

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر میزان پایداری مصرف آب در بخش کشاورزی حوضه آبریز زاینده رود

محمدجواد زارعیان^{۱*}، سیدسعید اسلامیان^۱ و حمیدرضا صفوی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۳۰)

چکیده

این مطالعه به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق و تعادل آن با منابع آب حوضه زاینده رود انجام گرفته است. دو ایستگاه شاخص هواشناسی در حوضه زاینده رود شامل ایستگاه‌های اصفهان و چلگرد که به ترتیب در شرق و غرب حوضه واقع شده‌اند، به عنوان ایستگاه‌های مورد بررسی انتخاب شدند. براساس روش وزن‌دهی، ترکیبی از ۱۵ مدل GCM ایجاد گردید و الگوهای تغییر اقلیم شامل ایده‌آل، متوسط و بحرانی تعریف گردیدند. با استفاده از الگوهای ارائه شده پیشنهادی، اثرات تغییر اقلیم روی دما و تبخیر و تعرق ایستگاه اصفهان و بارندگی ایستگاه چلگرد تحت دو سناریوی انتشار A۲ و B۱ مورد بررسی قرار گرفت. دو شاخص برای مشخص نمودن وضعیت تعادل آب کشاورزی حوضه در نظر گرفته شد. نسبت تبخیر و تعرق شرق حوضه به بارندگی غرب حوضه به عنوان شاخص EPR (تعادل در آب موجود و مصرف آب کشاورزی) و نسبت کمبود حداکثر کمبود آب به نیاز آبی کشاورزی به عنوان شاخص کمبود حداکثر (MD) در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که دمای سالانه شرق حوضه بین ۰/۶۳ تا ۱/۱۳ درجه سلسیوس افزایش پیدا خواهد کرد. کاهش بارندگی غرب حوضه نیز بین ۶/۵ تا ۳۰ درصد در الگوهای خوش‌بینانه تا بحرانی تغییر می نماید. فصل تابستان بیشترین مقدار افزایش دما و فصل زمستان بیشترین مقدار کاهش بارندگی را نشان دادند. سناریوی انتشار A۲ افزایش دما و کاهش بارندگی را بیش از سناریوی انتشار B۱ نشان داد. همچنین نتایج نشان دهنده افزایش ۳/۱ تا ۴/۸ درصدی تبخیر و تعرق پتانسیل در حوضه زاینده رود بود. مقدار شاخص EPR حوضه زاینده رود در الگوهای تغییر اقلیم مختلف، بین ۱۳ تا ۵۲ درصد و شاخص MD بین ۹ تا ۳۵ درصد افزایش می یابد. نتایج نشان‌دهنده بر هم خوردن تعادل مصرف آب کشاورزی در شرق حوضه با بارندگی در غرب حوضه است. به عبارت دیگر در این شرایط بایستی برنامه‌ریزی و مدیریت ویژه‌ای برای ایجاد پایداری منابع آب در حوضه آبریز زاینده رود اتخاذ نمود.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق، تعادل منابع آب، تغییر اقلیم، حوضه زاینده‌رود، روش وزن‌دهی

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشکده صنعتی اصفهان

۲. گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mj.zareian@ag.iut.ac.ir

مقدمه

هواشناسی ترکیب و سری زمانی داده‌های اقلیمی در آینده تولید می‌شود (۲۲).

تاکنون محققین زیادی با استفاده از یکی از مدل‌های GCM، اقدام به برآورد پارامترهای هواشناسی در آینده نموده‌اند. طبق نتایج حاصل، استفاده از مدل‌های GCM به صورت منفرد باعث عدم قطعیت‌های فراوان در پیش‌بینی تغییر اقلیم می‌گردد (۱۵). بنابراین محققین، استفاده از روش‌های ترکیبی را جهت بالا بردن دقت پیش‌بینی مدل‌های GCM توصیه کرده‌اند (۱۳). دو روش کلی برای ترکیب این مدل‌ها پیشنهاد شده است. در روش اول، احتمال صحت پیش‌بینی هر کدام از مدل‌های GCM یکسان در نظر گرفته می‌شود (۲۸). ولی در روش دوم، مدل‌های GCM بر اساس توانایی خود برای پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی، وزن‌دهی می‌شوند. روش دوم در مقایسه با روش اول دقت بهتری دارد؛ چون باعث افزایش وزن مدل‌های دقیق‌تر خواهد شد و ضریب تأثیر این مدل‌ها در پیش‌بینی بیشتر خواهد بود (۱۲).

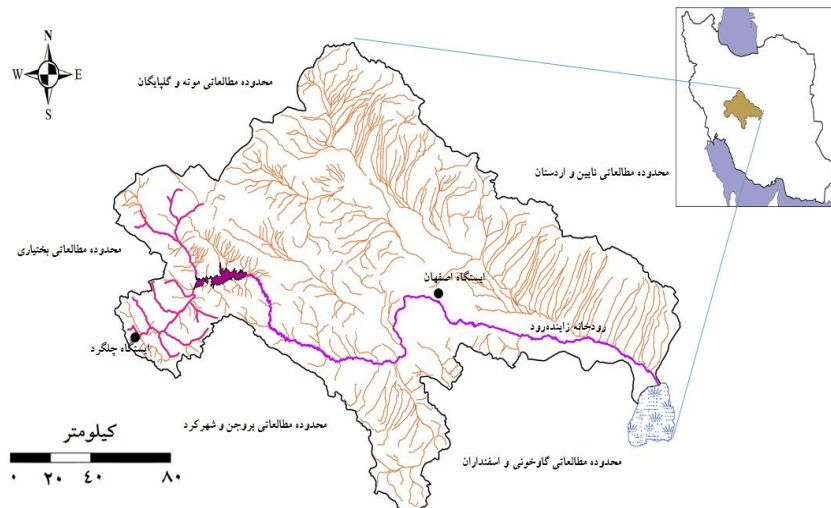
نتایج استفاده از مدل‌های GCM تحت سناریوهای مختلف در ۳۷ ایستگاه هواشناسی ایران نشان داده که در اثر تغییر اقلیم، مناطق خشک با کاهش و مناطق مرطوب با افزایش بارندگی مواجه خواهند بود (۶). در مطالعه‌ای که به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم در حوضه زاینده‌رود با استفاده از مدل HadCM۳ انجام شد، مشخص گردید که تا سال ۲۱۰۰، دمای حوضه افزایش و مقدار بارندگی آن کاهش خواهد یافت و اثر آن در سال‌های پایانی قرن ۲۱ شدیدتر خواهد بود (۵). در مطالعه دیگری که در حوضه زاینده‌رود انجام شد، با استفاده از روش‌های احتمالاتی، اقدام به وزن‌دهی مدل‌های GCM گردید (۱۰). نتایج نشان داد که مدل‌های GCM مختلف، دقت متفاوتی در پیش‌بینی اثر تغییر اقلیمی بر دما و بارندگی داشتند. همچنین افزایش دما تا سال ۲۰۴۵ بین ۱/۳۲ تا ۱/۵۲ درجه سلسیوس و کاهش بارندگی تا ۳۱ درصد تخمین زده شد.

هدف پژوهش حاضر، بررسی اثرات تغییر اقلیم در حوضه آبریز زاینده‌رود می‌باشد. رویکرد اصلی در این تحقیق، استفاده از مدل‌های ترکیبی به جای مدل‌های منفرد بوده و در کنار آن

به‌طورکلی، تغییر اقلیم اشاره به دگرگونی‌های غیرمنتظره در خصوصیات آب و هوایی زمین دارد که در دراز مدت رخ می‌دهد (۱۱). این تغییرات عمدتاً به دلیل گسترش فعالیت‌های صنعتی بشر در دهه‌های اخیر و افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو زمین رخ داده است. (۲۷). در نتیجه این تغییرات، پارامترهای هواشناسی نیز دچار دگرگونی شده‌اند. افزایش دمای کره زمین مشخص‌ترین علامت این تغییرات است. دمای کره زمین در طول ۱۰۰ سال گذشته ۰/۷۴ درجه سلسیوس افزایش یافته و تا سال ۲۱۰۰، این افزایش به ۳ درجه سلسیوس خواهد رسید (۱۷). تغییر در میزان و الگوی بارندگی، پدیده دیگری است که در اثر تغییر اقلیم ایجاد شده است. این تغییرات بیشتر به دلیل تغییر در مقدار آب موجود در جو رخ داده است. شدت بارندگی نیز در اثر تغییر اقلیم دچار نوسانات شدیدی شده است به طوری که وقوع بارش‌های با شدت زیاد در مناطق خشک روند رو به رشدی داشته است. وقوع سیل‌های نادر و شدید در کنار خشکسالی‌های متعدد، گویای اثرات مخرب تغییر اقلیم بر وضعیت آب و هوایی جهان است (۲۹).

