر شود (المهدی و همکاران، ۲۰۰۹: ۳۹۲۴). از این رو لازم است اعتبار مدل های استفاده شده در شبیه سازی متغیرهای اقلیمی مورد ارزیابی قرار گیرد. اعتبارسنجی یک مدل عبارتست از: تحلیل و مقایسه ویژگی های آماری داده های مشاهداتی و تولید شده جهت سنجش توانایی مدل در شبیه سازی متغیرهای اقلیمی برای منطقه مورد مطالعه (چن و همکاران، ۲۰۱۲: ۳۶۷). در این مطالعه، مدل لارس با استفاده از آزمون های آماری T-test، F، کلموگراف-سمیرنوف^{۱۴} و محاسبه مقادیر P-value برای هر یک از آزمون ها اعتبارسنجی شده است. همچنین، اعتبار و عملکرد مدل های گردش عمومی جو در پیش بینی اقلیم آینده با تجزیه و تحلیل خطاهای پیش بینی تعیین و برای اندازه گیری خطای پیش بینی از معیارهای دقت^{۱۵} استفاده شده است (خرمی و بزرگ نیا، ۱۳۸۶: ۱۰۰). بنابراین جهت بررسی عملکرد مدل های گردش عمومی جو در شبیه سازی دما و بارش منطقه خزری، میانگین های ماهانه دما و بارش ایستگاه های سینوپتیک مورد مطالعه و خروجی ماهانه دما و بارش مدل های گردش عمومی جو برای دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱) با استفاده از شاخص های عملکرد مانند ضریب همبستگی، میانگین قدر مطلق خطاها و ریشه میانگین مربع خطاها^{۱۶} مقایسه شدند.

پس از اعتبارسنجی مدل لارس، ارزیابی دقت پیش بینی مدل های گردش عمومی جو و انتخاب بهترین مدل، داده های اقلیم آینده برای دو دوره آماری ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶ تحت سه سناریوی A1B، A2 و B1 تولید و وضعیت اقلیم آینده در منطقه خزری بررسی گردید.

یافته ها و بحث

اعتبارسنجی مدل لارس

به منظور ارزیابی توانایی مدل لارس در شبیه سازی اقلیم منطقه، تست های آماری توسط مدل اجرا گردید. آزمون کلموگراف-سمیرنوف جهت سنجش یکسانی توزیع فصلی سری های خشک و تر، توزیع بارش روزانه و توزیع

14- Kolmogorov-Smirnov (K-S)

15- Measures of Accuracy

16- RMSE

دمای بیشینه و کمینه روزانه، آزمون T جهت تست همانندی برای میانگین بارش ماهانه و میانگین دمای بیشینه و کمینه روزانه و آزمون F جهت ارزیابی واریانس ماهانه بارش اجرا شده است. (جدول ۳) نتایج آزمون‌های کلموگراف-سمیرنوف، T و F را برای هریک از ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. در این جدول، تعداد آزمون‌های خارج از سطح معناداری (۰/۰۵) نسبت به کل آزمون در هر سری نشان داده شده است. به عبارتی اگر مقدار P-value کم‌تر از سطح معناداری (۰/۰۵) باشد فرض صفر مبنی بر این‌که داده شبیه‌سازی شده همانند داده واقعی می‌باشد، رد می‌شود. بنابراین اعداد بزرگ‌تر گویای این است که مدل در تولید داده ضعیف عمل می‌کند. بر این اساس، با توجه به نتایج (جدول ۳)، میانگین نتایج خارج از سطح معناداری در تمام ایستگاه‌ها برای توزیع سری‌های خشک و تر فصلی برابر با صفر از ۸ تست و برای توزیع بارش روزانه، دمای کمینه و دمای بیشینه برابر با صفر از ۱۲ تست است. میانگین نتایج خارج از سطح معناداری برای بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه ماهانه به ترتیب ۰/۲، ۰/۲ و ۰/۱ از ۱۲ تست و برای واریانس بارش ماهانه برابر با ۰/۸ از ۱۲ تست می‌باشد. با توجه به میانگین تعداد خارج از سطح معناداری می‌توان گفت که مدل برای شبیه‌سازی میانگین‌های ماهانه و روزانه دما و بارش در منطقه خزری مناسب است.

جدول ۳- نتایج اعتبارسنجی مدل لارس در شبیه‌سازی بارش و دمای روزانه و ماهانه

ایستگاه	سری تر و خشک	توزیع بارش روزانه	میانگین بارش ماهانه	واریانس ماهانه بارش	توزیع دمای کمینه روزانه	توزیع دمای بیشینه روزانه	میانگین ماهانه دمای حداقل روزانه	میانگین ماهانه دمای حداکثر روزانه
آستارا	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰
بندر انزلی	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۱	۰
بابلسر	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰
رامسر	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰
رشت	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰
قراخیل	۰	۰	۲	۱	۰	۰	۰	۰
گرگان	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
منجیل	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰
مراوه‌تپه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
نوشهر	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
میانگین	۰	۰	۰/۲	۰/۸	۰	۰	۰/۲	۰/۱
مجموع آزمون	۸	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲

برای روشن‌تر شدن نتایج حاصل از ارزیابی توانمندی مدل لارس، از آزمون آماری T برای مقایسه تفاوت میانگین‌های ماهانه بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه تولید شده و مشاهداتی در سطح ۰/۰۵ درصد استفاده گردید

(جدول ۴ و ۵). همان طور که ملاحظه می شود، مقادیر P-value تطابق خوبی را بین میانگین های ماهانه داده های مشاهداتی و شبیه سازی شده نشان می دهد.

