اکوهیدرولوژی
دورهٔ ۸، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۴۰۰، ص ۱۱۹۷-۱۱۸۹

پیش‌بینی تغییر اقلیم با استفاده از رویکرد مدل‌های چندگانهٔ گروهی در حوضهٔ آبخیز قره‌سو

علی‌رضا مساح بوانی[۱]، سجاد قاسم‌زاده[۲] عباس روزبهانی[۱]، فاطمه رجائی[۳*]

۱. دانشیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲. دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد مهندسی منابع آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۳. استادیار گروه علوم محیط زیست، دانشکدهٔ علوم، دانشگاه زنجان

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۵/۱۸؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۰۹/۰۷)

چکیده

با توجه به اینکه گرمایش زمین عامل تهدیدکننده‌ای برای زندگی بشر در کرهٔ زمین است، پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در آینده امری ضروری به حساب می‌آید. از اهداف این مطالعه، پیش‌بینی دما و بارش روزانه آیندهٔ نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰)، با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو- اقیانوس (AOGCM) و نیز کاهش عدم قطعیت‌ها آن‌ها است. بنابراین، در این تحقیق ابتدا، از میان مدل‌های بررسی‌شده، ۵ مدل مناسب شامل NOERESM1-M ESM2M-،MICRO IPSL-CM5A-LR،HADGEM2-ES GFDEL انتخاب و به روش LARS-WG ریزمقیاس‌نمایی شد. سپس، با استفاده از دو رویکرد وزن‌دهی Raisanen و میانگین مشاهداتی دما و بارش (MOTP) جهت وزن‌دهی و همادی کردن مدل‌های چندگانه (Ensemble Multi-Model) استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد دمای حداکثر در تمامی ماه‌ها افزایش می‌یابد که بیشترین افزایش دما در مدل Raisanen، در ماه فوریه و کمترین افزایش در ماه اکتبر است. در مدل وزن‌دهی MOTP، بیشترین افزایش دما در ماه ژانویه و کمترین افزایش دما، ماه آگوست است. تغییرات بارندگی در ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست کاهش چشم‌گیری را به دلیل بارش مشاهداتی جزئی داشته است. در این تحقیق روش وزن‌دهی MOTP برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آینده به دلیل داشتن R^2 بالاتر و کمترین RMSE به عنوان روش بهتر در پیش‌بینی داده‌های اقلیمی انتخاب شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده انتظار می‌رود بازخورد بارزی در بیلان آبی منطقه به دلیل اثر افزایش دما و افزایش تبخیر به وجود آید و همچنین، پتانسیلی برای تغییر در وقایع جوی و هیدرولوژی حوزه به وجود آید.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، مدل‌های گردش عمومی اقیانوس- اتمسفر (AOGCM)، روش‌های وزن‌دهی، مدل‌های چندگانهٔ گروهی.

* نویسندهٔ مسئول

Email: rajaei_fatemeh@znu.ac.ir

مقدمه

عوامل مختلفی باعث به هم خوردن شرایط حاکم بر اجزای مختلف سیستم اقلیم کرهٔ زمین می‌شود که می‌تواند تأثیراتی بر اجزای دیگر بگذارد. این عوامل به دو بخش داخلی و خارجی تقسیم می‌شوند. عوامل داخلی ناشی از کنش‌های متقابل بین اجزا سیستم اقلیم و عوامل خارجی (طبیعی) ناشی از تابش خورشیدی، فعالیت‌های آتش‌فشانی و افزایش غیرطبیعی گازهای گلخانه‌ای هستند. در بین عوامل یادشده تنها عاملی که به صورت غیرطبیعی بر سیستم اقلیم کرهٔ زمین تأثیر می‌گذارد، افزایش گازهای گلخانه‌ای است. بررسی وضعیت انتشار این گازها نشان می‌دهد پس از انقلاب صنعتی در نیمهٔ قرن ۱۸، به دلیل افزایش روزافزون صنایع و به واسطهٔ آن افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی، توازن مقادیر گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر زمین به هم خورده و مقادیر آن به‌خصوص میزان گاز دی‌اکسید کربن افزایش یافته است [۱].

معمول‌ترین روش شبیه‌سازی تغییرات بارش و دما در دوره‌های آتی، استفاده از داده‌های خروجی مدل‌های گردش عمومی جو است. محدودیت اصلی استفاده از نتایج اقلیمی مدل‌های چرخهٔ عمومی جو، دقت تجزیهٔ مکانی مناسب برای کاربردهای مختلف از جمله مدل‌های هیدرولوژیکی است. در این راستا روش‌های مختلفی برای ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های گردش عمومی جو توسعه یافته‌اند. از طرف دیگر، غالب مطالعات تغییر اقلیم بر مبنای استفاده از مدل‌های تکی و یا چند مدل از مدل‌های گردش عمومی جو، به صورت جداگانه صورت پذیرفته است، در صورتی که به دلیل عدم قطعیت‌های بالا در استفاده از مدل‌های تکی، استفاده از ترکیب مدل‌ها[1] یا به‌اصطلاح مدل‌های چندگانهٔ گروهی (Ensemble Multi-Model) پیشنهاد می‌شود. اولین قدم ساخت مدل‌های چندگانهٔ گروهی مسئلهٔ وزن‌دهی مدل و ترکیب آن‌ها است [۲] که در این راستا می‌توان به روش‌های وزن‌دهی با استفاده از روش‌های Bayesian Model Averaging (BMA)، هوش مصنوعی و غیره اشاره کرد.