به‌غیر از دما و بارندگی، تبخیر و تعرق یکی دیگر از پارامترهایی است که در اثر تغییرات اقلیم دچار نوسان شده است. این درحالی است که تبخیر و تعرق به‌عنوان اصلی‌ترین عامل تعیین‌کننده نیاز آبی گیاهان همواره مطرح می‌باشد و هرگونه تغییر در میزان تبخیر و تعرق باعث تغییر نیاز آبی گیاهان خواهد شد (۹).

طی سه دهه اخیر، تلاش‌های زیادی صورت گرفته تا اثرات تغییر اقلیم بر پارامترهای هواشناسی، به‌صورت کمی درآید. حاصل این تلاش‌ها تشکیل هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) بوده است. این بنیاد، مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) را ارائه داده است. جهت تبدیل خروجی مدل‌های GCM به داده‌های روزانه، از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی (Downscaling) استفاده می‌شود. در این روش‌ها، داده‌های خروجی مدل‌های GCM به صورت همزمان با داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌های



شکل ۱. نمای کلی از موقعیت حوضه آبریز زاینده‌رود و ایستگاه‌های هواشناسی منتخب

مصرف می‌نماید (۳۰). هم‌زمانی توسعه بی‌رویه حوضه با وقوع تغییرات اقلیمی، شرایط را برای این منطقه پیچیده‌تر کرده و موجب تأثیرپذیری بخش‌های کمی و کیفی منابع آب گردیده است (۵).

به‌دلیل تمرکز بیشتر مصارف آب حوضه زاینده‌رود در قسمت‌های مرکزی و شرقی حوضه، فشار اصلی بر منابع آب در این قسمت‌ها وارد می‌شود. بنابراین ایستگاه هواشناسی اصفهان به‌عنوان یکی از ایستگاه‌های شاخص منطقه شرق حوضه انتخاب گردید تا اثرات تغییر اقلیم بر دمای آن بررسی گردد. این ایستگاه هواشناسی دارای طول جغرافیایی $51^{\circ} 40'$ شرقی، عرض جغرافیایی $32^{\circ} 37'$ شمالی و ارتفاع ۱۵۸۶ متر از سطح دریا می‌باشد. از طرف دیگر، بخش غربی حوضه زاینده‌رود که شامل زیرحوضه پلاسجان می‌شود، به‌عنوان تأمین‌کننده اصلی جریان آب در رودخانه زاینده‌رود مطرح است. بنابراین وقوع تغییرات اقلیمی در مناطق غربی حوضه، اثرات شدیدی بر بارندگی و در نتیجه منابع آب در حوضه خواهد داشت. بنابراین، ایستگاه هواشناسی چلگرد نیز در قسمت غربی حوضه با طول جغرافیایی $50^{\circ} 07'$ شرقی، عرض جغرافیایی $32^{\circ} 28'$ شمالی و ارتفاع ۲۳۷۲ متر از سطح دریا انتخاب گردید. شکل ۱، وضعیت کلی حوضه زاینده‌رود و ایستگاه‌های انتخابی را نشان می‌دهد.

الگوهای تغییر اقلیم برای شرایط متفاوت ارائه گردیده است. در نهایت، با استفاده از خروجی روش ترکیبی، اثرات تغییر اقلیم بر دما، بارندگی و تبخیر و تعرق حوضه زاینده‌رود در دوره زمانی ۲۰۴۴-۲۰۱۵ مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به‌ذکر است که هدف اصلی این مقاله بررسی اثرات تغییر اقلیم بر پارامترهای دما و بارندگی و تعیین اثرگذاری این پارامترها بر بخش کشاورزی است. بدیهی است تغییر در اقلیم محلی منطقه، بحثی مجزا از هدف این مقاله است و آنچه مورد استفاده قرار گرفته است، اثرات تغییر اقلیم در مقیاس جهانی بر پارامترهای دما و بارندگی منطقه است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه، حوضه آبریز زاینده‌رود که در بخش خشک و نیمه‌خشک مرکز ایران واقع شده است، به‌عنوان نمونه‌ای از مناطق کم‌آب ایران انتخاب گردید. عمده منبع تأمین آب مورد نیاز این حوضه، رودخانه زاینده‌رود است که آب مورد نیاز برای مصارفی که عمدتاً در قسمت شرقی متمرکز هستند را فراهم می‌کند (۲۴). بخش کشاورزی، مهم‌ترین مصرف‌کننده آب در این حوضه است و حدود ۷۳٪ از منابع آب را در این منطقه

جدول ۱. خصوصیات مدل‌های GCM مورد استفاده جهت بررسی اثرات تغییر اقلیم

| نام مدل | دقت تفکیک (درجه) | نام مدل | دقت تفکیک (درجه) |
|-------------|------------------|-----------|------------------|
| HADCM3 | ۳/۷۵×۲/۵ | IPSL-CM4 | ۳/۷۵×۲/۵ |
| ECHAM5-OM | ۱/۹×۱/۹ | GISS-E-R | ۱/۹×۱/۹ |
| CSIRO-MK3/0 | ۱/۹×۱/۹ | ECHO-G | ۱/۹×۱/۹ |
| GFDL-CM2/1 | ۰/۲/۵×۲ | INM-CM3/0 | ۰/۲/۵×۲ |
| CGCM2/3/2 | ۲/۸×۲/۸ | CGCM3-T63 | ۲/۸×۲/۸ |
| CCSM3 | ۱/۴×۱/۴ | NCAR-PCM | ۱/۴×۱/۴ |
| CNRM-CM3 | ۱/۹×۱/۹ | BCM2/0 | ۱/۹×۱/۹ |
| MIROC3/2 | ۲/۸۱×۲/۸۱ | | |

بررسی اثرات تغییر اقلیم

در این مطالعه، از خروجی ۱۵ مدل GCM مربوط به چهارمین گزارش ارزیابی IPCC (AR4) استفاده شد (۲۲). جدول ۱ جزئیات مدل‌های مورد استفاده را نشان داده است. خروجی این مدل‌ها برای دو دوره زمانی ۱۹۷۱-۲۰۰۰ (دوره پایه) و ۲۰۴۴-۲۰۱۵ از سایت مرکز توزیع داده‌های IPCC (۸) استخراج گردید. این خروجی‌ها شامل داده‌های ماهانه دمای ایستگاه اصفهان و بارندگی ایستگاه چلگرد بودند.

داده‌های مورد استفاده برای خروجی مدل‌های GCM که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، مربوط به گزارش چهارم IPCC می‌باشد. در این گزارش دوره پایه‌ای که برای کالیبره کردن مدل‌های GCM استفاده شده است، مربوط به سال‌های ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۰ می‌باشد. علیرغم موجود بودن داده‌های هواشناسی در ایستگاه‌های هواشناسی تا سال ۲۰۱۵، امکان استفاده از داده‌های جدیدتر طبق توصیه IPCC وجود ندارد. چرا که این داده‌های جدیدتر در کالیبراسیون مدل‌های GCM مورد استفاده قرار نگرفته‌اند و در صورت استفاده از آنها برای ریزمقیاس نمایی ممکن است باعث ایجاد خطا شوند.

جهت تعیین دقت هر کدام از مدل‌های GCM در پیش‌بینی دما و بارندگی در هر ایستگاه، از روابط ۱ و ۲ استفاده شد (۳۰):

$$TE_G = |T_{BG} - T_{BO}| \quad [1]$$

$$PE_G = |P_{BG} - P_{BO}| \quad [2]$$

در این روابط، TE_G و PE_G مقدار خطای مطلق هر کدام از مدل‌های GCM در پیش‌بینی دما و بارندگی، T_{BG} و P_{BG} به ترتیب مقدار خروجی دما و بارندگی هر یک از مدل‌های GCM در دوره پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۰) و T_{BO} و P_{BO} مقادیر متوسط ۳۰ ساله دما و بارندگی هستند که بر اساس داده‌های مشاهداتی سال‌های ۱۹۷۱-۲۰۰۰ در ایستگاه‌های هواشناسی به دست آمدند.

وزن مدل‌های GCM بر اساس مقایسه خطاهای به دست آمده و از روابط ۳ و ۴ محاسبه گردید:

$$WT_G = \frac{\sqrt{TE_G}}{\sum_{G=1}^{15} \sqrt{TE_G}} \quad [3]$$

$$WP_G = \frac{\sqrt{PE_G}}{\sum_{G=1}^{15} \sqrt{PE_G}} \quad [4]$$

در این روابط، WT_G و WP_G به ترتیب وزن هر یک از مدل‌های GCM مورد استفاده برای پیش‌بینی تغییرات دما و بارندگی هستند. وزن‌های محاسبه شده از روابط ۳ و ۴ برای هر ماه به صورت جداگانه محاسبه شدند. به عبارت دیگر، به جای محاسبه و به‌کارگیری یک وزن در سرتاسر سال، وزن‌ها به صورت ماهانه محاسبه شدند تا دقت پیش‌بینی‌ها افزایش پیدا کند (۲۸).

