

## شبیه‌سازی اثر گرمایش جهانی بر میانگین و رخدادهای حدی برخی متغیرهای هیدرواقليمی در حوضه ی آبریز شانديز

الهام فهیمی نژاد<sup>۱</sup>، دانشجوی دکتری آب و هواشناسی (گرایش تغییرات آب و هوایی)، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

محمد باعقیده، دانشیار گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.  
ایمان باباییان، استادیار اقلیم‌شناسی، گروه تغییر اقلیم، پژوهشکده اقلیم‌شناسی مشهد، مشهد، ایران.  
علیرضا انتظاری، استادیار گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری، مشهد، ایران.

پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۱۰/۲۲

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۲۱

### چکیده

دو مشخصه بارز اقلیم آینده تغییر در میانگین و مقادیر حدی متغیرهای هیدرواقليمی می‌باشد، از این رو شبیه‌سازی رفتار اقلیم حوضه آبریز شانديز که یک منطقه گردشگری مهم در شمال‌شرق کشور است در دهه‌های آینده نقش مهمی در شناخت وضعیت اقلیم و آسیب‌پذیری احتمالی این منطقه از تغییر اقلیم دارد. هدف از این پژوهش شناسایی مقادیر حدی دما، بارش و تغییرات رواناب حوضه آبریز شانديز و مقایسه شرایط پایه و آینده است. برای نیل به این هدف از آمار روزانه دما و بارش روزانه ۳۰ سال آماری (از ۱۹۹۰-۱۹۶۱) ایستگاه سینوپتیک مشهد استفاده شده است. همچنین برای پیش‌بینی بارش، دمای حداقل و حداکثر در آینده از داده‌های مدل گردش کلی CanESM<sup>۲</sup> تحت سه سناریوی انتشار RCP<sup>۴,۵</sup>، RCP<sup>۲,۶</sup> و RCP<sup>۸,۵</sup> برای دوره ۲۰۴۱-۲۱۰۰ استفاده شده است. برای ریزگردانی خروجی مدل CanESM<sup>۲</sup> از روش آماری SDSM و برای استخراج مقادیر حدی بارش از نرم افزار RCLimDex استفاده شده است. نتایج نشان داد که در دوره آینده نه تنها در مقدار بارش ایستگاه مشهد بلکه در الگوی بارش نیز تغییراتی رخ خواهد داد. بر اساس نتایج بدست آمده، بارش سالانه در دهه‌های ۲۰۴۱-۲۰۷۰، بین ۳۷ تا ۵۴ درصد نسبت به دوره دیدبانی افزایش می‌یابد، و میزان افزایش بارش دهه‌های ۲۱۰۰-۲۰۷۱ بین ۵۲ تا ۶۶ درصد افزایش می‌یابد. تعداد رخداد بارش‌های روزانه با شدت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلیمتر در روز، بارش‌های با آستانه‌های صدک ۹۵ و ۹۹ دوره‌های آتی در تمامی فصول ایستگاه مشهد نسبت به دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۱۹۶۱) افزایش خواهند یافت. در دهه‌های آینده میانگین دمای حداکثر مشهد نسبت به دوره مشاهداتی بین ۰/۴ - ۰/۶ درجه سلسیوس و میانگین دمای حداقل بین ۱/۵ تا ۴/۲ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. از مدل SWAT جهت ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر میزان رواناب حوضه استفاده گردید. بدین منظور ابتدا این مدل با استفاده از دبی ایستگاه هیدرومتری شانديز برای دوره ۲۰۱۲-۲۰۰۳، واسنجی و اعتبارسنجی شد که مقادیر R<sup>۲</sup> به ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۵۲ بدست آمد. در ادامه با بکارگیری داده‌های ریزمقیاس شده مدل CanESM<sup>۲</sup> در مدل SWAT، تغییرات رواناب خروجی از حوضه طی دوره‌های ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ شبیه‌سازی گردید. اعمال نتایج تغییرات بارش و دمای حوضه در دهه‌های آینده بر مدل SWAT نشان داد که دبی حوضه شانديز در دهه‌های آینده بین ۲ تا ۱۰۴ درصد افزایش خواهد یافت.

واژه‌های کلیدی: گرمایش جهانی، مخاطرات هیدرواقليمی، مدل GCM، SDSM، SWAT، حوضه آبریز شانديز.

## مقدمه

غالب جوامع علمی فرایندهای محیطی را که در محیط زندگی انسان به صورت متخاصم رخ می دهد و انسان ها کنترل اندکی بر آن دارند، با عنوان مخاطرات محیطی مورد بحث قرار می دهند (Bry, ۲۰۰۵). بخش قابل توجهی از مخاطرات محیطی را رویدادهای حدی آب و هوایی تشکیل می دهند. پدیده های حدی اقلیمی از قبیل، بارش شدید (سیل ها)، بادهای تند (طوفان ها)، دماهای بالا (امواج گرمایی) و غیره به سبب ندرت در وقوع و عدم سازگاری جوامع بشری و اکوسیستم با آن ها خسارات زیادی را موجب می شوند (Diaz and Murnane, ۲۰۰۸). افزایش رخدادهای حدی یکی از شش چالش بزرگ شناسایی شده توسط برنامه جهانی تحقیقات اقلیمی (WCRP) میباشد. نتایج بدست آمده توسط منابع مختلف نشان میدهد رخدادهای حدی اقلیمی در طول دهه های اخیر افزایش معنی دار داشته اند که این وضعیت موجب افزایش مخاطرات اقلیمی در دهه های آینده می گردد (Ha and Yun, ۲۰۱۲; IPCC, ۲۰۱۳; Seneviratne et.al, ۲۰۱۴; Fan and Xiong, ۲۰۱۵). تغییرات رخدادهای حدی اقلیمی قطعیت بیشتری نسبت به تغییرات در میانگین های فصلی دارند و افزایش وقوع رخدادهای حدی بر زیرساختهای اجتماعی و اقتصادی از قبیل کشاورزی، سلامت، منابع آب، خدمات عمومی تاثیر زیادی می گذارد (Easterling, ۲۰۰۰). در سالهای ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۱، برنامه تحقیقات اقلیمی (WCRP/CLIVAR) و کارگروه آشکارسازی تغییراقلیم<sup>۱</sup> (WGCCD)، با همکاری سازمان جهانی هواشناسی<sup>۲</sup> (WMO) کارگروهی با هدف تحقیق درباره شیوه های تولید شاخص های حدی اقلیمی با مقیاس روزانه، محدودیت ها و کاربردهای مختلف آنها در بخش های مختلف در سطوح جهان و محلی تشکیل گردید. نتایج کارگروه تخصصی ابتدا منجر به معرفی و توسعه شاخص های حدی متعددی با ویژگیهای متفاوتی از قبیل فراوانی روزانه از قبیل فروانی روزانه (روزهای همراه با بارش سنگین)، صدک ها (صدک ۹۰ ام حداقل دما) و از داده های روزانه دما و بارش گردید، سپس با تحلیل اثرات تغییراقلیم در مناطق مختلف جهان مشخص گردید مناطق مختلف از قبیل آمریکای شمالی، استرالیا، اروپا و .... روندهای متفاوتی را تجربه می کنند (Brunetti et al, ۲۰۰۴; Klein et al, ۲۰۰۲; Zhang, ۲۰۰۶; Folland et al, ۲۰۰۲; Alexander et al, ۲۰۰۶; Beniston et al, ۲۰۰۷; Nandintsetseg et al, ۲۰۰۷; Meehl et al, ۲۰۰۰; Liu et al, ۲۰۰۸, Bell et al, ۲۰۰۴; Karl and Trenberth, ۲۰۰۳). شکایا و همکاران، ۱۳۸۸. رحیم زاده و همکاران). هیات بین الدول تغییراقلیم (IPCC) سناریوهای مختلفی را برای پیش یابی چگونگی ادامه روند افزایش گازهای گلخانه ای ارائه کرده است که بر مبنای سناریوهای مختلف، تا پایان قرن ۲۱ میلادی غلظت دی اکسید کربن دو برابر خواهد شد (Grubler, ۲۰۰۷; Hoogwijk, ۲۰۰۵). در حال حاضر مدل های گردش عمومی (GCM)، دقیق ترین ابزار برای کمی کردن اثر تغییراقلیم بر روی پارامترهای هواشناسی هستند (IPCC, ۲۰۰۷). هدف این مدل ها شبیه سازی همه ویژگی های سه بعدی آب و هوا می باشد (Hoogwijk, ۲۰۰۹). مزیت GCMs این است که می توانند اطلاعات منطقه ای را برای همه مناطق جهان ارائه دهند. مدل های گردش عمومی هیچ گاه نمی توانند مستقیماً برای پیش بینی های منطقه ای استفاده شوند. آن ها نیازمند ریزمقیاس گردانی هستند تا با اعمال رفتارهای محلی در آن ها پیش بینی هایشان در مقیاس محلی بهبود یابند. خروجی های مدل های گردش عمومی را می توان به دو صورت دینامیک و آماری ریزمقیاس کرد (Murphy, ۱۹۹۹). در تهیه گزارش پنجم که به تدریج از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴ منتشر شد، از برون داد مدل های سری CMIP<sup>۵</sup> استفاده گردید. از مدل های سری CMIP<sup>۴</sup> در هیچ یک از گزارش های IPCC

۱. World Meteorological Organization

استفاده نشد، که انتخاب این سری از مدل ها هم به عهده برنامه جهانی پژوهش های اقلیمی سازمان جهانی هواشناسی-یعنی-WCRP بوده است. این مدل ها از سناریوهای جدید RCP، شامل RCP های ۲.۶، ۴.۵، ۶ و ۸.۵ استفاده می کنند. تفاوت عمده سناریوهای RCP و SRES در این است که سناریوهای RCP خط سیر توازن واداشت تابشی ناشی از افزایش گازهای گلخانه ای را تا سال ۲۱۰۰ بر حسب وات بر متر مربع مشخص میکند، مثلا در سناریوی RCP۸.۵، توازن واداشت تابشی در منتهی الیه جو و در سال ۲۱۰۰ حدود ۸.۵ وات بر متر مربع خواهد بود یعنی تابش ورودی منهای خروجی از جو مثبت ۸.۵ وات بر متر مربع است که این انباشت ۸.۵ وات بر مترمربع در سامانه جو منجر به افزایش دمای کره زمین می گردد، اما سناریوهای سری SRES خط سیر غلظت گازهای گلخانه ای را مشخص می کنند. بنابراین با توجه به انتشار سناریوهای جدید، هر کار تحقیقی هم که بعد از انتشار این داده های انجام می شود، بایستی بر اساس داده های جدید باشد مگر اینکه بخواهیم مطالعات تطبیقی انجام بدهیم. لذا داوران مجلات و پایان نامه این موضوع را مد نظر قرار می دهند و اگر کاری بر اساس سناریوهای قدیمی انجام گیرد، قطعاً جای ایراد و اشکال دارد. با انتشار سناریوهای جدید در سالهای اخیر تمرکز زیادی بر استفاده از آنها شده است. ( Taylor et al, ۲۰۱۲; Van and Garbrecht, ۲۰۰۳; Kharin et al, ۲۰۱۳; IPCC, ۲۰۱۴; and Stocker, ۲۰۱۰; Moss Marengo et al, ۲۰۱۴ et al, ۲۰۱۰; Plattner

بینی شده است بر اساس سناریوهای RCP، کمینه های دما نسبت به بیشینه های دما افزایش، فراوانی روزهای یخبندان کاهش و فراوانی شب های حاره ای افزایش معنی داری در دهه های آینده خواهند داشت ( Collins, ۲۰۱۳). به دنبال توسعه سناریوهای RCP، برخی از محققین با استفاده از پیش بینی روند دما در سناریوهای مختلف، اثرات آن ها را بر موضوعات مختلف از قبیل منابع آب، کشاورزی و ..... بررسی نمودند (Deryng et al, ۲۰۱۴).