بسیاری از تحقیقات در خصوص استفاده از مدل‌های چندگانه نشان داده است که همادی کردن یا ترکیب خروجی مدل‌ها، پیش‌بینی‌های بهتری نسبت به استفاده از مدل تکی ارائه می‌دهند. در مطالعهٔ Tegenge و همکاران (۲۰۲۰) رویکرد ترکیبی مدل‌ها با استفاده از روش‌وزن‌دهی REA برای ارزیابی تأثیرات تغییرات اقلیمی آینده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج پژوهش یادشده نشان داد مجموعه‌ای از چندین مدل با بهره‌گیری از قوت‌ها و کاهش ضعف‌های هر شبیه‌ساز آب‌وهوا، قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌ها را افزایش می‌دهد. نتایج نشان داد روش میانگین‌گیری چند مدل پیشنهادی در کاهش خطای میانگین مربعات (RMSE) به‌ترتیب ۵ و ۵۴ درصد در شرایط بارندگی مرطوب و خشک از روش‌های موجود بهتر عمل کرد [۲]. در مطالعهٔ دیگر، Feng و همکاران (۲۰۱۷) از مدل بیزین به عنوان یک رویکرد مؤثر برای کاهش عدم قطعیت مرتبط با شبیه‌سازی مدل‌های تکی استفاده کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد روش بیزین موفق است و عملکرد مثبت در بازسازی داده‌ها به دست می‌آورد و محدودهٔ معتبرتری از پیش‌بینی آب‌وهوای آینده را ایجاد می‌کند [۳]. Chen و همکاران (۲۰۱۷) برای تعیین وزن برای مدل‌های آب‌وهوایی و تغییرات هیدرولوژیکی از ۵ روش و مجموعه‌ای از ۲۹ مدل جهانی آب‌وهوایی استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد وزن‌دهی مدل‌ها در شرایط آب‌وهوایی پیش‌بینی‌شده نتایج را بهبود می‌بخشد [۴]. Madadgar و همکاران (۲۰۱۶) طی پژوهشی در ایالت نوادا و کالیفرنیا چارچوبی برای پیش‌بینی بارش فصلی با استفاده از یک مدل آماری دینامیکی ترسیم کردند. مدل دینامیکی به‌کاررفته در این پژوهش شبیه‌سازی‌های NMME و آماری مبتنی بر مدل بیزین چندمتغیره بود که رابطهٔ بین بارش و دور پیوندها را بیان می‌کند. نتیجهٔ پژوهش یادشده این بود که روش ترکیبی در مقایسه با NMME برای پیش‌بینی ناهنجاری‌های مثبت و منفی بارش بهتر عمل کرده است [۵]. از سوی‌دیگر، مطالعهٔ Fei و همکاران (۲۰۱۴) در شرق آسیا نشان داد استفاده از مدل‌های چندگانه گروهی در مقایسه با مدل‌های منفرد در حالت کلی مهارت زیادی دارد [۶]. در مطالعهٔ دیگر Cavazos و همکاران (۲۰۱۲) سناریوهای تغییر اقلیم را برای منطقهٔ جنوبی کالیفرنیا و امریکای شمالی تولید کردند. در این مطالعه از شش مدل گردش عمومی جو تحت دو سناریو استفاده شد. نتایج پژوهش

