

## ارزیابی کارایی مدل سری CMIP5 در شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی بارندگی، دما و سرعت باد (مطالعه موردی: استان یزد)

مریم میراکبری- دانشجوی دکتری بیابان‌زدایی، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران  
طیبه مصباح‌زاده\* - استادیار گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران  
محسن محسنی ساروی- استادیار گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران  
حسن خسروی- استاد گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران  
قاسم مرتضایی فریزندی- دانشیار پژوهشکده مطالعات توسعه جهاد دانشگاهی تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۹/۲۶

### چکیده

ایران جزو کشورهایی است که ضریب تأثیرپذیری آن از تغییرات اقلیمی بالاست. امروزه، تغییرات پارامترهای اقلیمی به وسیله مدل‌های گردش کلی جو بررسی می‌شود. نسخه‌های گوناگونی از این مدل‌ها منتشر شده است؛ آخرین نسخه آن مدل‌های سری CMIP5 است. مدل‌های CMIP5، که در گزارش پنجم ارزیابی تغییر اقلیم (AR5) استفاده شده‌اند، از عدم قطعیت پایین‌تر و وضوح بیشتری نسبت به مدل‌های قبل برخوردارند. در این مطالعه، تغییرات پارامترهای اقلیمی بارندگی، دمای متوسط، و سرعت باد حداکثر به وسیله مدل CanESM2 به‌عنوان یکی از مدل‌های مورد استفاده در تهیه گزارش پنجم ارزیابی تحت سه سناریوی RCP و براساس روش ریزمقیاس‌نمایی SDSM بررسی شد. نتایج نشان داد میانگین بارندگی طبق سناریوهای RCP 8.5 و RCP 2.6 به ترتیب ۶۹ و ۶۲/۲۸ میلی‌متر خواهد بود که نسبت به دوره مشاهداتی به ترتیب ۹/۱۸ و ۱۷/۲ درصد افزایش و براساس سناریوی RCP 4.5، ۵۸/۳۹ میلی‌متر بوده است که نسبت به دوره مشاهداتی ۰/۸۱ درصد کاهش خواهد داشت. میانگین دمای متوسط طبق سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5، و RCP 8.5 به ترتیب ۴/۵، ۶/۷، و ۱۲/۸ درصد افزایش دارد. همچنین، سرعت حداکثر باد تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5، و RCP 8.5 به ترتیب ۴/۹، ۴/۴، و ۵/۳ درصد نسبت به دوره مشاهداتی افزایش خواهد داشت.

کلیدواژگان: ارزیابی آماری، سری CMIP5، روند تغییرات، CanESM2، SDSM

### مقدمه

تغییر اقلیم از دو دهه قبل، به دلیل تأثیرات جدی که بر روی انسان، جامعه، و محیط زیست گذاشته، برای جامعه علمی به دغدغه‌ای تبدیل شده است. تعاریف متفاوتی در منابع مختلف از تغییر اقلیم شده است. براساس تعریف IPCC (۲۰۱۴)، تغییر اقلیم تغییر حالتی از اقلیم است که در آن میانگین یا خصوصیات قابل تغییر آن به مدت چند دهه یا طولانی‌تر دچار تغییر می‌شود. تغییر اقلیم ممکن است به علت تغییر نیروهای خارجی یا داخلی مانند نوسان چرخه خورشیدی، فوران آتشفشان، افزایش گاز گلخانه‌ای، و تغییر کاربری اراضی باشد. طبق گزارش ارزیابی پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)<sup>۱</sup>، دمای کره زمین ۰/۸۵ درجه سانتی‌گراد از ۱۸۸۰ تا ۲۰۱۲ افزایش یافته است (IPCC, 2013). این تغییر در

گرمای جهانی باعث تغییر در اقلیم به صورت وقوع سیل یا خشک‌سالی شده است (فنگ و همکاران، ۲۰۱۴: ۴۲). براساس مطالعات انجام‌گرفته طی چند دهه گذشته، گرمایش جهانی در مقیاس محلی، منطقه‌ای، و جهانی تأیید شده است (روی و گنگ، ۲۰۱۳: ۱۴۰۵). شواهد مربوط به گرمایش جهانی نشان می‌دهد که، با وجود ابهامات در مورد گرم‌شدن کره زمین، هوای زمین دچار تغییرات درخور توجهی شده است و انتظار بر این است که تا پایان قرن ۲۱ دمای هوا در سطح جهانی از ۱/۸۱ تا ۴ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد (طبری و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۳۰).

تاکنون نسخه‌های گوناگونی از مدل‌های تغییر اقلیم ارائه شده است؛ از آن جمله می‌توان به مدل‌های اولین گزارش ارزیابی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم با نام FAR، مدل‌های دومین گزارش با نام SAR، مدل‌های سومین گزارش با نام TAR، و مدل‌های چهارمین گزارش با نام (CMIP3)AR4، و درنهایت مدل‌های پنجمین گزارش با نام (CMIP5)AR5 اشاره کرد. در مدل‌های گزارش پنجم، برخلاف گزارش‌های قبل، بیشتر به جنبه‌های اقتصادی-اجتماعی تغییرات اقلیم و نقش آن در توسعه پایدار و مدیریت ریسک پرداخته شده است. چارچوب کلی این مدل بر کاهش گازهای گلخانه‌ای و روش‌های سازگاری با تغییر اقلیم تأکید دارد. گزارش ارزیابی پنجم شامل سه گزارش کارگروه و یک گزارش خلاصه‌شده است که اولین گزارش گروه کاری در سال ۲۰۱۳ منتشر شده است و بقیه گزارش‌ها در سال ۲۰۱۴ تکمیل شده‌اند (IPCC, 2014).

طبق پیش‌بینی‌های گزارش پنجم، افزایش دمای سطح زمین در پایان قرن ۲۱ احتمالاً بیش از ۱.۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره ۱۸۵۰ تا ۱۹۰۰ برای اکثر سناریوهاست و احتمالاً برای بسیاری از سناریوها ۲.۰ درجه سانتی‌گراد خواهد بود. در مقایسه با گزارش چهارم، حد پایین حساسیت سیستم آب و هوایی به انتشار گازهای گلخانه‌ای اندکی کاهش یافته است: هرچند که پیش‌بینی‌های افزایش دمای متوسط جهانی (نسبت به مقادیر پیش از انقلاب صنعتی) تا سال ۲۱۰۰ در همه سناریوها بیش از ۱.۵ درجه سانتی‌گراد است. در تهیه گزارش پنجم، که به تدریج از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴ منتشر شد، از برون‌داد مدل‌های سری CMIP5 استفاده شد. این مدل‌ها از سناریوهای جدید انتشار با عنوان نماینده خط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (RCP)<sup>۱</sup> استفاده می‌کنند (ماس و همکاران، ۲۰۱۰: ۷۵۰). سناریوهای RCP شامل سناریوی کاهش سخت‌گیرانه (RCP2.6)، دو سناریوی حد واسطه (RCP4.5 و RCP6)، و یک سناریوی بدبینانه‌اند که بر اساس میزان واداشت تابشی آن‌ها در سال ۲۱۰۰ نام‌گذاری شده‌اند (وان و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۲). سناریوهای RCP2.6، RC4.5، RCP6، و RCP8.5 اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت تابشی را در سال ۲۱۰۰ به ترتیب تا ۲/۶، ۴/۵، ۶ و ۸/۵ وات بر متر مربع تخمین زده‌اند. انواع مختلف مدل‌های گردش کلی جو دارای تمام سناریوهای یادشده یا تعدادی از آن‌هاست. تفاوت عمده سناریوهای RCP و SRES (سناریوی گزارش ارزیابی چهارم) در این است که RCP خط سیر توازن واداشت تابشی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای را تا سال ۲۱۰۰ بر حسب وات بر متر مربع مشخص می‌کند؛ اما سناریوهای سری SRES خط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای را مشخص می‌کنند (زو و همکاران، ۲۰۱۲: ۵۳۰).