محققین زیادی در این سالها روند تغییرات دما را با در نظر گرفتن اثرات متفاوتی که بر بخش های مختلف از قبیل کشاورزی دارد بررسی نمودند و با توجه به تفاوت های منطقه ای که در شاخص های حدی دما مشاهده نمودند دریافتند شاخص های بیشینه و کمینه دما با شیب های خطی متفاوت، افزایش معنا داری در آینده خواهد داشت. (Kharin et al, ۲۰۱۳; Chamchati and Bahir, ۲۰۱۱; Muhire and Ahmad, ۲۰۱۶)

در تحقیق بدرال و همکاران (۲۰۱۶) ۲۴ شاخص حدی آب و هوایی شامل دمای حداکثر و حداقل روزانه و بارش روزانه در شمال تایلند با استفاده از داده های ریزمقیاس شده مدل HadCM توسط PRECIS برای دوره آتی (۱۹۶۰-۲۱۰۰) مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس تحقیق یادشده، شاخص ها حاکی از افزایش قابل توجه در تعداد روزهای تابستانی و شب های گرمسیری در آینده داشتند. کاهش قابل ملاحظه ای در تعداد روزها و شب های سرد نیز در منطقه مورد مطالعه انتظار می رود، و کاهش ناچیز در میزان بارش سالانه، تعداد روز با بارش بیش از ۱۰ و ۲۰ میلی متر برآورد شد.

دولابیان (۱۳۹۶) در مطالعه ای اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش مناطق مختلف کشور بر اساس سناریوهای RCP را بررسی نمودند. در این مطالعه با بررسی خروجی ۲۵ مدل گردش عمومی جو از سری مدل های CMIP<sup>۵</sup> نتایج نشان داد که سیر صعودی دما در تمامی مناطق مورد مطالعه وجود دارد. بر خلاف دما، رژیم بارش، در مناطق و

سناریوهای مختلف، متفاوت می باشد. بارش در مناطق جنوب غرب، افزایش و در مناطق جنوب شرق، کاهش و عدم تغییر در شمال غرب را نشان می دهد.

اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب به عنوان موضوعی چالش برانگیز در بسیاری از مناطق خشک می باشد. گرم شدن کره زمین منجر به تغییر بیلان تابش از سطح زمین، گردش اتمسفر، تغییر توزیع مکانی و زمانی شدت بارش شده و به چرخش بخار آب سرعت می بخشد، همچنین ویژگی های هیدرولوژیکی از قبیل تبخیر، رواناب و آب خاک را تحت تاثیر قرار می دهد (Kundzewicz et al, ۲۰۰۷; Merritt et al, ۲۰۰۶). با توجه به آن که آب و مسائل مربوط به آن از جمله دغدغه های اصلی بشر در دوره های آتی به حساب می آید جهت مدیریت هرچه بهتر، ضرورت دارد وقوع تغییرات اقلیمی و میزان تاثیرگذاری آن بر منابع آب ارزیابی گردد.

استفاده از مدل های هیدرولوژیکی در برنامه ریزی و مدیریت منابع آب و تحلیل تاثیر تغییرات آب و هوایی بر اجزای آب به تازگی تبدیل به یک قانون گردید (Abbaspour et al, ۲۰۰۵; Mill et al, ۱۹۹۸; Srinivasan et al, ۲۰۰۹) Faramarzi et al, ۲۰۰۹ مطالعات گذشته نشان داده است که تغییرات آب و هوایی می تواند تاثیر قابل توجهی بر میزان آب قابل دسترس، تنش آبی و تقاضای آب داشته باشد. (Abbaspour et al, ۲۰۰۰; Vörösmarty et al, ۲۰۱۰; Beyene et al, ۲۰۱۰; Setegn et al, ۲۰۰۹) انتخاب یک مدل از بین مدل های هیدرولوژیکی مختلف که بتواند تاثیرات تغییر اقلیم را با توجه به شرایط مختلف مدیریت کشاورزی و منابع آبی بر روی سیستم منابع آب یک منطقه شبیه سازی کند، تاثیر بسزایی در ارزیابی اثرات این پدیده و تصمیم گیری بهتر سازمان ها و ذی نفعان مربوط دارد. بررسی تحقیقات انجام شده نشان داده است که مدل SWAT به دلایلی مانند بدون هزینه بودن و قابلیت شبیه سازی همزمان اثرات متقابل متغیرهای هیدرولوژیکی و مدیریت کشاورزی (مانند رواناب، تبخیر و تفرق و آب های زیرزمینی) و متغیرهای گیاهی (مانند عملکرد) در حوضه های پیچیده با شرایط کاربری اراضی و نوع خاک متنوع گزینه مناسبی می باشد.

لیرونک و جیونین (۲۰۰۸) تاثیر تغییرات آب و هوایی بر میزان رواناب و تبخیر و تفرق با مدل SWAT حوضه بیانگ را بررسی کردند و با قرار دادن ۱۵ سناریو در مدل کالیبره شده تحت کاربری اراضی ثابت به این نتیجه دست یافتند که تغییرات آب و هوایی بر میزان رواناب حوضه موثر است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش بارش و تغییر نکردن دما، میزان تبخیر و تفرق و رواناب بیشتر می شود. ژانگ و همکاران (۲۰۰۶)، عدم قطعیت هیدرولوژیکی را با ترکیب اثر دو سناریوی انتشار و هشت مدل گردش عمومی برای دو حوضه در شمال غرب اقیانوس آرام مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد، اثرات نسبی منابع گوناگون عدم قطعیت بین دو حوضه متفاوت است و تغییرات در نیمه ی دوم زمستان برای حوضه ای برف گیر، به دلیل تفاوت در مقدار و زمان ذوب برف نسبت به حوضه های بارانی بیشتر تحت تاثیر عدم قطعیت مدل هیدرولوژیکی قرار دارد. بنابراین مطالعه اثرات تغییر اقلیم در حوضه های برفی به دلیل عدم قطعیت قابل ملاحظه در پارامترهای مدل هیدرولوژیکی نیاز به تفسیر محتاط تر پیش بینی ها دارد. مولینا و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مدل SWAT به بررسی اثرات منفی تغییر اقلیمی بر منابع آب ترکیه پرداختند، نتایج شبیه سازی نشان داد که تمام مولفه های رژیم آبی کاهش یافته در نتیجه تنش آبی و دما افزایش یافته است. همچنین می توان به مطالعات تان و همکاران (۲۰۱۵) در رودخانه جوهارمالزیا و بیگر و همکاران (۲۰۱۵) در حوضه های کوهستانی چین در رابطه مستقیم با تغییر اقلیم بر دبی

رودخانه اشاره کرد. پیراس و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه ای با استفاده از ریزمقیاس نمایی آماری، تاثیر تغییر اقلیم را بر بارندگی و دبی اوج مناطق مدیترانه ای بررسی کردند، نتایج نشان داد که استفاده از ریزمقیاس نمایی آماری برای شبیه سازی تغییرات اقلیمی کارایی بالایی دارند.

تان و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی پیامدهای تغییر اقلیم بر روی منابع آب حوزه آبریز کلانتان مالزی براساس سناریوهای واداشت تابشی پرداختند. نتایج نشان داد در دوره آینده براساس سناریوهای واداشت تابشی، میزان دما افزایش خواهد داشت. برش در ماه های سرد سال به طور ناچیز افزایش خواهد داشت اما در ماه های گرم نسبت به دوره پایه با کاهش همراه خواهد بود. در اثر افزایش دمای هوا، میزان تبخیر-تعرق پتانسیل نیز افزایش خواهد یافت.

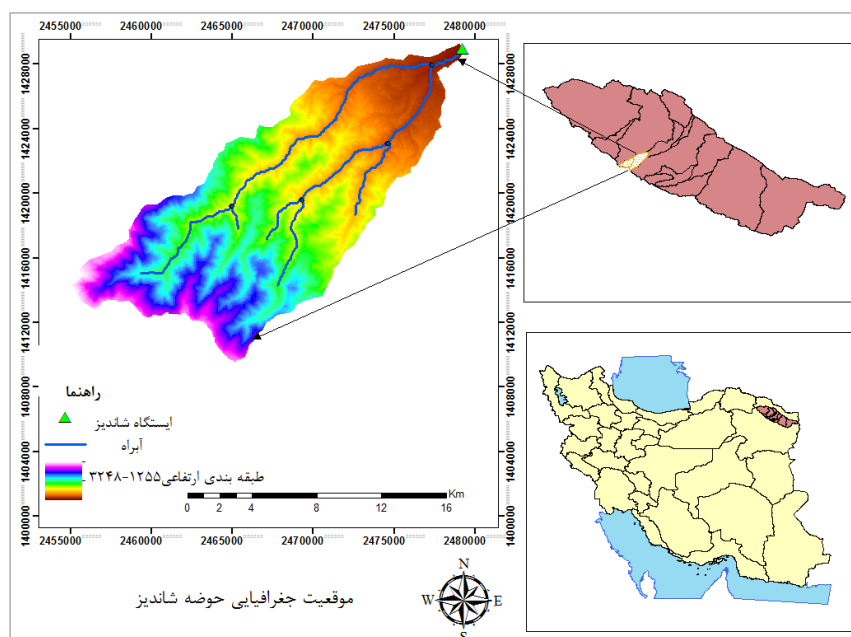
البته باید به این مهم توجه داشت که ارزیابی حساسیت مدل به تغییرات آب و هوایی لزوماً یک طرح از عواقب احتمالی تغییرات آب و هوایی را ارائه نمی دهد، با این حال، چنین مطالعاتی بینش ارزشمندی را در حساسیت سیستم های هیدرولوژیکی در آینده به تغییرات اقلیمی فراهم می کنند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱).

از دیدگاه هیدرواقلمی، مهمترین پیامد تغییر اقلیم، افزایش رخداد های حدی هیدرواقلمی در اکثر مناطق کره زمین می باشد، به طوریکه با افزایش میانگین دمای کره زمین وقوع بارش های سنگین و سیل آسا بیشتر شده است. برای کاهش پیامدها و همچنین سازگاری با تغییر اقلیم در زمینه افزایش رخداد های حدی هیدرولوژیکی نیازمند تغییر در مدیریت آب های سطحی و رواناب وجود دارد. تغییر در برخی متغیر های هیدرواقلمی مانند PMP و PMF و آستانه های بارش های سیل آسا نیازمند تغییر در برخی دستورالعمل های استاندارد مهندسی سازه در طراحی دهانه پل ها، ارتفاع تاج سد ها، طراحی سیستم جمع آوری و مدیریت آب های سطحی در مناطق شهری می باشد (IPCC, ۲۰۱۴).

با توجه به افزایش مخاطرات اقلیمی ناشی از افزایش مقادیر متغیر های حدی اقلیمی در نقاط مختلف دنیا، ایران نیز از این تغییر مستثنی نبوده و اثرات آن در بسیاری از مناطق کشور مشاهده شده است. در این میان حوزه ی آبریز شاندیز، در سالهای اخیر با انواع مخاطرات هیدرواقلمی از جمله سیل و بارش های ناگهانی و خشکسالی ها پیاپی مواجه بوده است. در این مطالعه به ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر مقادیر حدی اقلیمی این حوزه با استفاده از ریزمقیاس کردن بارش و دما مدل CanESM<sup>۲</sup> با کمک مدل SDSM و شبیه سازی رواناب با مدل SWAT در دهه های آینده پرداخته می شود.

### داده ها و روش کار

حوزه ی آبریز شاندیز در طول جغرافیای ۱۵° ۵۹' تا ۳۵° ۵۹' و عرض جغرافیایی ۲۷° ۳۶' تا ۴۰° ۳۶' قرار دارد و از شمال به ارتفاعات هزار مسجد، و از جنوب به ارتفاعات بینالود محدود می شود. این حوزه ی آبریز جزء مناطق کم بارش در ایران محسوب می گردد. بارندگی کم و تبخیر و تعرق و پتانسیل بالای از ویژگی های منطقه محسوب می شود. شکل (۱) موقعیت حوزه ی آبریز شاندیز در ایران و همچنین ایستگاه های مورد مطالعه در سطح حوزه را نشان می دهد.