1. Ensemble Multi Model

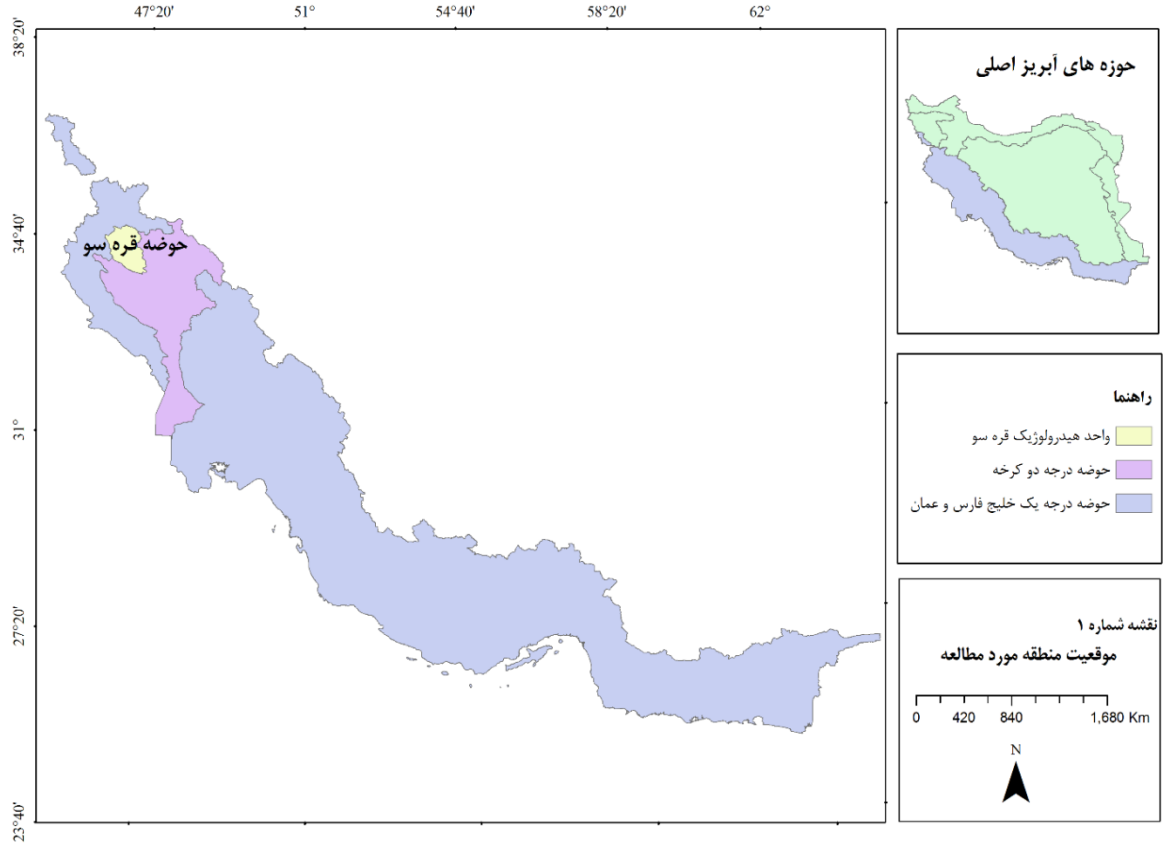
یادشده نشان داد مدل‌های گروهی کوچک‌مقیاس‌شده به طور مشخص، چرخهٔ سالیانهٔ متوسط بارش و دما و نیز توزیع‌های مکانی آن‌ها در منطقه را بهتر می‌کند [۷]. همچنین، Giorgi و Coppola (۲۰۱۰) به این نتیجه دست یافتند که حداقل به چهار تا پنج مدل بزرگ‌مقیاس نیاز است تا نتایج خروجی مدل‌های چندگانه، تطابق بهتری با داده‌های مشاهداتی داشته باشد. نکتهٔ جالبی که در مورد ترکیب مدل‌ها با توانایی‌های مختلف وجود دارد، این است که حتی اضافه کردن یک مدل ضعیف به یک مدل منفرد نیز شبیه‌سازی بهتری برای تغییر اقلیم انجام می‌دهد [۸]. در ایران مطالعات متعددی در مورد پیش‌بینی تغییرات دما و بارش صورت پذیرفته است، اما مطالعات بسیار کمی به همادی کردن خروجی مدل‌های گردش عمومی جو پرداخته است [۹ـ ۱۱]. مالمیر و همکاران (۱۳۹۵) اثرات تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی و جریان رودخانهٔ قره‌سو را با داده‌های مدل HadCM3 تحت دو سناریوی اقلیمی A2و B2 بررسی کردند. نتایج پژوهش یادشده به‌ترتیب افزایش دمای ۱/۶ و ۱/۷ درجهٔ سانتی‌گراد، تحت دو سناریوی یادشده و نیز کاهش بارندگی در دورهٔ آینده نسبت به دورهٔ پایه را نشان داد و در ادامه کاهش میزان رواناب با استفاده از شبکهٔ عصبی مصنوعی پویا در نرم‌افزار متلب پیش‌بینی شد [۱۲]. همچنین، بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر برنامه‌ریزی تأمین نیاز کشاورزی در آینده در حوضهٔ قره‌سو با استفاده از مدلWEAP، نشان‌دهندهٔ افزایش نیاز تأمین‌نشده بخش کشاورزی در منطقهٔ مورد مطالعه در دورهٔ آتی است [۱۳]. در بررسی دیگر، پیرمرادیان و همکاران (۱۳۹۱) با اجرای منفرد مدل‌های مختلف گردش عمومی جو، پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی ایستگاه سینوپتیک رشت تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم را انجام دادند. برای انتخاب بهترین مدل برای پیش‌بینی هر پارامتر از آمارهٔ خطاسنجی RMSE استفاده شد. به این‌ترتیب، برای پارامتر دمای کمینهٔ مدل GIAOM، برای دمای بیشینهٔ مدل FGOALS و GIAOM و برای بارش مدل INCM3 به عنوان بهترین مدل و تحت سناریوی A1B انتخاب شدند [۱۴]. مساح بوانی و همکاران (۱۳۸۵) با استفاده از ۷ مدل اقلیمی به تأثیر تغییرات اقلیمی آینده بر رواناب زاینده‌رود پرداختند و برای همادی کردن مدل‌های اقلیمی از روش‌های MOTP و REA استفاده کردند. در پایان، با در نظر گرفتن روش وزن‌دهی MOTP به عنوان روش وزن‌دهی برتر تغییرات رواناب حوضهٔ زاینده‌رود را محاسبه کردند که نتایج احتمال زیاد برای کاهش رواناب حوضه را نشان می‌دهد [۱۵]. غالب مطالعات صورت‌گرفته در زمینهٔ تغییرات اقلیمی بر مبنای استفاده از مدل‌های تکی (یکی از مدل‌های AOGCM) و یا از چند مدل به صورت جداگانه صورت پذیرفته است. این در حالی که نخست نتایج هر مدل گردش عمومی جو منحصر به همان ناحیه و منطقهٔ مورد بررسی است و از طرف دیگر، امکان دارد یک مدل شبیه‌سازی بارش را با دقت بیشتری شبیه‌سازی کند، ولی دما توسط مدل دیگری شبیه‌سازی دقیق‌تری داشته باشد.

بنابراین، هدف از پژوهش حاضر کاهش عدم قطعیت‌های موجود برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم براساس اجرای گروهی یا به اصطلاح همادی‌سازی مدل‌های گردش عمومی جو است. در راستای این هدف ۱۳ مدل گردش عمومی جو تحت سناریوی RCP4.5 برای ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه، توسط مدل آماری مولد آب‌وهوا (LARS-WG) ریزمقیاس‌نمایی شد و در ادامه عدم قطعیت خروجی مدل‌ها به صورت گروهی با استفاده از روش‌های وزن‌دهی Raisanen و MOTP در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی مورد ارزیابی قرار گرفت.

