

Assessing Precipitation and Reference Potential Evapotranspiration in the Current Climate and under CORDEX Climate Change Projections in Major Drylands Region of Kurdistan Province

YOUSEF GHOLAMPOUR SHEMAMI¹, NASSER MAJNOUN HOSSEINI^{1*}, JAVAD BAZRAFESHAN², FARZAD SHARIFZADEH¹, HOMAYOUN KANOUNI³

1. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Science & Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran. Karaj. Iran.
2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran. Karaj. Iran.
3. Department of Agronomy and Horticultural Research, Sanandaj Agricultural and Natural Resources Research Center. Sanandaj. Iran.

(Received: July. 10, 2019- Revised: Aug. 4, 2019- Accepted: Aug. 10, 2019)

ABSTRACT

According to numerous reports about the global warming process and the fluctuations of rainfall, the study of climate change, especially in semi-arid regions of the country's dryland, is necessary in order to adapt to this phenomenon. The purpose of this study was to investigate the current process of climate change and the projection of CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) climate models under the CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) project in dryland areas of Kurdistan province. In this study, Sanandaj, Qorveh, and Zarinah stations were selected as the nearest synoptic meteorological stations to the agricultural research institutes of dryland in Kurdistan province. At first, bias correlation was done on downscaled data of the CORDEX project. Given that the future course of the project began in 2006 and continues until 2100, the data were divided into four time periods. The forecasted climatological data were compared with the observed data from 2006 to 2017, then the projection of climate models in the future periods was considered. The trend of climate change in the past, using the Mann-Kendall test and the Sen's slope estimator, indicates a decrease in precipitation and an increase in temperature and potential evapotranspiration. The comparison between predicted and observed data during 2006-2017 showing the high accuracy for temperature and evapotranspiration estimation, and low accuracy for rainfall estimation. Also, according to the projection of climate models at the end of 21st century, temperature and evapotranspiration increase in all climatic models of all stations and fluctuations in rainfall are projected. While precipitation reduction in Sanandaj is expected, more precipitation will occur in Qorveh and Zarinah stations.

Keywords: Climate Change, CORDEX, Precipitation, Reference Potential Evapotranspiration, Kurdistan.

* Corresponding Author Email: mhoseini@ut.ac.ir

ارزیابی بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع در شرایط اقلیم فعلی و تغییر اقلیم آینده تحت پروژه CORDEX در نواحی عمده تولید محصولات دیم استان کردستان

یوسف غلام‌پور شماسی^۱، ناصر مجنون حسینی^{۱*}، جواد بذرافشان^۲، فرزاد شریف زاده^۱، همایون کانونی^۳

۱. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج.

۳. بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کردستان، سنندج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۱۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۵/۱۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۵/۱۹)

چکیده

با توجه به گزارش‌های متعدد مبنی بر روند گرم شدن کره زمین و نوسانات بارش، بررسی تغییرات اقلیمی به منظور سازگاری با این پدیده به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک دیم کشور ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این مطالعه بررسی روند تغییرات اقلیمی فعلی و پیش‌نگری مدل‌های اقلیمی CMIP5 تحت پروژه CORDEX در مناطق دیم‌خیز استان کردستان می‌باشد. در این مطالعه، ایستگاه‌های سنندج، قروه و زرینه به عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک به ایستگاه‌های تحقیقاتی معرف کشاورزی دیم استان کردستان انتخاب شدند. داده‌های اقلیمی ریزمقیاس‌نمایی شده پروژه CORDEX ابتدا مورد پس‌پردازش قرار گرفتند. با توجه به اینکه دوره آینده این پروژه از سال ۲۰۰۶ شروع و تا سال ۲۱۰۰ ادامه دارد، داده‌ها به چهار دوره‌ی زمانی تقسیم‌بندی شدند. داده‌های اقلیمی پیش‌نگری شده با داده‌های مشاهداتی دوره زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷ مقایسه شدند، سپس پیش‌نگری مدل‌های اقلیمی در دوره‌های زمانی مختلف آینده مورد بررسی قرار گرفتند. روند تغییرات اقلیمی فعلی با استفاده از آزمون من-کندال و تخمین گر شیب سن نشان‌دهنده کاهش بارش و افزایش دما و تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع می‌باشد. مقایسه دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۶ نشان‌دهنده دقت بالای تخمین دما و تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع و دقت کم بارش می‌باشد. همچنین طبق پیش‌نگری مدل‌های اقلیمی در پایان قرن ۲۱ نسبت به دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۹۰ افزایش دما و تبخیر-تعرق پتانسیل در تمامی مدل‌های اقلیمی همه ایستگاه‌ها و نوسانات در بارش اتفاق خواهد افتاد. در حالی که در سنندج کاهش بارش مورد انتظار است، بارش‌های بیشتری در قروه و زرینه رخ خواهد داد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، CORDEX، بارش، تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع، کردستان

مقدمه

سال ۲۰۱۶ و پس از آن به ترتیب در سال‌های ۲۰۱۷، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۸ رخ داده است (NASA, 2019). میانگین جهانی دما تحت سناریوهای مختلف و بسته به منطقه جغرافیایی در اواخر قرن (۲۰۸۱-۲۱۰۰) بین ۰/۳ تا ۴/۸ درجه سلسیوس نسبت به میانگین دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۶) افزایش خواهد یافت (IPCC AR5, 2014).

اقلیم‌های خشک و نیمه خشک، از جمله بسیاری از مناطق ایران، به دلیل ساختار اکولوژیکی خاص خود نسبت به سایر اقلیم‌ها آسیب‌پذیری بیشتری دارند (Amiri et al., 2010). در بررسی اثرات تغییر اقلیم بر شرایط اقلیمی ایران با استفاده از داده‌های CORDEX^۱ مشاهده شد که به طور کلی بارش ایران در پایان قرن حاضر نسبت به دوره تاریخی، ۲۰ درصد کاهش را نشان

تغییر اقلیم در حال به چالش کشیدن و تهدید جوامع انسانی است (Shikuku et al., 2017). با افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای به خصوص گاز دی‌اکسید کربن، میانگین دمای کره زمین نیز افزایش می‌یابد (Asgari et al., 2017) که می‌تواند منجر به تغییرات اقلیمی شود (VijayavenkataRaman et al., 2012). با وجود عدم قطعیت‌های موجود در پیش‌نگری‌های مربوط به تغییرات اقلیمی آینده، وقوع این پدیده مورد پذیرش عمومی محققین می‌باشد (Koocheki and Kamali, 2010). بر اساس گزارش‌ها، از سال ۱۸۸۰ تا پایان سال ۲۰۱۸ گرم شدن جهانی دمای سطح زمین از سال ۲۰۰۰ شدت بیشتری پیدا کرده است و گرم‌ترین دما در

* نویسنده مسئول: mhoseini@ut.ac.ir

اقليم منطقه‌ای تولید شوند (Giorgi and Gutowski, 2016). خروجی مدل‌های اقلیم جهانی با دقت مکانی ۰/۴۴، ۰/۲۲ و ۰/۱۱ درجه تولید می‌شود. همچنین دقت زمانی خروجی مدل‌های ریزمقیاس نمایی دینامیکی مورد استفاده در پروژه CORDEX، شامل داده‌های با مقیاس زمانی سه ساعته، شش ساعته، روزانه، ماهانه و فصلی است؛ قابل ذکر است که با توجه به انتخاب متغیرهای مختلف، تنها مقیاس‌های زمانی خاصی ارائه می‌شود. علاوه بر افزایش دقت مکانی و زمانی در مدل‌ها، تعداد و نوع متغیرهای ورودی و در نتیجه متغیرهای ریزمقیاس شده و محاسبه شده نیز افزایش قابل توجهی یافته است (Christensen et al., 2014).