مدل‌های گردش کلی معتبرترین ابزار برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی محسوب می‌شوند. این مدل‌ها می‌توانند اقلیم حاضر را شبیه‌سازی و شرایط اقلیم آینده را تحت سناریوهای مختلف تصویرسازی کنند (میائو و همکاران، ۲۰۱۳: ۷۳۵). هرچند که مدل‌های گردش کلی جو در پیش‌بینی تغییرات اقلیم آینده کره زمین ابزار مناسبی هستند، خروجی این مدل‌ها دارای تفکیک مکانی بالایی است (۲۵۰ تا ۶۰۰ کیلومتر) (گبرمسکل و همکاران، ۲۰۰۵: ۲۷۵). بنابراین، کاربرد

این مدل‌ها در مقیاس منطقه‌ای و محلی به‌تنهایی مناسب نیست. در واقع، بالا بودن تفکیک مکانی آن‌ها باعث می‌شود خروجی مدل برای بررسی تأثیرات هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی تغییر اقلیم در مقیاس منطقه‌ای قابل استفاده نباشد (های و همکاران، ۲۰۰۰: ۳۹۰). مهم‌ترین و مناسب‌ترین ابزار برای ایجاد ارتباط بین مقیاس محلی / منطقه‌ای و مقیاس مدل گردش کلی جو ریزمقیاس‌نمایی است. روش‌های متعددی برای ریزمقیاس‌نمایی ارائه شده که در آن‌ها عدم هماهنگی بین مقیاس‌های جهانی و منطقه‌ای در نظر گرفته شده است. به‌طور کلی، دو روش آماری و دینامیکی بدین منظور ارائه شده است. در روش دینامیکی، یک مدل عددی با تفکیک مکانی بالا یا مدل اقلیمی منطقه‌ای با تفکیک مکانی در حدود ۵ تا ۵۰ کیلومتر با مدل گردش کلی جو جفت می‌شود. در روش آماری، ارتباط تجربی / آماری بین متغیرهای بزرگ‌مقیاس و محلی برقرار می‌شود؛ این روش‌ها سریع‌ترند و به‌شدت محاسباتی. با استفاده از روش‌های آماری متغیرهای اقلیمی در مقیاس جهانی، مانند میانگین فشار سطح دریا، باد ناحیه‌ای، دما، و ارتفاع ژئوپتانسیل با متغیرهای مقیاس محلی / منطقه‌ای جفت می‌شوند (وترهال و همکاران، ۲۰۰۶: ۸). اساس روش‌های آماری بر پایه روابط رگرسیونی است. از بین روش‌های آماری ریزمقیاس‌نمایی، SDSM به‌طور گسترده‌ای برای ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای اقلیمی در سرتاسر جهان استفاده شده است (هانگ و همکاران، ۲۰۱۱: ۷۸۵). SDSM ترکیب دو روش رگرسیون خطی چندگانه و مولد آب و هوایی آماری است (گبرمسکل و همکاران، ۲۰۰۵: ۲۷۵؛ ویلبای و همکاران، ۲۰۰۶).

در بیشتر مطالعاتی که در زمینه کاربرد مدل‌های تغییر اقلیم در کشور انجام گرفته از مدل‌های گزارش چهارم استفاده شده است (جهان‌بخش اصل و همکاران، ۱۳۹۵؛ محمود و بابل، ۲۰۱۲). در حالی که اخیراً اکثریت پژوهشگران در سرتاسر جهان به وسیله مدل‌های گزارش ارزیابی پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم به بررسی تغییرات پارامترهای اقلیمی تحت سناریوهای جدید انتشار در مناطق مختلف پرداخته‌اند (خارین و همکاران، ۲۰۱۳: ۳۵۰؛ کومار بال و همکاران، ۲۰۱۶: ۵۲۵). مدل‌های ارزیابی گزارش پنجم قدرت تفکیک‌پذیری بسیار زیادی دارند و از سناریوهای انتشار جدید نسبت به گزارش چهارم استفاده می‌کنند. در ادامه، به چند مورد از تحقیقات انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود. محمود و بابل (۲۰۱۲) از زیرمدل‌های ماهانه و سالانه SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی دما و بارندگی بر اساس داده‌های گزارش چهارم مدل گردش کلی HadCM3 در منطقه‌ای در پاکستان و هند استفاده کردند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد هر دو زیرمدل SDSM قابلیت خوبی برای ریزمقیاس‌نمایی بارندگی، دمای حداکثر و حداقل تحت سناریوهای A2 و B2 دارند. جهان‌بخش اصل و همکاران (۱۳۹۵) تأثیر تغییر اقلیم بر دما و بارش را با استفاده از دو مدل HadCM3 و MPEH5 بر اساس داده‌های گزارش ارزیابی چهارم تحت سناریوهای A1B، A2، و B1 بررسی کردند. براساس معیارهای ارزیابی آماری، در نهایت، برای شبیه‌سازی بارش از مدل HadCM3 تحت سناریوی A1B و برای تولید دما از مدل MPEH5 تحت سناریوی A2 استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد بارش در دوره آینده ۹ میلی‌متر کاهش داشته و دمای حداقل و حداکثر به‌ترتیب ۱/۰۵ و ۰/۸۷ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد داشت. احمدوند و کهریزی (۱۳۹۵) عملکرد سناریوهای RCP و SRES را در پیش‌بینی دمای کمینه و بیشینه ایستگاه ارازکوه و نوده در استان گلستان در دوره زمانی ۲۰۰۴-۲۰۶۵ و ۲۰۸۰-۲۰۹۹ نسبت به دوره پایه ۱۹۶۸-۲۰۰۵ به وسیله هشت مدل GCM تحت سناریوهای انتشار و مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG و SDSM مقایسه کردند. بر اساس نتایج این بررسی، در بین سناریوهای گزارش چهارم، A1B و سناریوی گزارش پنجم RCP8.5 بیشترین افزایش دما را پیش‌بینی کردند. مقدار افزایش دما به طور نسبی از سناریوی RCP2.6 به سمت سناریوی RCP8.5 افزایش می‌یابد. صیاحی و همکاران (۱۳۹۵) اثر تغییر اقلیم را بر رواناب ماهانه حوضه دز به وسیله دو مدل MPI-ESM-LR و MPI-ESM-MR تحت سناریوی RCP2.6

از سری مدل‌های CMIP5 بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد دما ۰/۱۷ تا ۲ درجه سانتی‌گراد و بارندگی به مقدار ۳ تا ۷۵ درصد در دوره آتی (۲۰۱۱-۲۰۳۵) نسبت به دوره مشاهداتی (۱۹۸۳-۲۰۰۵) افزایش خواهد داشت. افزایش دما و بارندگی سبب افزایش ۹/۷ درصدی رواناب در آینده خواهد شد. آقاخانی افشار و همکاران (۱۳۹۵) پارامترهای اقلیمی بارندگی و دمای متوسط را براساس ۱۴ مدل مستخرج از گزارش ارزیابی پنجم در حوضه آبخیز کشف‌رود ارزیابی کردند. از میان مدل‌های انتخابی، چهار مدل GFDL-ESM2G، IPSL-CM5A-MR، MIROC-ESM، و NorESM1-M، براساس معیارهای ارزیابی، همبستگی بیشتری با داده‌های مشاهداتی در دوره پایه ۱۹۹۲-۲۰۰۵ داشتند. نتایج مدل‌سازی پارامترهای بارندگی و دما برای دوره آینده نشان داد مؤلفه بارندگی دارای روند کاهشی و افزایشی متغیری است. همچنین، دمای متوسط روند افزایشی معنی‌داری دارد؛ به طوری که دمای متوسط حوضه بین ۰/۵۶ تا ۳/۳ درجه سانتی‌گراد افزایش و بارندگی ۱۰/۷ درصد کاهش داشته است. نورین‌محمد و همکاران (۲۰۱۵) انواع مدل‌های CMIP5 تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 را برای شبیه‌سازی تأثیرات تغییر اقلیم بر روی رژیم جریان در حوضه دریاچه دشت چم به کار بردند. نتایج این بررسی نشان داد فقط پنج مدل از مدل‌های انتخابی روند معنی‌داری را برای داده‌های بارندگی به خوبی نشان می‌دهند؛ در حالی که مقدار این روند قابل مقایسه با داده‌های مشاهداتی نیست. ژاس و همکاران (۲۰۱۶) حساسیت مدل‌های ارزیابی گزارش چهارم (AR4) و پنجم (AR5) را در نمایش تغییرات متوسط سالانه بارندگی در سه منطقه با سه اقلیم متفاوت در شمال برزیل برای دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۰۰ براساس داده‌های CMAP<sup>1</sup> مقایسه کردند. مدل‌های استفاده‌شده در این بررسی نمایانگر خوبی از چرخه سالانه بارندگی بود. با وجود این، نتایج حاصل از ضریب تحلیل همبستگی و میانگین خطای مطلق نشان داد خروجی هر دو گزارش خطای بزرگی را تولید می‌کنند. المزروعی و همکاران (۲۰۱۷) عدم قطعیت تغییرات دما و بارندگی شبیه‌سازی‌شده به وسیله مدل‌های گزارش ارزیابی پنجم تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 را در عربستان بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد بارندگی در برخی نقاط عربستان روند افزایشی و در برخی دیگر روند کاهشی خواهد داشت؛ در حالی که دما در کل منطقه روند افزایشی دارد. پنایک و همکاران (۲۰۱۷) بارش و دمای سالانه به وسیله سری مدل‌های CMIP5 تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 را در کشورهای BIMSTEC در دوره ۱۹۰۱ تا ۲۱۰۰ پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد چهار مدل از شش مدل انتخابی بارندگی در برخی کشورها روند افزایشی و در برخی دیگر روند کاهشی خواهد داشت. در زمینه دما، تمام مدل‌ها روند افزایشی را در آینده برای کل منطقه مطالعاتی پیش‌بینی کردند. میزان افزایش برای هر دو پارامتر دما و بارندگی تحت سناریوی RCP8.5 بیشتر از RCP4.5 است.