جدول ۴- مقایسه میانگین دمای کمینه و بیشینه مشاهداتی و تولید شده در ایستگاه های منطقه خزری

دمای بیشینه (سلسیوس)			دمای کمینه (سلسیوس)			نام ایستگاه
P-value	تولید شده	دوره مشاهداتی	P-value	تولید شده	دوره مشاهداتی	
۰/۵۵	۱۸/۷۷	۱۸/۸۵	۰/۴۷	۱۱/۸۴	۱۱/۸۵	آستارا
۰/۶۶	۱۸/۸۵	۱۸/۹۳	۰/۳۷	۱۳/۸۶	۱۳/۸۸	بندر انزلی
۰/۵	۲۱/۱۲	۲۱/۱۹	۰/۵۴	۱۳/۸۲	۱۳/۷۹	بابلسر
۰/۵۳	۱۹/۳۶	۱۹/۴۳	۰/۵۲	۱۳/۱۶	۱۳/۱۱	رامسر
۰/۵۶	۲۰/۴۹	۲۰/۶۵	۰/۴۹	۱۲/۰۹	۱۲/۱۱	رشت
۰/۵	۲۱/۳۵	۲۱/۵۱	۰/۴۲	۱۲/۴۸	۱۲/۴۷	قراخیل قائمشهر
۰/۵۳	۲۲/۸۹	۲۳	۰/۶	۱۲/۵۹	۱۲/۶۳	گرگان
۰/۴۷	۲۲/۴۴	۲۲/۵۷	۰/۵۵	۱۲/۷۳	۱۲/۷۹	منجیل
۰/۵۵	۲۲/۴۹	۲۲/۶۹	۰/۵۷	۱۳/۱۱	۱۳/۲۴	مراوه تپه
۰/۵۷	۱۹/۵۷	۱۹/۶۷	۰/۵۵	۱۲/۸۷	۱۲/۸۴	نوشهر

جدول ۵- مقایسه میانگین بارش مشاهداتی و تولید شده در ایستگاه های منطقه خزری

P-value	میانگین بارش تولید شده (میلی متر)	میانگین بارش دوره مشاهداتی (میلی متر)	ایستگاه
۰/۶۷	۱۱۲/۴۷	۱۰۹/۱	آستارا
۰/۵۴	۱۳۸/۰۱	۱۴۰/۶۵	بندر انزلی
۰/۶۷	۷۶/۱۵	۷۶/۰۶	بابلسر
۰/۵۵	۱۰۲/۸۹	۹۷/۰۷	رامسر
۰/۶۳	۱۰۸/۵۴	۱۰۸/۳۲	رشت
۰/۴۷	۶۴/۲۹	۵۹/۶۵	قراخیل قائمشهر
۰/۶۹	۴۳/۴۵	۴۳/۰۸	گرگان
۰/۶۷	۱۶/۳۷	۱۶/۴۴	منجیل
۰/۶۵	۲۹/۲۱	۲۸/۵۶	مراوه تپه
۰/۴۲	۱۰۸/۲۴	۱۰۳/۵۹	نوشهر

- ارزیابی عملکرد مدل‌های گردش عمومی در شبیه‌سازی بارش و دما

هنگامی که از چند مدل برای بررسی شرایط اقلیمی هر منطقه استفاده می‌شود، لازم است بهترین مدل از بین مدل‌ها انتخاب گردد. (جدول ۶) نتایج اندازه‌گیری خطای پیش‌بینی را با استفاده از معیارهای دقت برای دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱) نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مدل‌های Mpeh و Nccsm بیشترین ضریب همبستگی را با کمترین خطا در شبیه‌سازی دما و بارش منطقه خزری دارند. از این‌رو با توجه به اصل عدم قطعیت و به‌منظور کاهش خطای شبیه‌سازی، از مدل‌های Mpeh و Nccsm جهت پیش‌بینی اقلیم آینده منطقه خزری استفاده گردید.

جدول ۶- ارزیابی عملکرد مدل‌های گردش عمومی جو در شبیه‌سازی دما و بارش

متغیر اقلیمی			دما (سلسیوس)			بارش (میلی‌متر)		
معیارهای دقت			ضریب همبستگی	میانگین قدر مطلق خطاها	ریشه میانگین مربع خطاها	ضریب همبستگی	میانگین قدر مطلق خطاها	ریشه میانگین مربع خطاها
Gfcm2			۰/۹۸	۵/۷	۶/۱	۰/۳۶	۱/۸	۲/۳
Hadcm3			۰/۸۷	۵/۲	۵/۹	۰/۴	۱/۸	۲/۳
Incm3			۰/۹۶	۵/۵	۵/۹	۰/۱۲	۱/۹	۲/۵
Ipcm4			۰/۹۹	۳/۳	۳/۶	۰/۴۳	۱/۹	۲/۴
Mpeh5			۰/۹۹	۲/۶	۳/۰	۰/۶۴	۲/۰	۲/۳
Nccsm			۰/۹۹	۲/۸	۳/۱	۰/۶۵	۱/۷	۲/۲

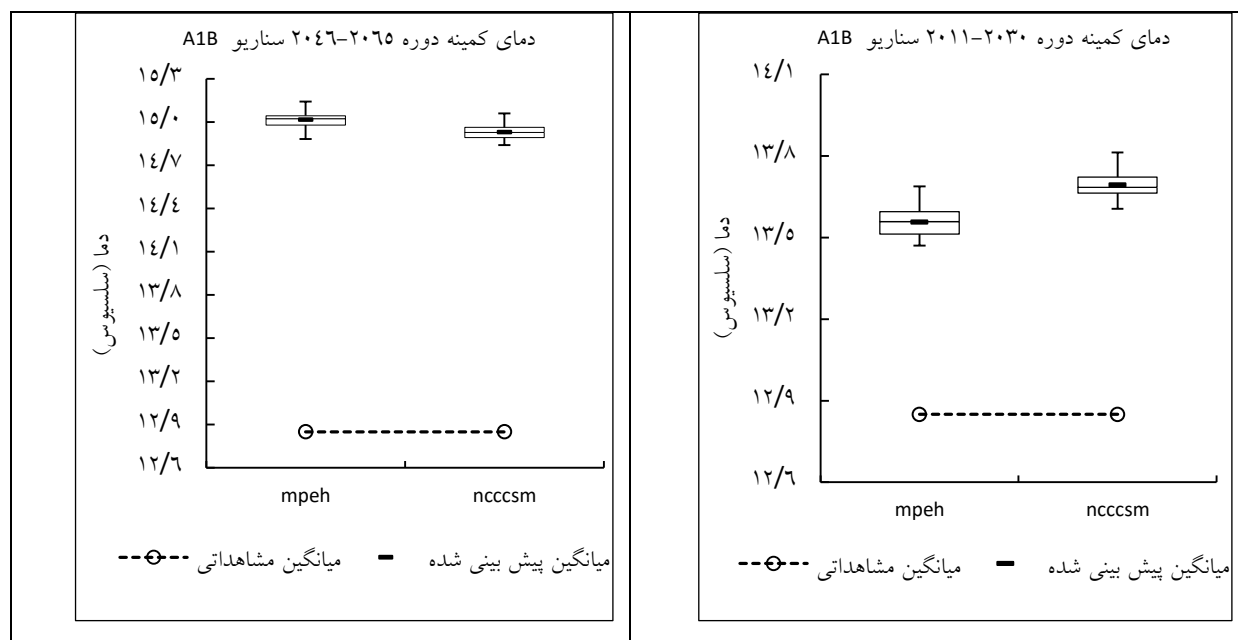
پیش‌بینی مدل‌های گردش عمومی بر اساس سناریوهای اقلیمی