شکل (۱): موقعیت حوضه ی آبریز شاندیز در ایران

در این تحقیق از آمار ایستگاه سینوپتیک مشهد واقع در حوضه آبریز شاندیز در یک دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۶۱-۱۹۹۰)، برای ریزمقیاس نمایی بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل روزانه استفاده شده است. از آنجایی که خروجی مدل های گردش عمومی جو بزرگ مقیاس می باشند در این تحقیق از مدل ریزمقیاس نمایی SDSM استفاده شد. سه نوع داده برای ریزمقیاس نمایی توسط مدل SDSM مورد استفاده قرار گرفت که عبارتند از: متغیرهای بزرگ مقیاس در دو دوره گذشته (۱۹۶۱-۱۹۹۰) و آینده (۲۰۴۱-۲۱۰۰) حاصل از مدل گردش کلی CanESM<sup>۲</sup>، متغیرهای بزرگ مقیاس باز تحلیل از مرکز پیش بینی های محیطی آمریکا NCEP در دوره ۱۹۶۱-۱۹۹۰ و داده های دیدبانی بارش و دمای حداقل و حداکثر روزانه ایستگاه سینوپتیک مشهد. نرم افزار SDSM روابط آماری را بر مبنای روش رگرسیون خطی چندگانه بین متغیرهای اقلیمی بزرگ مقیاس (پیش بینی کننده ها) و محلی (پیش بینی شونده ها) محاسبه می کند. این روابط بر اساس داده های دیدبانی و بازتحلیل NCEP در دوره گذشته (۱۹۶۱-۱۹۹۰) به صورت ماهانه تهیه می شوند. فرض بر این است که این روابط برای آینده نیز صادق است. هر دو داده های دیدبانی و مدل نسبت به دوره ۱۹۶۱-۱۹۹۰ نرمالیزه می شوند. پیش بینی کننده های دیدبانی بزرگ مقیاس از داده های بازتحلیل NCEP بدست می آیند (Willby et al, ۲۰۰۲). طول دوره داده های NCEP ۱۹۶۱-۲۰۰۵ می باشد که شامل ۴۵ سال داده های پیش بینی کننده روزانه هستند که قبل از نرمالیزه شدن در شبکه /سلول هایی مشابه با ابعاد مدل گردش عمومی CanESM<sup>۲</sup> درونیابی شده اند. با اعمال روابط رگرسیون چندگانه استخراج شده ماهانه در دوره دیدبانی بر روی متغیرهای بزرگ مقیاس برون داد مدل گردش عمومی CanESM<sup>۲</sup> می توان متغیرهای این مدل را بر روی ایستگاه مذکور ریزمقیاس نمود.

در این تحقیق رفتار رخداد‌های حدی اقلیمی وابسته به دما و بارش در ایستگاه مشهد در دوره مشاهداتی ۱۹۶۱-۱۹۹۰، دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سه سناریو (RCP۲,۶, RCP۴,۵, RCP۸,۵) پیش بینی می

<sup>۲</sup> Canadian Earth System Model

گردد. قبل از مدل سازی تغییرات رخدادهای حدی در دهه های آتی، توانمندی روش مورد استفاده در شبیه سازی میانگین ها و رخدادهای حدی در دوره دیدبانی مورد بررسی و واسنجی قرار گرفتند که نتایج در جدول ۱ آورده شده اند. خطای شبیه سازی بارش ۵/۷- درصد و دما در حد ۰/۱ درجه سلسیوس می باشد. شبیه سازی بارش و دما در سطح اعتماد ۰/۰۵ معنی دار هستند.

جدول ۱: کارایی مدل SDSM در شبیه سازی بارش و میانگین دمای سالانه در دوره دیدبانی

| فراسنج              | دوره ۱۹۶۱-۹۰ | مشهد   |
|---------------------|--------------|--------|
| میانگین بارش        | دیدبانی      | ۲۵۵    |
|                     | شبیه سازی    | ۲۴۰    |
|                     | خطا(%)       | - ۵/۷  |
|                     | RMSE         | ۱۴/۵   |
| میانگین دمای حداکثر | دیدبانی      | ۲۱/۱۵  |
|                     | شبیه سازی    | ۲۱/۱۳  |
|                     | خطا(°C)      | - ۰/۰۹ |
|                     | RMSE         | ۰/۰۱   |
| میانگین دمای حداقل  | دیدبانی      | ۶/۴۸   |
|                     | شبیه سازی    | ۶/۳۸   |
|                     | خطا(°C)      | - ۱/۵  |
|                     | RMSE         | ۰/۱    |

برای ارزیابی شاخص های حدی بارش و دما از نرم افزار RCLIMDEX استفاده شده است. RCLIMDEX به وسیله زانگ و یانگ در شعبه تحقیقات علمی سرویس هواشناسی کانادا توسعه یافته است. (Zhang, ۲۰۰۴). تیم کارشناسی آشکار سازی و نمایش تغییر اقلیم و شاخص های (ETCCDI) بر اساس مجموعه استاندارد ۲۷ شاخص حدی در زبان برنامه نویسی R و بر اساس الگوریتم های بهبود یافته و کاهش خطای عددی طراحی کرده است (Zhang, ۲۰۰۴; Zhang and Yang, ۲۰۰۴). ETCCDI به صورت مشترک بوسیله کمیسیون اقلیم شناسی، سازمان جهانی هواشناسی و برنامه جهانی دیدبانی داده ها، تغییر پذیری و پیش بینی اقلیم حمایت می شود (Sillmann and Roeckner, ۲۰۰۸). نرم افزار RCLIMDEX بر اساس آستانه های تعریف شده برای هر شاخص میزان شیب آن ها را طی دوره آماری محاسبه می کند.

به منظور تحلیل شرایط اقلیمی دوره دیدبانی و آینده، از میان شاخص های معرفی شده توسط مرکز بین المللی ETCCDI، شاخص دما شامل  $TMINmean$ ،  $TMAXmean$  و شاخص های حدی بارش شامل نمایه های حداکثر بارش یک روزه ( $Rx1day$ )، حداکثر بارش ۵ روزه متوالی ( $Rx5day$ )، تعداد روزهای با بارش مساوی و یا بیشتر از ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلیمتر ( $R30mm$ ،  $R20mm$ ،  $R10mm$ )، جمع سالانه بارش روزهای خیلی تر ( $R95p$ )، جمع سالانه بارش روزهای فوق العاده تر ( $R99p$ ) و جمع سالانه بارش روزهای تر ( $PRCPTOT$ ) محاسبه و روند تغییرات آنها در دوره مشاهداتی (۱۹۶۱-۱۹۹۰) و دوره آینده (۲۰۴۱-۲۱۰۰) محاسبه شده است.

در این پژوهش از مدل SWAT نیز جهت شبیه سازی و مدل سازی چشم انداز آبی دبی حوضه آبریز شانندیز استفاده شده است. اطلاعات هواشناسی مورد نیاز مدل SWAT عبارت اند از بارش، دمای حداقل، حداکثر روزانه،

رطوبت نسبی و ساعات آفتابی که به صورت فایل اطلاعاتی به مدل معرفی می‌شود. اطلاعات توپوگرافی (DEM)، پوشش گیاهی و کاربری اراضی از دیگر داده‌های بعد از پردازش در محیط GIS به صورت رستر (Grid) در مدل SWAT استفاده شد. دبی ماهانه ایستگاه سر آسیاب شاندیز در یک دوره آماری ۱۰ ساله (۲۰۰۳-۲۰۱۲) استفاده شد.

مدل SWAT یک مدل فیزیکی و توزیعی است که برای پیش‌بینی اثر کاربری، تغییر اقلیم و مدیریت‌ها در حوضه‌های آبریز بزرگ و پیچیده توسعه داده شده است. برای شروع کار با مدل SWAT ۲۰۱۲، ابتدا نقشه رقومی ارتفاعی DEM حوضه آبریز شاندیز به محیط نرم افزار ArcGIS فراخوانده شد. شاخص فیزیوگرافی مختلف حوضه آبریز از مدل رقومی ارتفاعی زمین قابل استخراج هستند. با معرفی نقشه DEM حوضه، ابتدا شبکه آبراهه‌های حوضه به وسیله مدل SWAT تعیین و ترسیم شد و برای هر آبراهه، نقطه خروجی آن مشخص شد. سپس محدوده و مرز حوضه آبریز با توجه به توپوگرافی شبکه آبراهه‌ها ترسیم و در پایان حوضه به زیرحوضه‌های مختلف تقسیم بندی شد. سپس مدل SWAT با استفاده از نقشه‌های خاک، کاربری اراضی حوضه که به مدل معرفی شده است و همچنین نقشه شیب حوضه (تشکیل شده بوسیله مدل با استفاده از DEM) زیر حوضه‌ها را به واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRUs) تقسیم می‌شوند که بخش‌هایی از زیر حوضه‌ها با پوشش‌ها، مدیریت و خصوصیات خاک می‌باشد. SWAT از روش عدد منحنی اصلاح شده (USDA Soil Conservation Service, ۲۰۰۱) یا روش نفوذ Green and Ampt جهت محاسبه حجم رواناب سطحی برای هر HRU استفاده می‌کند. برای هر HRU از رابطه شماره ۱ محاسبات در مدل SWAT انجام می‌گیرد.

$$\Delta SW = \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

در این رابطه  $\Delta SW$  = آب ذخیره شده در خاک،  $R_{day}$  = بارش روزانه،  $Q_{surf}$  = رواناب سطحی،  $E_a$  = تبخیر و تعرق واقعی،  $W_{seep}$  = آبی که از پروفیل خاک به منطقه غیراشباع وارد می‌شود و  $Q_{gw}$  = جریان آب زیرزمینی خروجی به رودخانه می‌باشد. مقدار رواناب سطحی برای هر واحد پاسخ هیدرولوژیکی جداگانه شبیه‌سازی می‌شود که باعث افزایش دقت تخمین مدل می‌شود. در این مطالعه برای واسنجی مدل SWAT از نرم افزار SWAT-CUP استفاده می‌شود (عباسپور و همکاران). با استفاده از آن واسنجی و عدم قطعیت‌ها در ارتباط با SWAT به راحتی انجام پذیر است. برای این منظور در این مطالعه از داده‌های دبی ماهانه ایستگاه سرآسیاب شاندیز در سالهای ۲۰۱۲-۲۰۰۳، استفاده شده است که دوره واسنجی مدل دبی ماهانه سال‌های (۲۰۰۶-۲۰۱۰) و دوره اعتبار سنجی مدل (۲۰۱۱-۲۰۱۲) می‌باشد. برای ارزیابی نتایج مدل در شبیه‌سازی رواناب از دو ضریب Nash-Sutcliffe ( $E_{NS}$ ) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) استفاده خواهد شد. هر چه عدد  $E_{NS}$  و  $R^2$  به مقدار یک نزدیکتر باشند، دبی‌های شبیه‌سازی شده دقت مطلوب‌تری خواهند داشت.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (2)$$

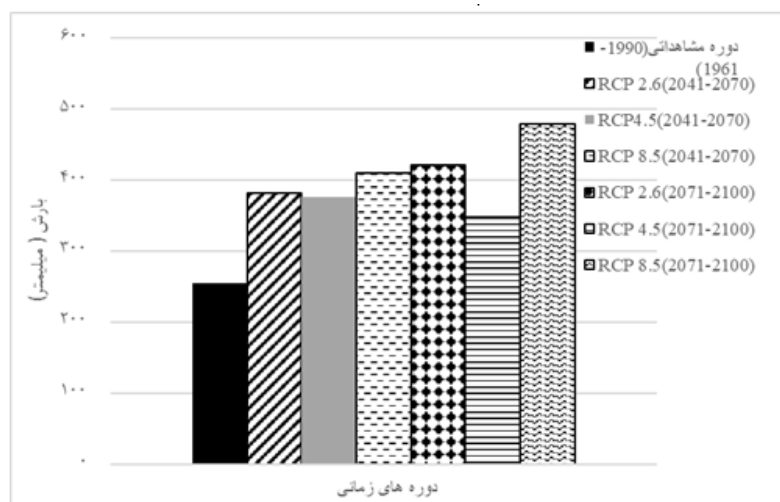
$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

در این روابط  $\bar{O}$  و  $\bar{S}$  به ترتیب متوسط دبی مشاهداتی و شبیه سازی شده است. برای تحلیل نتایج واسنجی از شاخص نش - ساتکلیف (NS) استفاده شد. عموماً اگر ضریب ناش ساتکلیف از ۰/۷۵ بیشتر باشد مدل عالی و کامل، و اگر بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ باشد، رضایت بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد غیرقابل قبول فرض می شود (ناش و ساتکلیف، ۱۹۷۰). همچنین طبق گزارش موربایی اگر ضریب ناش ساتکلیف بیشتر از ۰/۶۵ باشد نتایج واسنجی و اعتبار سنجی خیلی خوب، اگر بین ۰/۵ تا ۰/۶۵ نتایج مناسب و اگر کمتر از ۰/۵ باشد نتایج واسنجی و اعتبارسنجی رضایت بخش نیست (موربایی ۲۰۰۷).