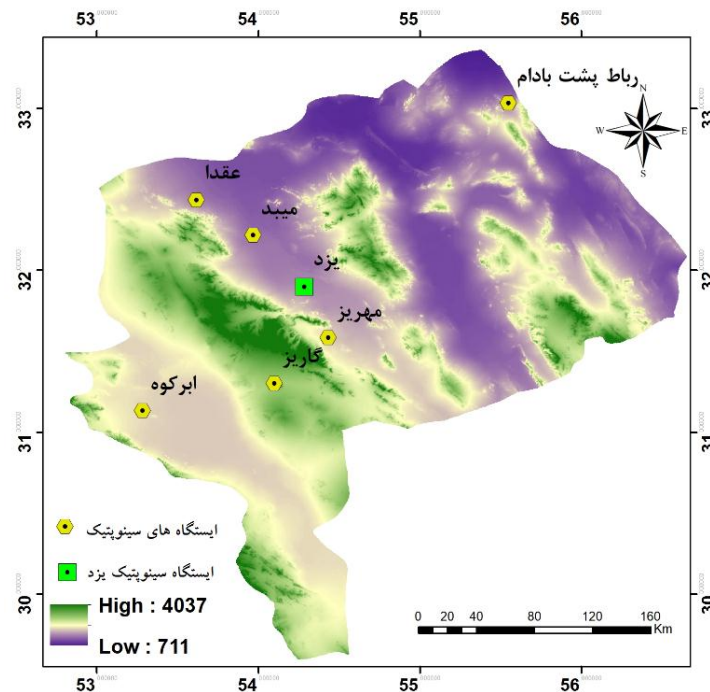
همان‌طور که اشاره شد، تاکنون بیشتر مطالعات در زمینه مدل‌سازی تغییر اقلیم بر اساس داده‌های گزارش چهارم انجام شده است. بنابراین، اجرای مطالعات و به‌روزرسانی آن با داده‌های CMIP5 برای کاهش عدم قطعیت مدل‌سازی تغییر اقلیم دهه‌های آتی امری ضروری است. بنابراین، در این مطالعه با استفاده از داده‌های گزارش پنجم به مدل‌سازی پارامترهای اقلیمی دمای متوسط، بارندگی، و سرعت باد حداکثر در استان یزد پرداخته می‌شود. تاکنون مطالعه‌ای به وسیله مدل‌های گزارش پنجم در منطقه مطالعاتی انجام نگرفته است؛ به طوری که همه مطالعات انجام‌شده براساس گزارش چهارم ارزیابی و فقط برای پارامترهای بارندگی و دماست (دستورانی و همکاران، ۲۰۱۱)؛ برزگری و ملکی‌نژاد، (۱۳۹۵). بدین منظور، پارامترهای یادشده بر اساس دوره پایه ۱۹۶۱-۲۰۰۵ مدل‌سازی شده و روند تغییرات اقلیمی آینده طی یک دوره ۹۵ ساله از ۲۰۰۶ تا ۲۱۰۰ شبیه‌سازی خواهد شد. با توجه به اینکه منطقه مطالعاتی از اقلیم خشک

برخوردار است، بررسی تغییرات پارامترهای باد، دما، و بارش در این منطقه اهمیت زیادی در مطالعات اقلیمی دارد. بررسی تغییرات سرعت حداکثر باد در این منطقه، که از مناطق بادخیز کشور بوده و هرساله تحت تأثیر طوفان‌های گرد و غبار است، در مطالعات مربوط به گرد و غبار و فرسایش بادی در آینده می‌تواند از اهمیت بسزایی برخوردار باشد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مطالعاتی

محدوده مطالعاتی استان یزد با عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۲۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۳۷ دقیقه شرقی و مساحت تقریبی ۱۳۱۵۷۵ کیلومتر مربع است (شکل ۱). این استان دارای اقلیم خشک و فراخشک و از استان‌های کم‌بارش کشور است. متوسط بارندگی در این منطقه برای دوره آماری ۶۳ ساله (۱۹۵۲-۲۰۱۴) ۵۷ میلی‌متر، متوسط دمای میانگین ۱۹/۵۸ درجه سانتی‌گراد، حداکثر دمای بیشینه در گرم‌ترین ماه سال ۴۵/۶ درجه سانتی‌گراد، حداقل دمای کمینه در سردترین ماه سال ۱۶- درجه سانتی‌گراد، و حداکثر سرعت باد تا ۳۳ متر بر ثانیه است. براساس مطالعه نگارش و همکاران (۱۳۹۰)، میانگین بارندگی در منطقه مطالعاتی طی دوره آماری ۵۰ ساله (۱۹۶۵-۲۰۰۵) ۷/۵ درصد کاهش و دمای حداکثر در این دوره نسبت به میانگین ۵۰ ساله ۱ درصد افزایش یافته است. بنابراین، بررسی تغییرات پارامترهای اقلیمی در این منطقه به وسیله مدل‌های تغییر اقلیم، که نسبت به تحلیل‌های ساده آماری از دقت بسیاری برخوردارند، اهمیت زیادی دارد. در شکل ۱ منطقه مطالعاتی همراه موقعیت ایستگاه سینوپتیک یزد به‌عنوان ایستگاه مورد بررسی در این مطالعه ارائه شده است.



شکل ۱. منطقه مطالعاتی و موقعیت ایستگاه سینوپتیک یزد

## مدل گردش کلی (GCM)<sup>۱</sup>

همان‌طور که اشاره شد، مهم‌ترین ابزار برای پیش‌بینی تغییرپذیری متغیرهای اقلیمی در سطح جهانی و قاره‌ای مدل‌های گردش کلی هستند. در این مطالعه از نسل دوم مدل کانادایی سیستم زمین یا CanESM2<sup>۲</sup>، که توسط CCCma<sup>۳</sup> ارائه شده، استفاده شد. مدل CanESM2 نسخه ارتقا یافته از مدل‌های گردش کلی است که به آن‌ها مدل‌های سامانه زمین (ESM) گفته می‌شود. ESMها سعی بر لحاظ حداکثر مؤلفه‌های تأثیرگذار سامانه زمین بر اقلیم را در ساختار مدل‌سازی خود دارند. در حال حاضر، مدل CanESM2 تنها مدلی است که دارای داده‌های روزانه قابل کاربرد برای SDSM است؛ در عین حال، امکان ریزمقیاس‌نمایی داده‌های سایر مدل‌های گردش کلی با تبدیل آن‌ها به آنومالی و نرمال‌سازی آن‌ها وجود دارد. مدل CanESM2 دارای سه سناریو است: RCP2.6، RCP4.5، و RCP8.5. همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر شد، سناریوی RCP2.6 دارای کمترین میزان افزایش گازهای گلخانه‌ای و واداشت تابشی ناشی از آن است. مطابق این سناریو، واداشت تابشی در اواسط دوره به حدود ۳.۱ رسیده و سپس کاهش یافته است و به ۲.۶ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰ خواهد رسید. میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بر طبق سناریوی RCP4.5 حد واسط دو سناریوی دیگر است؛ به طوری که این سناریو تحت عنوان سناریوی تثبیت شناخته شده است (تامسون و همکاران، ۲۰۱۱). سناریوی RCP8.5، که آخرین سناریوی گزارش ارزیابی پنجم است، دارای بیشترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای است. خروجی‌های مدل CanESM2 برای دوره پایه از ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۵ و در دوره آینده از ۲۰۰۶ تا ۲۱۰۰ است (IPCC, 2014).

جدول ۱. خصوصیات مدل CanESM2

مدل	قدرت تفکیک اتمسفری (درجه)	قدرت تفکیک اقیانوسی (درجه)	دوره شبیه‌سازی تاریخی / آینده	سناریوهای شبیه‌سازی
CanESM2	۲٫۸۱*۲٫۸۱	۰٫۹۴*۱٫۴۱	۱۸۵۰-۲۰۰۶/۲۰۰۵-۲۱۰۰	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5

## داده‌های مورد استفاده

برای مدل‌سازی متغیرهای اقلیمی توسط مدل CanESM2 از سه نوع ورودی استفاده می‌شود. این ورودی‌ها شامل داده‌های روزانه بارندگی، دمای متوسط، و سرعت باد حداکثر ایستگاه سینوپتیک، داده‌های بازتحلیل‌شده جو (NCEP)<sup>۴</sup>، و داده‌های مدل CanESM2 می‌باشند. داده‌های روزانه مشاهداتی تحت عنوان پیش‌بینی‌شونده، داده‌های بازتحلیل‌شده جو تحت عنوان پیش‌بینی‌کننده مشاهداتی، و داده‌های مدل گردش کلی جو تحت عنوان پیش‌بینی‌کننده بزرگ‌مقیاس نام‌گذاری می‌شوند. داده‌های پیش‌بینی‌کننده مشاهداتی و بزرگ‌مقیاس شامل ۲۶ متغیرند که در دو دوره پایه ۱۹۶۱-۲۰۰۵ و دوره آینده ۲۰۰۶-۲۱۰۰ موجودند.