با توجه به تحلیل‌های انجام شده، مشخص گردید که مدل لارس توانایی تولید داده‌های روزانه بارش، دماهای کمینه و بیشینه را در منطقه خزری دارد. بنابراین این مدل را می‌توان برای پیش‌بینی دما و بارش در ایستگاه‌های سواحل شمالی به کار برد. نتایج پیش‌بینی دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش مدل‌های Mpeh و Nccsm برای دو دوره آماری ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و ۲۰۴۶-۲۰۶۵ با استفاده از نمودارهای باکس-ویسکر نشان داده شده است. در نمودار باکس-ویسکر، ابتدا و انتهای هر جعبه مقدار چارک اول و چارک سوم، خط افقی داخل جعبه مقدار میانه اعداد و خطوط عمودی دو طرف جعبه حداقل و حداکثر مقدار داده را در طول دوره آماری مورد نظر نشان می‌دهد. هر جعبه نتایج پیش‌بینی یک مدل اقلیمی است.

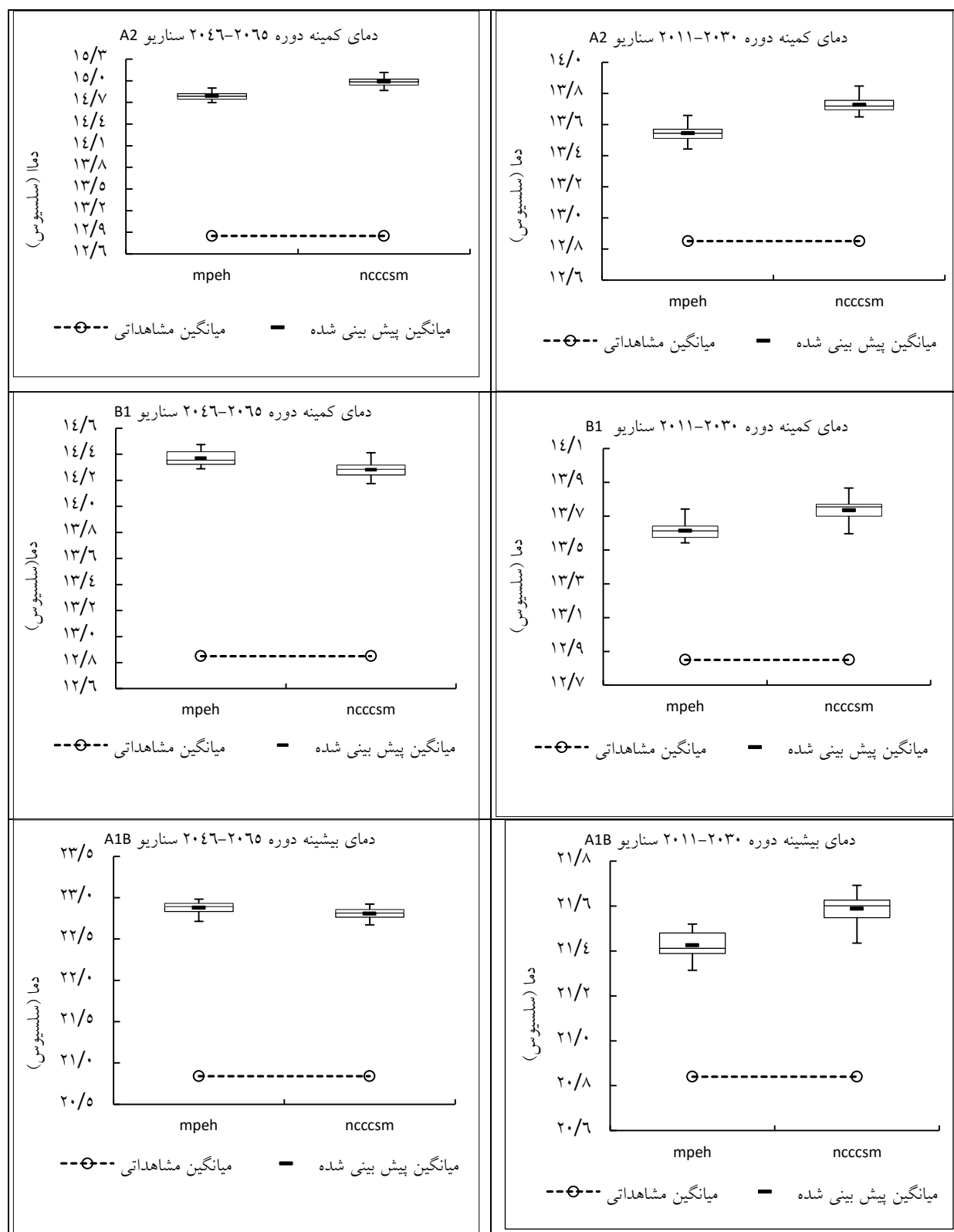
- پیش بینی دمای کمینه و بیشینه

(شکل های ۱ و ۲)، نتایج پیش بینی دمای کمینه و بیشینه تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 و میانگین دمای کمینه و بیشینه دوره مشاهداتی را نشان می دهند. میانگین دمای کمینه در دوره مشاهداتی ۱۲/۸۵ درجه و میانگین دمای بیشینه ۲۰/۸۴ درجه سلسیوس می باشد. در دوره اول (۲۰۱۱-۲۰۳۰) براساس سناریوی A1B، افزایش میانگین دمای کمینه بین ۰/۷ الی ۰/۸ درجه و افزایش دمای بیشینه بین ۰/۶ الی ۰/۷ درجه سلسیوس، براساس سناریوی A2، افزایش دمای کمینه بین ۰/۹ تا ۰/۷ درجه و افزایش دمای بیشینه ۰/۶ تا ۰/۷ درجه سلسیوس و براساس سناریوی B1، افزایش میانگین دمای کمینه بین ۰/۸ تا ۰/۹ درجه و افزایش دمای بیشینه ۰/۶ تا ۰/۸ درجه سلسیوس خواهد بود.