گردیده‌اند. اندیس G نیز معرف هر کدام از ۱۵ مدل GCM مورد استفاده است.

۱۵ مدل GCM مورد استفاده در این تحقیق، از میان ۲۳ مدل GCM موجود در گزارش چهارم IPCC انتخاب شدند. این مدل‌ها در حقیقت مدل‌هایی هستند که خروجی مورد نظر در این تحقیق (دما و بارندگی)، برای ایستگاه‌های مورد مطالعه را به‌طور کامل ارائه داده‌اند.

مقادیر ΔT و ΔP محاسبه شده از روابط ۶ و ۸ به‌علت استفاده از تمامی ۱۵ مدل GCM، دارای بیشترین دقت ممکن در پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم هستند. از طرف دیگر، سناریوهای دیگری نیز همواره باید برای بررسی اثر تغییر اقلیم در نظر گرفته شود. بنابراین، مقادیر ΔT و ΔP محاسبه شده به‌عنوان تغییرات دما و بارش در حالت متوسط در نظر گرفته شده و به‌صورت ΔT_m و ΔP_m مشخص شدند. پس از آن، مدل‌های GCM در هر ایستگاه مجدداً مورد بازبینی قرار گرفتند و مدل‌هایی که تغییرات دما را بیش از ΔT_m نشان می‌دادند، به‌عنوان مدل‌های بحرانی و سایر مدل‌ها به‌عنوان مدل‌های ایده‌آل از سایر مدل‌ها تفکیک شدند. برای هر دسته از این مدل‌ها، مجدداً وزن‌دهی با استفاده از روابط ۳ و ۴ انجام شد. نتیجه تولید دو الگوی دیگر برای پیش‌بینی تغییرات اقلیم بود که به‌ترتیب با حالت بحرانی (ΔT_c) و حالت ایده‌آل (ΔT_i) مشخص شدند. برای بارندگی نیز دو الگوی بحرانی (ΔP_c) و ایده‌آل (ΔP_i) تعریف شد، با این تفاوت که آن دسته از مدل‌هایی که کاهش بیشتری را برای بارندگی آینده تخمین زدند، به‌عنوان مدل‌های بحرانی و سایر مدل‌ها به‌عنوان مدل‌های ایده‌آل بارندگی انتخاب گردیدند.

جهت تبدیل خروجی مدل‌های GCM به مقادیر سری روزانه یا ماهانه داده‌های هواشناسی، از مدل LARS-WG استفاده شد (۲۵). این مدل، بر اساس توابع توزیع نیمه‌تجربی قادر به پیش‌بینی دوره‌های تر و خشک آینده می‌باشد (۲۵) و (۲۶). در این تحقیق، سری روزانه داده‌های مشاهداتی دمای ایستگاه اصفهان و بارندگی ایستگاه چلگرد، به همراه الگوهای

دوره‌های زمانی برای بررسی اثرات تغییر اقلیم، شامل دوره ۳۰ ساله ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۴ بود. استخراج مقادیر خروجی مدل‌ها برای دو سناریوی انتشار A۲ و B۱ صورت گرفت. سناریوی انتشار A۲ بیشتر روی رشد سریع جمعیت همراه با توسعه ناچیز فناوری و اقتصادی تا سال ۲۱۰۰ تأکید می‌کند. ولی سناریوی انتشار B۱ قرن حاضر را دو بخش تقسیم می‌کند و طبق آن تا سال ۲۰۵۰ رشد سریعی در بخش اجتماعی-اقتصادی و نیز جمعیت رخ داده و پس از آن تا سال ۲۱۰۰ روند کاهشی خواهد داشت. در سناریوی انتشار A۲، مقدار رشد جمعیت دنیا تا سال ۲۰۱۰ برابر با ۱۰۵ میلیون نفر در هر سال پیش‌بینی شده است. ولی در سناریوی انتشار B۱، مقدار رشد جمعیت تا سال ۲۰۵۰ برابر با ۱۰۵ میلیون نفر در سال بوده و به‌تدریج از سال ۲۰۵۰ تا ۲۱۰۰ به‌صورت خطی تا ۶۰ میلیون نفر در سال کاهش پیدا خواهد نمود (۲۷).

مقدار تغییرات دمای ماهانه ایستگاه اصفهان و بارندگی ماهانه ایستگاه چلگرد برای هر یک از سناریوهای انتشار A۲ و B۱، با استفاده از روابط ۵ تا ۸ تعریف گردید (۳۰):

$$\Delta T = \sum_{G=1}^{15} (WT_G \times \Delta T_G) \quad [5]$$

$$\Delta T_G = T_{FG} - T_{BG} \quad [6]$$

$$\Delta P = \sum_{G=1}^{15} (WP_G \times \Delta P_G) \quad [7]$$

$$\Delta P_G = \frac{P_{FG}}{P_{BG}} \quad [8]$$

در روابط فوق، ΔT تغییرات دمای ایستگاه اصفهان در آینده، ΔT_G متوسط ۳۰ ساله تغییرات دمای پیش‌بینی شده توسط هر یک از مدل‌های GCM و T_{FG} متوسط دمای خروجی هر یک از مدل‌های GCM در آینده هستند. همچنین ΔP تغییرات بارندگی ایستگاه چلگرد می‌باشد. ΔP_G متوسط ۳۰ ساله تغییرات بارندگی پیش‌بینی شده توسط هر یک از مدل‌های GCM و P_{FG} متوسط بارندگی خروجی هر یک از مدل‌های GCM در آینده هستند. WT_G و WP_G نیز به‌ترتیب وزن مدل‌های GCM برای محاسبه دما در ایستگاه اصفهان و بارندگی در ایستگاه چلگرد هستند که از روابط ۳ و ۴ قبلاً محاسبه

اصفهان گسترش یافته‌اند.

مقدار تبخیر و تعرق در این قسمت با استفاده از روش هارگریوز-سامانی در ایستگاه اصفهان محاسبه گردید تا به‌عنوان شاخصی از مصرف آینده آب در بخش کشاورزی مدنظر قرار گیرد. از طرف دیگر، عمده جریان آب در رودخانه زاینده‌رود به بارش‌های جوی رخ داده در قسمت غرب حوضه و به‌خصوص در زیرحوضه پلاسجان وابسته است. بنابراین تغییرات بارش در قسمت غربی حوضه بر اساس مقدار تغییرات بارش در ایستگاه چلگرد مشخص گردید. درنهایت، وضعیت تعادل آبی در بخش کشاورزی حوضه زاینده‌رود بر اساس الگوهای مختلف تغییر اقلیم با استفاده از دو شاخص نسبت تبخیر-تعرق به بارش و شاخص کمبود حداکثر تعریف گردید:

$$EPR_m = \frac{ET_m}{P_m} \quad [11]$$

که EPR_m (Evapotranspiration-Precipitation Ratio) است

شاخص تعادل آب کشاورزی است و برابر با نسبت تبخیر و تعرق مرجع در قسمت شرقی حوضه (ET_{0m}) به بارندگی در قسمت غربی حوضه (P_m) می‌باشد (۱۸).

$$MD = \text{Max def } i = \frac{\max(D_{\text{Annual}}^i)}{\text{Water Demand}^i} \quad [12]$$

که MD شاخص کمبود حداکثر سالانه، $\max(D_{\text{Annual}}^i)$ حداکثر مقدار کمبود سالانه میان تبخیر و تعرق و بارندگی و Water Demand^i مقدار نیاز تبخیر و تعرق می‌باشد. زیرنویس i نیز بدین معنی است که رابطه ۱۲ برای هر ماه به‌صورت جداگانه مورد استفاده قرار گرفته و در نهایت بیشترین کمبود در هر دوره ماهانه به‌عنوان شاخص کمبود سالانه در نظر گرفته شد (۲۱).

نتایج و بحث

وزن مدل‌های GCM

شکل ۲ نتایج وزن‌دهی مدل‌های GCM را جهت پیش‌بینی دمای ایستگاه اصفهان و بارندگی ایستگاه چلگرد نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که مدل‌های مختلف GCM، دقت متفاوتی در

تغییر اقلیم در هر ماه، به‌عنوان ورودی به مدل LARS-WG داده شده و سری زمانی ۳۰ ساله داده‌های دما و بارندگی این ایستگاه‌ها ایجاد گردید. پس از این مرحله، امکان استفاده از خروجی مدل‌های تغییر اقلیم در تحلیل وضعیت آب و هوایی حوضه زاینده‌رود فراهم شد.