به طور کلی با توجه به نتایج پژوهش‌ها در ایران که مثال‌هایی از آن ذکر شد به نظر می‌رسد در اکثر نقاط کشور در آینده شاهد روند افزایشی دما با شدت‌های مختلف خواهیم بود، با این وجود تغییرات بارش و پارامترهای دیگر همانند سرعت باد، رطوبت نسبی و طول ساعات آفتابی دارای نوساناتی با توجه به مناطق و مدل‌های اقلیمی مختلف خواهند بود (Nouri et al., 2017؛ Ashraf Vaghefi et al., 2019؛ Ghiami Shamami et al., 2019)؛ با توجه به تأثیر این پارامترها بر تبخیر-تعرق به نظر می‌رسد بررسی تغییرات تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع دارای اهمیت خاصی باشد. در ایران با توجه به وابستگی تولیدات کشاورزی به ویژه دیم به شرایط اقلیمی و بروز تغییرات اقلیم، بررسی وضعیت تغییر اقلیم در آینده ضروری به نظر می‌رسد و با در نظر گرفتن پیش‌نگری‌های به دست آمده، برنامه‌ریزی برای تولید پایدار محصولات کشاورزی بایستی صورت پذیرد. از این رو این مطالعه سعی دارد شرایط اقلیم منطقه و چگونگی تغییرات اقلیم فعلی و آینده را با توجه ویژه به بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن) در مناطق معرف تولید دیم استان کردستان بررسی نماید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

استان کردستان با دارا بودن ۱۰۵۰۰۰۰ هکتار زمین کشاورزی که حدود ۸۸ درصد آن زیر کشت محصولات زراعی دیم می‌باشد، بیشترین سطح زیر کشت محصولات زراعی دیم (۱۲ درصد از کل کشور) را به خود اختصاص داده است و از این رو سومین تولیدکننده محصولات زراعی دیم کشور (۱۰ درصد) است (Ministry of Agriculture-Jahad, 2018). مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان با توجه به شرایط اقلیمی، خاک و توپوگرافی استان، ایستگاه‌های تحقیقاتی گریزه در شهرستان سنندج؛ سارال در شهرستان دیواندره و قاملو

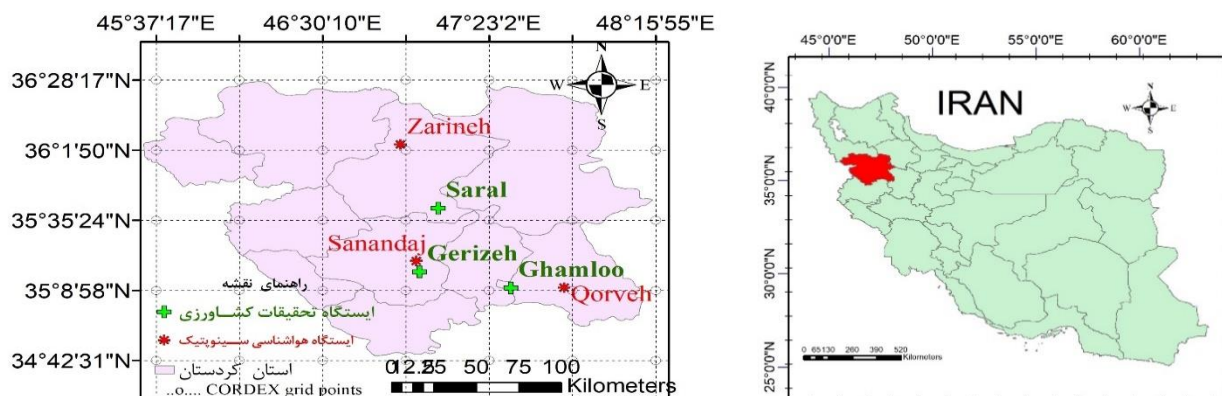
می‌دهد، همچنین دمای کشور نیز به طور کلی افزایش ۲/۴ درجه سلسیوس را تجربه خواهد کرد (Senatore et al., 2019). برخلاف دما، رژیم بارش در آینده در مناطق مختلف، نوساناتی را در مدل‌های اقلیمی مختلف نشان داد (Doolabian, 2017). برخی از مناطق در غرب و شمال غربی کشور بیشترین افزایش بارش را نسبت به دوره تاریخی مشاهده شده از خود نشان دادند (Ashraf Vaghefi et al., 2019). افزایش گازهای گلخانه‌ای منجر به پیدایش تغییراتی در پارامترهای اقلیمی از جمله دما و بارش خواهد شد که می‌تواند بر مقدار تبخیر-تعرق گیاه تأثیرگذار باشد (Ghahreman et al., 2015). مقادیر بارش و تبخیر-تعرق به ترتیب مهم‌ترین عامل در تعیین توازن آب هستند. تخمین قابل اعتماد ETo برای اجرای شیوه‌های مدیریت آب به ویژه در مناطق با محدودیت آب بسیار مفید است (Gimenez & Galiano et al., 2018). با این حال، اثرات تغییرات اقلیمی پیچیده است. بنابراین ضروری است که تغییرات بالقوه تبخیر-تعرق تحت شرایط اقلیم آینده برای بهبود مدیریت زراعی مورد بررسی قرار گیرد (Chen et al., 2019). الگوی مقادیر تبخیر-تعرق مرجع نسبتاً پیچیده می‌باشد؛ به دلیل این که پارامترهای بسیار زیادی در محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع با استفاده از معادله فائو-پنمن-مانتیت نقش دارند. وجود الگوی غیر یکنواخت در مقادیر این پارامتر در مناطق مختلف قابل انتظار است؛ به طوری که تغییرات ماهانه تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع در مناطق جنوب غربی دریاچه ارومیه در برخی موارد روند متضادی نسبت به سایر مناطق این حوضه از خود نشان داده است (Nikfal et al., 2018). به دنبال افزایش دما، کاهش بارش در مناطق مختلف اقلیمی ایران در دوره گذشته مشاهده شده و به نظر می‌رسد رژیم خشک‌تر برای آینده هم‌راستا با رخدادهای کاهش بارش در فصل تابستان برای ایران اتفاق خواهد افتاد (Ghiami Shamami et al., 2019). به منظور برنامه‌ریزی استراتژیک درازمدت منابع آب، در مواجهه با تغییر اقلیم مهم است که این تأثیرات با وضوح مکانی و زمانی زیاد تعیین شود (Abbaspour et al., 2009). به منظور برآورد میزان تغییرات پارامترهای اقلیمی در آینده، مدل‌های اقلیم جهانی (GCM) با قدرت تفکیک مکانی و زمانی متفاوت اجرا می‌شود (Ghahreman et al., 2016) که می‌توانند برای درک تغییرات اقلیمی آینده در سناریوهای انتشار گوناگون استفاده شوند (Su et al., 2017). به منظور کمک به مطالعات اثرات تغییر اقلیم و سازگاری، هم‌زمان با گزارش ارزیابی پنجم و فراتر از آن، برنامه CORDEX ایجاد شد که یک برنامه استاندارد برای آزمایش‌های متداول را فراهم آورده است تا مجموعه‌های بزرگ طرح‌های پیش‌نگری اقلیم بر مبنای تکنیک‌های ریزمقیاس‌نمایی