### شرح و تفسیر نتایج

#### الف - متغیرهای اقلیمی

**میانگین بارش:** در این تحقیق حاضر ابتدا داده های اقلیمی برای دو دوره آتی (۲۰۴۱-۲۰۷۰) و (۲۰۷۱-۲۱۰۰) بر اساس سناریوهای RCP<sub>۲,۶</sub>، RCP<sub>۴,۵</sub> و RCP<sub>۸,۵</sub> مدل CanESM<sub>۲</sub> توسط مدل SDSM ریزمقیاس شده است. بارش سالانه ایستگاه مشهد در دوره دیدبانی ۱۹۹۰-۱۹۶۱ به مقدار ۲۴۹/۷ میلیمتر می باشد. در جدول ۲، چشم انداز تغییرات بارش در ایستگاه مشهد در دو دوره آتی ۲۰۴۱-۲۰۷۰، ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سه سناریوی انتشار RCP<sub>۲,۶</sub>، RCP<sub>۴,۵</sub> و RCP<sub>۸,۵</sub> آورده شده است. همانطور که دیده می شود در ایستگاه مشهد و تحت هر سه سناریوی انتشار میانگین بارش سالانه دوره های آتی نسبت به دوره دیدبانی افزایش یافته است. بیشترین افزایش میانگین بارش ماهانه در دوره های آتی نسبت به دوره ی دیدبانی مربوط به ماه های می و اکتبر می باشد (شکل ۲). بارش سالانه در دهه ی ۲۰۴۱-۲۰۷۰، بین ۳۷ تا ۵۴ درصد نسبت به دوره ی دیدبانی افزایش می یابد، و میزان افزایش بارش دهه ی ۲۰۷۱-۲۱۰۰ بین ۵۲ تا ۶۶ درصد افزایش می یابد.



شکل ۲: تغییرات بارش سالانه (میلیمتر) در ایستگاه مشهد در دوره دیدبانی (۱۹۹۰-۱۹۶۱) و دو دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سه سناریوی انتشار RCP<sub>۲,۶</sub>، RCP<sub>۴,۵</sub> و RCP<sub>۸,۵</sub>

جدول ۲: درصد تغییرات در میانگین بارش ماهانه در ایستگاه مشهد نسبت به دوره دیدبانی (۱۹۹۰-۱۹۶۱) در دو دوره ۲۰۷۰-

۲۰۴۱ و ۲۰۱۰۰-۲۰۷۱ تحت سه سناریوی انتشار  $RCP_{۲,۶}$ ،  $RCP_{۴,۵}$  و  $RCP_{۸,۵}$

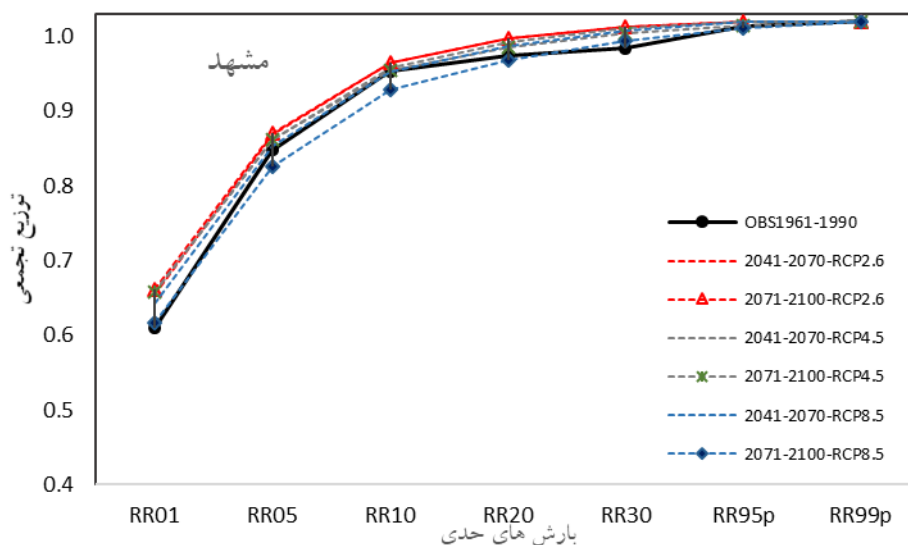
| ۲۰۷۱-۲۱۰۰   |             |             | ۲۰۴۱-۲۰۷۱   |             |             | ۱۹۶۱-۱۹۹۰ |         |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|---------|
| $RCP_{۸,۵}$ | $RCP_{۴,۵}$ | $RCP_{۲,۶}$ | $RCP_{۸,۵}$ | $RCP_{۴,۵}$ | $RCP_{۲,۶}$ |           |         |
| ۳۴/۶        | ۲۳/۹        | ۳۲/۸        | ۲۹/۳        | ۳۵/۲        | ۳۱/۷        | ۳۴/۱      | ژانویه  |
| ۵۳/۴        | ۳۵          | ۳۰/۴        | ۳۱/۸        | ۳۳/۹        | ۳۵/۸        | ۳۳/۸      | فوریه   |
| ۷۰/۸        | ۵۸          | ۵۵          | ۴۴/۵        | ۴۶/۹        | ۵۷          | ۵۲        | مارس    |
| ۵۷/۷        | ۵۴/۳        | ۵۱/۳        | ۶۰/۶        | ۵۶/۵        | ۶۴/۹        | ۴۸/۲      | آوریل   |
| ۱۰۵         | ۹۰          | ۱۵۱         | ۱۱۲         | ۱۰۸         | ۸۶/۹        | ۲۹/۷      | می      |
| ۱۰          | ۹/۲         | ۱۲          | ۹/۸         | ۱۳          | ۱۷          | ۵/۱       | ژوئن    |
| ۱/۴         | ۲           | ۱/۳         | ۱/۷         | ۱/۷         | ۱/۷         | ۱         | جولای   |
| ۱/۴         | ۰/۹         | ۰/۷         | ۰/۹         | ۰/۸         | ۰/۹         | ۰/۷       | آگوست   |
| ۱۴          | ۹/۸         | ۵           | ۱۶/۸        | ۹           | ۴/۸         | ۱/۳       | سپتامبر |
| ۱۰          | ۱۰          | ۱۰          | ۱۰          | ۱۰          | ۱۰          | ۹/۶       | اکتبر   |
| ۴۶/۴        | ۲۴/۷        | ۳۴/۴        | ۳۵/۳        | ۳۳/۸        | ۳۷          | ۱۵        | نوامبر  |
| ۷۳          | ۲۹/۲۵       | ۳۶/۲        | ۵۶/۲        | ۲۵/۸        | ۳۵/۵        | ۲۴/۲      | دسامبر  |

بارش های حدی: جدول (۳) تغییرات تعداد روزهای بارش مساوی و یا بیشتر از ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلیمتر ( $R30mm$ )، مجموع سالانه بارش روزهای خیلی تر ( $R95p$ )، مجموع سالانه بارش روزهای فوق العاده تر ( $R99p$ )، را نشان می دهد. با توجه به نتایج بدست آمده تعداد روزهای بارش سنگین در دو دهه ی آینده نسبت به دوره دیدبانی افزایش می یابد. شکل (۳) نشان می دهد، تعداد روزهای بارش های بیشتر از صدک ۹۵ و ۹۹، در دو دهه ی آینده و تحت هر سه سناریو نسبت به دوره دیدبانی افزایش می یابد. بارش های صدک ۹۵ بین ۴۳ درصد تا ۱۱۹ درصد و بارش های صدک ۹۹ بین ۴۷ درصد تا ۹۳ درصد در سالهای (۲۰۴۱-۲۱۰۰) نسبت به دوره دیدبانی افزایش می یابند که نشان از سیل آسا شدن بارش های دهه های آتی و افزایش مخاطرات اقلیمی ناشی از بارش های سنگین و سیل آسا می گردد (جدول ۴). این موضوع در شکل ۳ نشان داده شد است. مطابق شکل مذکور، تابع توزیع تجمعی بارش در دهه های آینده به گونه ای است که نشان از افزایش بارش های حدی دارد.

جدول ۳: درصد تغییرات شاخص های حدی بارش ایستگاه مشهد نسبت به دوره دیدبانی (۱۹۹۰-۱۹۶۱) در دو دوره ۲۰۷۰-

۲۰۴۱ و ۲۰۱۰۰-۲۰۷۱ تحت سه سناریوی انتشار  $RCP_{۲,۶}$ ،  $RCP_{۴,۵}$  و  $RCP_{۸,۵}$

| ۲۰۷۱-۲۱۰۰ |     |         |     |         |     | ۲۰۴۱-۲۰۷۰ |     |         |     |         |     |                  |                   |
|-----------|-----|---------|-----|---------|-----|-----------|-----|---------|-----|---------|-----|------------------|-------------------|
| RCP ۸,۵   |     | RCP ۴,۵ |     | RCP ۲,۶ |     | RCP ۸,۵   |     | RCP ۴,۵ |     | RCP ۲,۶ |     | دوره<br>مشاهداتی |                   |
| تعداد     | CV% | تعداد   | CV% | تعداد   | CV% | تعداد     | CV% | تعداد   | CV% | تعداد   | CV% |                  |                   |
| روز       |     | روز     |     | روز     |     | روز       |     | روز     |     | روز     |     |                  |                   |
| ۴۰۵       | ۷۵  | ۳۳۴     | ۴۴  | ۳۳۲     | ۴۳  | ۳۷۱       | ۶۰  | ۳۲۹     | ۴۲  | ۳۳۹     | ۴۶  | ۲۳۲              | RR <sup>۱۰</sup>  |
| ۱۶۲       | ۲۳۱ | ۱۱۴     | ۱۳۳ | ۱۱۲     | ۱۲۹ | ۱۲۸       | ۱۶۱ | ۱۱۴     | ۱۳۳ | ۱۱۵     | ۱۳۵ | ۴۹               | RR <sup>۲۰</sup>  |
| ۱۰۱       | ۴۳۱ | ۶۶      | ۲۴۷ | ۵۷      | ۲۰۰ | ۷۳        | ۲۸۴ | ۶۵      | ۲۴۲ | ۵۷      | ۲۰۰ | ۱۹               | RR <sup>۳۰</sup>  |
| ۱۱۹       | ۵۳  | ۱۱۵     | ۴۹  | ۱۱۳     | ۴۷  | ۱۱۶       | ۵۰  | ۱۰۹     | ۴۳  | ۱۱۳     | ۴۷  | ۶۶               | RR <sup>۹۵p</sup> |
| ۳۷        | ۹۳  | ۲۳      | ۵۳  | ۲۳      | ۵۳  | ۲۴        | ۶۰  | ۲۲      | ۴۷  | ۲۳      | ۵۳  | ۱۵               | RR <sup>۹۹p</sup> |



شکل (۳): نمودار تابع توزیع تجمعی طبقات مختلف بارش در ایستگاه مشهد

**حداکثر بارش در ۵ روزه:** یکی از نمایه های حدی استاندارد که توسط سازمان جهانی هواشناسی برای مطالعه تغییر اقلیم توصیه شده است، حداکثر بارش در رویدادهای بارشی با تداوم پنج روزه می باشد. حداکثر بارش ۵ روزه در دو دوره آینده نسبت به دوره دیدبانی افزایش خواهد یافت. در جدول ۴، تغییرات فصلی حداکثر بارش های پنج روزه نشان داده شده است. تغییرات فصلی حداکثر بارش ۵ روزه، در دهه ی ۲۰۴۱-۲۰۷۰، تحت هر سه سناریوی RCP افزایش می یابد. و در دهه ی ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی  $RCP_{4.5}$ ، حداکثر بارش ۵ روزه بدون تغییر می باشد و تحت دو سناریوی  $RCP_{2.6}$  و  $RCP_{8.5}$  حداکثر بارش ۵ روزه نسبت به دوره دیدبانی افزایش می یابد. در فصل تابستان و پاییز میزان تغییرات شاخص حدی مذکور در سال های آینده نسبت به دوره دیدبانی، بیشتر از فصول بهار و زمستان است. این یافته ها همسو با نتایج پژوهش های باباییان و همکاران (۱۳۸۸) و بابایی فینی (۱۳۹۵) می باشد. افزایش فراوانی رخداد بارش های سنگین احتمال وقوع مخاطرات هیدرواقليمی (سیل) را افزایش می دهد. از آنجا که افزایش وقوع رخدادهای حدی آب و هوایی بر زیرساختهای اجتماعی و اقتصادی از قبیل کشاورزی، سلامت، منابع آب، خدمات عمومی تاثیر زیادی می گذارد (استرینگ و همکاران، ۲۰۰۰)، لذا پیشنهاد می شود دستورالعمل ها و استانداردهای ساخت تاسیسات زیربنایی گذشته مورد بازنگری قرار گرفته به نحوی که مقاومت سازه ها و تاسیسات نسبت به بارش های سیل آسا افزایش یابد.