محاسبه تبخیر و تعرق مرجع (ET_0)

فرمول‌هایی مانند فائو-پنمن-مانیتث که برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع به‌کار می‌روند، علاوه‌بر دمای حداکثر و حداقل روزانه، نیاز به پارامترهای رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی دارند. بنابراین سعی شد که از روش دیگری با تعداد متغیرهای کمتر جهت محاسبه ET_0 روزانه استفاده شود. بنابراین، روش هارگریوز-سامانی برای محاسبه ET_0 انتخاب گردید که به‌صورت رابطه ۹ تعریف گردیده است (۱۴):

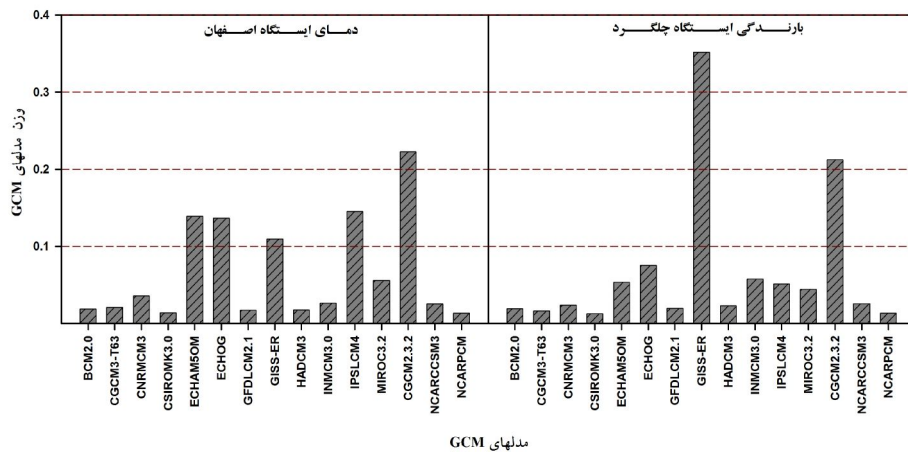
$$ET_0 = 0.0135 \times K_T \times R_a \times TD^{0.5} \times (T + 17/8) \quad [9]$$

در این رابطه، TD اختلاف بین دمای حداکثر و حداقل روزانه (درجه سلسیوس)، T میانگین دمای روزانه (درجه سلسیوس) و R_a حداکثر تابش خورشید به سطح زمین بر حسب میلی‌متر آب تبخیرشده می‌باشد که برای عرض‌های جغرافیایی مختلف توسط فائو ارائه شده است (۷). K_T نیز ضریب تصحیح دما است که از فرمول ۱۰ محاسبه می‌گردد:

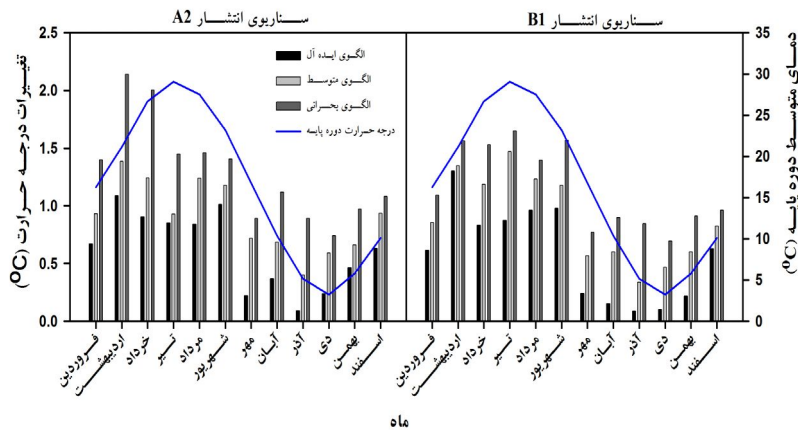
$$K_T = 0.00185 \times TD^2 - 0.0433 \times TD + 0.4023 \quad [10]$$

شاخص‌های تعادل در وضعیت آب بخش کشاورزی

تبخیر و تعرق به‌عنوان اصلی‌ترین عامل مؤثر در تعیین نیاز آبی گیاهان مطرح می‌باشد. بخش کشاورزی نزدیک به ۷۳ درصد آب موجود در حوضه زاینده‌رود را مصرف می‌نماید و بنابراین عمده‌ترین مصرف‌کننده آب در این ناحیه به‌شمار می‌رود (۱۰). بنابراین تغییر در میزان تبخیر و تعرق، سهم به‌سزایی در برهم خوردن تعادل آبی حوضه خواهد داشت. از طرف دیگر، عمده اراضی کشاورزی که به جریان آب در حوضه زاینده‌رود وابسته هستند در قسمت شرقی حوضه و در اطراف شهر



شکل ۲. متوسط ماهانه وزن مدل‌های GCM برای پیش‌بینی دمای ایستگاه اصفهان و بارندگی ایستگاه چلگرد در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۴



شکل ۳. متوسط تغییرات ماهانه دمای ایستگاه اصفهان تحت سناریوهای انتشار مختلف در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۴ در مقایسه با درجه حرارت متوسط دوره پایه ۱۹۷۱ تا ۲۰۱۰

مدل‌های GCM برابر با ۳۵٪ و متعلق به مدل GISS-ER بود. همچنین مدل CSIROMK3/0 با وزن ۱۳٪ کمترین دقت را بین مدل‌ها دارا بود. نتایج کلی نشان داد که دو مدل GISS-ER و CGCM2/3/2 بیشترین دقت را در پیش‌بینی بارندگی داشتند به نحوی که ۵۰٪ از وزن کل مدل‌های مورد استفاده مربوط به این دو مدل GCM بود.

تغییرات دمای ایستگاه اصفهان

شکل ۳ مقادیر تغییرات دمای ایستگاه اصفهان را نشان می‌دهد.

پیش‌بینی دما داشتند. مدل CGCM2/3/2 با وزن ۲۳٪ بیشترین و مدل NCARPCM با وزن ۱٪ کمترین دقت را در تخمین دما دارا بودند. به‌طورکلی، مدل‌های GCM با وزن بیشتر، فراوانی کمتری نسبت به سایر مدل‌های GCM داشتند و چهار مدل CGCM2/3/2، ECHAM5OM، IPSLCM4 و ECHOG به تنهایی ۵۰٪ وزن کل مدل‌های GCM استفاده شده را به خود اختصاص دادند.

نتایج مربوط به وزن‌دهی مدل‌های GCM جهت پیش‌بینی بارندگی ایستگاه چلگرد، نیز نشان داد که بیشترین وزن بین

جدول ۲. متوسط تغییرات فصلی و سالانه دمای ایستگاه هواشناسی اصفهان در طی دوره زمانی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۴ برحسب درجه سلسیوس در مقایسه با دوره پایه ۱۹۷۱ تا ۲۰۱۰

| دوره زمانی | الگوی ایده‌آل | | الگوی متوسط | | الگوی بحرانی | |
|------------|---------------|------|-------------|------|--------------|------|
| | B1 | A2 | B1 | A2 | B1 | A2 |
| بهار | ۰/۸۶ | ۰/۸۲ | ۱/۱۵ | ۱/۱۱ | ۱/۴۸ | ۱/۳۹ |
| تابستان | ۰/۹۹ | ۰/۹۶ | ۱/۳۲ | ۱/۲۱ | ۱/۸۵ | ۱/۵۴ |
| پاییز | ۰/۲۳ | ۰/۱۶ | ۰/۶۰ | ۰/۵۰ | ۰/۹۶ | ۰/۸۴ |
| زمستان | ۰/۴۴ | ۰/۳۲ | ۰/۷۳ | ۰/۶۳ | ۰/۹۴ | ۰/۸۵ |
| سالانه | ۰/۶۳ | ۰/۵۶ | ۰/۹۵ | ۰/۸۶ | ۱/۳۱ | ۱/۱۵ |

بحرانی بین ۰/۵۶ تا ۱/۱۵ درجه سلسیوس و در الگوی متوسط برابر با ۰/۸۶ درجه سلسیوس به دست آمد و بنابراین طی ۳۰ سال آینده، دمای منطقه تحت سناریوی انتشار B1، ۵/۳ درصد افزایش خواهد داشت. در کل سناریوی انتشار A2 افزایش دمای بیشتری نسبت به سناریوی انتشار B1 نشان داد.