## ریزمقیاس‌نمایی آماری توسط SDSM

همان‌طور که اشاره شد، خروجی مدل‌های گردش کلی جو به علت بزرگ‌مقیاس بودن یا، به بیان دیگر، تفکیک مکانی بالا، قابل استفاده در مقیاس منطقه‌ای یا محلی نیستند. بدین منظور، لازم است رابطه کمی بین متغیرهای بزرگ‌مقیاس

1. General Circulation Model

2. Canadian Earth System Model(second generation)

3. Canadian Center for Climate Modeling and Analysis

4. National Center for Environmental Prediction

مدل گردش کلی جو، و متغیرهای مشاهداتی کوچک‌مقیاس (محلّی / منطقه‌ای) ایجاد شود (ویلبای و همکاران، ۲۰۰۶: ۲۱۵). این رابطه به شکل رابطه ۱ خواهد بود (دیبیک و کیلیالی، ۲۰۰۵: ۱۵۰):

$$Y = f(x) \quad (1)$$

در این رابطه،  $Y$  متغیر پیش‌بینی‌کننده،  $X$  متغیر پیش‌بینی‌شونده، و  $f$  تابع انتقال است که به صورت تجربی از داده‌های مشاهداتی به دست می‌آید. در این مطالعه از SDSM5.2 برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بارندگی، دما، و سرعت باد استفاده شد. SDSM ابزاری است که ویلبای و همکاران (۲۰۰۲) برای ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم منطقه‌ای / محلّی با استفاده از تکنیک ریزمقیاس‌نمایی آماری ارائه کرده‌اند. این روش دارای چهار بخش اصلی است که شامل تعیین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده NCEP، واسنجی مدل، صحت‌سنجی مدل، تولید سناریو، و شبیه‌سازی برای دوره آینده است.

### انتخاب متغیرهای پیش‌بینی‌کننده مشاهداتی (NCEP)

برای مدل‌سازی داده‌های روزانه اقلیمی به تعیین متغیرهایی از NCEP نیاز است که ارتباط منطقی و مناسبی با پارامترهای اقلیمی انتخابی دارند. در واقع، خروجی مدل SDSM وابسته به انتخاب مناسب متغیرهای NCEP است. انتخاب مناسب‌ترین متغیر NCEP در مدل SDSM بر اساس ضریب تبیین ( $R^2$ )، ضریب همبستگی جزئی، و نمودار پراکنش متغیرهای NCEP در مقابل متغیر مشاهداتی انجام می‌گیرد.

### واسنجی مدل

واسنجی مدل برای تعیین ضرایب معادله حاصل از ارتباط متغیرهای NCEP و مشاهداتی انجام می‌گیرد. بدین منظور، ۷۰ درصد از داده‌های مشاهداتی برای تعیین این ضرایب در نظر گرفته می‌شود. در این مرحله، به تعیین دو فاکتور تورم واریانس<sup>۱</sup> و تصحیح اریبی<sup>۲</sup> نیاز است. با تغییر این فاکتورها، دقت برآورد مدل افزایش خواهد یافت. فاکتور تورم واریانس مقدار واریانس داده‌های ریزمقیاس‌شده را کنترل می‌کند. فاکتور تصحیح اریبی تخمین بیش از حد یا پایین میانگین فرایندهای شرطی (بارندگی و سرعت باد) توسط مدل SDSM را جبران می‌کند (فیسها و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۰). مقدار پیش‌فرض فاکتور واریانس در مدل SDSM ۱۲ است که تقریباً واریانس نرمال را ایجاد می‌کند. مقدار پیش‌فرض فاکتور تصحیح اریبی ۱ است که بیانگر عدم تصحیح اریبی است. در این مطالعه مقادیر هر دو فاکتور چندین مرتبه تنظیم شد تا اینکه بهترین تطابق بین داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی برقرار شود.

### صحت‌سنجی مدل

مرحله صحت‌سنجی برای ۳۰ درصد باقی‌مانده داده‌های مشاهداتی جهت ارزیابی کارایی مدل انجام می‌گیرد. صحت‌سنجی بر اساس خروجی مرحله قبل یا به عبارت دیگر توسط ضرایب معادلات حاصل از ارتباط متغیرهای NCEP و داده‌های مشاهداتی انجام می‌شود. به منظور ارزیابی مدل مشخصه‌های آماری (میانگین، مقادیر حداکثر و حداقل)، داده‌های مشاهداتی و داده‌های ریزمقیاس‌شده توسط مدل استخراج و مقایسه بین دو سری انجام می‌شود. در صورت عدم تطابق بین دو سری مشاهداتی و مدل‌سازی شده، مقادیر فاکتور واریانس و تصحیح اریبی تعدیل یا افزایش داده خواهد شد.

## ارزیابی و تعیین عدم قطعیت مدل

کارایی مدل گزارش پنجم توسط معیارهای ارزیابی ضریب تبیین ( $R^2$ )، درصد ضریب اریبی (PBIAS)، ضریب ناش-ساتکلیف (NSE)، جذر نسبت استاندارد (RSR)، و مجذور مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) بررسی می‌شود. در این رابطه‌ها،  $x_{obs}$  و  $y_{mod}$  به ترتیب مقادیر داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده است (آقاخانی افشار و همکاران، ۱۳۹۵).

$$PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^T (x_{obs} - y_{mod})}{\sum_{t=1}^T x_{obs}} * 100 \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (x_{obs} - y_{mod})^2}{\sum_{t=1}^T (x_{obs} - \bar{x}_{obs})^2} \quad (3)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^T (x_{obs} - y_{mod})^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (x_{obs} - \bar{x}_{obs})^2}} \quad (4)$$

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{t=1}^T (x_{obs} - \bar{x}_{obs})(y_{mod} - \bar{y}_{mod})}{\sqrt{(\sum_{t=1}^T (x_{obs} - \bar{x}_{obs})^2)(\sum_{t=1}^T (y_{mod} - \bar{y}_{mod})^2)}} \right]^2 \quad (5)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{x_{obs,max} - x_{obs,min}} \quad (6)$$

## تولید سناریو و شبیه‌سازی

پس از ارزیابی مدل، از ضرایب معادله‌ای که در مرحله واسنجی تعیین شده‌اند برای تولید سناریو و شبیه‌سازی آینده استفاده می‌شود. در این مرحله برای تولید داده از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بزرگ‌مقیاس یا مدل CanESM2 استفاده می‌شود. همان‌طور که اشاره شد، مدل CanESM2 دارای سه سناریو است: RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5. در این مرحله، داده‌های روزانه بارندگی، دما، و حداکثر سرعت باد توسط این سه سناریو برای دوره ۲۰۰۶-۲۱۰۰ شبیه‌سازی می‌شود.

## یافته‌های پژوهش

### تعیین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده مشاهداتی

با توجه به اینکه مدل‌سازی توسط مدل تغییر اقلیم به دوره آماری بلندمدت نیاز دارد، فقط ایستگاه سینوپتیک یزد (۱۹۶۱-۲۰۱۵) در استان دارای دوره آماری قابل قبول برای ورود به مدل SDSM است. پس از بررسی و کنترل کیفیت داده‌های مشاهداتی، متغیرهای پیش‌بینی‌کننده NCEP، که دارای بیشترین همبستگی با هریک از داده‌های مشاهداتی بودند، انتخاب شدند. تعداد متغیرهای همبسته NCEP با داده‌های مشاهداتی به طول دوره آماری و نوع فرایند (شرطی و غیرشرطی) بستگی دارد. بدین صورت که هرچه طول دوره آماری بلندتر و متغیر پیوسته (فرایند غیرشرطی) باشد، تعداد متغیرهای همبسته کمتر می‌شود و فرایند مدل‌سازی با دقت بیشتری انجام خواهد شد. بر این اساس، تعداد متغیرهای NCEP برای پارامتر دما به عنوان یک متغیر پیوسته نسبت به بارندگی و سرعت باد، که به دلیل دارا بودن مقادیر صفر



متغیری گسسته محسوب می‌شوند، کمتر است (جدول ۲). در جدول ۲ متغیرهای پیش‌بینی‌کننده جهت مدل‌سازی برای هریک از پارامترهای اقلیمی ایستگاه مطالعاتی درج شده است.