جدول ۴: تغییرات فصلی حداکثر بارش‌های پنج روزه (به میلی‌متر) ایستگاه مشهد نسبت به دوره دیدبانی (۱۹۶۱-۱۹۹۰) در

دو دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سه سناریوی انتشار  $RCP_{۲,۶}$ ،  $RCP_{۴,۵}$  و  $RCP_{۸,۵}$

| زمستان |            | پاییز |            | تابستان |            | بهار   |            |                 |               |
|--------|------------|-------|------------|---------|------------|--------|------------|-----------------|---------------|
| CV%    | بارش<br>mm | CV%   | بارش<br>mm | CV%     | بارش<br>mm | CV%    | بارش<br>mm |                 |               |
|        | ۱۹/۴       |       | ۷/۴        |         | ۲/۲        |        | ۲۵/۹       | دوره<br>دیدبانی | ۱۹۶۱-<br>۱۹۹۰ |
| ۵٪     | ۲۰/۲       | ۱۰٪   | ۱۴/۶       | ۱۳۶٪    | ۴/۸        | ۳۱/۰۵٪ | ۳۳/۹       | RCP<br>۲,۶      | ۲۰۴۱-<br>۲۰۷۰ |
| ۰٪     | ۱۹         | ۹۵٪   | ۱۳/۶       | ۱۳۶٪    | ۴/۶        | ۰/۲۱٪  | ۲۵/۹       | RCP<br>۴,۵      |               |
| ۵٪     | ۲۰         | ۹۴٪   | ۱۴         | ۱۳۶٪    | ۴/۶        | ۱۱٪    | ۲۸/۷       | RCP<br>۸,۵      |               |
| ۰٪     | ۱۹         | ۱۰٪   | ۱۵/۲       | ۹۱٪     | ۴/۲        | ۲۵/۹٪  | ۳۶/۶       | RCP<br>۲,۶      | ۲۰۷۱-<br>۲۱۰۰ |
| ۱۰٪    | ۲۱/۱       | ۹۵٪   | ۱۴/۵       | ۹۱٪     | ۴          | ۲۵/۹٪  | ۳۲/۹       | RCP<br>۴,۵      |               |
| ۱۵٪    | ۲۲         | ۱۳۵٪  | ۱۷         | ۱۳۷٪    | ۵/۲        | ۲۵/۲٪  | ۳۲/۴       | RCP<br>۸,۵      |               |

دمای حداکثر: با توجه به شکل ۴، میانگین دمای حداکثر در ایستگاه مشهد تحت سه سناریوی انتشار  $RCP_{۲,۶}$ ،  $RCP_{۴,۵}$  و  $RCP_{۸,۵}$  افزایش یافته است که افزایش دمای حداکثر در دهه ۲۰۷۱-۲۱۰۰ بیشتر از دهه ی ۲۰۷۱-۲۰۴۱ می باشد. به طور کلی میانگین دمای حداکثر در تمام فصول در ایستگاه مشهد و تحت هر سه سناریو نسبت به دوره گذشته افزایش خواهد یافت. بیشترین افزایش در میانگین دمای حداکثر فصلی به میزان ۶/۵ درجه سلسیوس در تابستان در دهه ۲۰۸۰ رخ خواهد داد، و بیشترین افزایش میانگین دمای حداکثر ماهانه در ماه ژوئن و جولای در هر دو دوره ی آتی و تحت هر سه سناریوی  $RCP_{۲,۶}$ ،  $RCP_{۴,۵}$  و  $RCP_{۸,۵}$  می باشد (جدول ۵).

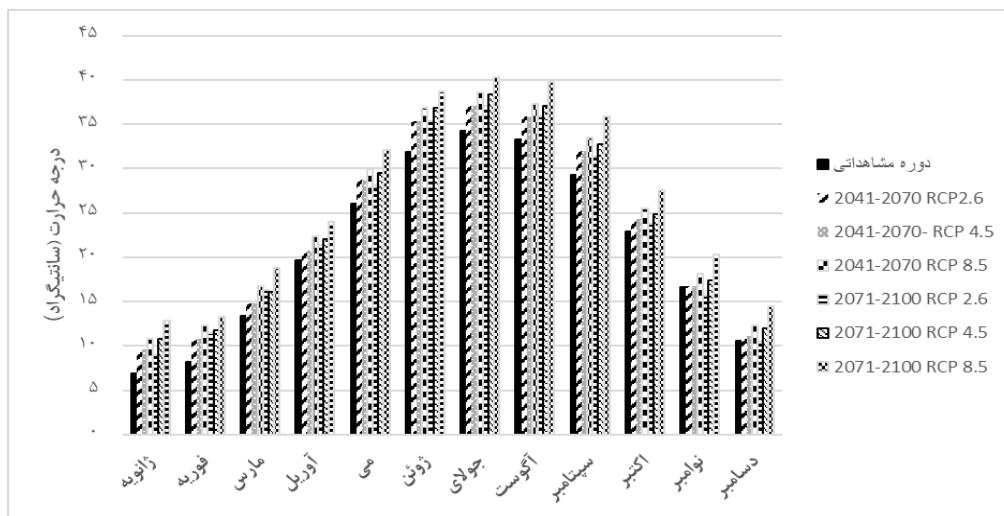
در شکل ۵، مقایسه مقادیر و تایع توزیع حداکثر دمای ماهانه تحت سناریوهای انتشار گوناگون در دو دهه آتی آورده شده است. ملاحظه می شود که ضمن جابجایی الگوی دمای بیشینه به سمت مقادیر بیشتر، ارتفاع منحنی دمای بیشینه نیز نسبت به دمای دوره پایه افزایش یافته است. افزایش دما نقش مهمی در افزایش شدت خشکی که منجر به وقوع بیشتر رخدادهای حدی خشکسالی می شود دارد، همچنین می تواند باعث بیابان زایی، کاهش منابع آب و کاهش تولیدات کشاورزی ناشی از خرابی و نابودی محصولات کشاورزی شود (Chamchati and Bahir, ۲۰۱۱; Fernández et.al, ۲۰۱۳; McFadden and Miranowski, ۲۰۱۴).

Fernández et.al, ۲۰۱۳; McFadden and Miranowski, ۲۰۱۴)

جدول (۵): درصد تغییرات میانگین دمای حداکثر (درجه سلسیوس) سالانه و فصلی ایستگاه مشهد نسبت به دوره دیدبانی

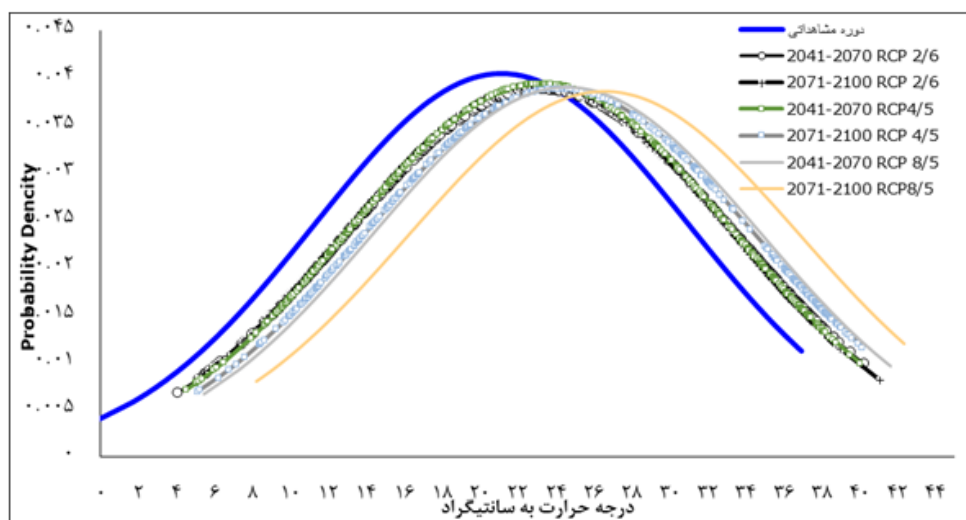
(۱۹۶۱-۱۹۹۰) در دو دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سه سناریوی انتشار  $RCP_{2.6}$ ،  $RCP_{4.5}$  و  $RCP_{8.5}$

|         | ۲۰۷۱-۲۱۰۰   |             |             | ۲۰۴۱-۲۰۷۰   |             |             | ۱۹۶۱-۹۰ |  |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|--|
|         | $RCP_{8.5}$ | $RCP_{4.5}$ | $RCP_{2.6}$ | $RCP_{8.5}$ | $RCP_{4.5}$ | $RCP_{2.6}$ | دیدبانی |  |
| زمستان  | ۵           | ۲/۹         | ۱/۷         | ۳/۲         | ۱/۹         | ۱/۹         | ۸/۵     |  |
| بهار    | ۵/۲         | ۲/۸         | ۲/۲         | ۳/۳         | ۱/۷         | ۱/۷         | ۱۹/۷    |  |
| تابستان | ۶/۴         | ۴/۳         | ۲/۹         | ۴/۴         | ۲/۹         | ۲/۹۴        | ۳۳/۱    |  |
| پاییز   | ۴/۹         | ۲           | ۰/۶         | ۲/۷         | ۱/۳         | ۱/۴         | ۲۲/۹    |  |
| سالانه  | ۵/۴         | ۳           | ۱/۸         | ۳/۴         | ۲           | ۲/۰۱        | ۲۱/۱    |  |



شکل (۴): میانگین دمای حداکثر (سانتی گراد) ماهانه ایستگاه مشهد در دوره دیدبانی (۱۹۶۱-۱۹۹۰) و دو دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و

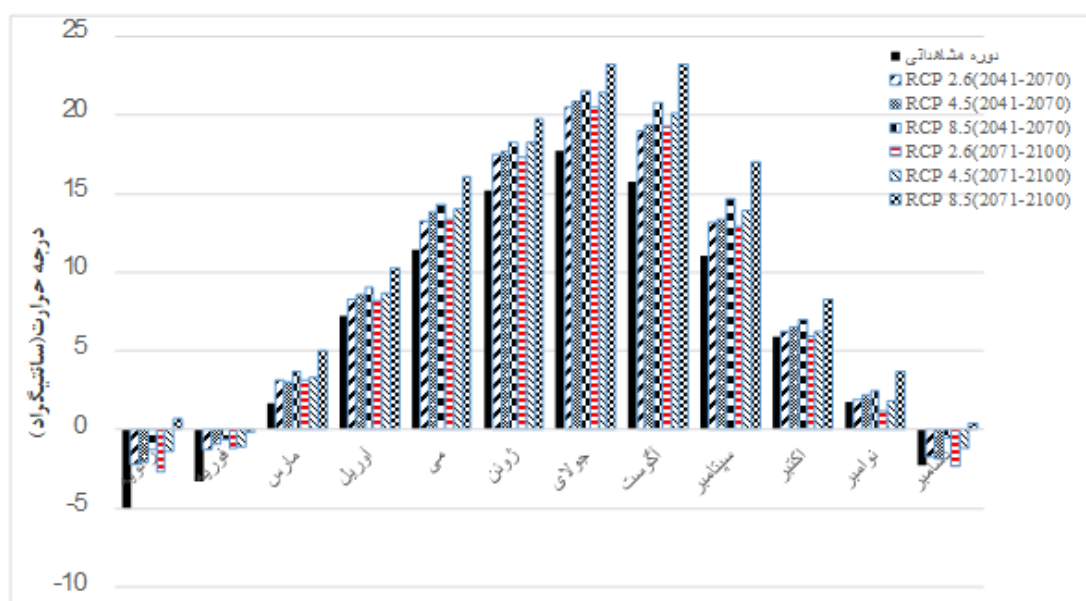
۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سه سناریوی انتشار  $RCP_{2.6}$ ،  $RCP_{4.5}$  و  $RCP_{8.5}$