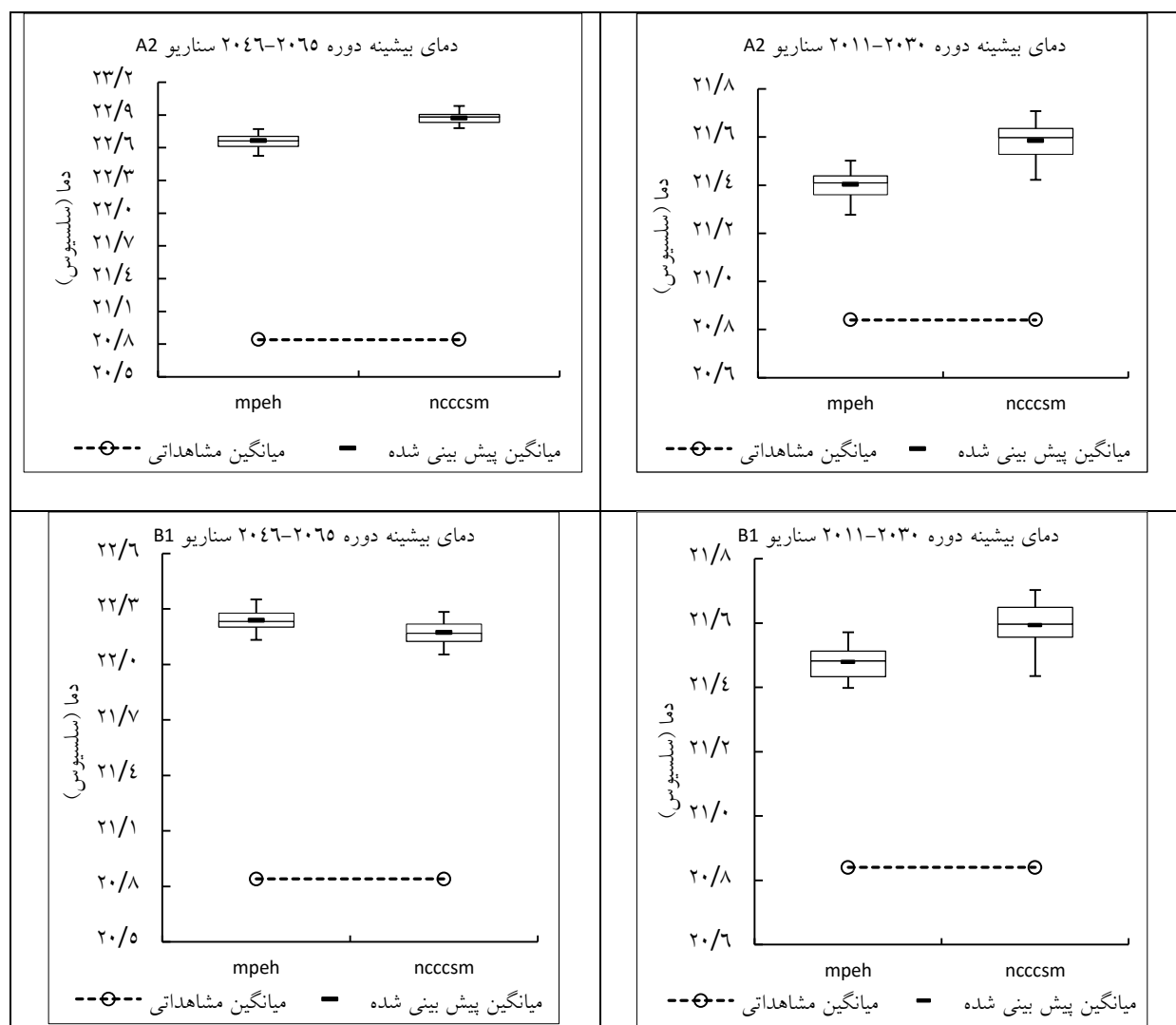
در دوره دوم (۲۰۴۶-۲۰۶۵) براساس سناریوی A1B، افزایش میانگین دمای کمینه ۲/۱ تا ۲/۲ درجه و افزایش دمای بیشینه ۲ درجه سلسیوس، براساس سناریوی A2، افزایش دمای کمینه ۱/۹ تا ۲/۱ درجه و افزایش دمای بیشینه ۱۸/۸ تا ۲ درجه سلسیوس و براساس سناریوی B1، افزایش دمای کمینه بین ۱/۴ تا ۱/۵ درجه و افزایش دمای بیشینه بین ۱/۳ تا ۱/۴ درجه سلسیوس پیش بینی شده است. با توجه به پیش بینی های هر دو مدل، در کل منطقه میانگین دمای کمینه و بیشینه در دوره های آینده افزایش خواهد یافت. مقدار افزایش دمای کمینه و بیشینه در دوره دوم بیش تر از دوره اول است که نشان دهنده روند افزایشی دما در آینده می باشد. همچنین این افزایش برای دمای کمینه نسبت به دمای بیشینه بیش تر است.