جدول ۲. متغیرهای پیش‌بینی‌کننده NCEP در ایستگاه یزد

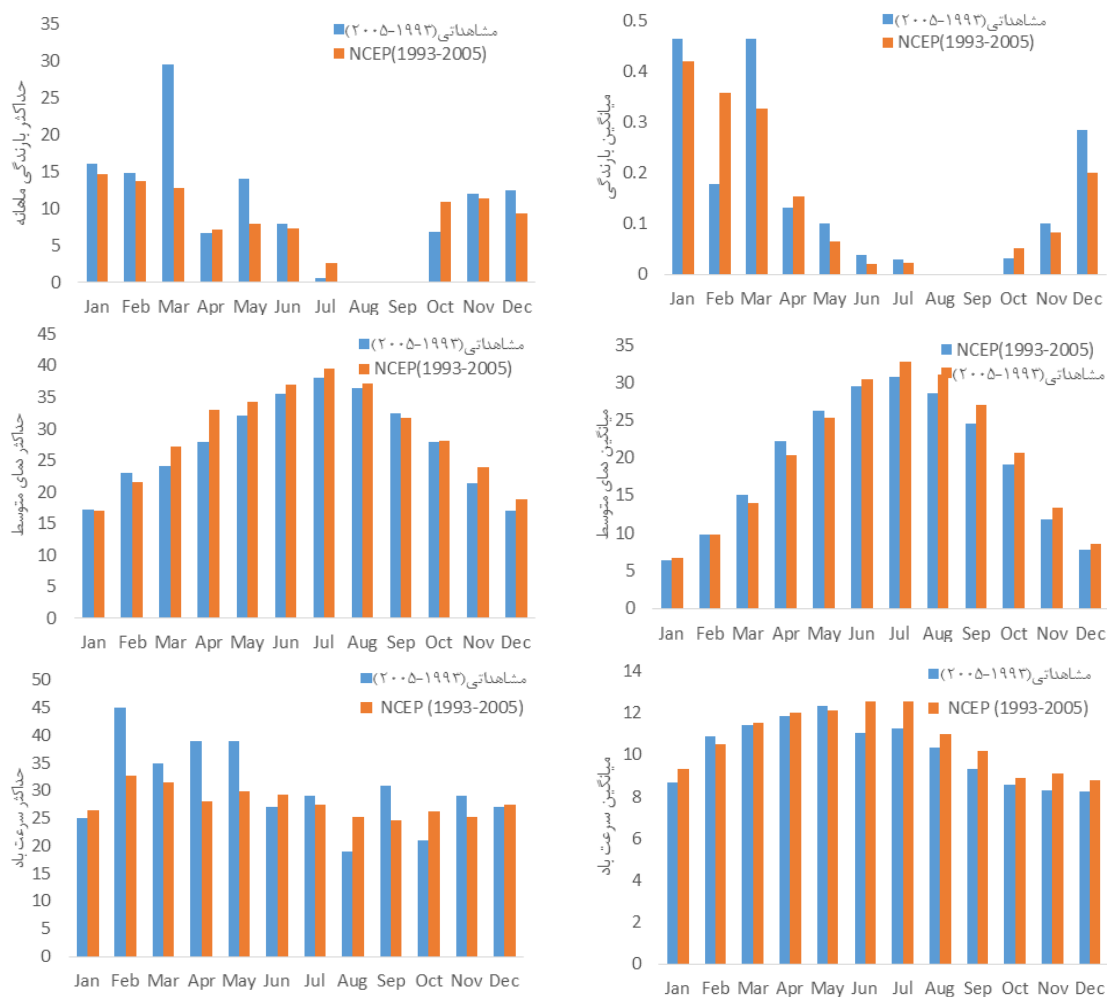
داده‌های مشاهداتی	متغیر NCEP	ضریب همبستگی	سطح معنی‌داری
بارندگی	ncepp500gl	۰٫۲۱	۰٫۰۴
	ncepprcp	۰٫۲۳	۰٫۰۴
	nceps850gl	۰٫۱۵	۰٫۰۵
دما	ncepshumgl	۰٫۱۸	۰٫۰۵
	ncepptempgl	۰٫۹۶	۰٫۰۰۰
	ncepmslpgl	-۰٫۲۷	۰٫۰۳۵
۳ باد	ncepp1-fgl	۰٫۳۸	۰٫۰۳
	ncepp1-ugl	۰٫۱۵	۰٫۰۵
	ncepp5-vgl	۰٫۲۶	۰٫۰۴
	ncepp500gl	-۰٫۰۲	۰٫۰۴۵
	ncepp8-fgl	۰٫۳۳	۰٫۰۳۴
	ncepp850-gl	-۰٫۰۳	۰٫۰۳۱
nceps500gl	۰٫۲۲	۰٫۰۴	

### واسنجی و صحت‌سنجی مدل

واسنجی مدل با استفاده از ۷۰ درصد داده‌های مشاهداتی در دوره آماری ۱۹۶۱ - ۱۹۹۲ به منظور تعیین ضرایب معادله جهت مدل‌سازی برای داده‌های بارندگی، دما، و سرعت باد انجام گرفت. ضرایب به‌دست‌آمده در مرحله واسنجی برای ۳۰ درصد باقی‌مانده داده‌ها (۱۹۹۳ - ۲۰۰۵) جهت صحت‌سنجی مدل استفاده شد. در این مرحله جهت افزایش دقت مدل مقادیر مختلف فاکتورهای تورم واریانس برای هر سه پارامتر (بارندگی، دما، و سرعت باد) و تصحیح اریبی برای بارندگی و سرعت باد انتخاب شد؛ بر اساس نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل، مناسب‌ترین مقدار برای هر فاکتور براساس مقایسه‌های آماری تعیین شد. در جدول ۳ مقادیر فاکتورهای تورم واریانس و تصحیح اریبی برای پارامترهای اقلیمی ایستگاه مطالعاتی ارائه شده است. در شکل ۲ کارایی مدل SDSM بر اساس مقایسه نتایج حاصل از صحت‌سنجی و داده‌های مشاهداتی در دوره آماری ۱۹۹۳ - ۲۰۰۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، کارایی مدل در ریزمقیاس‌نمایی دمای متوسط در مقایسه با بارندگی و سرعت باد بالاتر است. دلیل این امر پیوسته‌بودن پارامتر دما و فقدان مقادیر صفر است.

جدول ۳. مقادیر تورم واریانس و تصحیح اریبی در ایستگاه محدوده مطالعاتی

ایستگاه	بارندگی		سرعت باد		دما
	تصحیح اریبی	تورم واریانس	تصحیح اریبی	تورم واریانس	تورم واریانس
یزد	۱	۱۰	۱	۱۰	۶



شکل ۲. ارزیابی کارایی مدل SDSM در مرحله صحت‌سنجی داده‌های بارندگی (mm)، دمای متوسط (C)، و حداکثر سرعت باد در دوره ۱۹۹۳-۲۰۰۵ (m/s)