شکل (۵): توزیع حداکثر دمای ماهانه در ایستگاه مشهد نسبت به دوره دیدبانی (۱۹۶۱-۱۹۹۰) در دو دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰

۲۰۷۱ تحت سه سناریوی انتشار  $RCP_{2.6}$ ،  $RCP_{4.5}$  و  $RCP_{8.5}$

دمای حداقل: با توجه به شکل ۶ میانگین دمای حداقل ماهانه در ایستگاه مشهد در دو دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۱۰-۲۰۷۱ تحت سه سناریوی انتشار  $RCP_{2,6}$ ،  $RCP_{4,5}$  و  $RCP_{8,5}$  نسبت به دوره دیدبانی (۱۹۹۰-۱۹۶۱) افزایش یافته است. افزایش میانگین دمای حداقل در دهه ۲۰۷۱-۲۰۴۱ بیشتر از دهه ی ۲۰۴۱-۲۰۷۱ می باشد. به طور کلی میانگین دمای حداقل در تمام فصول در دوره آتی و تحت هر سه سناریو نسبت به دوره گذشته افزایش خواهد یافت. بیشترین افزایش ضریب تغییرات میانگین دمای حداقل فصلی به بیش ۱۰۹ درصد مربوط به فصل زمستان در دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ سناریوی  $RCP_{8,5}$  می باشد (جدول ۶). یکی از اثرات منفی افزایش دما بر منابع آب از طریق افزایش تبخیر تشدید می گردد و از کم و کیف منابع آب خواهد کاست. از طرف دیگر افزایش دما منجر به تغییر شکل بارش زمستانی در منطقه مورد مطالعه از برف به باران شود (منصوری و همکاران، ۱۳۹۳).



شکل (۶): میانگین دمای حداقل (سانتی گراد) ماهانه ایستگاه مشهد در دوره دیدبانی (۱۹۹۰-۱۹۶۱) و دو دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۱۰-۲۰۷۱

تحت سه سناریوی انتشار  $RCP_{2,6}$ ،  $RCP_{4,5}$  و  $RCP_{8,5}$

جدول ۶: درصد تغییرات دمای حداقل فصلی و سالانه ایستگاه مشهد در دو دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۰۴۱ تحت سه

سناریوی انتشار  $RCP_{2,6}$ ،  $RCP_{4,5}$  و  $RCP_{8,5}$  نسبت به دوره دیدبانی (۱۹۹۰-۱۹۶۱)

| ۲۰۷۱-۲۰۴۱   |       |             |       |             |       | ۲۰۴۱-۲۰۷۰   |       |             |       |             |       | ۱۹۶۱-۱۹۹۰ |         |
|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-----------|---------|
| $RCP_{8,5}$ |       | $RCP_{4,5}$ |       | $RCP_{2,6}$ |       | $RCP_{8,5}$ |       | $RCP_{4,5}$ |       | $RCP_{2,6}$ |       |           |         |
| ضریب        | درجه  | ضریب        | درجه  | ضریب        | درجه  | ضریب        | درجه  | ضریب        | درجه  | ضریب        | درجه  |           |         |
| تغییرات/٪   | حرارت | تغییرات/٪   | حرارت | تغییرات/٪   | حرارت | تغییرات/٪   | حرارت | تغییرات/٪   | حرارت | تغییرات/٪   | حرارت |           |         |
| ۵۵/۱        | ۱۰/۴  | ۲۲/۱        | ۸/۶   | ۳۳/۵        | ۸/۲   | ۲۵/۷        | ۹     | ۲۵/۷        | ۸/۵   | ۳۱/۸        | ۸/۲   | ۶/۷       | بهار    |
| ۳۵/۷        | ۲۲    | ۱۶/۹        | ۱۹/۹  | ۲۴/۱        | ۱۹    | ۱۸/۸        | ۲۰/۲  | ۱۸/۸        | ۱۹/۳  | ۱۶/۸        | ۱۹    | ۱۶/۲      | تابستان |
| ۵۴/۷        | ۹/۶   | ۶/۸         | ۷/۳   | ۲۸/۸        | ۶/۶   | ۱۷/۹        | ۸/۰۴  | ۱۷/۹        | ۷/۳   | ۱۴/۱۸       | ۷/۱   | ۶/۲       | پاییز   |
| ۱۰۹/۴       | ۰/۳   | ۴۰/۸        | - ۱/۲ | ۷۷/۳        | - ۲   | ۵۴/۸        | - ۰/۸ | ۵۴/۸        | - ۱/۶ | ۴۹/۶        | - ۱/۷ | - ۳/۵     | زمستان  |
| ۶۴/۹        | ۱۰/۷  | ۲۳/۶        | ۸/۷   | ۴۱/۳        | ۸/۰۱  | ۳۰/۳        | ۹/۱   | ۳۰/۳        | ۸/۴   | ۲۶/۴        | ۸/۲   | ۶/۴       | سالانه  |

#### ب- متغیرهای هیدرولوژی

تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبار سنجی مدل: از آن جایی که امکان این وجود ندارد که تمام پارامترها در فرایند واسنجی استفاده شوند، بنابراین، ابتدا یک انتخاب اولیه از پارامترهای موثر بر جریان صورت می گیرد که

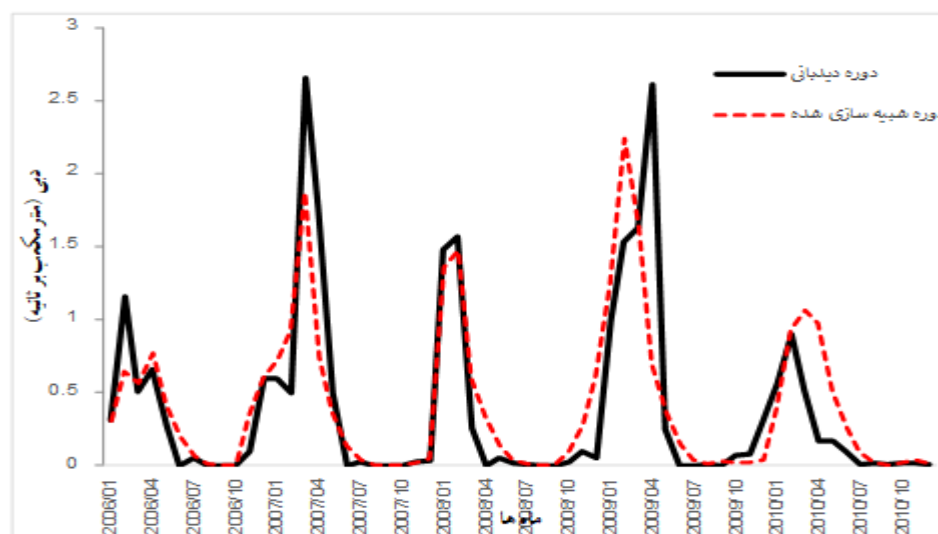
براساس حوضه و تحقیقات انجام شده قبلی می باشد. در این مطالعه، با توجه به مطالعات سالهای اخیر که به مطالعه رواناب و جریان رودخانه پرداخته بودند (Yang et al, ۲۰۰۷). ابتدا برای ایستگاه سرآسیاب شاندیز ۲۵ پارامتر انتخاب شد و سپس روش آنالیز حساسیت مطلق (تغییر یکی از پارامترها در حالی که سایر پارامترها ثابت نگه داشته شده اند) در نرم افزار SWAT-CUP<sup>۲</sup> (Abbaspour, ۲۰۰۹) اجرا شد. ابتدا برای هر پارامتر یک دامنه معقول و نسبتاً بزرگ، به صورت نسبی (یعنی: یک بعلاوه / منهای دامنه، ضرب در مقدار اولیه) و یا به صورت مطلق انتخاب می شود، سپس در نرم افزار مذکور این دامنه به پنج قسمت مساوی تقسیم شده و برای هر مقدار مدل SWAT اجرا می شود و نتایج با داده های مشاهده شده براساس تغییر ایجاد شده در تابع هدف، مقایسه می شوند. در نهایت ۱۲ پارامتر نسبتاً حساس مطابق جدول ۷، به دست آمد که در ادامه از آن ها در فرایند واسنجی استفاده شده است. دوره واسنجی بین سالهای (۲۰۰۶-۲۰۱۰) می باشد، نتایج واسنجی مدل در شکل ۷ آورده شده است. دوره صحت سنجی سالهای ۲۰۱۱-۲۰۱۲ می باشد شکل ۸ دبی شبیه سازی شد در دوره صحت سنجی رانشان می دهد. جدول (۸) وضعیت عملکرد مدل SWAT را در دو دوره واسنجی و صحت سنجی نشان می دهد که با ضریب نش ۰/۶۵ در دوره واسنجی و ضریب نش ۰/۴۹ در دوره صحت سنجی به خوبی توانسته است الگوی تغییرات دبی منطقه مورد مطالعه را شبیه سازی کند.

جدول (۷): مقادیر پارامترهای واسنجی شده مدل SWAT

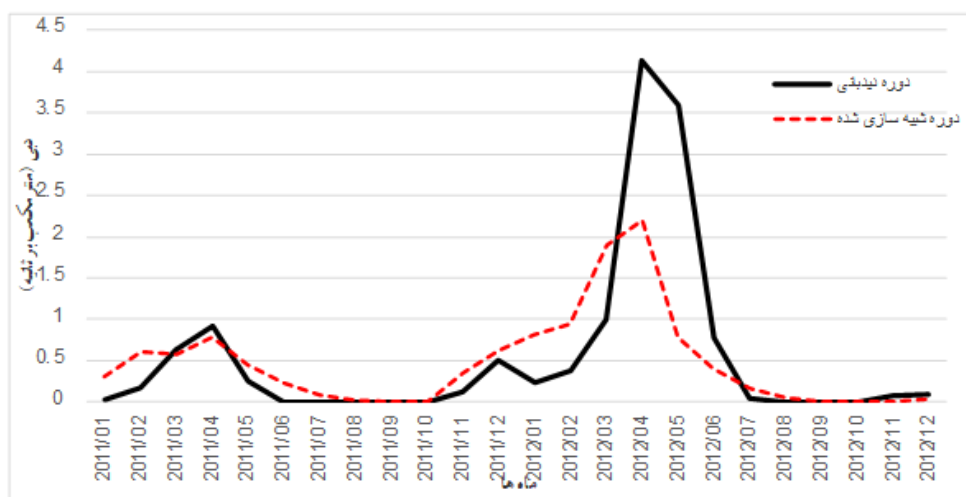
| پارامتر           | تعریف پارامتر                                                                                  | دامنه تغییرات | مقدار نهایی |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------|
| CN <sup>۲</sup>   | عدد CN                                                                                         | ۳۸-۹۸         | ۶۳/۶۳       |
| ALPHA_BF          | ضریب آلفای آب زیرزمینی                                                                         | ۰-۱           | ۰/۷۷۱       |
| GW_DELAY          | زمان تاخیر جریان آب زیرزمینی (روز)                                                             | ۰-۳۰۰         | ۶۲/۵۷       |
| GWQMN             | عمق آستانه آب در لایه کم عمق برای اینکه جریان پایه یا برگشتی اتفاق بیفتد. (mmH <sup>۲</sup> O) | ۰-۵۰۰۰        | ۴۷۲۱/۶۶     |
| SOL_BD            | جرم مخصوص خاک (gr/cm <sup>۳</sup> )                                                            | ۰/۹-۲/۵       | ۰/۹۵        |
| SOL_K             | ضریب هدایت هیدرولیکی در خاک (mm/hr)                                                            | ۰-۲۰۰۰        | ۰/۱۸۸       |
| ESCO              | فاکتور تبخیر آب از خاک                                                                         | ۰-۱           | ۰/۶۰۹       |
| EPCO              | ضریب جبران جذب گیاه                                                                            | ۰/۰۱-۱        | ۰/۹۲۳       |
| CH_N <sup>۲</sup> | ضریب مانینگ در رودخانه                                                                         | ۰/۰۱-۰/۳      | ۰/۱۹۳۲۸     |
| CH_K <sup>۲</sup> | هدایت هیدرولیکی موثر در کانال اصلی                                                             | ۰-۱۵۰         | ۳۲/۴۱       |
| SURLAG.bsn        | ضریب تاخیر رواناب سطحی (روز)                                                                   | ۱-۲۴          | ۱/۷۸        |
| SMFMN             | نرخ ذوب برف در دسامبر ۲۱ (mmH <sup>۲</sup> O/°C- day)                                          | -۵-۵          | ۲/۹۸۷       |