شکل ۱: پیش بینی میانگین دمای کمینه در دوره های آماری ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و ۲۰۴۶-۲۰۶۵



ادامه شکل ۲: پیش‌بینی میانگین دمای بیشینه در دوره‌های آماری ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و ۲۰۴۶-۲۰۶۵

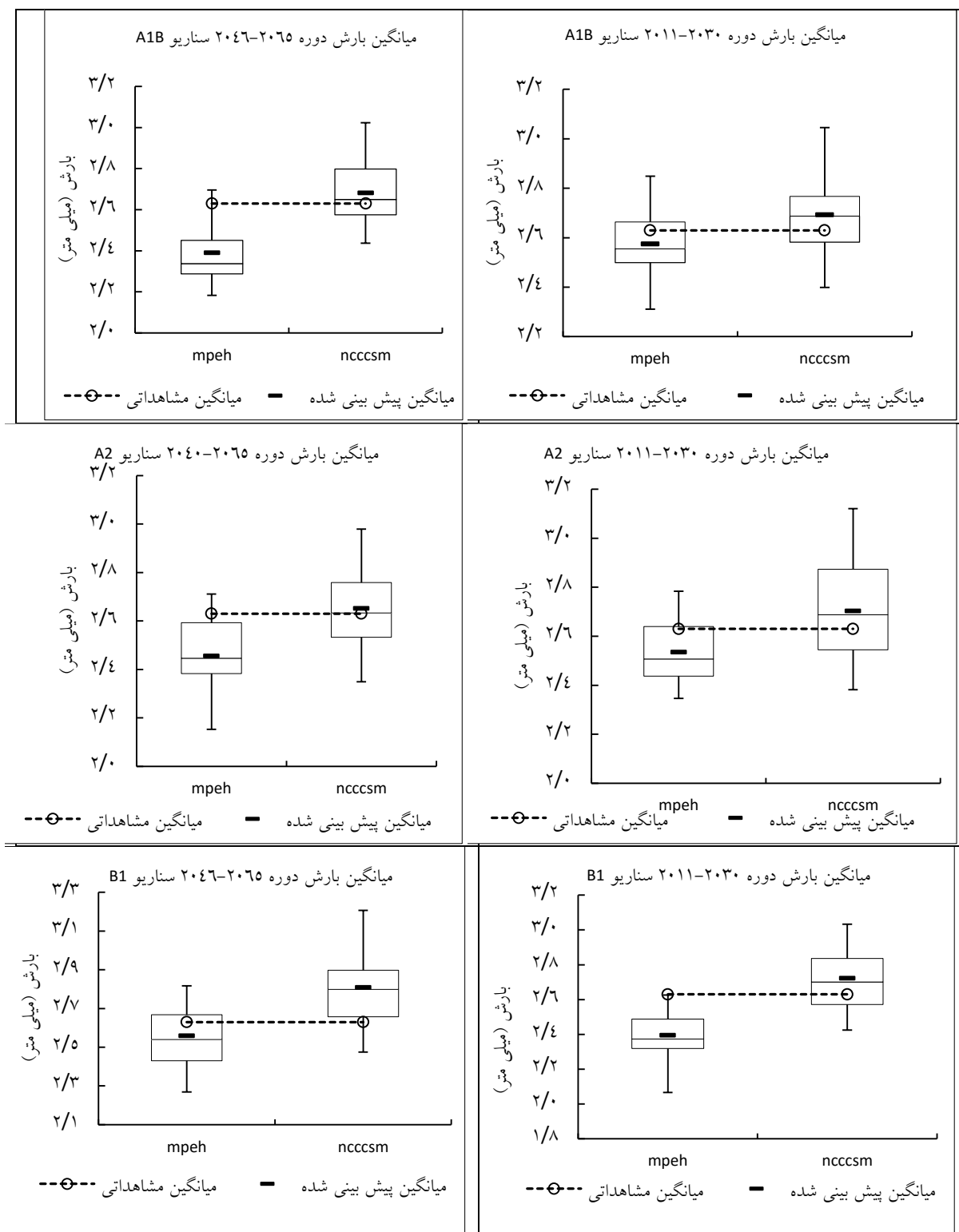


ادامه شکل ۲: پیش بینی میانگین دمای بیشینه در دوره های آماری ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و ۲۰۴۶-۲۰۶۵

- پیش بینی بارش

(شکل ۳)، میانگین بارش حاصل از پیش بینی مدل های Mpeh و Nccscsm را برای دوره های آماری ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و ۲۰۴۶-۲۰۶۵ نشان می دهد. مدل Mpeh میانگین بارش را کمتر از میانگین دوره مشاهداتی و مدل Nccscsm میانگین بارش را بیش تر از دوره مشاهداتی پیش بینی کرده است. در مدل Mpeh، کاهش بارش براساس سناریوی A1B، در دوره اول ۰/۶ و دوره دوم ۰/۲ میلی متر، براساس سناریوی A2، در دوره اول ۰/۱ میلی متر در دوره دوم ۰/۲ میلی متر و براساس سناریوی B1، در دوره اول ۰/۲ و در دوره دوم ۰/۱ میلی متر پیش بینی شده است. در مدل Nccscsm، افزایش بارش تحت سناریوی A1B در دوره اول و دوم به میزان ۰/۱ میلی متر، براساس سناریوی A2 در