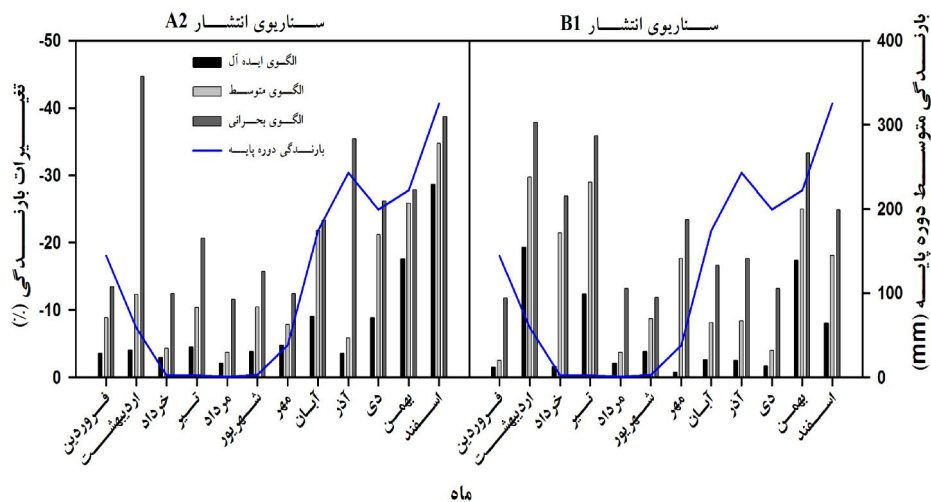
افزایش دمای مناطق مختلف زمین تحت سناریوهای مختلف اقلیمی، توسط محققان متعددی گزارش شده است. گوهری و همکاران (۱۰) نشان دادند که دمای متوسط حوضه زاینده‌رود تا سال ۲۰۴۵ بین ۱/۳ تا ۱/۵ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. در تحقیقی که توسط مرید و مساح بوانی (۲۰) انجام شد، وضعیت آینده اقلیم حوضه زاینده‌رود تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که دمای حوضه زاینده‌رود در مدل‌های GCM مختلف، تا ۱/۶ درجه سلسیوس افزایش پیدا خواهد کرد. هوگز (۱۶) نشان داد که تا سال ۲۰۳۰، متوسط دمای سالانه استرالیا افزایشی بین ۰/۶ تا ۲ درجه سلسیوس را تجربه خواهد کرد. همچنین آذرانفر و همکاران (۱)، نشان دادند که دمای نقاط مختلف حوضه زاینده‌رود طی دهه‌های آتی، ممکن است تا ۲ درجه سلسیوس افزایش پیدا کند.

تغییرات بارندگی ایستگاه چلگرد

شکل ۴ تغییرات بارندگی ایستگاه چلگرد را برای بازه زمانی

نتایج مربوط به سناریوی انتشار A2 نشان داد که مقدار افزایش دما در الگوی ایده‌آل بین ۰/۱ تا ۱/۱ درجه سلسیوس، الگوی متوسط بین ۰/۴ تا ۱/۴ درجه سلسیوس و در الگوی بحرانی بین ۰/۷ تا ۲/۱ درجه سانتی‌گراد بود. این مقادیر در سناریوی انتشار B1 برای الگوی ایده‌آل بین ۰/۱ تا ۱/۳، الگوی متوسط بین ۰/۴ تا ۱/۶ و الگوی بحرانی بین ۰/۷ تا ۱/۸ درجه سلسیوس به دست آمد.

جدول ۲ تغییرات فصلی و سالانه دمای ایستگاه اصفهان را تحت اثر تغییر اقلیم نشان داده است. فصل تابستان بیشترین و فصل پاییز کمترین مقدار افزایش دما را در هر دو سناریوی انتشار و هر سه الگوی تغییر اقلیم نشان دادند. مقدار افزایش دمای متوسط سالانه در سناریوی انتشار A2 بین ۰/۶۳ تا ۱/۳۱ درجه سلسیوس در نوسان بود. این نوسان به دلیل در نظر گرفته شدن ۳ الگوی متفاوت تغییر اقلیم حاصل گردیده است و بنابراین به جای یک مقدار مشخص، بازه‌ای از نوسان دمایی برای حالات خوش‌بینانه تا بدبینانه قابل تخمین می‌باشد. هر چند در حالت الگوی متوسط، این مقدار برابر با ۰/۹۵ درجه سلسیوس مشاهده شد. این درحالی است که متوسط درجه حرارت سالانه ایستگاه اصفهان برابر با ۱۶/۳ درجه سلسیوس می‌باشد و بنابراین در سناریوی انتشار A2، به‌طور متوسط در ۳۰ سال آینده، ۵/۸ درصد به دمای منطقه افزوده خواهد شد. در سناریوی انتشار B1 نیز تغییرات دما بین دو حد ایده‌آل و



شکل ۴. متوسط تغییرات ماهانه بارندگی ایستگاه چلگرد تحت سناریوهای انتشار مختلف در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۴ در مقایسه با دوره پایه ۱۹۷۱ تا ۲۰۱۰ برحسب درصد

جدول ۳. متوسط تغییرات فصلی و سالانه بارندگی در دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۴ در مقایسه با دوره پایه ۱۹۷۱ تا ۲۰۱۰ برحسب درصد

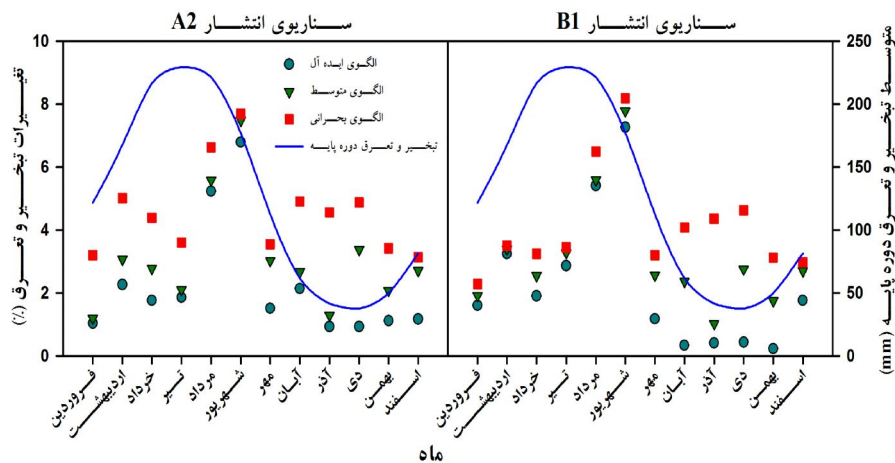
| الگوی بحرانی | | الگوی متوسط | | الگوی ایده‌آل | | دوره زمانی |
|--------------|--------|-------------|--------|---------------|--------|------------|
| B1 | A2 | B1 | A2 | B1 | A2 | |
| -۱۹/۳۵ | -۲۲/۳۴ | -۱۰/۴۵ | -۹/۷۶ | -۶/۵۶ | -۳/۸۶ | بهار |
| -۲۰/۸۴ | -۱۷/۰۷ | -۱۵/۶۰ | -۹/۶۴ | -۶/۷۵ | -۳/۷۰ | تابستان |
| -۱۷/۸۳ | -۲۸/۸۵ | -۹/۰۴ | -۱۲/۰۶ | -۲/۳۹ | -۵/۸۳ | پاییز |
| -۲۴/۲۳ | -۳۲/۱۴ | -۱۶/۳۷ | -۲۸/۴۴ | -۹/۱۰ | -۲۰/۰۵ | زمستان |
| -۲۱/۴۱ | -۲۹/۶۰ | -۱۳/۱۴ | -۲۰/۳۷ | -۶/۵۶ | -۱۲/۹۹ | سالانه |

زمستان مشاهده گردید. از طرف دیگر، کمترین مقدار کاهش بارندگی در سناریوی انتشار A2 در فصل تابستان و برای سناریوی انتشار B1 در فصل بهار پیش‌بینی شد. نتایج تحلیل بارش سالانه سناریوی A2 در ایستگاه چلگرد نشان‌دهنده کاهش تقریبی ۱۳ تا ۳۰ درصدی بارش بین الگوهای مختلف اقلیمی بود. این مقادیر در سناریوی انتشار B1 بین ۶/۵ تا ۲۱/۵ درصد بدست آمد. در حالت کلی، سناریوی انتشار A2 کاهش بارندگی را بیشتر از سناریوی انتشار B1 نشان داد.

سایر محققان نیز تغییر در میزان بارندگی را با استفاده از مدل‌های متفاوت GCM مورد تأیید قرار داده‌اند. اسماعیلی و همکاران (۲) دریافتند که تا اوایل قرن ۲۱، بارندگی

سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۴۴ نشان می‌دهد. بیشترین مقدار کاهش بارندگی در سناریوی انتشار A2 در ماه اردیبهشت مشاهده شد. این مقدار از ۲۸ درصد در الگوی ایده‌آل تا ۳۸ درصد در الگوی بحرانی متغیر بود و در الگوی متوسط ۳۴ درصد به دست آمد. کمترین مقدار کاهش بارندگی نیز در ماه مرداد رخ داد که بین ۴ تا ۱۲ درصد در الگوهای مختلف تغییر نمود. برای سناریوی انتشار B1 نیز بیشترین مقادیر کاهش بارندگی در اردیبهشت مشاهده شد که بین ۱۹ تا ۳۷ درصد بود.