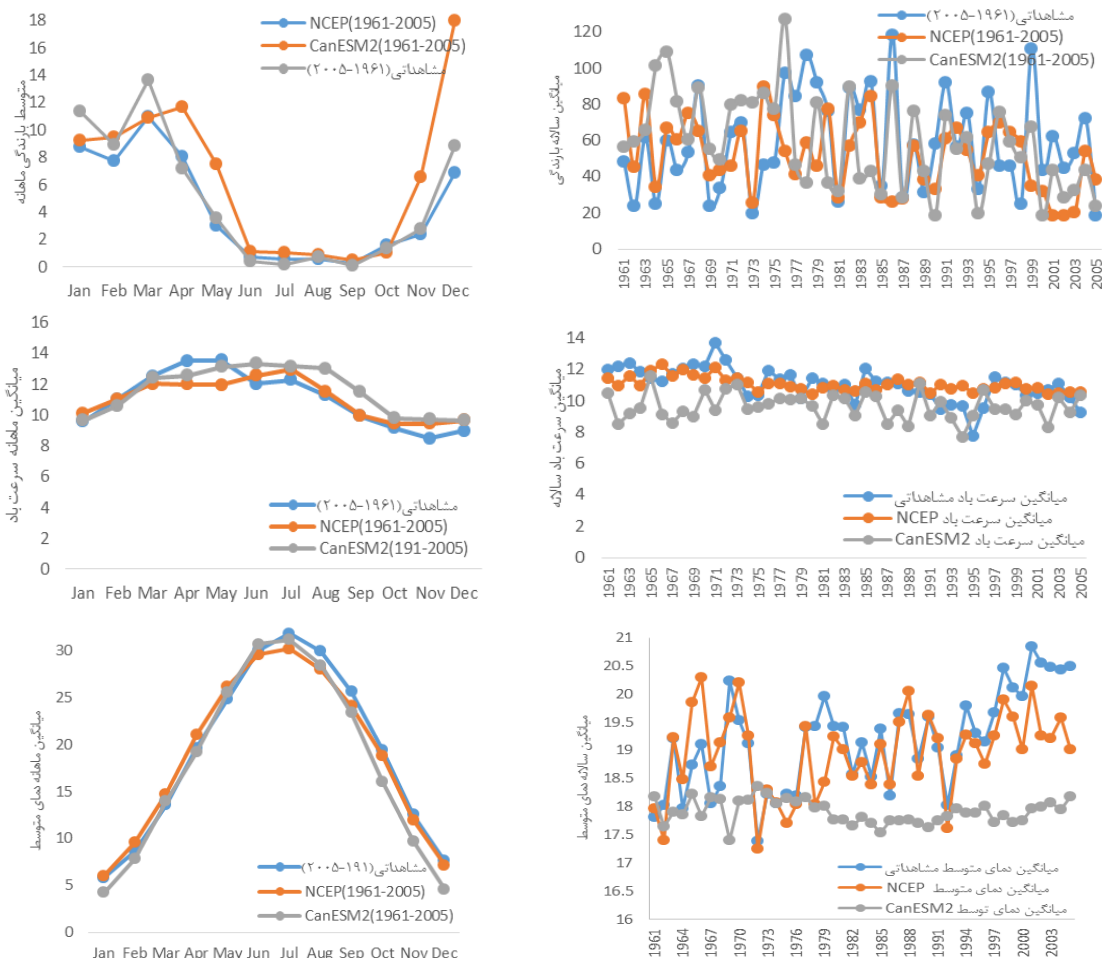
## ارزیابی کارایی و عدم قطعیت مدل

معیارهای آماری ضریب ناش-ساتکلیف، مجذور مربعات خطای نرمال‌شده، ضریب تبیین، درصد اریبی، و جذر نسبت استاندارد برای ارزیابی مقادیر ریزمقیاس‌نمایی‌شده پارامترهای بارندگی، دمای متوسط، و سرعت باد حداکثر توسط متغیرهای پیش‌بینی‌کننده مشاهداتی (NCEP) و بزرگ‌مقیاس (مدل CanESM2) در دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۰۵ محاسبه شد (جدول ۴). نتایج حاصل نشان داد مقادیر ضریب ناش-ساتکلیف، مجذور مربعات خطای نرمال‌شده، ضریب تبیین، درصد اریبی، جذر نسبت استاندارد، و ضریب همبستگی پیرسون برای دمای متوسط به ترتیب ۰٫۰۹۶، ۰٫۰۰۴، ۰٫۰۹۴، ۱٫۶۳، ۰٫۱۸، و ۰٫۹۷ بر اساس داده‌های ریزمقیاس‌شده توسط متغیر پیش‌بینی‌کننده NCEP و ۰٫۰۷، ۰٫۸۸، ۰٫۱۸، ۰٫۶۸، ۰٫۳۳، و ۰٫۹۴ بر اساس داده‌های ریزمقیاس‌شده توسط متغیر پیش‌بینی‌کننده بزرگ‌مقیاس (مدل CanESM2) بوده، که از مقدار قابل قبولی برخوردار است. معیارهای ارزیابی بارندگی و سرعت باد نسبت به دمای متوسط از مقادیر کمتری برخوردار است؛ دلیل آن را می‌توان نرمال‌نبودن داده بارندگی و سرعت باد به سبب وجود مقادیر صفر ذکر کرد (جدول ۴). مقادیر ضریب تبیین نشان می‌دهد فقط ۲۵ درصد واریانس داده‌های بارندگی توسط متغیرهای پیش‌بینی‌کننده مشاهداتی و ۲۱ درصد واریانس داده‌ها توسط متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بزرگ‌مقیاس تبیین می‌شود. همین‌طور در مورد داده‌های سرعت باد حداکثر فقط ۴۱ درصد واریانس داده‌های سرعت باد توسط متغیرهای

پیش‌بینی‌کننده مشاهداتی و ۲۹ درصد توسط متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بزرگ مقیاس تبیین می‌شوند. همان‌طور که از نتایج حاصل مشخص است، کارایی مدل برای داده سرعت باد نسبت به بارندگی بالاتر است؛ دلیل آن می‌تواند وجود مقادیر صفر کمتر در سری باشد. به‌طور کلی، بر اساس معیارهای ارزیابی، مدل CanESM2 در منطقه مطالعاتی برای شبیه‌سازی دمای متوسط مناسب است؛ در حالی که برای شبیه‌سازی بارندگی و سرعت باد کارایی مناسبی ندارد. شکل ۳ نیز مقادیر مدل‌سازی شده و مشاهداتی برای هر سه پارامتر بارندگی، سرعت حداکثر باد، و دمای متوسط را به ترتیب نشان می‌دهد.

جدول ۴. ارزیابی مقادیر ریزمقیاس شده توسط متغیرهای پیش‌بینی‌کننده NCEP و مدل CanESM2 در دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۰۵

ضریب همبستگی پیرسون	RSR	PBIAS	R <sup>2</sup>	NRMSE	NSE	پیش‌بینی‌کننده	پارامتر
۰٫۵	۰٫۸۹	۱۲٫۷۵	۰٫۲۵	۰٫۱۶	۰٫۲	NCEP	بارندگی
۰٫۴۶	۰٫۹۷	۰٫۴۵	۰٫۲۱	۰٫۱۸	۰٫۰۵	CanESM2	
۰٫۹۷	۰٫۱۸	۱٫۶۳	۰٫۹۴	۰٫۰۴	۰٫۹۶	NCEP	دمای متوسط
۰٫۹۴	۰٫۳۳	۶٫۸	۰٫۸۸	۰٫۰۷	۰٫۸۸	CanESM2	
۰٫۶۴	۰٫۷۷	-۰٫۳۲	۰٫۴۱	۰٫۰۲	۰٫۴۱	NCEP	سرعت باد حداکثر
۰٫۵۴	۰٫۷۷	-۴٫۶	۰٫۲۹	۰٫۰۳	۰٫۲۰	CanESM2	



شکل ۳. مقایسه مقادیر ریزمقیاس شده توسط متغیرهای پیش‌بینی‌کننده (NCEP و مدل CanESM2) و داده‌های مشاهداتی بارندگی، سرعت باد، و دمای متوسط در دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۰۵

همان‌طور که از مقایسه مقادیر مدل‌سازی شده توسط متغیرهای پیش‌بینی‌کننده مشاهداتی و بزرگ‌مقیاس مشخص است (جدول ۴، شکل ۳)، داده‌های مشاهداتی و داده‌های حاصل از ریزمقیاس‌نمایی توسط متغیرهای NCEP همبستگی بیشتری نسبت به داده‌های حاصل از مدل گردش کلی جو دارند که دلیل آن بزرگ‌تر بودن تفکیک مکانی متغیرهای مدل است.

### تولید سناریو و شبیه‌سازی

پس از مدل‌سازی پارامترهای اقلیمی در دوره آماری پایه (۱۹۶۱-۲۰۰۵) و ارزیابی کارایی مدل، به شبیه‌سازی هر یک از پارامترها در دوره آینده (۲۰۰۶-۲۱۰۰) تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، و RCP8.5 اقدام شد. جهت بررسی روند تغییرات پارامترهای اقلیمی در دوره آینده نسبت به دوره پایه آزمون روند من-کنندال برای سری‌های حاصل از مدل CanESM2 و مشاهداتی انجام شد. بر اساس نتایج آزمون من-کنندال، داده‌های بارندگی مشاهداتی و مدل‌سازی شده تحت دو سناریو RCP2.6 و RCP8.5 دارای روند معنی‌داری نیست. درحالی‌که داده‌های تولیدشده توسط سناریوی RCP4.5 روند معنی‌دار کاهشی را نشان می‌دهد. دلیل اختلاف نتایج حاصل از مدل‌سازی سناریوهای RCP برای بارندگی را می‌توان ماهیت مدل‌های سری CMIP5 بیان کرد (لیو و همکاران، ۲۰۱۴؛ مهران و همکاران، ۲۰۱۴). نتایج آزمون من-کنندال دمای متوسط نشان داد سری‌های مدل‌سازی شده توسط سناریوهای RCP و همچنین داده‌های مشاهداتی از روند افزایشی معنی‌داری برخوردارند. این روند افزایشی دما در دوره پایه نسبت به آینده نشان از وجود فرایند تغییر اقلیم در منطقه مطالعاتی است. همچنین، آزمون روند سرعت باد حداکثر نشان داد داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده توسط سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 دارای روند کاهشی معنی‌دار است؛ درحالی‌که داده‌های تولیدشده بر اساس سناریوی RCP8.5 دارای روند افزایشی است. جدول ۵ نتایج آزمون من-کنندال را برای هر سه پارامتر اقلیمی در دوره مشاهداتی و آینده نشان می‌دهد. همچنین، درصد تغییرات میانگین سالانه سری‌های مدل‌سازی شده تحت سناریوهای RCP نسبت به مقادیر مشاهداتی تعیین شد. بر این اساس، میانگین بارندگی طبق سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب ۶۲/۲۸ و ۶۹ میلی‌متر خواهد بود که نسبت به دوره مشاهداتی به ترتیب ۹/۱۸ و ۱۷/۲ درصد افزایش دارد. میانگین بارندگی بر اساس سناریوی RCP 4.5، ۵۸/۳۹ میلی‌متر است که نسبت به دوره مشاهداتی ۰/۸۱ درصد کاهش خواهد داشت. میانگین سالانه دمای متوسط طبق سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، و RCP8.5 به ترتیب ۲۰/۵۹، ۲۱/۰۳ و ۲۲/۱۰ درجه سانتی‌گراد خواهد بود که نسبت به دوره مشاهداتی به ترتیب ۴/۵، ۴/۷ و ۱۲/۸ درصد افزایش دارد. همچنین، میانگین سرعت باد مدل‌سازی شده توسط سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، و RCP8.5 به ترتیب ۱۱/۵۷، ۱۱/۵۱، و ۱۱/۶۱ متر بر ثانیه است که نسبت به دوره مشاهداتی ۴/۹، ۴/۴، و ۵/۲۵ درصد افزایش خواهد داشت (جدول ۶).