جدول (۸): شاخص عملکرد مدل هیدرولوژی SWAT برای شبیه سازی جریان ماهانه حوضه آبریز شاندیز

| R <sup>۲</sup> | E <sub>NS</sub> |                      |
|----------------|-----------------|----------------------|
| ۰/۶۵           | ۰/۶۵            | واسنجی ۲۰۰۳-۲۰۱۰     |
| ۰/۵۲           | ۰/۴۹            | اعتبارسنجی ۲۰۱۱-۲۰۱۲ |



شکل (۷): نتایج واسنجی مدل SWAT برای شبیه‌سازی جریان ماهانه حوضه آبریز شانديز (۲۰۰۳-۲۰۱۰)

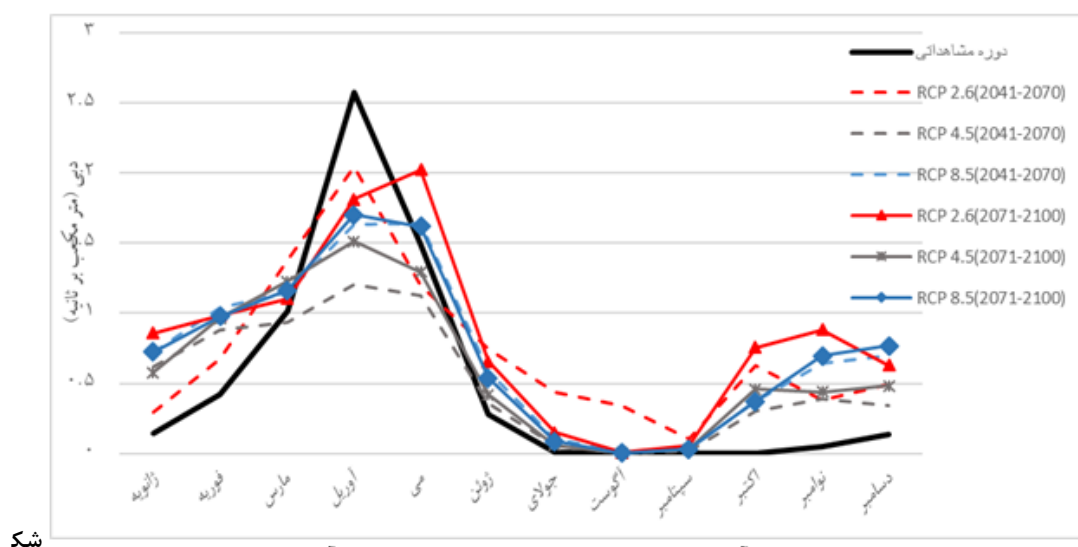


شکل (۸): نتایج ارزیابی مدل SWAT برای شبیه‌سازی جریان ماهانه حوضه آبریز شانديز (۲۰۱۱-۲۰۱۲)

نتایج مدل ریزمقیاس نمایی SDSM نشان می‌دهند که مدل مذکور توانایی شبیه‌سازی متغیرهای بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل روزانه را در دوره مورد مطالعه دارا بوده و خطای مدل سازی در حد قابل قبولی می‌باشد، بنابراین می‌توان از مدل SDSM ریزمقیاس نمایی متغیرهای بارش و دما استفاده کرد. نتایج مدل بارش دبی SWAT نشان می‌دهد که این مدل توانایی شبیه‌سازی دبی ماهانه را دارد و خطای مدل سازی در حد قابل قبولی می‌باشد، لذا از مدل SWAT با لحاظ پارامترهای واسنجی شده می‌توان در شبیه‌سازی دبی حوضه استفاده کرد.

**شبیه‌سازی تغییرات رواناب در دهه‌های آینده:** در ادامه با معرفی سری‌های زمانی ریزمقیاس شده دمای حداکثر و دمای و بارش ریزمقیاس شده توسط مدل SDSM، به مدل SWAT سری زمانی ماهانه رواناب حوضه آبریز شانديز در ایستگاه سراسیاب شانديز برای دو دوره ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۰۱۰-۲۰۷۱ تحت سه سناریوی انتشار  $RCP_{2.6}$ ،  $RCP_{4.5}$  و  $RCP_{8.5}$ ، شبیه‌سازی گردید. شکل (۹) سری زمانی دبی ماهانه ایستگاه سراسیاب شانديز در دوره دیدبانی، و دو دهه ی ۲۰۶۰ و ۲۰۸۰ تحت سه سناریوهای انتشار  $RCP_{2.6}$ ،  $RCP_{4.5}$  و  $RCP_{8.5}$ ، مدل

CanESM۲ نشان دهنده افزایش رواناب در تمام ماه های سال بجز ماه های مارس، آوریل و می است. تنها بر طبق سناریوی RCP۲,۶ دهه ی ۲۰۴۱-۲۰۷۰ در تمام ماه ها دبی ماهانه نسبت به دوره دیدبانی افزایش می یابد. در جدول (۹) مقدار میانگین دبی سالانه ایستگاه سرآسیاب شاندیز در دوره دیده بانی و دو دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۰۱۰۰ تحت سه سناریوی انتشار RCP۲,۶، RCP۴,۵ و RCP۸,۵ درصد تغییرات میانگین دبی سالانه دهه های آتی نسبت به دوره دیدبانی آورده شده است. روند متوسط سالانه نشان می دهد دبی در دهه های آتی افزایش خواهد یافت. کمترین افزایش میانگین سالانه دبی مربوط به دهه ی ۲۰۴۱-۲۰۷۰ سناریوی RCP۴,۵، با ۱/۵۶ درصد افزایش نسبت به دوره ی دیدبانی است. بیشترین افزایش میانگین سالانه رواناب ماهانه مربوط به دهه ی ۲۰۷۱-۲۰۱۰۰ سناریوی RCP ۲,۶ با ۱۰۴/۵۳ درصد رواناب نسبت به دوره دیدبانی افزایش می یابد. در نتیجه دبی خروجی حوضه شاندیز در ایستگاه سرآسیاب در دهه های آینده بین ۱/۵۶ تا ۱۰۴ درصد افزایش خواهد یافت.



شک

ل ۹: میانگین دبی ماهانه در ایستگاه سرآسیاب شاندیز دوره دیدبانی (۲۰۱۲-۲۰۴۳) و دو دوره آتی ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۰۱۰۰

۲۰۷۱ تحت سه سناریوی انتشار RCP۲,۶، RCP۴,۵ و RCP۸,۵

جدول ۹: درصد تغییرات در میانگین دبی سالانه ایستگاه سرآسیاب شاندیز نسبت به دوره دیدبانی در دو دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۰۱۰۰

۲۰۷۱-۲۰۱۰۰ تحت سه سناریوی انتشار RCP۲,۶، RCP۴,۵ و RCP۸,۵

| ۲۰۷۱-۲۰۱۰۰     |       | ۲۰۴۱-۲۰۷۰      |       |         | دوره دیدبانی |                |
|----------------|-------|----------------|-------|---------|--------------|----------------|
| ضریب تغییرات/% | دبی   | ضریب تغییرات/% | دبی   |         |              |                |
| ۱۰۴/۵۳         | ۱۲/۵۳ | ۵۷/۱۱          | ۹/۶۳  | RCP ۲,۶ | ۶/۱۳         | سرآسیاب شاندیز |
| ۶۶/۲۲          | ۱۰/۱۹ | ۱/۵۶           | ۶/۲۲  | RCP ۴,۵ |              |                |
| ۸۵/۱۵          | ۱۱/۳۵ | ۸۴/۱۹          | ۱۱/۲۹ | RCP ۸,۵ |              |                |

### نتیجه گیری

در این پژوهش پس از ریزگردانی داده های مدل اقلیمی، شاخص های حدی بارش و دما در سه دوره ۳۰ ساله برای دوره های پایه و آینده مورد بررسی و شناسایی قرار گرفت. میانگین بارش سالانه دهه های آینده ایستگاه مشهد نسبت به دوره دیدبانی افزایش یافته است. بررسی روند نمایه های حدی بارش ایستگاه مشهد در دو دهه ی آینده نشان می دهد، تعداد روزهای با بارش مساوی و یا بیشتر از ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلیمتر ( $R30mm$  ,  $R20mm$  ,  $R10mm$ )،

جمع سالانه بارش روزهای خیلی تر ( $R95p$ )، جمع سالانه بارش روزهای فوق العاده تر ( $R99p$ ) و حداکثر بارش ۵ روزه نسبت به دوره دیدبانی افزایش می‌یابد.

میانگین دمای حداقل و حداکثر ماهانه در ایستگاه مشهد در دو دهه ی آینده نسبت به دوره دیدبانی (۱۹۶۱-۱۹۹۰) افزایش یافته است. افزایش میانگین دمای حداقل و حداکثر در دهه ۲۰۷۱-۲۰۸۰ بیشتر از دهه ی ۲۰۴۱-۲۰۷۱ می‌باشد. بیشترین افزایش در میانگین دمای حداکثر فصلی به میزان ۶/۴ درجه سلسیوس در تابستان در دهه ۲۰۸۰ رخ خواهد داد. بیشترین افزایش ضریب تغییرات میانگین دمای حداقل فصلی به بیش از ۱۰۹ درصد مربوط به فصل زمستان در دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ بر طبق سناریوی RCP۸.۵ می‌باشد.

با تلفیق دو مدل اقلیمی SDSM و هیدرولوژی SWAT چشم انداز رواناب حوضه آبریز شانندیز در شمال شرق کشور مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این مرحله خروجی های بارش و دما حاصل از مدل SDSM به عنوان ورودی مدل SWAT معرفی شدند، نتایج نشان دادند که دبی خروجی حوضه شانندیز در ایستگاه سرآسیاب به میزان ۶/۲۲ تا ۱۲/۵۳ مترمکعب بر ثانیه معادل ۱/۵۶ تا ۱۰۴ درصد افزایش خواهد یافت.

نتایج این تحقیق می‌تواند برای سازگاری با تغییر اقلیم و مدیریت مخاطرات جوی و اقلیمی در دستگاههای ذیربط مانند سازمان مدیریت بحران، وزارت جهاد کشاورزی، شرکت آب منطقه ای، سازمان هواشناسی کشور و برنامه های توسعه بلند مدت مورد استفاده قرار گیرد.

## منابع

- بابائیان، ایمان؛ زهرا، نجفی نیک. فاطمه، زابل عباسی. مجید، حبیبی نوخندان. حامد، ادب و شراره، ملیوسی. ۱۳۸۸. ارزیابی تغییر اقلیم کشور در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۱ با استفاده از ریزمقیاس نمایی داده های مدل گردش عمومی جو ECHO-G. *مجله جغرافیا و توسعه*، ۱۶: ۱۵۲-۱۳۶.
- بابایی فینی، ام السلمه؛ الهه، قاسمی و ابراهیم، فتاحی. بررسی اثر تغییر اقلیم بر روند نمایه های حدی بارش ایران. ۱۳۹۵. *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۳: ۱۰۴-۸۶.
- دولابیان، شهاب. ۱۳۹۶. بررسی اثر تغییر اقلیم بر بارش و دمای مناطق مختلف کشور ایران بر اساس سناریوهای RCP، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود. شاهرود.
- منصوری، بهاره؛ حجت، احمدزاده. علیرضا، مساح بوانی. سعید، مرید. مجید، دلاور و سعید، لطفی. ۱۳۹۳. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه زربینه رود با استفاده از مدل SWAT. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۶: ۱۲۰۳-۱۱۹۱.