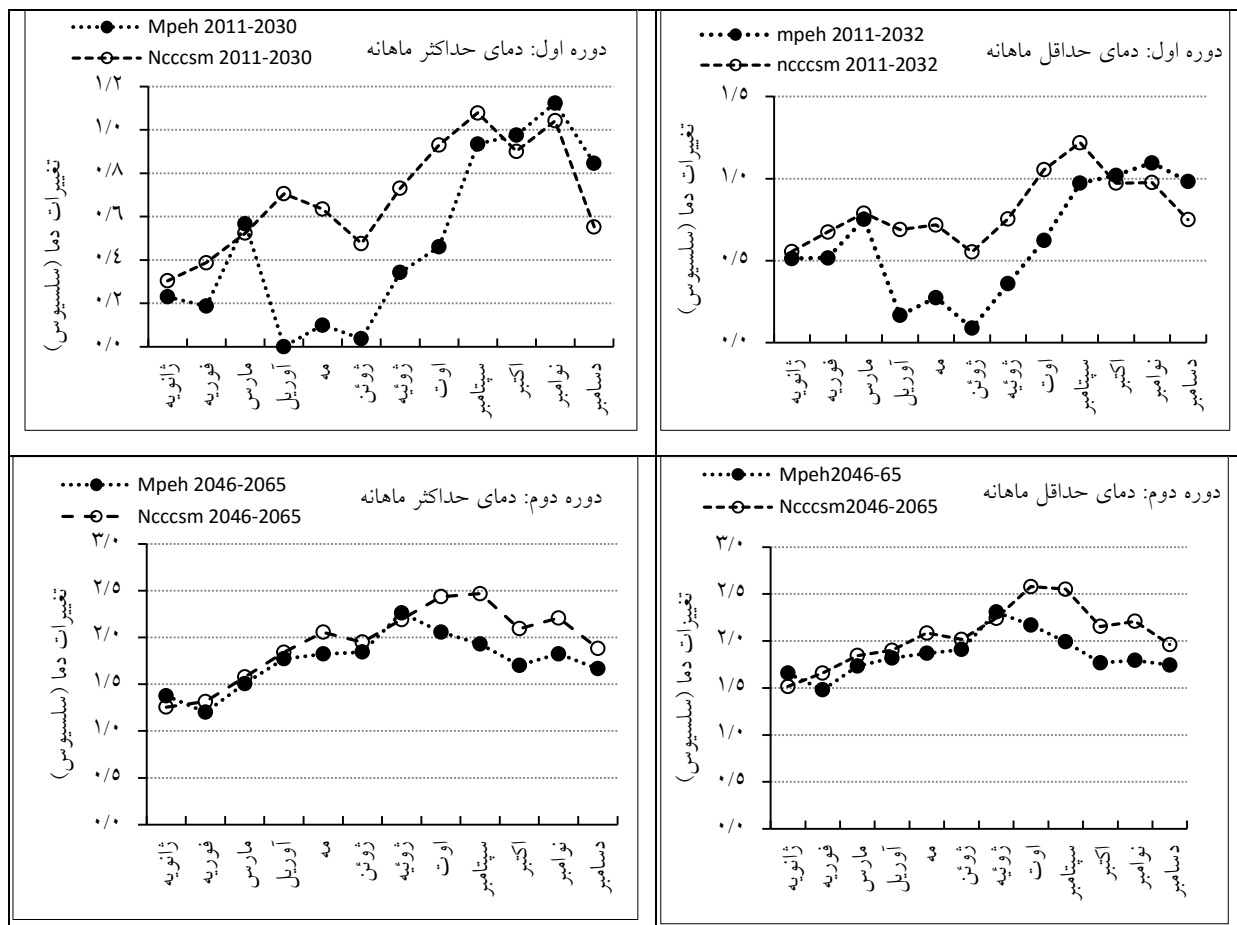
دوره اول ۰/۱ و در دوره دوم ۰/۲ میلی‌متر و براساس سناریوی B1 در دوره اول ۰/۱ و در دوره دوم ۰/۲ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۳: پیش‌بینی میانگین بارش در دوره‌های آماری ۲۰۴۶-۲۰۶۵ و ۲۰۱۱-۲۰۳۰

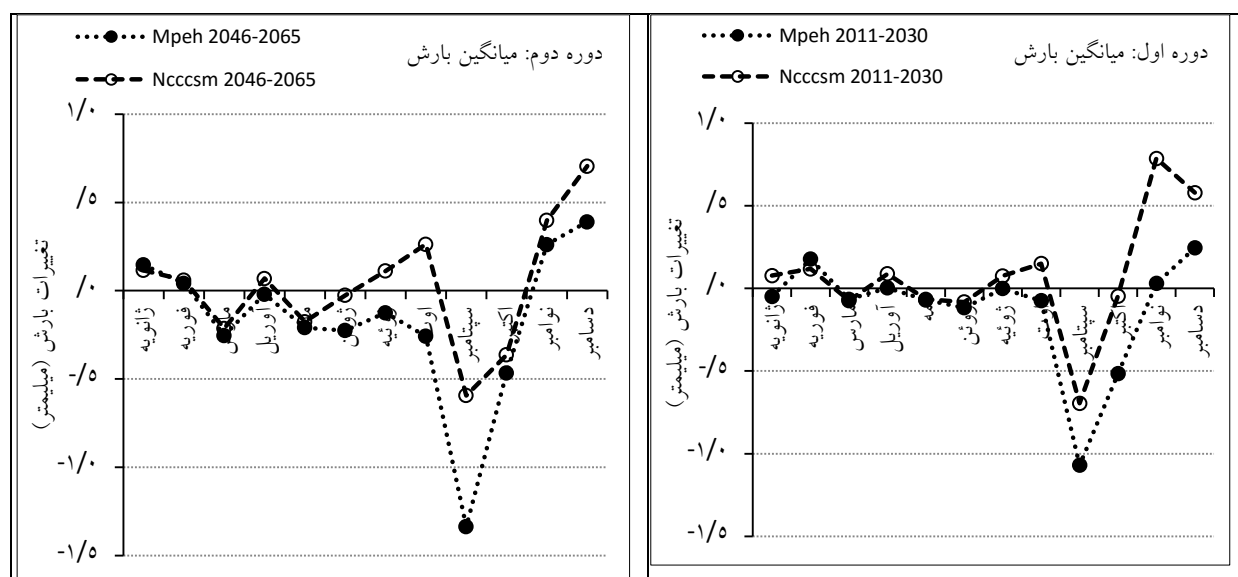
- پیش بینی ماهانه دما و بارش

بررسی نتایج پیش بینی سناریوهای اقلیمی نشان می دهد که تفاوت قابل ملاحظه ای در پیش بینی های ماهانه سناریوهای مدل های Mpeh و Nccsm وجود ندارد. بنابراین تغییرات ماهانه دماهای کمینه، دمای بیشینه و بارش براساس میانگین خروجی های سناریوهای تغییر اقلیم بررسی شده اند. (شکل ۴)، مقدار تغییرات ماهانه میانگین دمای کمینه و دمای بیشینه در دوره های آینده را نسبت به دوره مشاهداتی نشان می دهد. در هر دو دوره مطالعاتی، میانگین دمای کمینه و بیشینه در همه ماه ها افزایش یافته است. بیشترین افزایش دمای کمینه و بیشینه در دوره آماری ۲۰۱۱-۲۰۳۰ مربوط به ماه های سپتامبر، اکتبر و نوامبر (فصل پاییز) و کمترین افزایش در ماه های آوریل، مه و ژوئن مشاهده می شود. در دوره آماری ۲۰۶۵-۲۰۴۶ بیشترین افزایش دمای کمینه و بیشینه مربوط به ماه های ژوئیه، اوت و سپتامبر (فصل تابستان) و کمترین افزایش مربوط به ماه های ژانویه و فوریه می باشد. در دوره اول بیشترین افزایش برای دمای کمینه معادل ۱/۲ درجه و برای دمای بیشینه معادل ۱ درجه سانتی گراد و در دوره دوم بیشترین افزایش دمای کمینه برابر با ۲/۶ درجه و برای دمای بیشینه برابر با ۲/۴ درجه سانتی گراد می باشد.