زربنه موقعیت جغرافیایی آن در محدوده بین دشت‌های حاصلخیز اوباتو و سارال است که یکی از سرچشمه‌های اصلی رودخانه قزل‌اوزن نیز می‌باشد؛ به دلیل مشابه ایستگاه سینوپتیک قروه به جای ایستگاه اقلیم‌شناسی قاملو (مبین شرایط اقلیمی ایستگاه تحقیقات کشاورزی قاملو) انتخاب گردید. مشخصات جغرافیایی و اقلیمی این ایستگاه‌ها در شکل (۱) و جدول (۱) مشخص گردیده است. با توجه به جدول (۱)، ایستگاه سنندج بر اساس شاخص خشکی دمارتن گسترش یافته (Khalili, 1997) دارای اقلیم نیمه-خشک سرد، قروه، قاملو و بهارستان در اقلیم نیمه خشک فراسرد و زربنه در اقلیم مدیترانه‌ای فراسرد طبقه‌بندی می‌شود؛ البته با توجه به ضریب خشکی دمارتن تفاوت بسیار کمی با اقلیم نیمه-خشک فراسرد دارد (نتایج ذکر نشده است). لازم به ذکر است با توجه به ناکافی بودن دقت و مدت داده‌های ایستگاه‌های اقلیم-شناسی بهارستان و قروه، داده‌های این دو ایستگاه تنها به جهت مقایسه با ایستگاه‌های سینوپتیک ذکر گردیده است و قابلیت استناد طبقه‌بندی اقلیمی با اطمینان بالا را ندارد. در شکل (۱) نیز موقعیت ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی و نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به‌همراه شبکه CORDEX در ابعاد 0.44×0.44 درجه به صورت خط چین در نقشه استان کردستان نشان داده شده است.

در شهرستان قروه را به عنوان نماینده الگویی مناسب به ترتیب برای تحقیقات کشت آبی، حبوبات دیم و گندم دیم تعیین نموده است؛ به علاوه این سه شهرستان با دارا بودن سطح زیر کشت 358000 هکتار سهم به‌سزایی در تولیدات دیم این استان ایفا می‌کنند (Ministry of Agriculture-Jahad, 2019). با توجه به این، سه ایستگاه تحقیقات کشاورزی، نزدیک‌ترین ایستگاه‌های سینوپتیک دارای داده‌های بلند مدت مورد اعتماد (ایستگاه‌های سینوپتیک سنندج، قروه و زربنه) برای تعیین اثرات تغییر اقلیم انتخاب گردید. قابل ذکر است هر چند در ایستگاه تحقیقات کشاورزی سارال، ایستگاه اقلیم‌شناسی بهارستان (سارال) قرار دارد؛ اما با توجه به عدم وجود داده‌های طولانی مدت مناسب و دقیق در این ایستگاه اقلیم‌شناسی، پس از انجام مقایسات داده‌های موجود، ایستگاه اقلیم‌شناسی بهارستان به لحاظ تشابه شرایط اقلیمی و توپوگرافی با ایستگاه‌های سینوپتیک (نزدیک به این ایستگاه تحقیقات کشاورزی)، دارای داده‌های با دقت و مدت مناسب و همچنین قرار گرفتن در یک شهرستان، نهایتاً ایستگاه سینوپتیک زربنه به عنوان نماینده اقلیم ارتفاعات این استان غلات دیم (مبین شرایط اقلیمی ایستگاه تحقیقات کشاورزی سارال) انتخاب گردید. از دیگر دلایل انتخاب ایستگاه سینوپتیک

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی و اقلیمی (دوره زمانی ۲۰۱۷-۱۹۹۰) ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک مورد مطالعه و ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی مستقر در ایستگاه تحقیقات کشاورزی در استان کردستان

ایستگاه	عرض جغرافیایی (شمالی)	طول جغرافیایی (شرقی)	ارتفاع (متر)	سال تأسیس	بارش سالانه (میلی‌متر)	دمای سالانه (درجه سلسیوس)	تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه (میلی‌متر)	اقلیم (دمارتن گسترش یافته)
سنندج	$35^{\circ} 20'$	$47^{\circ} 00'$	۱۳۷۳	۱۹۵۹	$373/4$	$14/3$	۱۳۶۳	نیمه خشک سرد
قروه	$35^{\circ} 10'$	$47^{\circ} 47'$	۱۹۰۶	۱۹۸۹	$322/3$	$12/0$	۱۴۴۲	نیمه خشک فراسرد
زربنه	$36^{\circ} 04'$	$46^{\circ} 55'$	۲۱۴۲	۱۹۸۹	$369/2$	$8/3$	۱۲۸۷	مدیترانه‌ای فراسرد
بهارستان	$35^{\circ} 40'$	$47^{\circ} 07'$	۲۱۰۰	۱۹۹۴	۳۲۹	$9/9$	*	نیمه خشک فراسرد
قاملو	$35^{\circ} 10'$	$47^{\circ} 29'$	۱۸۵۳	۲۰۰۰	$342/7$	$10/6$	*	نیمه خشک فراسرد



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی و هواشناسی منتخب در منطقه مطالعاتی به همراه شبکه CORDEX در ابعاد مکانی 0.44×0.44 درجه

Ghahreman *et al.*, 2016). مشخصات مدل‌ها و سناریوهای واداشت تابشی مورد استفاده در این مطالعه در جدول (۲) مشخص گردیده است؛ قابل ذکر است که در زمان انجام این مطالعه تحت پروژه CORDEX در منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا برای ابعاد مکانی و زمانی و پارامترهای هواشناسی ذکر شده در بالا، تنها این مدل‌ها (جدول ۲) در دسترس بودند؛ بنابراین پیش‌نگری شرایط اقلیمی توسط این مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی صورت گرفت. بدیهی است به تدریج مدل‌ها و سناریوهای بیشتری تحت این پروژه ارائه خواهد شد. با توجه به اینکه دوره آینده در پروژه CORDEX از سال ۲۰۰۶ شروع می‌شود و پارامترهای اقلیمی تا پایان سال ۲۱۰۰ پیش‌نگری شده‌اند، قسمتی از این پیش‌نگری‌ها با داده‌های مشاهداتی همپوشانی دارد (دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۶)؛ از این‌رو مقایسه‌ای بین مشاهدات ایستگاه‌های سینوپتیک در دوره مذکور و داده‌های پیش‌نگری مدل‌های اقلیم منطقه‌ای پروژه CORDEX تحت سناریوهای واداشت تابشی طراحی شد. به منظور مقایسه پیش‌نگری تغییرات اقلیمی سناریوهای ذکر شده با توجه به دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۹۰) برای تولید داده‌های اقلیمی، دوره زمانی آینده به سه دوره زمانی ۱۶ ساله (۲۰۳۵-۲۰۲۰) مبین آینده نزدیک، (۲۰۶۵-۲۰۵۰) (آینده میانی) و (۲۱۰۰-۲۰۸۵) (آینده دور یا پایان قرن) تقسیم‌بندی شد. همچنین مقایسه آن‌ها با پیش‌نگری مدل‌های اقلیمی ابتدای قرن (۲۰۱۷-۲۰۰۵) و دوره مشاهداتی دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۹۰) و (۲۰۱۷-۲۰۰۵) نیز بررسی شده است.