جدول ۵. نتایج آزمون روند من-کنندال داده‌های مشاهداتی (۱۹۶۱-۲۰۰۵) و مدل‌سازی شده تحت سناریوهای RCP (۲۰۰۶-۲۱۰۰)

P-value	آماره Z	پارامتر اقلیمی
۰/۳۷	۰/۳۲	مشاهداتی
۰/۴۲	۰/۱۹	RCP2.6
۰/۰۲	-۱/۹۲	RCP4.5
۰/۸۳	۰/۲۱	RCP8.5
۰/۰۰۶	-۴/۸	مشاهداتی
۰/۰۱۸	-۲/۰۹	RCP2.6
۰/۲۳	-۱/۷	RCP4.5
۰/۰۱	۲/۰۹	RCP8.5
۰/۰۰۵	۴/۶۴	مشاهداتی
۰/۰۰۴	۲/۶	RCP2.6
۰/۰۰۶	۹/۵	RCP4.5
۰/۰۰۲	۱۱/۸۶	RCP8.5

جدول ۶. درصد تغییرات پارامترهای بارندگی، دما، و سرعت باد در دوره آینده نسبت به دوره تاریخی

پارامتر اقلیمی	میانگین سالانه	درصد تغییرات
مشاهداتی	۵۸٫۸۷	۰
بارندگی	RCP2.6	۹٫۱۸
	RCP4.5	-۰٫۸۱
	RCP8.5	۱۷٫۲
مشاهداتی	۱۱٫۰۲	۰
سرعت باد	RCP2.6	۴٫۹
	RCP4.5	۴٫۴۴
	RCP8.5	۵٫۳۵
مشاهداتی	۱۹٫۷	۰
دمای متوسط	RCP2.6	۴٫۵
	RCP4.5	۶٫۷
	RCP8.5	۱۲٫۱۸

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه برای بررسی تغییرات پارامترهای اقلیمی در مناطق خشک، که نسبت به تغییر اقلیم حساسیت بیشتری نشان می‌دهند، از مدل گزارش ارزیابی پنجم استفاده شد. مدل‌های گزارش پنجم از وضوح بیشتری نسبت به گزارش‌های قبلی برخوردارند. بنابراین، کاربرد این مدل‌ها در مناطق خشک، که نسبت به تغییرات اقلیمی حساسیت بیشتری نشان می‌دهند، ضروری است. بر اساس تعریفی که از تغییر اقلیم توسط IPCC ارائه شده است، منطقه مطالعاتی طبق نتایج به‌دست‌آمده از مدل CanESM2 و ریزمقیاس‌نمایی توسط روش SDSM از این پدیده مستثنا نیست. مدل روند معنی‌دار افزایش دمای متوسط را در دوره آتی تحت سه سناریوی RCP پیش‌بینی کرد که نتایج حاصل با نتایج آقاخان‌افشار و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت دارد. بر این اساس، به طور میانگین، دمای متوسط در منطقه مطالعاتی ۱٫۵۴ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد داشت. طبق سناریوی RCP2.6 دمای متوسط ۴٫۵، طبق سناریوی RCP4.5 دمای متوسط ۶٫۷ و طبق سناریوی RCP8.5 دمای متوسط ۱۲٫۱۸ درصد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد داشت. برخلاف دما، بارندگی دارای الگوی تغییرات معنی‌داری در منطقه مطالعاتی نیست که با نتایج مطالعات آقاخان‌افشار و همکاران (۱۳۹۵) و المزروعی و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت دارد. بر اساس نتایج حاصل در دوره آماری پایه، بارندگی در منطقه از روند خاصی تبعیت نمی‌کند. همچنین، طبق داده‌های مدل‌سازی شده توسط مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 بارندگی در دوره آینده افزایش خواهد داشت. درحالی‌که تحت سناریوی RCP4.5 بارندگی کاهش می‌یابد. به‌طورکلی، بر اساس نتایج حاصل از سناریوهای RCP، میانگین بارندگی در دوره آینده نسبت به پایه ۴٫۸ میلی‌متر افزایش خواهد داشت که با مطالعات آیزن و همکاران (۲۰۰۱) و فری و اسمیت (۲۰۰۳) مطابقت دارد. لذا، نتایج حاصل دور از انتظار نیست. سرعت باد حداکثر بر اساس پیش‌بینی‌های مدل به طور میانگین ۰٫۵۳ متر بر ثانیه نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت؛ به‌طوری‌که تحت سناریوی RCP2.6، ۴٫۹ درصد، طبق سناریوی RCP4.5، ۴٫۴۴ درصد، و طبق سناریوی RCP8.5، ۵٫۳۵ درصد افزایش را نسبت به داده‌های مشاهداتی خواهد داشت. به‌طورکلی، بر اساس تعاریفی که برای هر سناریو توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم ارائه شده، روند تغییرات داده‌های دمای متوسط و سرعت باد از سناریوی RCP2.6 به سمت RCP8.5 افزوده شده است. نتایج ارزیابی کارایی مدل توسط معیارهای آماری نشان داد مدل در پیش‌بینی پارامتر دمای متوسط به دلیل فقدان مقادیر صفر در سری از قابلیت بالایی برخوردار است؛ درحالی‌که در مورد

داده‌های سرعت باد و بارندگی به دلیل وجود مقادیر صفر از قابلیت مناسبی در برخی موارد برخوردار نیست. نتایج به‌دست‌آمده در این بخش با برخی مطالعات انجام‌گرفته در این زمینه مطابقت دارد. بر اساس مطالعه فیسه‌ها و همکاران (۲۰۱۲)، مقدار ضریب تبیین ( $R^2$ ) بین ۰/۱۳ تا ۰/۳ و ۰/۴ تا ۰/۷ به‌ترتیب برای بارندگی و دما به‌دست آمد. همچنین، هاسن و همکاران (۲۰۱۴) مقدار  $R$  را برای بارندگی و دما کمتر از ۰/۳ و ۰/۶ به‌دست آوردند. لیو و همکاران (۲۰۱۱) مقدار  $R^2$  را برای بارندگی و دما به‌ترتیب ۰/۰۷ و ۰/۹ تعیین کردند. بنابراین، در مقایسه با این یافته‌ها، نتایج ارزیابی مدل این مطالعه می‌تواند یک نتیجه آماری صحیح در نظر گرفته شود.

## منابع

- آقاجانی افشار، ا؛ حسن‌زاده، ی؛ بسالت‌پور، ع؛ پوررضا بیلندی، م. (۱۳۹۵). ارزیابی سالیانه مؤلفه‌های اقلیمی حوضه آبخیز کشف‌رود در دوره‌های آتی با استفاده از گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۳(۶): ۲۱۷-۲۳۳.
- احمدوند کهریزی م. و روحانی ح. (۱۳۹۵). تأثیرات حفاظتی تیر اقلیم بر اساس ریزمقیاس‌سازی دمای پیش‌بینی‌شده در قرن ۲۱ (مطالعه موردی: دو ایستگاه آراز کوسه و نوده در استان گلستان)، *اکوهیدرولوژی*، ۳(۶): ۵۹۷-۶۰۹.
- برزگری، ف. و ملکی‌نژاد، ح. (۱۳۹۵). بررسی و مقایسه تغییرات اقلیمی مناطق دشتی و کوهستانی در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۰ (مطالعه موردی: حوضه آبخیز دشت یزد اردکان)، *فیزیک و زمین، ۴۲(۱)*: ۱۷۱-۱۸۲.
- جهان‌بخش اصل، س؛ خورشیددوست، ع؛ عالی‌نژاد، م. و پوراصغر، ف. (۱۳۹۵). تأثیر تغییر اقلیم بر دما و بارش با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی، *هیدروژئومورفولوژی*، ۷: ۱۰۷-۱۲۲.
- صیاحی، ث؛ شهبازی، ع. و خادمی، خ. (۱۳۹۵). پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر رواناب ماهانه حوضه دزآب استفاده از مدل IHACRES، *دوفصل‌نامه علوم مهندسی آب*، ۱۵(۷): ۷-۱۸.
- نگارش، ح؛ فلاح، ح. و خسروی، م. (۱۳۹۰). تجزیه و تحلیل ناهنجاریهای اقلیمی مؤثر بر فرایند بیابان‌زایی در منطقه خضراباد یزد، *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳: ۹۴-۷۱.
- Ahmadvand, M. and Rouhani, H. (2016). Climate change protection effects based on downscaling of the predicted temperature in the 21st century (case study: Araz Koseh and Navadeh in Golestan Province), *Ecohydrology*, 3(4): 597-609.
- Alves, JMB.; Vasconcelos Junior, FC.; Chaves, RR.; Silva, EM.; Servain, J.; Costa, AA.; Sombra, SS. and Barbosa, ACB. (2016). Evaluation of the AR4 CMIP3 and the AR5 CMIP5 model and projections for precipitation in Northeast Brazil, *Frontiers in Earth Science*, 4(44): 1-22.
- Aizen, E.M.; Aizen, V.B.; Melack, J.M.; Nakamura, T. and Ohta, T. (2001). Precipitation and atmospheric circulation patterns at mid-latitudes of Asia, *International Journal of Climatology*, 21(5): 535-556.
- Almazroui, M.; Nazrul Islam, M., Saeed, F.; Alkhalaf, A. and Dambul, R. (2017). Assessing the robustness and uncertainties of projected changes in temperature and precipitation in AR5 Global Climate Models over the Arabian Peninsula, *Atmospheric Research*, 194: 202-213.
- Aghakhani Afshar, A.; Hassanzadeh, Y.; Besaltpour, A. and Pourreza-Bilondi, M. (2017). Annual assessment of Kashafrood watershed basin climate components in future periods by using fifth report of intergovernmental panel on climate change, *Water and Soil Conservation*, 6: 217-233.
- Barzegari, F. and Malekinejad, H. (2016). Prediction and comparison of Climate Changes in Mountainous and Plain Regions During 2010-2030 (Case Study: Yazd- Ardakan Watershed), *Earth and Space Physics*, 42(1): 171-182.
- Dastorani, M.T.; Massah Bavani, A.R.; Poormohammadi, S. and Rahimian, M.H. (2011). Assessment of potential climate change impacts on drought indicators (Case study: Yazd station, Central Iran), *Desert*, 1: 159-167.
- Dibike, Y.B. and Coulibaly, P. (2005). Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: Comparison of downscaling methods and hydrologic models, *Hydrology*, 307(1-4): 145-163.
- Frey, K.E. and Smith, L.C. (2003). Recent temperature and precipitation increases in West Siberia and their association with the Arctic Oscillation. *Polar Research*, 22 (2): 287-300.
- Fiseha, B.M.; Melesse, A.M.; Romano, E.; Volpi, E. and Fiori, A. (2012). Statistical Downscaling of