روش‌شناسی تحقیق

منطقهٔ مطالعاتی

منطقهٔ مطالعاتی این تحقیق، زیرحوضهٔ قره‌سو با مختصات جغرافیایی ۳۰ ´ ۳۴ تا ° ۵۴ ´ ۳۴ عرض شمالی و ۲۲° ´ ۴۶ تا ° ۲۲ ´ ۴۷ طول شرقی در استان کرمانشاه و در شمال غربی حوضهٔ کرخه است. وسعت حوزهٔ مورد نظر ۵۹۵۴ کیلومترمربع بوده و همچنین، متوسط بارش در کل حوضه بین ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر متغیر است. شکل ۱ موقعیت زیرحوضهٔ قره‌سو را در کشورمان نشان می‌دهد.



شکل ۱. محدودهٔ مطالعه‌شده

استخراج داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده و انتخاب مدل بهینه

از نیازهای اولیهٔ تحقیقات اقلیمی، اطلاعات دما و بارش مشاهداتی در محدودهٔ طرح است. بنابراین، آمار ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه برای تخمین دمای حداکثر، حداقل و بارش ماهانه بررسی شده است. همان‌طور که پیش از این نیز گفته شد، در حال حاضر معتبرترین ابزار برای تولید سناریوهای اقلیمی، مدل‌های AOGCM هستند. در این تحقیق، آمار دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش ماهانه مدل‌های سری CMIP5 از مجموعه مدل‌های AOGCM (مدل‌های CGMR،CNCM3،CSMK3،FGOALS،GFCM21،GIAOM IPCM4،MIHR،MPEH5،NCCCSM،NCPCM،BCM2 HADGEM،INCM3، HADCM3) استفاده شد. در دو بازهٔ زمانی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) به عنوان دورهٔ آینده و ۱۹۸۶-۲۰۰۵ به عنوان دورهٔ پایه، تحت سناریوی RCP4.5 استخراج شد. سپس، برای بررسی عملکرد مدل‌ها در شبیه‌سازی دما و بارش منطقه، میانگین ماهانه دورهٔ پایه از خروجی مدل‌ها با مقادیر مشاهداتی و دورهٔ آینده مقایسه شد. برای ایجاد سناریوی تغییر اقلیم در هر مدل AOGCM مقادیر «اختلاف» برای دما و «نسبت» برای بارندگی بین میانگین سالانه در دوره‌های آتی و دورهٔ شبیه‌سازی‌شدهٔ پایه توسط همان مدل برای هر سلول از شبکهٔ محاسباتی به دست آورده شد. سپس، سناریوهای تغییر اقلیم در دورهٔ آتی نسبت به دورهٔ پایه، به صورت جداگانه برای مدل‌های مختلف AOGCM تحت سناریوی انتشار RCP4.5 ایجاد شد.

ریزمقیاس‌نمایی

مدل‌های مختلف آماری و دینامیکی برای شبیه‌سازی و ریزمقیاس‌نماییخروجی مدل‌های GCM ابداع شده‌اند که قادرند خروجی مدل‌های عددی را تا مقیاس ایستگاه مدل کنند. LARS_WG یکی از مدل‌های معروف مولد داده‌های تصادفی وضع هوا است که برای تولید مقادیر بارش، تابش، دما در یک ایستگاه برای اقلیم حاضر و آینده به کار می‌رود. این مدل برای مدل‌سازی متغیرهای هواشناسی توزیع آماری پیچیده‌ای را به کار می‌برد. این مدل، قادر به تولید یک سری داده‌های هواشناسی با مشخصه‌های آماری مشابه دورهٔ اقلیمی است که از سه

بخش اصلی کالیبراسیون، ارزیابی و ایجاد داده‌های هواشناسی تشکیل شده است [۱۵].

وزن‌دهی مدل‌های اقلیمی

روش وزن‌دهی به شیوهٔ Raisanen

روش وزن‌دهی Raisanen شامل دو مرحله است. ابتدا رگرسیون خطی استفاده شده است تا قدر مطلق تداوم بین مدل‌ها در تغییرات اقلیمی را به تداوم متناظر آن در اقلیم کنونی ربط دهد. در این روش دمای متوسط بلندمدت ماه ژانویه (Tmean) طی سال‌های ۱۹۵۹-۲۰۰۸ در مقابل تغییرات بلندمدت (تفاوت دمای متوسط بلندمدت سی‌ساله ۱۹۷۱-۲۰۰۰ و ۲۰۶۹-۲۰۹۸) برای هر ۲۳ مدل بررسی شد. نتایج نشان داد بین این دو متغیر رابطه وجود دارد (رابطهٔ ۱). سپس، مدل‌ها با هر تعدادی براساس روابط ۱ و ۲ وزن‌دهی می‌شوند [۱۶ و ۱۷].

$$\Delta\bar{y} = a + b\Delta x \qquad (۱)$$

Δy: تفاوت‌های بین مدلی در تغییر اقلیم محلی وΔx: تفاوت ها در اقلیم حاضر

$$w_i = \Delta\tilde{y}_i^{-E} \Big/ \sum_{j=1}^{N} \Delta\tilde{y}_j^{-E} \qquad (۲)$$

N=تعداد مدل ها، E= یک نوع ضریب که در محاسبه معمولاً ۴ در نظر گفته می‌شود.