در این مطالعه، داده‌های هواشناسی شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، سرعت باد، طول ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و بارش در مقیاس روزانه مورد استفاده قرار گرفتند؛ علاوه بر این داده‌ها، تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن) نیز توسط نرم افزار ETo calculator V3.2 (Raes, 2012) که اساس آن روش فائو-پنمن-مانتیث (Allen *et al.*, 1998) می‌باشد محاسبه و در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این معادله با استفاده از مختصات محل و داده‌های هواشناسی طولانی مدت، پارامترهای تابش، دما، رطوبت و سرعت باد، میزان تبخیر-تعرق مرجع (پتانسیل) را برآورد می‌کند و به عنوان یک روش استاندارد برای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع توسط سازمان غذا و کشاورزی جهانی توصیه شده است (Lang *et al.*, 2017). با توجه به سال تأسیس ایستگاه‌های هواشناسی منتخب و اهمیت تداوم و همسانی طول دوره آماری، دوره زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۷ به عنوان دوره کامل مشاهداتی در ایستگاه‌ها در نظر گرفته شد. با توجه اینکه در پروژه CORDEX دوره پایه تا سال ۲۰۰۵ می‌باشد، در این مطالعه، دوره پایه سال‌های ۲۰۰۵-۱۹۹۰ انتخاب شد. داده‌های مربوط به سناریوهای تغییر اقلیم از مرکز محاسبات اقلیمی آلمان (DKRZ) مرتبط با سیستم سازمانی ESGF^۱ از آدرس اینترنتی <https://esgf-data.dkrz.de/search/esgf-dkrz> تحت پروژه CORDEX برای منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا دریافت گردید. این داده‌ها در تفکیک زمانی روزانه و در تفکیک مکانی ۰/۴۴ درجه به صورت فایل NetCDF و در دوره‌های زمانی ۵ ساله قابل دریافت می‌باشد (Senatore *et al.*, 2019).

جدول ۲- مدل‌ها و سناریوهای مورد استفاده و مشخصات مؤسسه توسعه‌دهنده مدل (Szepszo *et al.*, 2017)

مدل گردش عمومی جو	مؤسسه توسعه دهنده مدل	خروجی‌های ارائه شده تحت پروژه CORDEX
EC-EARTH	Irish Centre for High-End Computing, ICHEC (Ireland)/ European EC-Earth consortium	Historical, Rcp 2.6 Rcp 4.5, Rcp 8.5
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Meteorologiques / Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique (CNRM-CERFACS), France	Historical, Rcp 4.5 Rcp 8.5
GFDL-ESM2M	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA)	Historical, Rcp 4.5 Rcp 8.5

را در طول زمان بیان کرد (Rahimi, 2016). از این‌رو با توجه به این‌که داده‌های اقلیمی ممکن است توزیع نرمالی نداشته باشند و برای آزمون‌های پارامتری نرمال بودن داده‌ها لازم است، از آزمون‌های ناپارامتریک برای مشخص شدن روند استفاده شد

تحلیل روند زمانی سری‌های اقلیمی

برای بررسی روند پارامترهای مورد مطالعه در مقیاس سالانه، از آزمون ناپارامتری من-کندال استفاده گردید. با استفاده از آزمون من-کندال می‌توان روند تغییرات هر پارامتر (کاهش یا افزایش)

STD_{fut}^{GCM} معرف انحراف معیار داده‌های برآورد شده توسط مدل برای دوره آینده است.

شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل‌ها

به منظور ارزیابی مدل‌ها و مقایسه مقادیر پیش‌نگری و مشاهده شده از شاخص‌های آماری درصد تغییرات مقادیر شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر مشاهده شده % Change (معادله ۴)، میانگین انحراف از اشتباه (MBE) (معادله ۵)، ریشه میانگین مربعات اشتباه نرمال شده (NRMSE) (معادله ۶)، شاخص توافق ویلموت (d) (معادله ۷) و ضریب تعیین (R^2) (معادله ۸) استفاده شد.

$$Change \% = \left(\frac{P_i - O_i}{O_i} \right) \times 100 \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$d - index = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|p_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{o})^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2} \quad (\text{رابطه ۸})$$

P و O به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر پیش‌نگری و مشاهده شده و \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده شده، می‌باشند. مقدار MBE مثبت بیش برآوردی و مقادیر منفی کم برآوردی داده‌های پیش‌نگری شده مدل را نسبت به داده‌های مشاهده شده نشان می‌دهد. مقدار (NRMSE) ریشه میانگین مربعات اشتباه نرمال شده مقدار مطلق اشتباه را نشان می‌دهد، به طوری که مقدار کمتر از ۱۰ درصد عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد قابل پذیرش و بالاتر از ۳۰ درصد ضعیف می‌باشد؛ مقدار R^2 نسبت پراکندگی را در بین داده‌های پیش‌نگری شده و مشاهدات نشان می‌دهد (Wu et al., 2017). محدوده d (شاخص توافق ویلموت) بین صفر تا یک می‌باشد، به طوری که هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد توافق بهتر را نشان می‌دهد (Willmott, et al., 2012).

نتایج و بحث

روند تغییرات اقلیم فعلی

همان‌گونه که قبلاً بیان گردید این تحقیق با هدف بررسی روند

(Zare Abianeh et al., 2012). همچنین در این مطالعه از روش ناپارامتری تخمین‌گر شیب سن^۱ نیز استفاده گردید. آزمون تخمین‌گر شیب سن در برخی موارد نتایج قابل قبول‌تری را نسبت به آزمون من-کندال ارائه می‌دهد (Hajam et al., 2008). به منظور انجام آزمون‌های روندیابی تشریح شده در این بخش از ماکرووی MAKESENS1.0 در محیط برنامه Microsoft EXCEL استفاده شد. این ماکرو که یک محیط کاربرپسند است به منظور تشخیص و تخمین وجود روند در مؤسسه هواشناسی فنلاند توسعه پیدا کرده است (Salmi et al., 2002).

تصحیح اریبی خروجی مدل‌های اقلیم منطقه‌ای

در طی فرآیند ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی در پروژه CORDEX به علت مقیاس‌گذاری (میانگین‌گیری فضایی در سطح یک شبکه) و سایر تخمین‌ها، انحرافات به داده‌ها وارد شده که منجر به مقادیر داده‌های اقلیمی نادرست می‌گردد. بنابراین، به منظور ارزیابی و پیش‌نگری تغییر اقلیم آینده در سطوح منطقه‌ای این انحرافات باید از داده‌های اقلیمی تولید شده حذف گردد (Modala et al., 2017). به منظور تصحیح انحرافات (پس‌پردازش) داده‌های استخراج شده، از روش دلتا با استفاده از معادله‌های (۱، ۲ و ۳) استفاده شد. معادله (۱) برای تصحیح میانگین پارامترهای بارش، ساعت آفتابی و تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع، معادله (۲) برای تصحیح میانگین پارامترهای دما، سرعت باد و رطوبت نسبی و معادله (۳) برای تصحیح انحراف معیار همه پارامترها استفاده گردید (Asgari et al., 2017; Dubey & Sharma., 2018).

$$X_{fut} = \frac{Mean_{base}^{obs}}{Mean_{base}^{GCM}} \times X_{fut}^{GCM} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$X_{fut} = (Mean_{base}^{obs} - Mean_{base}^{GCM}) + X_{fut}^{GCM} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$STD_{fut} = \frac{STD_{base}^{obs}}{STD_{base}^{GCM}} \times STD_{fut}^{GCM} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن X_{fut} داده‌های آینده اقلیمی، $Mean_{base}^{obs}$ میانگین داده‌های مشاهده شده در دوره پایه، $Mean_{base}^{GCM}$ میانگین داده‌های خروجی مدل برای دوره پایه و X_{fut}^{GCM} معرف داده‌های برآورد شده توسط مدل برای دوره آینده است.