تغییرات فصلی و سالانه بارندگی ایستگاه چلگرد در جدول ۳ مشخص شده است. بیشترین مقدار کاهش بارندگی بین فصول مختلف سال، برای هر دو سناریوی انتشار، در فصل



شکل ۵. متوسط تغییرات تبخیر و تعرق ایستگاه اصفهان در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۴ نسبت به دوره پایه سال‌های ۱۹۷۱ تا ۲۰۱۰ در الگوهای مختلف تغییر اقلیم برحسب درصد

انتشار B1 این مقادیر در الگوهای ایده‌آل، متوسط و بحرانی به ترتیب ۷/۳، ۷/۸ و ۸/۲ درصد مشاهده شد. کمترین مقدار افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل نیز در ماه‌های مختلفی از سال رخ داد و مقدار آن در کمترین حالت از ۹/۰ درصد در سناریوی A2 تا ۳/۰ درصد در سناریوی B1 تغییر کرد.

مقایسه مقادیر سالانه تبخیر و تعرق نیز نشان داد که مقدار تبخیر و تعرق سالانه در تمامی الگوهای تغییر اقلیم نسبت به دوره زمانی ۱۹۷۱ تا ۲۰۱۰ افزایش پیدا خواهد کرد. این مقادیر در سناریوی انتشار A2 و برای الگوهای ایده‌آل، متوسط و بحرانی برابر با ۱۳۶۱ میلی‌متر (۳/۲ درصد افزایش)، ۱۳۷۲ میلی‌متر (۴/۱ درصد افزایش) و ۱۳۸۲ میلی‌متر (۴/۸ درصد افزایش) بود. در سناریوی انتشار B1 نیز این مقادیر برابر با ۱۳۵۹ میلی‌متر (۳/۱ درصد افزایش)، ۱۳۶۷ میلی‌متر (۳/۷ درصد افزایش) و ۱۳۷۶ میلی‌متر (۴/۳ درصد افزایش) بود. به‌طور کلی سناریوی انتشار A2 مقادیر افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل را بیش از سناریوی B1 نشان داد.

رحمانی و همکاران (۳)، بیان نمودند که تبخیر و تعرق گیاهان مختلف در نواحی شرقی ایران، تحت اثر تغییر اقلیم تا سال ۲۰۳۹ بین ۵/۲ تا ۵/۵ درصد افزایش خواهد یافت. رودریگز و همکاران (۲۳)، نشان دادند که تا سال

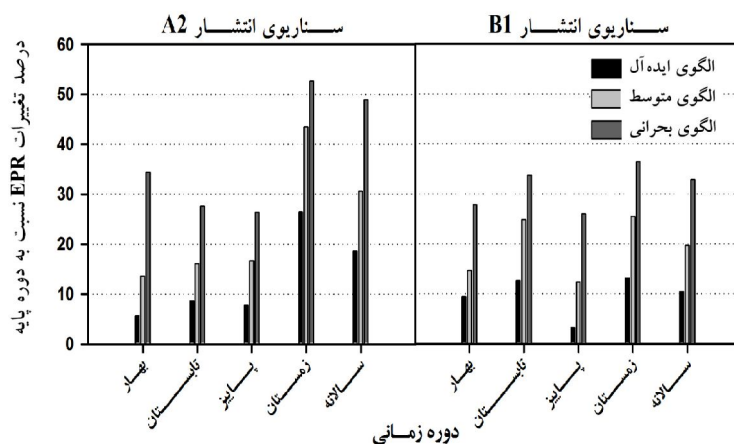
قسمت‌های شرقی ایران تا ۸ درصد کاهش خواهد یافت. مرر و همکاران (۱۹) با استفاده از ۱۶ مدل GCM و سناریوهای انتشار A2 و B1 اقدام به بررسی اثرات هیدرولوژیک تغییر اقلیم در حوضه آبریز ریولامپا در آمریکای مرکزی نمودند. نتایج نشان داد که میانگین بارندگی تحت سناریوی انتشار A2 و ۱ B به ترتیب ۱۰/۴ و ۵ درصد کاهش داشت. ظهرابی و همکاران (۳۱) در مطالعه‌ای به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر بارندگی در نقاط مرکزی و جنوبی ایران پرداختند. نتایج نشان داد که بارش این نواحی در اثر پدیده تغییر اقلیم تا ۴۰ درصد کاهش خواهد یافت.

تغییرات تبخیر و تعرق ایستگاه اصفهان

شکل ۵ روند تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل را براساس داده‌های هواشناسی ایستگاه اصفهان نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که مقدار تبخیر و تعرق در تمامی ماه‌های سال نسبت به دوره پایه افزایش پیدا خواهد کرد. بیشترین مقدار افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل در هر دو سناریوی A2 و B1، متعلق به ماه شهریور بود. براساس سناریوی انتشار A2، مقدار افزایش تبخیر و تعرق در ماه شهریور بین ۶/۸ تا ۷/۷ درصد تغییر کرد؛ ولی در حالت الگوی متوسط این مقدار ۷/۵ درصد بود. در سناریوی

جدول ۴. تغییرات فصلی و سالانه شاخص تبخیر و تعرق به بارندگی (EPR) حوضه زاینده رود در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۴ نسبت به دوره ۱۹۷۱ تا ۲۰۱۰ برحسب درصد

| دوره زمانی | دوره پایه | الگوی ایده آل | | الگوی متوسط | | الگوی بحرانی | |
|------------|-----------|---------------|--------|-------------|--------|--------------|--------|
| | | B1 | A2 | B1 | A2 | B1 | A2 |
| بهار | ۲/۱۴ | ۲/۳۴ | ۲/۲۶ | ۰/۴۵ | ۲/۴۳ | ۲/۷۴ | ۲/۸۸ |
| تابستان | ۹۸/۶۳ | ۱۱۱/۰۵ | ۱۰۷/۱۳ | ۱۲۳/۱۳ | ۱۱۴/۴۴ | ۱۳۱/۹۰ | ۱۲۵/۸۱ |
| پاییز | ۰/۴۱ | ۰/۴۲ | ۰/۴۴ | ۰/۴۶ | ۰/۴۸ | ۰/۵۲ | ۰/۶۰ |
| زمستان | ۰/۲۰ | ۰/۲۲ | ۰/۲۵ | ۰/۲۴ | ۰/۲۸ | ۰/۲۷ | ۰/۳۰ |
| سالانه | ۰/۹۳ | ۱/۰۳ | ۱/۱۱ | ۱/۱۲ | ۱/۲۲ | ۱/۲۴ | ۱/۳۹ |



شکل ۶. متوسط درصد تغییرات شاخص تبخیر و تعرق به بارندگی حوضه زاینده رود (EPR) در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۴ نسبت به دوره پایه ۱۹۷۱ تا ۲۰۱۰

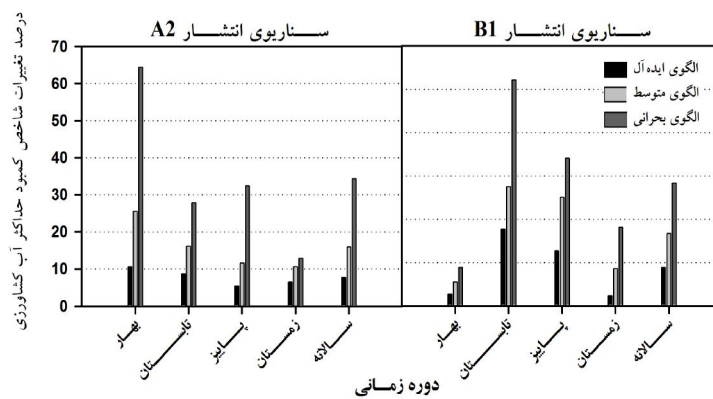
بارندگی (EPR) را تحت تأثیر تغییر اقلیم نشان داده است. مقایسه مقادیر EPR دوره پایه با مقادیر دوره آتی نشان می‌دهد که الگوی تغییرات در دوره آینده با دوره پایه تفاوتی نخواهد داشت و فصل تابستان بیشترین و فصل زمستان کمترین مقدار EPR را دارا خواهند بود. هر چند این روند به‌خاطر اختلاف زیاد تبخیر و تعرق پتانسیل و بارندگی در این دو فصل می‌باشد. جهت مشخص شدن روند داده‌ها، درصد تغییرات شاخص EPR نسبت به دوره پایه در شکل ۶ نشان داده شده است. بیشترین مقدار افزایش شاخص EPR در فصل زمستان مشاهده شد. در سناریوی انتشار A2، مقدار افزایش شاخص EPR در الگوهای ایده آل، متوسط و بحرانی برابر با ۲۶، ۴۳ و ۵۲ درصد

۲۰۵۰، تغییر اقلیم باعث افزایش تبخیر و تعرق سالانه مناطق مختلف اسپانیا بین ۱۵ تا ۲۰ درصد خواهد شد. مطالعات علیزاده و همکاران (۴)، نشان می‌دهد که شدت تبخیر-تعرق در حوضه آبریز کشف رود، در تمامی طول سال در اثر تغییر اقلیم افزایش خواهد یافت. همچنین افزایش نیاز آبی گیاهان در اثر تغییر اقلیم در حوضه زاینده رود، بین ۳ تا ۱۰ درصد توسط گوهری و همکاران (۱۰) پیش‌بینی شده است.