روش وزن‌دهی میانگین مشاهداتی دما و بارندگی (MOTP)

در این روش مدل‌های AOGCM، براساس مقدار انحراف میانگین دما یا بارندگی شبیه‌سازی‌شده در دورهٔ پایه از میانگین داده‌های مشاهداتی وزن‌دهی می‌شوند [۱۱].

$$w_i = \frac{\left(1/B_{v,i}\right)}{\sum_{i=1}^{N}\left(1/B_{v,i}\right)} \qquad (۳)$$

Bv انحراف میانگین دما و یا بارندگی شبیه‌سازی‌شده توسط هر یک از مدل‌های AOGCM در دورهٔ پایه از میانگین داده‌های مشاهداتی و W وزن نسبت‌داده‌شده به هر مدل AOGCM است. بدیهی است هر مقدار انحراف مقادیر شبیه‌سازی‌شده متغیر اقلیمی یک مدل AOGCM از مقادیر داده‌های مشاهداتی بیشتر شود، وزن کمتری به خود اختصاص می‌دهد.

نتایج و بحث

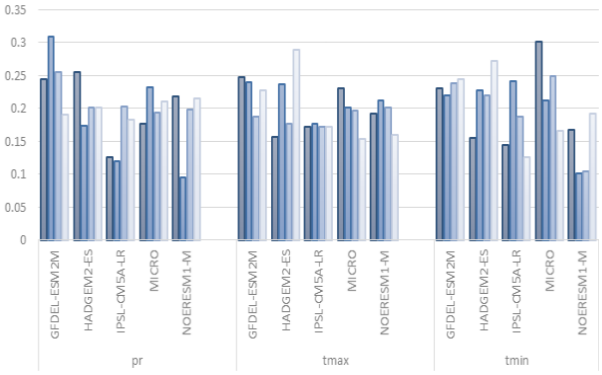
انتخاب مدل مناسب گردش عمومی جو

در این تحقیق ابتدا، آمار دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش ماهانهٔ مدل‌های سری CMIP5 از مجموعه مدل‌های AOGCM در دو بازهٔ زمانی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) به عنوان دورهٔ آینده و ۱۹۸۶-۲۰۰۵ به عنوان دورهٔ پایه، استخراج شد. در خصوص استفاده از مدل‌های یادشده درخور یادآوری است که تمام مدل‌ها قابلیت استفاده در تمام نقاط را ندارند و در هر منطقه‌ای باید مدل‌های مناسب مورد استفاده قرار گیرند. نتایج نهایی قابل استفاده از مدل‌های یادشده تغییرات دما و بارش دورهٔ آتی نسبت به دورهٔ پایه مدل‌ها خواهند بود که معیار تشخیص مناسب بودن مدل برای محدودهٔ مطالعاتی منطقی بودن مقادیر اختلاف دما و بارش به‌دست‌آمده از مدل‌ها خواهد بود. در این تحقیق از میان مدل‌های بررسی‌شده، تعدادی مدل نامناسب تشخیص داده شد که ایراد وارد بر مدل‌های مردود مربوط به تغییرات بسیار زیاد دمای ماهانه دورهٔ آتی نسبت به دورهٔ پایه، بود. درنهایت، ۵ مدل مناسب از ۱۳ مدل، HADGEM2-ES، IPSL-CM5A-MICRO LR، ESM2M-GFDEL M NOERESM1-انتخاب شدند (اطلاعات استخراج‌شده از دورهٔ پایه مدل‌های یادشده، با اطلاعات دورهٔ مشاهداتی، مقایسه شد).

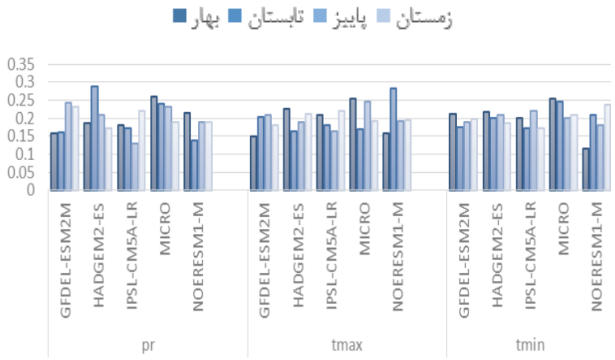
بررسی عدم قطعیت مدل‌های AOGCM و نتایج وزن‌دهی

مطابق آنچه در بخش گذشته گفته شد، اولین مسئله در ترکیب مدل‌ها با یکدیگر، شیوهٔ وزن‌دهی مدل‌ها است. در این بخش داده‌های مدل‌های تغییر اقلیم وزن‌دهی شدند. در روش وزن‌دهی به روش میانگین مشاهداتی دما و بارندگی (MOTP)، برای وزن‌دهی به این روش خروجی مدل‌های بزرگ‌مقیاس در دورهٔ کنترل نیاز است و به همین دلیل، به خلاف روش‌های دیگر وزن‌دهی، مقادیر وزن‌های اختصاصی به مدل‌ها در دوره‌های مختلف با دورهٔ کنترل ثابت تغییر نمی‌کند. در این روش، در فصل بهار بیشترین وزن مقادیر بارش مربوط مدل HADGEM_ES با ۰/۲۵ و کمترین وزن مقادیر مربوط به IPSL_CM5A_LR با ۰/۱۳ است. در فصل تابستان بیشترین وزن مقادیر بارش مربوط به مدل ESM2M-GFDEL با ۰/۳۱ در فصل تابستان و کمترین وزن مربوط