STD_{fut}^{obs} انحراف معیار داده‌های آینده اقلیمی، STD_{base}^{obs} انحراف معیار داده‌های مشاهده شده در دوره پایه، STD_{base}^{GCM} انحراف معیار داده‌های خروجی مدل برای دوره پایه و

در سطح ۹۵ درصد از خود نشان داد، اما تفاوت خاصی بین ایستگاه‌ها از این نظر وجود نداشت. در مطالعه‌ای با استفاده از آزمون‌های من-کندال، تخمین‌گر شیب سن و رگرسیون خطی روند بارش ۴۱ ایستگاه در سرتاسر ایران در دوره ۲۰۰۵-۱۹۶۶ انجام شد، نتایج نشان داد که در ۶۰ درصد ایستگاه‌های منتخب آن مطالعه روند کاهشی بارش مشاهده شد که این روند منفی بیشتر در شمال غرب کشور مشاهده شد و در بین تمامی ایستگاه‌ها سنندج بیشترین روند کاهشی بارش را داشت، در حالی که در شرق، جنوب و مرکز ایران روند معنی‌داری مشاهده نشد (Tabari and Hosseinzadeh Talae, 2011b). تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع تنها در ایستگاه سنندج روند افزایشی معنی‌داری را نشان می‌دهد که غیرهمسو با رطوبت نسبی و همسو با سایر پارامترها است. هر چند روند تغییرات سرعت باد در این ایستگاه معنی‌دار نیست، بیشترین مقدار را نسبت به سایر ایستگاه‌ها دارد؛ به نظر می‌رسد در ایستگاه قروه، کاهش سرعت باد و در ایستگاه زرینه، کاهش مقدار تابش باعث کاهش اثرات افزایشی دما بر تبخیر-تعرق باشند. تبخیر-تعرق با افزایش دما، افزایش تشعشع، کاهش رطوبت نسبی و افزایش سرعت باد افزایش می‌یابد (Abteu and Melesse., 2012).

تغییرات (افزایشی/کاهشی) پارامترهای اقلیمی در دوره تاریخی ۱۹۹۰-۲۰۱۷ و همچنین، بررسی بزرگی آن انجام شده است. برای این منظور، مقادیر آماره Z آزمون من-کندال و Qmed شیب سن محاسبه شد؛ مطابق جدول‌های (۳) و (۴) ملاحظه می‌شود که روند افزایشی حداقل و حداکثر دمای روزانه در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه رخ داده است. در واقع در این دوره ۲۷ ساله روند گرم‌تر شدن منطقه مشاهده می‌شود. نکته قابل تأمل، قطعیت بیشتر معنی‌داری در ایستگاه قروه نسبت به ایستگاه‌های دیگر می‌باشد؛ با توجه به این که قروه نسبت به ایستگاه‌های دیگر دارای متوسط بارش کمتری در مقایسه با دو ایستگاه دیگر می‌باشد، به نظر می‌رسد روند افزایشی بیشتری را در دمای حداقل و حداکثر روزانه سپری کرده است. نتایج پژوهشی به وضوح سیر افزایشی سالانه، ماهانه و فصلی را در دمای حداقل و حداکثر در مناطق خشک و نیمه خشک ایران در فاصله سال‌های ۲۰۰۵-۱۹۶۶ بیان می‌کنند. در حالی که روند افزایشی بیشتری در مورد دمای حداقل نسبت به دمای حداکثر دیده می‌شود (Tabari and Hosseinzadeh Talae, 2011a)، در تناقض با یافته‌های ایشان دمای حداکثر در این مطالعه روند افزایشی بیشتری را نشان داد. مقدار بارش در تمام ایستگاه‌ها روند کاهشی معنی‌داری را

جدول ۳- مقادیر آماره Z حاصل از آزمون من-کندال برای متغیرهای اقلیمی در ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	دمای حداقل	دمای حداکثر	رطوبت نسبی	سرعت باد	ساعات آفتابی	بارش	تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع
سنندج	۲/۵۵*	۴/۶۰***	-۳/۱۸**	۱/۱۳	۲/۵۵*	-۲/۴۷*	۲/۹۴**
قروه	۵/۴۳***	۳/۵۴***	۰/۶۱	-۳/۱۴**	۲/۹۰**	-۲/۰۷*	۰/۵۳
زرینه	۳/۱۸**	۴/۰۹***	۱/۶۴	۰/۹۷	-۰/۵۳	-۲/۳۱*	۱/۸۴

جدول ۴- مقادیر آماره Qmed حاصل از آزمون تخمین‌گر شیب سن برای متغیرهای اقلیمی در ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	دمای حداقل (درجه سلسیوس در سال)	دمای حداکثر (درجه سلسیوس در سال)	رطوبت نسبی (درصد در سال)	سرعت باد (متر مربع بر ثانیه در سال)	طول ساعات آفتابی (ساعت در سال)	بارش (میلی‌متر در سال)	تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع (میلی‌متر در سال)
سنندج	۰/۰۴*	۰/۰۹**	-۰/۱۸۴**	۰/۰۱۰	۰/۰۱۹*	-۵/۲۸*	۰/۰۱۹**
قروه	۰/۱۰۱**	۰/۰۷۷***	۰/۰۵	-۰/۰۲۵**	۰/۰۲۹**	-۲/۹۱*	۰/۰۰۲
زرینه	۰/۰۳۳**	۰/۰۹۱**	۰/۱۴۲	۰/۰۲۴	-۰/۰۰۵	-۴/۸۶*	۰/۰۱۶

نسبی، باد و ساعات آفتابی) به طور مستقیم در محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع مورد استفاده قرار می‌گیرند، به جای بحث در مورد یکایک این عوامل، فقط نتایج مربوط به تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع به همراه بارش ارائه می‌شود. جدول‌های (۵) و (۶) نتایج به‌دست آمده به کمک شاخص‌های آماری مختلف را در ایستگاه‌های مطالعاتی به ترتیب برای بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع ارائه می‌دهند. در دوره زمانی ۲۰۱۷-۲۰۰۶

مقایسه خروجی‌های مدل‌های اقلیمی و داده‌های مشاهداتی در دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۶

در این بخش، خروجی پس‌پردازش شده مدل‌های اقلیمی منتخب CORDEX و داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌ها از نظر دو پارامتر اقلیمی بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع در دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۶ مورد مقایسه قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه، به غیر از بارش تمام عوامل اقلیمی مورد بحث در این مطالعه (شامل دما، رطوبت

مختلف CMIP5 در برآورد بارش کشور گزارش شد که این مدل‌ها دقت ضعیف تا متوسط برای برآورد بارش در آینده از خود نشان دادند (Porkamar, 2017).

تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع در ایستگاه قروه با مقدار ۳/۹ میلی‌متر در روز نسبت به سنندج و زرینه بالاتر بود (جدول ۶). اختلاف کمی بین تبخیر-تعرق پتانسیل مشاهده و پیش‌نگری شده مشاهده شد، به طوری که ایستگاه سنندج با ۲/۱- درصد تغییر بیشترین اختلاف در مقادیر را دارا بود؛ که این مطلب علاوه بر بالا بودن مقادیر شاخص‌های توافق ویلموث، ضریب تبیین و پایین بودن مقادیر ریشه میانگین مربعات اشتباه نرمال شده، دقت مناسب سناریوهای اقلیمی برای تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع را نشان می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های اقلیمی تخمین مناسب‌تری از تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع در قروه را ارائه داده‌اند. شاخص‌های ارزیابی اشاره دارند که مدل GFDL-ESM2M دارای دقت بهتری نسبت به سایر مدل‌ها در تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع بوده است (جدول ۶).