Abbaspour, K.C. ۲۰۰۹. User manual for SWAT-CUP<sup>۲</sup>, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. *Swis Federal Institute of Aquatic Science and Technology*, Eawag, Duebendorf, Switzerland, ۹۵ pages.

Alexander, L.V.; X. Zhang, T.C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A.M.G. Klein Tank, and A. Tagipour. ۲۰۰۶. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D<sup>۵</sup>).

Badrul, M.M.; P. Soni, S. Shrestha, and N.K. Tripathi. ۲۰۱۶. Changes in Climate Extremes over North Thailand, ۱۹۶۰-۲۰۹۹. *Journal of Climatology*, ۲۰۱۶: ۱۸-۲۳.

- Bell, J.L.; L.C. Sloan, and M.A. Snyder. ۲۰۰۴. Regional changes in extreme climatic events: A future climate scenario. *Journal of Climate*. ۱۷(۱): ۸۱-۸۷.
- Beniston, M.; D.B. Stephenson, O.B. Christensen, C.A. Ferro, C. Frei. S. Goyette, and K. Woth. ۲۰۰۷. Future extreme events in European climate: An exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, ۸۱(۱): ۷۱-۹۵.
- Brunetti, M.; L. Buffoni, F. Mangianti, M. Maugeri, and T. Nanni, T. ۲۰۰۴. Temperature, precipitation and extreme events during the last century in Italy. *Global and Planetary Change*, 40(۱): ۱۴۱-۱۴۹.
- Chamchati, H.; and M. Bahir. ۲۰۱۱. Contribution of climate change on water resources in semi-arid areas: Example of the Essaouita Basin (Morocco). *American Journal of Scientific and Industrial Research*. ۲(۲): ۲۰۹-۲۱۵.
- Cheema, S.B.; G. Rasul, G. Ali, D.H. Kazmi D.H. ۲۰۱۳. A Comparison of Minimum Temperature Trends with Model Projections. *Pakistan Journal of Meteorology*. ۸: ۳۹-۵۲.
- Collins, M.; R. Knutti, J.M. Arblaster, J.L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, and M. Wehner. ۲۰۱۳. Chapter 12 - Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. IPCC Working Group I Contribution to AR5*. Eds. IPCC, Cambridge: Cambridge University Press.
- Deryng, D.; D. Conway, N. Ramankutty, J. Price, and R. Warren. ۲۰۱۴. Global crop yield response to extreme heat stress under multiple climate change futures. *Environmental Research Letters*, 9(۳): ۰۳۴۰۱۱.
- Easterling, D.R., Meehl, G.A., Parmesan, C., Changnon, S.A., Karl, T.R., Mearns, L.O. (۲۰۰۰), Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science*, ۲۸۹(۵۴۸۷): ۲۰۶۸-۲۰۷۴.
- Fan, L., Xiong, Z. (۲۰۱۵), Using quantile regression to detect relationships between large-scale predictors and local precipitation over northern China, *Advances in Atmospheric Sciences*, ۳۲(۴), pp ۵۴۱-۵۵۲.
- Faramarzi, M.; K.C. Abbaspour, R. Schulin, and H. Yang, ۲۰۰۹. Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes*. ۲۳: ۴۸۶-۵۰۱.
- Folland, C. K.; T.R. Karl, and M. Jim Salinger. ۲۰۰۲. Observed climate variability and change. *Weather*, ۵۷(۸): ۲۶۹-۲۷۸.
- IPCC. ۲۰۰۷. Summary for Policymakers in Climate Change, 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. PP. ۱-۱۸.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers. In *Climate Change ۲۰۱۳: The Physical Science Basis; Contribution of Working Group I to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change*; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, ۲۰۱۳.
- IPCC. ۲۰۱۴. Annex II: glossary. K. J. Mach, S. Planton, C. von Stechow (Eds.), *Climate change ۲۰۱۴: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: Core Writing Team, Pachauri RK, Meyer LA (Eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, pp. ۱۱۷-۱۳۰.
- Ha, K. J.; and K. S. Yun. ۲۰۱۲. Climate change effects on tropical night days in Seoul, Korea. *Theoretical and Applied Climatology*. ۱۰۹(۱-۲): ۱۹۱-۲۰۳.
- Liu, J.; S. Fritz, C. F. A. Van Wesenbeeck, M. Fuchs, L. You, M. Obersteiner, and H. Yang. ۲۰۰۸. A spatially explicit assessment of current and future hotspots of hunger in Sub-Saharan Africa in the context of global change. *Global and Planetary Change*. 64(۳): ۲۲۲-۲۳۵.
- Hoogwijk M., Faaij, A., de Vries, B. and Turkenburg, W. ۲۰۰۹. Exploration of Regional and Global Cost-Supply Curves of Biomass Energy from Shortrotation Crops at Abandoned Cropland and Rest Land under Four IPCC SRES Land-use Scenarios, *Biomass & Bioenergy*, ۳۳: ۲۶-۴۳.

- Kharin, V. V.; F. W. Zwiers, X. Zhang, and M. Wehner, ۲۰۱۳. Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP۵ ensemble. *Climatic Change*, **119**(۲): ۳۴۵-۳۵۷.
- Klein T.; F. W. Zwiers, X. Zhang. ۲۰۰۹. Guideline on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation, *WMO Publication*, ۷۲: ۵۵pp.
- Klein, T.; A. M. G. Wijngaard, J. B., Können, G. P., Böhm, R., Demarée, G., A. Gocheva, and R. Heino. ۲۰۰۲. Daily dataset of ۲۰th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *International journal of climatology*, **22**(۱۲): ۱۴۴۱-۱۴۵۳.
- Kundzewicz Z.W., Mata L.J., Arnell N.W., D'oll P., Kabat P., Jim'enez B., Miller K.A., Oki T., Sen Z. and Shiklomanov I.A. ۲۰۰۷. Freshwater resources and their management. Climate Change ۲۰۰۷: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Parry, M. L. Canziani O. F. Palutikof J. P. van der Linden P. J. and Hanson C. E. Cambridge University Press, Cambridge, UK, ۱۷۳-۲۱۰, ۲۰۰۷.
- Marengo, J. A.; S. C. Chou, R. R. Torres, A. Giarolla, L. M. Alves, and A. Lyra. ۲۰۱۴. Climate change in central and South America: Recent trends, future projections, and impacts on regional agriculture. Working Paper, No ۷۳.
- Meehl, G. A.; F. Zwiers, J. Evans, T. Knutson, L. Mearns, and P. Whetton. ۲۰۰۰. Trends in extreme weather and climate events: Issues related to modeling extremes in projections of future climate change. *Bulletin of the American Meteorological Society*. **81**(۳): ۴۲۷-۴۳۶.
- Merritt W.S., Alila Y., Barton M., Taylor B., Cohen S. and Neilsen D. ۲۰۰۶. Hydrologic response to scenarios of climate change in subwatersheds of the Okanagan basin, British Columbia. *Journal of Hydrology* **۳۲۶**, ۷۹-۱۰۸.
- Molina E.; D. Trolle, S. Martinez, and A. Sastre. ۲۰۱۴. Hydrological and Water quality impact assessment of a Mediterranean Limon-reservoir under climate change and land use management Scenarios. *Hydrology*, **۵**(۹): ۳۵۴-۳۶۶.
- Moriasi, D. N.; J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith. ۲۰۰۷. Model evaluation guideline for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* ISSN ۰۰۰۱-۲۳۵۱ Transactions of the ASABE, **۵۰**(۳): ۸۸۵-۹۰۰.
- Moss, R. H.; J. A. Edmonds, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S. K. Rose, D. P. Van Vuuren, and T. J. Wilbanks. ۲۰۱۰. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. **۴۶۳**(۷۲۸۲): ۷۴۷-۷۵۶.
- Muhire, I.; and F. Ahmed. ۲۰۱۶. Spatiotemporal trends in mean temperatures and aridity index over Rwanda. *Theoretical and Applied Climatology*, **123**(۱-۲): ۳۹۹-۴۱۴.
- Murphy, J. ۱۹۹۲. An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate. *Journal of Climate*, **۱۹**(۵): ۰۰۲۶-۰۰۲۲.
- Nandintsetseg, B.; J. S. Greene, and C. E. Gouliden. ۲۰۰۷. Trends in extreme daily precipitation and temperature near Lake Hövsgöl, Mongolia. *International Journal of Climatology*, **27**(۳): ۳۴۱-۳۴۷.
- Nash J. E.; and J. V. Sutcliffe. ۱۹۷۰. River flow forecasting through conceptual models. Part I –A discussion of principles. *Journal of Hydrology* **۱۰**: ۲۸۲-۲۹۰.
- Plattner, G. K.; T. F. Stocker. ۲۰۱۰. From AR۴ to AR۵: New Scenarios in the IPCC Process. Workshop Report.
- Piras, M.; G. Mascaro, R. Deidda, and E. Vivonia. ۲۰۱۶. Impacts of climate change on precipitation and discharge extremes through the use of statistical downscaling approaches in a Mediterranean basin. *Total Environment*. **۵۴۳**: ۹۶۵- ۹۸۰.
- Seneviratne, S. I.; M. G. Donat, B. Mueller, and L. V. Alexander. ۲۰۱۴. No pause in the increase of hot temperature extremes. *Nature Climate Change*, **۴**(۳): ۱۶۱-۱۶۳.

- Setegn S. G. ۲۰۱۰. Modeling hydrological and hydrodynamic processes in lake Tana basin, Ethiopia. KTH. TRITA-LWR PhD Thesis ۱۰۵۷. Royal Institute of Technology. Sweden. Sudheer CH, Nitin ABK, Panigrahi BK and Shashi M, ۲۰۱۳. Streamflow forecasting by SVM with quantum behaved particle swarm optimization. *Neurocomputing* ۱۰۱: ۱۸-۲۳.
- Sillmann, J. and E. Roeckner. ۲۰۰۸. Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change. *Climatic Change*. ۸۶: ۸۳-۱۰۴.
- Tan, M. L., Yusop, Z., Chua, V. P., & Chan, N. W. (۲۰۱۷). Climate change impacts under CMIP<sup>۵</sup> RCP scenarios on water resources of the Kelantan River Basin, Malaysia. *Atmospheric Research*, ۱۸۹: ۱-۱۰.
- Taylor, K. E.; R. J. Stouffer, and G. A. Meehl. ۲۰۱۲. An overview of CMIP<sup>۵</sup> and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4): ۴۸۵-۴۹۸.
- Vaghefi, S.A.; S. J. Mousavi, K. C. Abbaspour, R. Srinivasan, H. Yang. ۲۰۱۴. Analyses of the impact of climate change on water resources components, drought and wheat yield in semiarid regions: Karkheh River Basin in Iran. *Hydrol. Process*. ۲۸:۲۰۱۸-۲۰۳۲.
- Van Liew M.W.; and J. Garbrecht J. ۲۰۰۳. *Hydrologic simulation of the Little Washita River experimental watershed using SWAT*. Journal of the American Water Resources Association ۳۹:۴۱۳-۴۲۶.
- Willby, R. L., C. W. Dawson, and E. M. Barrow. ۲۰۰۲. SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, ۱۷: ۱۴۵-۱۵۷.
- Zhang, X.; G. Hegerl, F.W. Zwiers, and J. Kenyon, ۲۰۰۴: Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes. *J. Climate*, submitted.
- Zhang, X.; and F. Yang. ۲۰۰۴. RCLimDex (۱.۰) User Manual. Climate Research Branch Environment Canada Downsview, Ontario Canada
- Zhang, Q.; C. Liu, C. Xu, Y. Xu, Y. and T. Iang. ۲۰۰۶. Observed trends of annual maximum water level and streamflow during past ۱۳۰ years in the Yangtze River basin, China. *J. Hydrol.* ۳۲۴: ۲۵۵-۲۶۵.