به مدل M-NOERESM1 با ۰/۱۱ است. در فصل پاییز بیشترین وزن مقادیر بارش مربوط به مدل ESM2M-GFDEL با ۰/۲۶ و در فصل پاییز کمترین وزن مقادیر بارش مربوط به مدل MICRO با وزن ۰/۱۹ است. در فصل زمستان بیشترین وزن مقادیر بارش مربوط به مدل M-NOERESM1 با ۰/۲۱ و کمترین وزن مقادیر مربوط به مدل LR-CM5A-IPSL با ۰/۱۸ است. در مورد دمای حداکثر، در فصل بهار بیشترین وزن مقادیر مربوط به مدل ESM2M-GFDEL با ۰/۲۵ و کمترین وزن مربوط به مدل ES-HADGEM2 با ۰/۱۶ است. در فصل تابستان بیشترین وزن مقادیر مربوط به مدل ES-HADGEM2 با ۰/۲۴ و کمترین وزن مربوط به LR-CM5A-IPSL با ۰/۱۸ است. در فصل پاییز بیشترین وزن مربوط به مدل MICRO با ۰/۲ و کمترین وزن مربوط به مدل LR-CM5A-IPSL با ۰/۱ است. در فصل زمستان بیشترین وزن مقادیر دما حداکثر مربوط به مدل ES-HADGEM2 با ۰/۲۹ و کمترین وزن مقادیر مربوط به مدل MICRO با ۰/۱۵ است. در فصل بهار بیشترین وزن مقادیر دما حداقل مربوط به مدل MICRO با ۰/۳ و کمترین وزن مربوط به مدل LR-CM5A-IPSL با ۰/۱۵ است. در فصل تابستان بیشترین وزن مربوط به مدل LR-CM5A-IPSL با ۰/۲۴ و کمترین وزن مقادیر مربوط به M-NOERESM1 با ۰/۱ است. در فصل پاییز بیشترین وزن مقادیر مربوط به مدل MICROبا ۰/۲۵ و کمترین وزن مقادیر مربوط به M-NOERESM1 با ۰/۱۱ است. در فصل زمستان بیشترین وزن مقادیر مربوط به مدل ESM2M-GFDEL با ۰/۲۴ و کمترین وزن مقادیر دما حداقل مربوط به مدل LR-CM5A-IPSLبا ۰/۱۳ است (شکل‌های ۲ و ۳).



شکل ۲. روش وزن‌دهی میانگین مشاهداتی دما و بارندگی

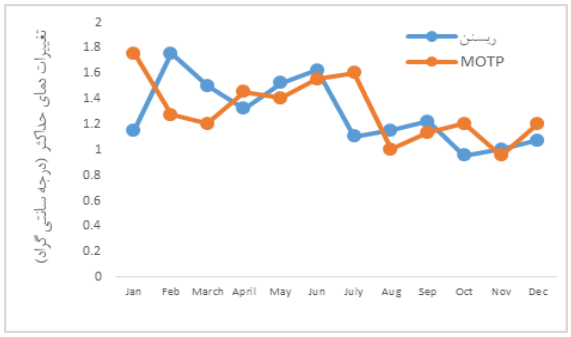


شکل ۳. نتایج وزن‌دهی با استفاده از روش Raisanen

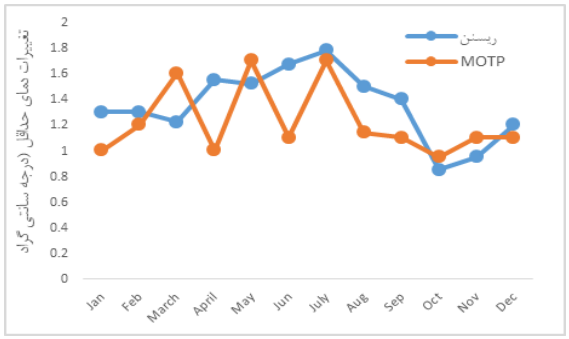
نتایج ریزمقیاس کردن و تولید داده برای دورهٔ آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۰)

پس از تعیین سناریوی RCP 4.5 و مدل‌های اقلیمی مورد نظر، تولید داده برای دورهٔ آینده انجام شد و پس از آن، خروجی‌های مدل برای هر متغیر اقلیمی (دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش) وزن‌دهی و به صورت ماهانه میانگین‌گیری شد و در مرحلهٔ بعد با داده‌های مشاهداتی مقایسه شد. طبق شکل ۴ دمای حداکثر در تمامی ماه‌ها افزایش می‌یابد که بیشترین افزایش دما در مدل Raisanen در ماه فوریه و کمترین افزایش در ماه اکتبر است. در مدل وزن‌دهی MOTP بیشترین افزایش دما در ماه ژانویه و کمترین افزایش دما، ماه آگوست است. شکل ۵ تغییرات دمای حداقل در دورهٔ آتی نسبت به دورهٔ پایه را نشان می‌دهد. طبق این جدول، دما در تمامی ماه‌ها افزایش می‌یابد که بیشترین افزایش دما در روش وزن‌دهی Raisanen ماه جولای و کمترین افزایش ماه اکتبر است. در مدل وزن‌دهی MOTP بیشترین افزایش دما در ماه می و کمترین افزایش دما، ماه اکتبر است. بنابراین، طبق نتایج به‌دست‌آمده انتظار می‌رود بازخورد بارزی در ییلان آبی منطقه به دلیل اثر افزایش دما و افزایش تبخیر به وجود آید و همچنین، پتانسیلی برای تغییر در وقایع جوی و هیدرولوژی حوضه به وجود آید. طبق شکل ۶ بارش در بیشتر ماه‌ها کاهش پیدا کرده است. درصد تغییرات بارندگی در ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست کاهش چشمگیری را به دلیل بارش مشاهداتی جزئی داشته است، بنابراین از شکل حذف شد.