قروه بارش کمتری را نسبت به دو ایستگاه دیگر تجربه کرده است، در حالی که سنندج و زرینه مقادیر بارش یکسانی را داشتند (جدول ۵). مدل‌های اقلیمی در ایستگاه‌های زرینه، قروه و سنندج به ترتیب ۲۵/۹، ۲۴/۲ و ۱۸/۴ درصد بارش بیشتری را نسبت به مقادیر مشاهده شده در این دوره پیش‌نگری کرده‌اند. مدل EC-EARTH 2.6 در زرینه و سنندج کمترین اختلاف بین داده‌های مشاهده و پیش‌نگری شده را به خود اختصاص داده است. نکته حائز اهمیت این است که در حالی که در پارامترهای دما، ساعت آفتابی و رطوبت نسبی با افزایش واداشت تابشی از ۴/۵ به ۸/۵ مقادیر آن‌ها در اکثر موارد به ترتیب افزایش، افزایش و کاهش می‌یابد (نتایج گزارش نشده است)، در پارامتر بارش هر چند به طور میانگین برای ایستگاه‌ها با کاهش همراه است، اما این کاهش برای برخی سناریوها مشاهده نشد. در مورد شاخص‌های ارزیابی نیز باید بیان کرد که دقت خوبی بین داده‌های مشاهده شده و تخمین زده شده وجود ندارد، با این وجود به طور کلی می‌توان گفت که مدل EC-EARTH از این لحاظ نسبت به سایر مدل‌ها بهتر بوده است. در مطالعه‌ای به منظور ارزیابی دقت ۸ مدل

جدول ۵- ارزیابی تغییرات بارش در سناریوهای تغییر اقلیم نسبت به مقادیر مشاهده شده در دوره ۲۰۰۶-۲۰۱۷ در کردستان

مشاهده (میلی‌متر در روز)	مدل گردش عمومی	RCP	مقادیر پیش‌نگری مدل (میلی‌متر در روز)	Change %	MBE	NRMSE	d	R ²	
سنندج	EC-EARTH	۲/۶	۰/۹۷	۲/۵۷	۰/۰۲	۱۴۶	۰/۶۷	۰/۱۳	
		۴/۵	۱/۰۳	۸/۶۷	۰/۰۸	۱۴۴	۰/۷۱	۰/۲۰	
	CNRM-CM5	۸/۵	۰/۸۹	۵/۹۷-	۰/۰۶-	۱۳۴	۰/۷۰	۰/۱۵	
		۴/۵	۱/۱۹	۲۶/۲۴	۰/۲۵	۱۵۰	۰/۶۷	۰/۱۵	
	GFDL-ESM2M	۸/۵	۱/۲۴	۳۰/۶۶	۰/۲۹	۱۴۳	۰/۷۰	۰/۱۸	
		۴/۵	۱/۳۱	۳۸/۳۴	۰/۳۶	۱۷۲	۰/۶۲	۰/۱۲	
	میانگین	۸/۵	۱/۲۱	۲۸/۳۴	۰/۲۷	۱۵۴	۰/۶۷	۰/۱۶	
		۱/۱۲	۱/۱۲	۱۸/۴۱	۰/۱۷	۱۴۹	۰/۶۸	۰/۱۶	
	قروه	EC-EARTH	۲/۶	۱/۱۲	۲۸/۰۷	۰/۲۵	۱۶۱	۰/۶۲	۰/۱۱
			۴/۵	۱/۱۹	۳۵/۷۷	۰/۳۱	۱۶۱	۰/۶۶	۰/۱۸
CNRM-CM5		۸/۵	۰/۹۲	۵/۲۸	۰/۰۵	۱۲۷	۰/۷۰	۰/۱۴	
		۴/۵	۱/۰۴	۱۹/۰۶	۰/۱۷	۱۴۶	۰/۶۷	۰/۱۴	
GFDL-ESM2M		۸/۵	۰/۹۸	۱۲/۲۱	۰/۱۱	۱۳۸	۰/۶۶	۰/۱۰	
		۴/۵	۱/۱۴	۲۹/۸۹	۰/۲۶	۱۵۵	۰/۶۴	۰/۱۱	
میانگین		۸/۵	۱/۲۲	۳۸/۹۷	۰/۳۴	۱۵۹	۰/۶۶	۰/۱۳	
		۲/۶	۰/۹۲	۲۴/۱۸	۰/۲۱	۱۵۰	۰/۶۶	۰/۱۳	
زرینه		EC-EARTH	۲/۶	۰/۹۲	۲/۵۴-	۰/۰۲-	۱۳۴	۰/۶۹	۰/۱۴
			۴/۵	۱/۳۰	۳۷/۰۲	۰/۳۵	۱۶۱	۰/۶۷	۰/۲۰
	CNRM-CM5	۸/۵	۱/۱۰	۱۶/۶۴	۰/۱۶	۱۴۷	۰/۶۶	۰/۱۴	
		۴/۵	۱/۲۳	۳۰/۴۷	۰/۲۹	۱۴۷	۰/۶۴	۰/۱۱	
	GFDL-ESM2M	۸/۵	۱/۲۸	۳۵/۵۳	۰/۳۴	۱۴۴	۰/۶۸	۰/۱۴	
		۴/۵	۱/۳۲	۳۹/۷۲	۰/۳۸	۱۵۴	۰/۶۸	۰/۲۰	
	میانگین	۸/۵	۱/۱۸	۲۴/۶۱	۰/۲۳	۱۴۱	۰/۷۱	۰/۲۲	
		۱/۱۹	۱/۱۹	۲۵/۹۲	۰/۲۵	۱۴۸	۰/۶۸	۰/۱۶	

جدول ۶- ارزیابی تغییرات تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع در سناریوهای تغییر اقلیم نسبت به مقادیر مشاهده شده در دوره ۲۰۰۶-۲۰۱۷ در کردستان

مشاهده (میلی متر در روز)	مدل گردش عمومی	RCP	مقادیر پیش‌نگری مدل (میلی متر در روز)	Change %	MBE	NRMSE	d	R2	
سنندج	EC-EARTH	۲/۶	۳/۷۱	۲/۷۴-	۰/۱۰-	۳۱/۹	۰/۹۸	۰/۸۷	
		۴/۵	۳/۶۸	۳/۴۰-	۰/۱۳-	۲۲/۲	۰/۹۸	۰/۸۷	
	CNRM-CM5	۸/۵	۳/۷۴	۱/۸۸-	۰/۰۷-	۳۱/۴	۰/۹۸	۰/۸۷	
		۴/۵	۳/۷۲	۲/۳۴-	۰/۰۹-	۲۴/۱	۰/۹۸	۰/۸۴	
	GFDL-ESM2M	۸/۵	۳/۷۷	۱/۱۷-	۰/۰۴-	۲۳/۳	۰/۹۸	۰/۸۵	
		۴/۵	۳/۶۹	۳/۰۶-	۰/۱۲-	۱۶/۰	۰/۹۹	۰/۹۳	
	میانگین	۸/۵	۳/۷۹	۰/۴۴-	۰/۰۲-	۱۷/۳	۰/۹۹	۰/۹۲	
		۳/۷۳	۲/۱۵-	۰/۰۸-	۲۰/۹	۰/۹۸	۰/۸۸		
	قروه	EC-EARTH	۲/۶	۳/۹۴	۰/۱۴	۰/۰۱	۱۸/۶	۰/۹۹	۰/۹۱
			۴/۵	۳/۹۰	۰/۹۴-	۰/۰۴-	۱۷/۸	۰/۹۹	۰/۹۲
CNRM-CM5		۸/۵	۴/۰۱	۱/۹۹	۰/۰۸	۱۸/۱	۰/۹۹	۰/۹۲	
		۴/۵	۴/۰۱	۲/۰۰	۰/۰۸	۱۸/۴	۰/۹۹	۰/۹۱	
GFDL-ESM2M		۸/۵	۴/۰۶	۳/۱۴	۰/۱۲	۱۸/۲	۰/۹۹	۰/۹۲	
		۴/۵	۳/۹۰	۰/۹۱-	۰/۰۴-	۱۷/۵	۰/۹۹	۰/۹۲	
میانگین		۸/۵	۳/۹۶	۰/۵۸	۰/۰۲	۱۹/۵	۰/۹۹	۰/۹۱	
		۳/۹۷	۰/۸۶	۰/۰۳	۱۸/۳	۰/۹۹	۰/۹۲		
زرینه		EC-EARTH	۲/۶	۳/۵۱	۱/۶۷-	۰/۰۶-	۲۶/۱	۰/۹۸	۰/۸۴
			۴/۵	۳/۵۱	۱/۶۷-	۰/۰۶-	۲۵/۲	۰/۹۸	۰/۸۵
	CNRM-CM5	۸/۵	۳/۵۶	۰/۴۴-	۰/۰۲-	۲۵/۸	۰/۹۸	۰/۸۵	
		۴/۵	۳/۵۲	۱/۳۶-	۰/۰۵-	۳۰/۱	۰/۹۷	۰/۷۹	
	GFDL-ESM2M	۸/۵	۳/۵۸	۰/۳۶	۰/۰۱	۲۸/۱	۰/۹۷	۰/۸۲	
		۴/۵	۳/۴۶	۳/۱۲-	۰/۱۱-	۲۰/۳	۰/۹۹	۰/۹۰	
	میانگین	۸/۵	۳/۶۴	۱/۹۴	۰/۰۷	۲۲/۱	۰/۹۸	۰/۸۹	
		۳/۵۴	۰/۸۵-	۰/۰۳-	۲۵/۴	۰/۹۸	۰/۸۵		