شکل ۴: مقایسه تغییرات میانگین ماهانه دمای کمینه و دمای بیشینه در دوره های آینده نسبت به دوره مشاهداتی

در خصوص تغییرات ماهانه بارش، با توجه به این که منطقه خزری بیشترین بارش را در فصل پاییز و به‌ویژه ماه اکتبر دریافت می‌کند، نتایج بررسی سناریوهای هر دو مدل نشان می‌دهد که در هر دو دوره آماری، بارش از ماه مارس تا اکتبر نسبت به میانگین دوره مشاهداتی کاهش می‌یابد که بیشترین کاهش بارش در ماه‌های سپتامبر و اکتبر (فصل پاییز) مشاهده می‌شود. همچنین بارش در ماه‌های نوامبر و دسامبر و ژانویه و فوریه (فصل زمستان) نسبت به دوره مشاهداتی افزایش خواهد یافت. در هر دو دوره آماری، مدل Mpeh کاهش بارش در ماه‌های سپتامبر و اکتبر را بیش‌تر از مدل Nccsm و افزایش بارش را کم‌تر از مدل Nccsm پیش‌بینی کرده است. همین مسأله سبب گردید تا میانگین بارش کل دوره در مدل Mpeh کمتر از مدل Nccsm نشان داده شود (شکل شماره ۵).



شکل ۵: مقایسه میزان تغییرات میانگین ماهانه بارش در دوره‌های آینده نسبت به دوره مشاهداتی

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، خروجی مدل‌های گردش عمومی جو Mpeh و Nccsm به‌منظور شناخت اقلیم آینده منطقه خزری بر روی ۱۰ ایستگاه سینوپتیک برای دوره‌های آماری (۲۰۱۱-۲۰۳۰) و (۲۰۴۶-۲۰۶۵) ریزمقیاس شدند. بررسی توانمندی مدل‌سازی اقلیم دوره گذشته براساس یک سناریوی تغییر اقلیم پایه که میانگین‌ها و انحراف معیارهای این سناریو دقیقاً مشابه میانگین‌ها و انحراف معیارهای دوره آماری باشد، نشان داد که مدل مولد داده‌های آب‌وهوایی لارس توانمندی تولید داده‌های آینده را در منطقه خزری دارد. همچنین با سنجش عملکرد مدل‌های گردش عمومی جو مشخص گردید که مدل‌های آب‌وهوایی Mpeh و Nccsm با همبستگی بالا و خطای کم‌تر می‌توانند وضعیت آینده دما و بارش را با دقت بیش‌تری نسبت به سایر مدل‌ها پیش‌بینی کنند. به عبارتی، هر مدلی که

وزن بیش تری در مدل سازی گذشته منطقه داشته باشد، طبیعتاً انتظار می رود در مدل سازی آینده هم کم و بیش همان وزن را داشته باشد. نتایج حاصل از بررسی اقلیم آینده منطقه خزری به شرح زیر می باشد:

- پیش بینی میانگین دماهای کمینه و بیشینه براساس دو مدل مذکور و تحت سه سناریوی A1B، A2 و B1 نشان می دهد که محدوده افزایش دمای کمینه در دوره آماری ۲۰۱۱-۲۰۳۰ بین ۰/۷ تا ۰/۹ درجه و در دوره آماری ۲۰۴۶-۲۰۶۵ بین ۱/۴ تا ۲/۲ درجه سانتی گراد است. همچنین محدوده افزایش دمای بیشینه در دوره اول مطالعاتی بین ۰/۶ تا ۰/۸ درجه و در دوره دوم بین ۱/۳ تا ۲ درجه سانتی گراد پیش بینی شده است. بنابراین، روند دمای حداقل و حداکثر در منطقه خزری صعودی است و این افزایش برای دمای کمینه بیش تر از دمای بیشینه می باشد.

- بررسی تغییرات ماهانه دمای کمینه و بیشینه نشان داد که در دوره آماری ۲۰۱۱-۲۰۳۰، افزایش دمای کمینه و بیشینه در ماه های سپتامبر، اکتبر و نوامبر (فصل پاییز) و دوره آماری ۲۰۴۶-۲۰۶۵، در ماه های ژوئیه، اوت و سپتامبر (فصل تابستان) بیش تر از سایر فصول خواهد بود. در دوره اول، افزایش میانگین دما در فصل پاییز، زمستان، بهار و تابستان به ترتیب حدود ۷، ۵/۹، ۱/۶ و ۳ درصد و در دوره دوم به ترتیب حدود ۱۳/۷، ۱۷/۹، ۹/۷ و ۸/۸ درصد پیش بینی شده است.

- بررسی های فصلی و ماهانه بارش نشان می دهد که در هر دو دوره آماری، بارش از ماه مارس تا اکتبر نسبت به میانگین دوره مشاهداتی کاهش می یابد که بیش ترین کاهش بارش در ماه های سپتامبر و اکتبر مشاهده می شود. همچنین بارش در ماه های نوامبر، دسامبر، ژانویه و فوریه (پاییز و زمستان) نسبت به دوره مشاهداتی افزایش خواهد یافت. با توجه به این که منطقه خزری هم اکنون بیش ترین بارش سالانه را در فصل پاییز و به ویژه ماه اکتبر دریافت می کند، پیش بینی ها نشان می دهد که بیش ترین بارش سالانه با یک ماه تأخیر در ماه نوامبر رخ خواهد داد. همچنین مقدار بارش در فصل تابستان ۱۳ درصد و در بهار ۵ درصد نسبت به دوره مشاهداتی کاهش خواهد یافت. این مسأله با توجه به افزایش دمای کمینه و بیشینه در فصل پاییز و تابستان و در نتیجه افزایش دمای آب دریای خزر که می تواند موجب تزریق بیش تر رطوبت به درون جو و افزایش بارندگی های پاییزه در منطقه گردد، قابل تأمل است؛ اما در مورد علت تأخیر در وقوع حداکثر بارش سالانه نسبت به زمان کنونی لازم است تغییرات زمانی و مکانی سیستم های جوی موثر بر بارش در سواحل شمالی ایران در دوره های آینده مورد بررسی قرار گیرند.