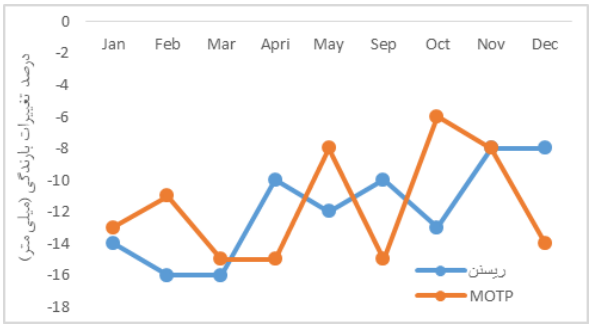
بررسی فصلی نشان داد در روش Raisanen تغییرات دمای حداکثر در دورهٔ آتی نسبت به دورهٔ پایه در بهار ۱/۲۴، تابستان ۱/۵۲، پاییز ۱/۳۲، زمستان ۱/۰۴ و در روش MOTP در فصل بهار ۱/۲۱، تابستان ۱/۵۴، پاییز ۱/۳۸ و زمستان ۱/۱ درجهٔ سانتی‌گراد است. بیشترین افزایش دما مربوط به فصل تابستان است. همچنین، کمترین میزان افزایش دما، مربوط به فصل زمستان است. میزان تغییرات دمای حداقل در دورهٔ آتی نسبت به دورهٔ پایه در روش Raisanen در دورهٔ آتی نسبت به دورهٔ پایه در بهار ۲/۸، تابستان ۱/۶۲، پاییز ۱/۵۴، زمستان ۰/۹۹ و در روش MOTP در فصل بهار ۱/۲۶، تابستان ۱/۲۶، پاییز ۱/۳۱ و زمستان ۱/۰۶ درجهٔ سانتی‌گراد است.



شکل ۴. تغییرات دمای حداکثر در دورهٔ آتی نسبت به دورهٔ پایه



شکل ۵. تغییرات دمای حداقل در دورهٔ آتی نسبت به دورهٔ پایه



شکل ۶. میزان تغییرات بارندگی در دورهٔ آتی نسبت به دورهٔ پایه

در مطالعات تغییر اقلیم عدم قطعیت‌های مختلفی بر نتایج نهایی تأثیر می‌گذارند و با نادیده گرفتن هر یک از آنها از اعتبار نتایج کاسته می‌شود. عدم قطعیت در مدل‌ها در واقع تفاوت بین نتایج مدل و مقادیر اندازه‌گیری‌شده یا مشاهده‌شده است که می‌تواند ناشی از کمبود اطلاعات و تغییرپذیری مدل و پارامترهای آن باشد. وجود خطا در داده‌ها نیز موجب عدم قطعیت در مدل‌ها می‌شود. از جملهٔ این عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی و سناریوهای پخش گازهای گلخانه‌ای اشاره کرد. برای کاهش عدم قطعیت این مدل‌ها در مطالعات تغییر اقلیم نباید به یک مدل گردش عمومی جو اکتفا کرد و باید سعی کرد که از نتایج چندین مدل کمک گرفته شود. هر روشی که نزدیک‌ترین مقدار دما و بارش را به مقادیر ایستگاه مورد نظر داشته باشد، به عنوان روش وزن‌دهی منتخب برگزیده می‌شود یا به بیانی دیگر، بهترین روش وزن‌دهی روشی است که بیشترین مقدار ضریب R^2 و کمترین RMSE مربعات را داشته باشد. در این تحقیق روش وزن‌دهی MOTP برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آینده به دلیل داشتن R^2 بالاتر و کمترین RMSE به عنوان روش بهتر در پیش‌بینی داده‌های اقلیمی تحت سناریوی RCP4.5 انتخاب شد. مطالعات انجام‌شده در این راستا نیز مؤید کاهش عدم قطعیت‌های پیش‌بینی‌های اقلیمی با اجرای گروهی مدل‌ها و یا به بیان دیگر، استفاده از چندین مدل به جای اجرای منفرد مدل‌ها است [۱۸]. نتایج فنگ و فو (۲۰۱۳) نیز نشان داد با اجرای گروهی ۸ مدل آب‌وهوا منطقه‌ای (RCM) کاهش معنادار خطای اریبی در شبیه‌سازی به روش وزنی در بارش و دما در مقایسه با اجرای منفرد هر مدل مشاهده شده است [۷]. بررسی اثر

تغییر اقلیم در بارش‌های حدی انگلستان با اجرای گروهی ۱۳ مدل آب‌وهوا منطقه‌ای براساس روش وزن‌دهی توسط فولر و اکستروم (۲۰۰۹) نیز نشان داد اجرای گروهی مدل‌ها منجر به کاهش قابل توجه خطای مدل‌ها و در نتیجه، کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی بارش مناطق مورد مطالعه شدند [۱۹]. نتایج اشرف و همکاران (۱۳۹۳) نیز نشان داد آماره‌های محاسبه‌شده توسط اجرای گروهی ۵ مدل نشان‌دهندهٔ کاهش چشم‌گیر خطای نسبی شبیه‌سازی‌شده و در نتیجه، افزایش دقت پیش‌بینی‌های صورت‌گرفته بر مبنای سناریوهای مختلف بوده است [۲۰]. از طرفی، بررسی‌های انجام‌شده در قارهٔ آفریقا دیالو[1] و همکاران (۲۰۱۲) در خصوص اثرات تغییر اقلیم در غرب آفریقا نشان داد مدل‌های چندگانه، همخوانی بهتری با داده‌هایی مشاهداتی دارد [۲۱]. همچنین، مطالعه چن[2] و همکاران در سال نشان می‌دهد وزن‌دهی یا به‌اصطلاح همادی کردن مدل‌های گردش عمومی جو در شرایط اقلیمی پیش‌بینی‌شده در شرایط بارش و دما تأثیر دارند و نتایج را بهبود می‌بخشند [۸].