تغییرات شاخص‌های تعادل آب کشاورزی حوضه زاینده رود جدول ۴ مقادیر فصلی و سالانه شاخص نسبت تبخیر و تعرق به

جدول ۵. تغییرات فصلی و سالانه شاخص کمبود حداکثر برای بخش کشاورزی حوضه زاینده رود (EPR) در دوره زمانی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۴ نسبت به دوره پایه ۱۹۷۱ تا ۲۰۱۰

| دوره زمانی | دوره پایه | الگوی ایده‌آل | | الگوی متوسط | | الگوی بحرانی | |
|------------|-----------|---------------|--------|-------------|--------|--------------|--------|
| | | B1 | A2 | B1 | A2 | B1 | A2 |
| بهار | ۱/۱۴ | ۱/۲۶ | ۱/۳۴ | ۱/۴۳ | ۱/۴۵ | ۱/۸۸ | ۱/۷۴ |
| تابستان | ۹۷/۶۳ | ۱۰۶/۱۳ | ۱۱۰/۰۵ | ۱۱۳/۴۴ | ۱۲۲/۱۳ | ۱۲۴/۸۱ | ۱۳۰/۹۰ |
| پاییز | -۰/۵۹ | -۰/۵۶ | -۰/۵۸ | -۰/۵۲ | -۰/۵۴ | -۰/۴۰ | -۰/۴۸ |
| زمستان | -۰/۸۰ | -۰/۷۵ | -۰/۷۸ | -۰/۷۲ | -۰/۷۶ | -۰/۷۰ | -۰/۷۳ |
| سالانه | -۰/۰۷ | ۰/۱۱ | ۰/۰۳ | ۰/۲۲ | ۰/۱۲ | ۰/۳۹ | ۰/۲۴ |



شکل ۷. درصد تغییرات شاخص کمبود حداکثر آب در بخش کشاورزی حوضه زاینده رود در دوره زمانی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۴ نسبت به دوره پایه ۱۹۷۱ تا ۲۰۱۰

بخش کشاورزی حوضه زاینده رود را نشان داده است. مطابق انتظار در فصولی از سال که بارندگی بیش از تبخیر و تعرق است (پاییز و زمستان)، مقدار شاخص MD منفی و در فصول دیگر (بهار و تابستان) مثبت بوده است. این روند هم در دوره پایه و هم در دوره‌های آینده وجود دارد. بیشترین مقدار شاخص کمبود در فصل تابستان و کمترین مقدار آن در فصل زمستان مشاهده شد. متوسط سالانه شاخص MD نیز نشان می‌دهد که در دوره پایه مقدار این شاخص منفی بوده است ($MD = -0/07$)، ولی در تمامی الگوهای تغییر اقلیم در آینده، مقدار این شاخص مثبت گردیده است که نشان‌دهنده آن است که به مرور زمان، بخش کشاورزی نقصان بیشتری از آب را احساس خواهد کرد.

شکل ۷، تغییرات شاخص کمبود حداکثر را به صورت فصلی

به دست آمد. برای سناریوی انتشار B1 این مقادیر به ترتیب ۱۳، ۲۵ و ۳۶ درصد بود. کمترین مقدار افزایش شاخص EPR نیز در هر دو سناریوی انتشار A2 و B1 در فصل پاییز مشاهده شد. مقایسه مقادیر سالانه شاخص EPR نیز نشان داد که براساس سناریوی انتشار A2، در خوش‌بینانه‌ترین حالت، مقدار شاخص EPR ۱۸ درصد و در بحرانی‌ترین حالت ۴۸ درصد افزایش یافت. در سناریوی انتشار B1 این مقدار بین ۱۰ تا ۳۲ درصد بود. براساس الگوی متوسط تغییرات اقلیمی نیز مقدار شاخص EPR بین ۳۰ درصد در سناریوی A2 تا ۱۹ درصد در سناریوی B1 افزایش یافت. نتایج کلی نشان‌دهنده آن است که سناریوی انتشار A2 شرایط نامناسب‌تری از لحاظ تعادل تبخیر و تعرق و بارندگی در حوضه زاینده رود پیش‌بینی می‌کند. جدول ۵ تغییرات مقادیر شاخص کمبود حداکثر (MD) در

مشخص شدن اثرات تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی حوضه، تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل در قسمت‌های شرقی حوضه محاسبه شد، چون این مناطق اصلی‌ترین مصرف کننده آب کشاورزی در این حوضه هستند. نتایج نشان دهنده افزایش ۳/۱ تا ۴/۸ درصدی تبخیر و تعرق بود، به نحوی که مقدار تبخیر و تعرق از مقدار ۱۳۱۹ میلی‌متر در بازه زمانی ۱۹۷۱ تا ۲۰۱۰ تا ۱۳۸۲ میلی‌متر در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۴ افزایش پیدا کرد.

جهت بررسی وضعیت تعادل مصارف آب در بخش کشاورزی با منابع آب حوضه، شاخص تعادل آب کشاورزی (EPR) تعریف گردید تا نسبت بین تبخیر و تعرق شرق حوضه را به بارندگی در غرب حوضه برآورد کند. در واقع مقدار مصرف آب کشاورزی در شرق حوضه، به عنوان اصلی‌ترین مصرف کننده آب کشاورزی، با معیار تبخیر و تعرق مشخص شد و از طرف دیگر منابع آب حوضه که بیشتر در قسمت غرب آن متمرکز است، با بارندگی غرب حوضه سنجیده شد. نتایج نشان داد که شاخص EPR حوضه زاینده رود در الگوهای تغییر اقلیم مختلف، بین ۱۳ تا ۵۲ درصد افزایش خواهد یافت. این در حالی است که بخش بسیار زیادی از اراضی مستعد کشاورزی حوضه در بخش شرقی حوضه واقع شده است. این اراضی وابستگی شدیدی به منابع آب در قسمت غرب حوضه دارند. از یک طرف، افزایش دما در قسمت شرقی حوضه باعث افزایش مقدار آب مورد نیاز بخش کشاورزی می‌شود و از طرف دیگر کاهش بارندگی در قسمت غربی حوضه باعث کاهش منابع آب در دسترس خواهد شد. این وضعیت باعث خواهد شد که کمبود کنونی آب در حوضه زاینده رود در سالیان آینده تشدید شود و با توجه به کم شدن جریان رودخانه زاینده رود و افت سطح آب‌های زیرزمینی در سالیان اخیر، وضعیت نامساعدی را از لحاظ منابع آب در دسترس ایجاد نماید. بنابراین لزوم اتخاذ سیاست‌هایی جهت مقابله با بحران‌هایی که ممکن است تغییر اقلیم در بخش منابع آب ایجاد کند بسیار ضروری است.

و سالانه نشان داده است. نتایج نشان می‌دهد که با وجود این که فصل تابستان بیشترین مقدار شاخص MD را طبق جدول ۵ یدارد، ولی بیشترین افزایش مقدار این شاخص نسبت به دوره پایه در فصل بهار رخ خواهد داد. به عبارت دیگر، هر چه به سمت دوران آینده پیش می‌رویم، اثرات کمبود آب در بخش کشاورزی، بیشتر متوجه فصل بهار خواهد بود. در سناریوی انتشار A۲ مقدار شاخص MD نسبت به دوره پایه در سه الگوی ایده‌آل، متوسط و بحرانی به ترتیب ۹/۸، ۱۶ و ۳۴/۴ درصد افزایش پیدا کرد. همچنین، این مقادیر در سناریوی انتشار B۱ به ترتیب ۸/۹، ۱۵/۷ و ۲۸/۱ بود. بنابراین مانند شاخص EPR، شاخص MD نیز در سناریوی انتشار A۲، شرایط حادثی را نسبت به سناریوی انتشار B۱ نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مطالعه، جهت بررسی اثرات تغییر اقلیم بر نیاز آبی بخش کشاورزی حوضه زاینده رود، ترکیبی از ۱۵ مدل GCM مختلف مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل‌های GCM مختلف، دقت متفاوتی در تخمین اثرات تغییر اقلیم روی دما و بارندگی دارند. بنابراین قبل از استفاده از این مدل‌ها، بایستی براساس روش‌های وزن‌دهی، خروجی هر کدام از آنها براساس دقت تخمین، وزن‌دهی گردد. در این مطالعه، بهترین مدل برای پیش‌بینی دمای حوضه زاینده رود، مدل CGCM۲/۳/۲ و برای پیش‌بینی بارندگی، مدل GISS-ER تشخیص داده شد. از طرف دیگر، الگوهای مختلف تغییر اقلیم براساس شرایط ایده‌آل، متوسط و بحرانی تعریف گردید تا براساس روش وزن‌دهی، مدل‌های GCM براساس پیش‌بینی خود از شرایط ذکر شده وزن‌دهی گردند.