- Precipitation and Temperature for the Upper Tiber Basin in Central Italy, *International Journal of Water Sciences*, 1(3): 1-14.
- Feng, S.; Hu, Q.; Huang, W.; Ho, C.H.; Li, R. and Tang, Z. (2014). Projected climate regime shift under future global warming from multi-model, multi-scenario CMIP5 simulations, *Global and Planetary Change*, 112: 41-52.
- Gahanbakhsh Asl, S.; Khorshid Dost, A.; Ali Nejad, M. and Poor Asghar, F. (2017). The Impact of Climate Change on Temperature and Precipitation Considering the Uncertainty of Models and Climate Scenario, *Hydrogeomorphology*, 7: 107-122.
- Gagnon, S.; Singh, B.; Rousselle, J. and Roy, L. (2005) An application of the statistical downscaling model (SDSM) to simulate climatic data for streamflow modelling in Québec, *Canadian Water Resources*, 30(4): 297-314.
- Gebremeskel, S.; Liu, Y.B.; de Smedt, F.; Hoffmann, L. and Pfister, L. (2005). Analysing the effect of climate changes on streamflow using statistically downscaled GCM scenarios, *International Journal River Basin Management*, 2(4): 271-280.
- Hassan, Z.; Shamsudin, S. and Harun, S. (2014). Application of SDSM and LARS-WG for simulating and downscaling of rainfall and temperature, *Theoretical and Applied Climatology*, 116(1-2): 243-257.
- Huang, J.; Zhang, J.; Zhang, Z.; Xu, C.; Wang, B. and Yao, J. (2011). Estimation of future precipitation change in the Yangtze River basin by using statistical downscaling method, *Stochastic Environmental Research Risk Assessment*, 25(6):781-792.
- Hay, L.E.; Wilby, R.L. and Leavesley, G.H. (2000). A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States *American Water Resources Association*, 36(2): 387-397.
- IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis, *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (2014). Summary for policymakers, In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Astrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., and White, L.L. (Eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA p. 1-32.
- Kumar Bal, P.; Ramachandran, A.; Geetha, R.; Bhaskaran, B.; Thirumurugan, P.; Indumathi, J. and Jayanthi, N. (2016). Climate change projections for Tamil Nadu, India: deriving high-resolution climate data by a downscaling approach using PRECIS, *Theoretical Applied Climatology*, 123: 523-535.
- Kharin, V.V.; Zwiers, F.W.; Zhang, X. and Wehner, M. (2013). Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble, *Climate Change*, 119: 345-357.
- Liu, L.; Liu, Z.; Ren, X.; Fischer, T. and Xu, Y. (2011). Hydrological impacts of climate change in the Yellow River Basin for the 21st century using hydrological model and statistical downscaling model, *Quaternary International*, 244(2): 211-220.
- Liu, Z.; Mehran, A.; Phillips, T.J.; Aghakouchak, A.; Res, C.; Liu, Z.; Mehran, A.; Phillips, T.J. and Aghakouchak, A. (2014). Seasonal and regional biases in CMIP5 precipitation simulations, *Climate Research*, 60(1): 35-50.
- Miao, C.Y.; Duan, Q.Y.; Sun, Q.H. and Li, J.D. (2013). Evaluation and application of Bayesian multi-model estimation in temperature simulations, *Progress in Physical Geograph*, 37: 727-744.
- Mahmood, R. and Babel, S.M. (2012). Evaluation of SDSM developed by annual and monthly sub-models for downscaling temperature and precipitation in the Jhelum basin, Pakistan and India,



*Theoretical and Applied Climatology*, PP. 1-18.

- Mehran, A.; Aghakouchak, A. and Phillips, T.J. (2014). Evaluation of CMIP5 continental precipitation simulations relative to satellite-based gauge-adjusted observations, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(4): 1695-1707.
- Moss, R.H.; Edmonds, J.A.; Hibbard, K.A.; Manning, M.R.; Rose, S.K.; Van Vuuren, D.P.; Carter, T.R.; Emori, S.; Kainuma, M.; Kram, T.; Meehl, G.A.; Mitchell, J.F.; Nalichenovic, N.; Riahi, K.; Smith, S.J.; Stouffer, R.J.; Thomson, A.M.; Weyant, J.P. and Wilbanks, T.J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Journal of Nature*, 463: 747-756.
- Negaresh, H. and Khosravi, M. (2011). The Analysis of Climatological Abnormalities Influencing on Desertification Process in Khezer Abad Region of Yazd, *Geography and Environmental Planning*, 3: 71-79.
- Nourein Mohammed, I.; Beverley, A. and Wemple, B. (2015). The use of CMIP5 data to simulate climate change impacts on flow regime within the Lake Champlain Basin, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3: 160-186.
- Pattnayak, K.C.; Kar, S.C.; Dalal, M. and Pattnayak, R. K. (2017). Projections of annual rainfall and surface temperature from CMIP5 models over the BIMSTEC countries, *Global and Planetary Change*, 152: 152-166.
- Rui, Li and Geng, S. (2013). Impacts of climate change on agriculture and adaptive strategies in China, *Integrative Agriculture*, 12(8): 1402-1408
- Sayahi, S.; Shahbazi, A. and Khademi, KH. (2016). Prediction of the effect of climate change on the monthly runoff of the basin Dez using IHACRES, *Journal of Water Science Engineering*, 15(7): 7-18.
- Tabari, H.; Marofi, S.; Aeni, A.; Hosseinzadeh Talaeae, P. and Mohammadi, K. (2011). Trend analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran, *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(2):128-136.
- Tabari, H.; Abghari, H. and Hosseinzadeh Talaeae, P. (2013). Impact of the North Atlantic Oscillation on stream flow in Western Iran, *Hydrol. Process*. DOI: 10.1002/hyp.9960.
- Thomson, A.M.; Calvin, K.V.; Smith, S.J.; Kyle, G.P.; Volke, A.; Patel, P.; Delgado-Arias, S.; Bond-Lamberty, B.; Wise, M.A.; Clarke, L.E. and Edmonds, J.A. (2011). RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100, *Climatic Change*, 109(1): 77-94.
- Van Vuuren, D.P.; Edmonds, J.; Kainuma, M.; Riahi, K.; Thomson, A.; Hibbard, K.; Hurtt, G.C.; Kram, T.; Krey, V.; Lamarque, J.F.; Masui, T.; Meinshausen, M.; Nakicenovic, N.; Smith, S.J. and Rose, S.K. (2011). The representative concentration pathways: An overview, *Climatic Change*, 109(1): 5-31.
- Wilby, R.L.; Dawson, C.W. and Barrow, E.M. (2002). SDSM - A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, *Environmental Modelling & Software*, 17(2): 147-159.
- Wetterhall, FA.; Bárdossy, D.; Chen, SH. and Xu, C-Y. (2006). Daily precipitation-downscaling techniques in three Chinese regions, *Water Resources Research* 42(aa):W11423.
- Wilby, RL.; Whitehead, PG.; Wade, AJ.; Butterfield, D.; Davis, RJ. and Watts, G. (2006). Integrated modelling of climate change impacts on water resources and quality in a lowland catchment: River Kennet, *UK. Hydrology*, 330(1-2): 204-220.
- Xu, C.H. and Xu, Y. (2012). The Projection of Temperature and Precipitation over China under RCP Scenarios using a CMIP5 Multi-Model Ensemble, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 5(6): 527-533.