نتیجه‌گیری

امروزه موضوع تغییر اقلیم جهانی بسیار مورد توجه دانشمندان و سیاست‌گذاران عرصه‌های بین‌المللی قرار گرفته است، زیرا هر تغییری در آب‌وهوا عدم قطعیت مربوط به پیش‌بینی و برنامه‌ریزی آینده را افزایش خواهد داد. نتایج اجرای گروهی مدل‌ها نیز نشان داد در برنامه‌ریزی آتی می‌توان از ترکیب گروهی مدل‌ها با عدم قطعیت کمتر و دقت بیشتری پارامترهای اقلیمی را شبیه‌سازی کرد، بنابراین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی از چندین مدل ترکیبی برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی استفاده کرد. دلیل آگاهی از چگونگی وقوع این فرایند و کاهش عدم قطعیت‌های موجود در مدل‌های اقلیمی می‌تواند در ارائهٔ برنامه‌های جامع برای مقابله یا آمادگی در برابر مخاطرات، مؤثر واقع شود.

منابع

[1].Stanzel P, Hannes H . Climate change impact on West African rivers under an ensemble of CORDEX climate projections Climate Services. 2018; 11: 36-48.

[2].Tegegnea G, Melesse A, Worqlul A. Development of multi-model ensemble approach for enhanced assessment of impacts of climate change on climate extremes. Science of The Total Environment. 2020; 704: 135357.

[3].Feng J. Fu C. A. Multi-Ensemble of Regional Climate Simulation from RMIP for Asia. Report of Key Laboratory of Regional Climate Environment for East Asia, START Regional Center for Temperature East Asia, IAPCAS. 2012; 1-38.

[4].Chen J, Brissette F.P. Leconte R. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climatechange on hydrology. Hydrology. 2011; 401 (3-4): 190-202.

[5]. Madadgar Sh, AghaKouchak A, Shukla Sh.. A hybrid statistical-dynamical framework for meteorological drought prediction: Application to the southwestern United States. Water Resources Research. 2016;52(7): 11-21.

[6].Giorgi F, Coppola E. Does the model regional bias affect the projected regional climate change? An analysis of global model projections. Climate change. 2010; 100, 787-795.

[7].Fei S, M. Desprez J , Potter K. Divergence of species responses to climate change. Science Advances; 2017. 3(5): 1603055.

[8].Cavazos T, Arriaga-Ramírez S. Downscaled climate change scenarios for Baja California and the North American monsoon during the twenty-first century. Journal of Climate .2012;25 (17): 5904-5915.

[9]. Rokhsar P, Ansari H, Alizadeh and Ghorbani M. Investigation of group uncertainty of atmospheric general circulation models in simulation of meteorological data (Case study of Rasht synoptic station) Iranian Journal of Irrigation and Drainage. 2020; 6(5): 1897-1909 (Persian)

[10]. Naseri H. Salemieh, surveyor Boani A. The effect of output uncertainty of climate models in predicting changes in groundwater level (Case study: Hamadan-Bahar plain aquifer. Earth knowledge research, 2016. ;(26) 56-61 (Persian).

[11]. Safavi H., Stepani F, Ahmadi A. Assessing the effects of climate change using the weight of AOGCM multiple models, 8th National Congress of Civil Engineering, Babol. 17 May 2014. (Persian).

1. Diallo
2. Chen

[12]. Malmir M., Rezapour A., Sharif Azari. 2016. Investigation of the effects of climate change on the runoff of Qara Sood basin using statistical microscale of HADCM3 data and dynamic neural network. Journal of Soil and Water Conservation Research. 23: 11-21.

[13]. Malmir M., Rezapour A., Sharif Azari. 2016. Evaluation of the effect of climate change on agricultural water allocation in Qarasu basin with WEAP model. Irrigation and water engineering. 23: 143-151

[14]. Pirmoradian N, Hadi Nia, H. And Ashrafzadeh, A. Prediction of minimum and maximum temperature, radiation and precipitation in Rasht synoptic station under different scenarios of climate change. Journal of Geography and Planning. 2016; 20: 29 - 44. (Persian)

[15]. Massah Bavani., A. R. 2006. Climate change risk assessment and its impact on water resources, a case study: Zayandehrud basin. PhD Thesis, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran

[16]. Raisanen J, Ruokolainen L., Jussi Ylha¨isi.2009. Weighting of model results for improving best estimates of climate Change”

[17]. Xu Z, .Li L, Huang G, Wang S. A multi-scenario ensemble streamflow forecast method for Amu Darya River Basin under considering climate and land-use changes. Journal of Hydrology. 2021;598: 126276.

[18]. Semenov M, Stratonovitch P. Use of Multi Model Ensembles from Global Climate Models for Assessment of Climate Change Impacts. Climate Research. 2010; 41: 1-14.

[19]. Fowler H.J, Ekstrom M. Multi-Model Ensemble Estimates of Climate Change Impacts On UK Seasonal Precipitation Extremes. International Journal of Climatology. 2009; 29: 385-416.

[20]. Ashraf B, Alizadeh A, Mousavi M. Builders M. Validation of temperature and precipitation data simulated by individual and group implementation of five AOGCM models for the northeastern region of Iran. Journal of Water and Soil. 2012; 2: 253-266.

[21]. Diallo I and Sylla M. Multimodel GCM-RCM Ensemble-Based Projections of Temperature and Precipitation over West Africa for the Early 21st Century. International Journal of Geophysics. 2012; 19(2): 1-19.