بررسی تغییر اقلیم در دوره‌های زمانی آینده

لذا به نظر می‌رسد تنها با احتمال اینکه این مدل پیش‌نگری بهتری را انجام داده باشد کاهش بارش در این دوره زمانی رخ خواهد داد.

در دوره پایه مشاهداتی ایستگاه قروه با ۱۴۴۳ میلی‌متر در سال میزان تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع بیشتری را نسبت به ایستگاه‌های سنندج و زرینه (به ترتیب ۱۳۳۹ و ۱۲۷۱ میلی‌متر در سال) داشته است. تغییرات تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع در آینده در تمامی ایستگاه‌ها و سناریوها روند افزایشی را نشان می‌دهد، این روند با گذشت زمان تا پایان قرن ادامه می‌یابد (شکل ۲). این افزایش در ایستگاه زرینه (۱۷ درصد) بیشتر از ایستگاه‌های سنندج و قروه (به ترتیب ۱۵ و ۱۴ درصد) مورد انتظار است و با بیشتر شدن واداشت تابشی نیز این روند افزایشی بیشتر می‌شود. GFDL-ESM2M 8.5 با افزایش حدود ۲۷ درصد در سه ایستگاه بیشترین افزایش تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع را در انتهای قرن نسبت به دوره پایه پیش‌نگری می‌کند، در حالی که در EC-EARTH 2.6 تنها ۲ درصد افزایش قابل انتظار است. روند افزایشی تبخیر-تعرق سالانه در شمال غرب کشور در آینده تحت مدل‌های اقلیمی مختلف به علت افزایش دما و کاهش

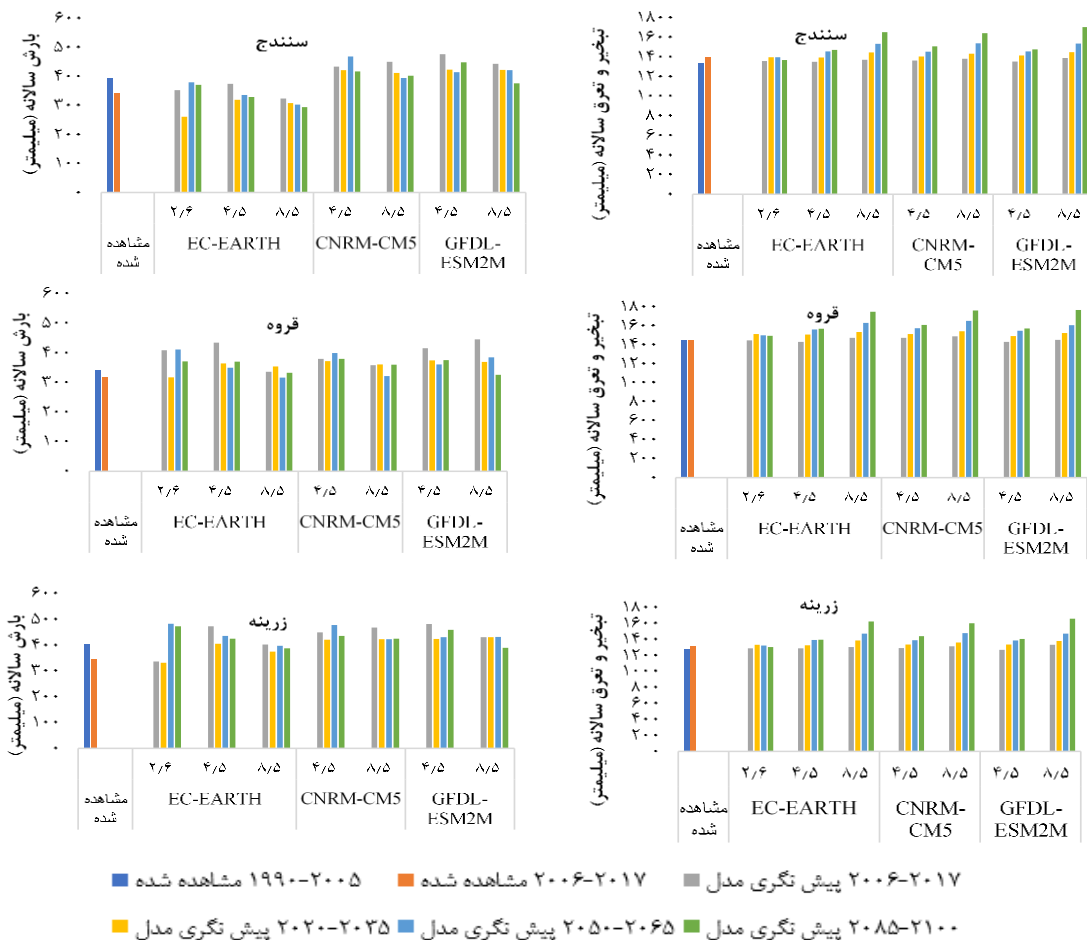
میزان بارش در ایستگاه زرینه در دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۹۰ (۴۰۲ میلی‌متر در سال) نسبت به سنندج و قروه (به ترتیب ۳۹۵ و ۳۴۱ میلی‌متر در سال) بیشتر بوده است (شکل ۲). هر چند نوساناتی در میزان بارش در سناریوها و در ایستگاه‌های مختلف با گذشت زمان دیده می‌شود، سناریوهای اقلیمی به طور متوسط در انتهای قرن نسبت به دوره پایه در دو ایستگاه قروه و زرینه افزایش ۵ و ۶ درصدی در میزان بارش‌ها را پیش‌نگری کرده‌اند، اما برای ایستگاه سنندج کاهش ۵- درصدی بارش مورد انتظار است. نوسانات در میزان بارش تحت مدل‌های اقلیمی مختلف در آینده در مناطق مختلف کشور و جهان توسط محققان متعددی گزارش شده است (Aghakhani Afshar *et al.*, 2017). همچنین در اکثر سناریوها در دوره‌ی ۲۰۳۵-۲۰۲۰ نسبت به دیگر دوره‌ها بارش کمتری رخ خواهد داد، هر چند تنها در ایستگاه سنندج نسبت به دوره پایه کاهش بارش قابل انتظار است. با نگاه جزئی‌تر مشخص می‌شود که مدل EC-EARTH در این دوره زمانی در اکثر سناریوها کاهش بارش را نسبت به دوره پایه پیش‌نگری کرده است، در حالی که در سایر مدل‌ها افزایش بارش مورد انتظار است،