تغییرات دمای ایستگاه هواشناسی اصفهان در دوره ۳۰ ساله ۲۰۴۴-۲۰۱۵، نشان داد که دمای سالانه قسمت‌های شرقی حوضه بین ۰/۶۳ تا ۱/۱۳ درجه سلسیوس افزایش پیدا کرد. همچنین مقدار بارندگی ایستگاه چلگرد به عنوان ایستگاه شاخص غرب حوضه، بین ۶/۵ تا ۳۰ درصد کاهش یافت. برای

منابع مورد استفاده

۱. آذرانفر، ا.، ا. ابریشم‌چی و م. تجربی. ۱۳۸۵. ارزیابی تغییرات بارش و دما بر تغییر اقلیم با استفاده از خروجی مدل‌های چرخش عمومی. دومین کنفرانس مدیریت منابع آب. دانشگاه صنعتی اصفهان. بهمن ماه ۱۳۸۵.
۲. اسماعیلی، ر.، ا. گندمکار و ح. غیور. ۱۳۹۰. پهنه‌بندی میزان تغییرات اقلیمی از دیدگاه کشاورزی در دوره اقلیمی آینده مطالعه موردی: استان خراسان رضوی. مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی ۲۲(۱): ۳۵-۵۲.
۳. رحمانی، م.، م. جامعی، ع. شهیدی و م. هادی‌زاده. ۱۳۹۴. تأثیر تغییر اقلیم بر طول مراحل رشد و نیاز آبی گندم و جو (مطالعه موردی: دشت بیرجند). مجله بوم‌شناسی کشاورزی ۴(۷): ۱-۱۶.
۴. علیزاده، ا.، م. حسامی کرمانی، م. بنایان اول و ع. فرید حسینی. ۱۳۸۹. بررسی پتانسیل اثرات تغییر آب و هوای، بر منابع و مصارف آب کشاورزی (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه کشفرد). نشریه آب و خاک ۲۴(۴): ۸۳۵-۸۱۵.
۵. مساح بوانی، ع. ر. و س. مرید. ۱۳۸۴. اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده‌رود اصفهان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۹(۴): ۱۷-۲۸.
6. Abbaspour, K. C., M. Faramarzi, S. S. Ghasemi and H. Yang. 2009. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resour. Res.* 45: 104-134.
7. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage. Paper 56*, FAO, Rome. 300 p.
8. Data distribution center of IPCC (DCC), available at :<http://www.ipcc-data.org/>
9. Eslamian, S. S., M. J. Khordadi and J. Abedi-Koupai. 2011. Effects of Variations in Climatic Parameters on Evapotranspiration in the Arid and Semi-arid Regions. *Global Planet. Change.* 78: 188-194.
10. Gohari, A., S. Eslamian, J. Abedi-Koupai, A. Massah Bavani, D. Wang and K. Madani. 2013. Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud River Basin. *Sci. Total Environ.* 442: 405-419.
11. Goyal, R. K. 2004. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: A case study of arid zone of Rajasthan (India). *Agric. Water Manage.* 69: 1-11.
12. Greene, A. M., L. Goddard and L. Lall. 2006. Probabilistic multi-model regional temperature change projections. *J. Clim.* 19: 4326-4346.
13. Guegan, M., C. B. Uvo and K. Madani. 2012. Developing a module for estimating climate warming effects on hydropower pricing in California. *Energy Policy.* 42: 261-271.
14. Hargreaves, G. H. and Z. A. Samani. 1982. Estimating potential evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. E-ASCE* 108: 225-230.
15. Hawkins, E. and R. Sutton. 2009. The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 90: 1095-1107.
16. Hughes, L. 2003. Climate change and Australia: trends, projections and impacts. *Aust. Ecol.* 28: 423-443.
17. Levinson, D. H. and C. J. Fettig. 2014. Climate change: Overview of data sources, observed and predicted temperature changes, and impacts on public and environmental health. *Global Climate Change and Public Health.* New York: Springer Publication.
18. Liu, S., P. Sun, J. Wang and L. Chen. 2000. Hydrological functions of forest vegetation in upper reaches of the Yangtze River. *J. Nat. Resour.* 16: 451-456.
19. Maurer, E. P. 2009. Climate model based consensus on the hydrologic impacts of climate change to the Rio Lempa basin of Central America. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13: 183-194.
20. Morid, S. and A. R. Massah Bavani. 2010. Exploration of potential adaptation strategies to climate change in the Zayandeh Rud irrigation system, Iran. *J. Irrig. Drain. ASCE.* 59: 226-238.
21. Moy, W. S., J. L. Cohon and C. S. Revelle. 1986. A programming model for analysis of reliability, resilience and vulnerability of a water supply reservoir. *Water Resour. Res.* 22: 489-498.
22. Randall, D. A., R. A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fieffet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R. J. Stouffer, A. Sumi and K. E. Taylor. 2007. Climate models and their evaluation. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of IPCC. UK: Cambridge University Press.
23. Rodriguez, D. J. A., Weatherhead, E. K., Knox, J. W. and Camacho, E. 2007. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. *Reg. Environ. Change.* 7: 149-159.
24. Safavi, H. R., M. K. Esfahani and A. R. Zamani. 2014. Integrated index for assessment of vulnerability to drought, case study: Zayandehrood River Basin, Iran. *Water Resour. Manage.* 28: 1671-1688.

25. Semenov, M. A. 2007. Development of high-resolution UKCIP02-based climate change scenarios in the UK. *Agric. For. Meteorol.* 144: 127-138.
26. Semenov, M. A. 2008. Simulation of extreme weather events by a stochastic weather generator. *Clim. Res.* 35: 203-212.
27. Solomon, S. 2007. *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC.* UK: Cambridge University Press.
28. Tao, F. and Z. Zhang. 2010. Adaptation of maize production to climate change in North China Plain: quantify the relative contributions of adaptation options. *Eur. J. Agron.* 33: 103-116.
29. Wang, B., H. J. Kim, K. Kikuchi and A. Kitoh. 2011. Diagnostic metrics for evaluation of annual and diurnal cycles. *Clim. Dyn.* 37: 941-955.
30. Zareian, M. J., S. Eslamian and H. R. Safavi. 2014. A modified regionalization weighting approach for climate change impact assessment at watershed scale. *Theor. Appl. Climatol.* 122: 497-516.
31. Zohrabi, N., Massah Bavani, A. M., Goodarzi, E. and Eslamian, S. 2014. Attribution of temperature and precipitation changes to greenhouse gases in northwest Iran. *Quat. Int.* 345: 130-137.

Investigating the Effects of Sustainability of Climate Change on the Agriculture Water Consumption in the Zayandeh-Rud River Basin

M. J. Zareian^{1*}, S. S. Eslamian¹ and H. R. Safavi²

(Received: April 25-2015 ; Accepted : Dec. 21-2015)

Abstract

This study investigated the effects of climate change on the evapotranspiration amount and water balance in the Zayandeh-Rud river basin. Two important weather stations; Isfahan and Chelgerd stations, located in the East and West of the basin respectively, were selected for investigation in this study. The combination of 15 GCM models were created based on the weighting method and three patterns of climate change including the ideal, medium and critical were defined. Using the proposed patterns, the effects of climate change on temperature and evapotranspiration in Isfahan station and precipitation in Chelgerd station were estimated under the A2 and B1 emissions scenarios. Two indices were considered to determine the sustainability of agricultural water consumption in the study area. Ratio of evapotranspiration in the East part of the basin to precipitation in the West part was defined as EPR index (Evapotranspiration-Precipitation Ratio), and the ratio of maximum agricultural water deficit to the amount of agriculture water need, was considered as maximum deficit index (MD). Results showed that the annual temperature would increase between 0.63-1.13°C in the eastern part of the basin. The west precipitation in the basin would reduce between 6.5-30% in the ideal to critical patterns. Summer season, showed the most amount of increase in the temperature, and winter season, showed the most amount of decrease in precipitation. The A2 emission scenario showed more temperature increase and more precipitation decrease in comparison with the B1 emission scenario and also indicated that the potential evapotranspiration would increase by 3.1 to 4.8% in the basin. The EPR index will increase between 13-52% and MD index will increase between 9-35% in Zayandeh-Rud river basin under different climate change patterns. The results revealed the imbalance between agricultural water use in eastern part and the precipitation in the western part of the basin. In other words, in these conditions, appropriate management strategies and planning should be implemented to ensure the sustainability of water resources in Zayandeh-Rud River Basin.

Keywords: Evapotranspiration, Balance of water resources, Climate change, Zayandeh-Rud river basin, Weighting method.

1. Dept. of Water Eng., College of Agric., Isf. Univ. of Technol., Isfahan, Iran.

2. College of Civil Eng., Isf. Univ. of Technol., Isfahan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: mj.zareian@ag.iut.ac.ir