- مدل های Mpeh و Nccsm در تخمین میانگین بارش کل دوره نسبت به دوره پایه هماهنگ نبوده اند. مدل Mpeh مقدار بارش در دوره های مورد مطالعه را کم تر از میانگین دوره مشاهداتی و مدل Nccsm مقدار بارش را بیش تر از دوره مشاهداتی پیش بینی کرده است. مدل Nccsm افزایش بارش ماه های نوامبر و دسامبر را بیش تر از مدل Mpeh و کاهش بارش در ماه های سپتامبر و اکتبر را کم تر از مدل Mpeh پیش بینی کرده است. این امر موجب ناهماهنگی در پیش بینی بارش کل دوره نسبت به دوره مشاهداتی شده و موجب گردید تا مدل Nccsm مقدار بارش کل دوره را بیش تر از دوره مشاهداتی نشان دهد. با وجود این، هر دو مدل در پیش بینی تغییرات بارش ماهانه هماهنگ بوده اند.

منابع

- باباییان، ا؛ نجفی‌نیک، ز؛ زابل عباسی، ف؛ حبیبی‌نوخندان، م؛ ادب، ح؛ ملبوسی، ش (۱۳۸۸)، «ارزیابی تغییر اقلیم کشور در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۰ میلادی با استفاده از ریزمقیاس نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHO-G»، *جغرافیا و توسعه*، شماره ۱۶، صص ۱۵۲-۱۳۵.
- خرمی، م؛ بزرگ نیا، ا (۱۳۸۶)، «*تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی*»، تهران، انتشارات سخن گستر.
- کمال، ع؛ مساح بوانی، ع (۱۳۹۱)، «مقایسه عدم قطعیت مدل‌های تغییر اقلیم و در تأثیر رواناب حوضه در دوره آتی»، *مجله فیزیک زمین و فضا*، شماره ۳، صص ۱۸۸-۱۷۵.
- عباسی، ف؛ ملبوسی، ش؛ بابائیان، ا؛ اثمري، م؛ برهانی، ر (۱۳۸۹)، «پیش‌بینی تغییرات اقلیمی خراسان جنوبی در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ میلادی با استفاده از ریزمقیاس نمایی آماری خروجی مدل ECHO-G»، *نشریه آب‌و‌خاک*، شماره ۲۴، صص ۲۳۳-۲۱۸.
- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی مرکز آمار ایران، (۱۳۹۱)، «گزیده نتایج سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۳۹۰»، دفتر ریاست (روابط عمومی و همکاری‌های بین الملل)، تهران.
- مساح‌بوانی، ع؛ مرید، س (۱۳۸۴)، «اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده‌رود اصفهان»، *فصلنامه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب‌و‌خاک*، شماره ۹، صص ۲۸-۱۷.
- محمدی، ح؛ مقبل، م؛ رنجبر، ف (۱۳۸۹)، «مطالعه تغییرات بارش و دمای ایران با استفاده از مدل Magicc Scengen»، *جغرافیا (فصلنامه انجمن جغرافیایی ایران)*، شماره ۲۵، صص ۱۴۲-۱۲۵.
- وزارت جهاد کشاورزی، (۱۳۹۰)، «آمارنامه کشاورزی»، تهران، وزارت جهاد کشاورزی.
- Boberg, F., Berg, P., Gutowski, W. J., Christensen, J. H., (2010), "Improved confidence in climate change projections of precipitation further evaluated using daily statistics from ensembelse models", *Climate Dynamics*, 35(7): 1509-1520.
- Chen, H., Guo, J., Zhang, Z., Xu, C., (2013), "Prediction of temperature and precipitation in Sudan and South Sudan by using LARS-WG in future", *Theor Appl Climatol*, 113: 363-375.
- Elmahdi, A., Shahkarami, N., Morid, S., Massah, B. A., (2009), "Assessing the impact of AOGCMs uncertainty on the risk of agricultural water demand caused by climate change", *18th World IMACS / MODSIM Congress*, Cairns, Australia 13-17 July.
- Intergovernmental Panel on Climate Change., (2001), "Climate change 2001: The scientific basis", *contribution of working group i to the third assessment report*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change., (2007), "Climate change 2007: The physical science basis", *contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change*, Cambridge University Press, Cambridge.

- Intergovernmental Panel on Climate Change, (2007), "Impact, adaptation and vulnerability of climate change", Contribution of working group II to the Fourth assessment report, Cambridge University Press, Cambridge.
- Pittok, A. B., (2005), "**Climate Change: turning up the heat**", London, CSIRO Publishing, 329 pp.
- Prudhomme, C., Jakob, D., Svensson, C., (2003), "Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments", **Journal of Hydrology**, 277: 1–23.
- Prudhomme, C., Reynard, N., Crooks, S., (2002), "Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now"?, **Hydrological Processes**, 16: 1137–1150.
- Richardson, C., (1981), "Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation", **Wat Resour Res**, 17:182–190.
- Semenov, M., Barrow, E., (1997), "Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios", **Clim Change**, 35:397–414.
- Semenov, M., Brooks, R., Barrow, E., Richardson, C., (1998), "Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates", **Clim Res**, 10(2):95–107.
- Semenov, M., Stratonovitch, P., (2010), "Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts", **Clim Res**, 41(1): 1–14.
- Wilby, R., Christian, W., (2007), "**Sdsm 4.1- a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts**", user manual. [on line]: <http://copublic.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM/SDSM Manual.pdf>.
- Wilby, R. L., Harris, I., (2006), "A frame work for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK", **Water Resources Research**, 42 (2): 2419-2429.
- Xu, C.Y., (1999), "From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches", **Prog Phys Geogr**, 23 (2): 229–249.