اقلیمی تجربه کرده است. در بررسی میزان تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع در قروه بیش برآوردی و در زرینه و سنندج کم برآوردی مدل های اقلیمی مشاهده شد، با این وجود اختلافات بین مقادیر پیش‌نگری و مشاهده شده، تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع کم بود. در مجموع به لحاظ شاخص‌های ارزیابی مدل‌های اقلیمی در برآورد دما و تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع دقت مناسبی داشته‌اند، اما در برآورد بارش و سرعت باد ضعیف عمل کرده‌اند. در دوره‌های زمانی قرن ۲۱ با گذشت زمان دما و تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع نسبت به دوره پایه ۱۹۹۰-۲۰۰۵ افزایش را نشان می‌دهد، علیرغم نوسانات، در پایان قرن بارش نسبت به دوره پایه در دو ایستگاه زرینه و قروه افزایش و در سنندج کاهش را نشان می‌دهند. علیرغم عدم قطعیت مطالعات تغییر اقلیم، افزایش دما و تبخیر-تعرق پتانسیل در آینده به احتمال زیاد رخ خواهد داد، بنابراین بررسی‌های بیشتر در قدرت تفکیک مکانی بالا، همچنین مطالعه راهکارهای سازگاری به منظور دستیابی به پایداری در شرایط تغییر اقلیم ضروری به نظر می‌رسد.

رطوبت نسبی گزارش شده است (Nouri et al., 2017). با توجه به این‌که در آینده روند افزایشی دما و کاهش در طول ساعات آفتابی، سرعت باد و رطوبت نسبی مشاهده می‌شود (نتایج ارائه نشده است)، به نظر می‌رسد تأثیر مثبت افزایش دما و کاهش رطوبت نسبی بر افزایش تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع با غلبه بر تأثیر منفی کاهش طول ساعات آفتابی و سرعت باد موجب افزایش تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع در آینده شود.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با استفاده از آزمون‌های ناپارامتریک من-کندال و تخمین‌گر شیب سن به بررسی روند تغییرات پارامترهای اقلیمی از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۷ پرداخته شد؛ نتایج روند کاهشی بارش و افزایشی دما و تبخیر-تعرق پتانسیل را نشان داد. در ادامه مقایسه پارامترهای اقلیمی مشاهده و پیش‌نگری شده توسط مدل‌های اقلیمی نشان داد که سنندج و زرینه دماهای کمتری را نسبت به مدل‌های اقلیمی تجربه کرده‌اند. بارش در تمامی ایستگاه‌ها در این دوره زمانی مقادیر کمتری را نسبت به مجموعه مدل‌های



شکل ۲- بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع سالانه مشاهده شده در دو دوره ۱۹۹۰-۲۰۰۵ و ۲۰۰۶-۲۰۱۷، همچنین پیش‌نگری مدل‌های اقلیمی در ایستگاه‌های مورد مطالعه

هواشناسی استان کردستان که داده‌های مشاهده شده ایستگاه‌های مورد مطالعه را در اختیار قرار دادند سپاس‌گزاری می‌شود.

سپاس‌گزاری

این مطالعه حاصل نتایج پایان‌نامه مقطع دکترا دانشگاه تهران می‌باشد. همچنین بدین‌وسیله از سازمان هواشناسی کشور و اداره

REFERENCES

- Abbaspour, K. C., Faramarzi, M., Ghasemi, S. S. and Yang, H. (2009). Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research*, 45(10).
- Abtew, W. and Melesse, A. (2012). Evaporation and evapotranspiration: measurements and estimations. *Springer Science & Business Media*.
- Aghakhani Afshar, A.H., Hassanzadeh, Y., A.A. Besalatpour, A.A. and Pourreza-Bilondi, M. (2017). Annual assessment of Kashafrood watershed basin climate components in future periods by using fifth report of intergovernmental panel on climate change. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(6). (In Farsi).
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. (1998). Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO-Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome (<http://www.fao.org/docrep/ARPAV> (2000), La caratterizzazione climatica della Regione Veneto, Quaderni per. *Geophysics*, 156, 178.
- Amiri M. J. and Eslamian S. S. (2010). Investigation of climate change in Iran. *Journal of Environmental Science and Technology*, 3, 208–216.
- Asgari, S., Ghahreman, N. and Babaeian, I. (2017). Quantifying the possible impacts of climate change on temperature-humidity index, (THI) under RCP scenarios across Iran. *Journal of Climate Research*, 8(31), 1-18. (In Farsi).
- Ashraf Vaghefi, S., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H. and Abbaspour, K.C. (2019). the future of extreme climate in Iran. *Scientific Reports*, 9(1), 1464.
- Chen, Y. Marek, G. W. Marek, T. H. Moorhead, J. E. Heflin, K. R. Brauer, D. K. Gowda, P. H. and Srinivasan, R. (2019). Simulating the impacts of climate change on hydrology and crop production in the Northern High Plains of Texas using an improved SWAT model. *Agricultural Water Management*, 221. 13-24.
- Christensen, O. B., Gutowski, W. J., Nikulin, G. and Legutke, S. (2014). CORDEX Archive design. *Danish Meteorological Institute*.
- Doolabian, S. (2017). *Evaluating the effects of Climate Change on Precipitation and Temperature over Different Parts of Iran using RCP*. MSc. dissertation in Water Resources Engineering and Management scenarios. Shahrood University of Technology. (In Farsi).
- Dubey, S.K. and Sharma, D. (2018). Assessment of climate change impact on yield of major crops in the Banas River Basin, India. *Science of the Total Environment*, 635,10–19.
- Ghiami Shamami, F., Sabziparvar, A. A. and Shinoda, S. (2019). Long-term comparison of the climate extremes variability in different climate types located in coastal and inland regions of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 136(3-4), 875-897.
- Ghahreman, N., Babaeian, I. and Mousavi, M. (2015). Evaluation of the RegCM regional model in estimating potential evapotranspiration during the past climate and the period of 2021-2035: Case study of Mashhad. *Iranian Journal of Geophysics*, 8(4). (In Farsi).
- Ghahreman, N., Babaeian, I. and Tabatabaei. (2016). Evaluation the post processed outputs of dynamic models in estimation potential evapotranspiration changes under RCP scenarios (Case Study: Mashhad plain). *Journal of the Earth and Space Physics*, 42(3). (In Farsi).
- Gimenez, P. and García-Galiano, S. (2018). Assessing regional climate models (RCMs) ensemble-driven reference evapotranspiration over Spain. *Water*, 10(9), 1181.
- Giorgi, F. and Gutowski, W.J. (2016). Coordinated experiments for projections of regional climate change. *Current Climate Change Reports*, 2, 202–210.
- Hajam, S., Khoush Khou, Y. and Shams Aldin Vandi, R. (2008). Annual and Seasonal precipitation trend analysis of some selective meteorological stations in central region of Iran using non-parametric methods. *Geographical Research*, 40(64). (In Farsi).
- Hanafi, A. and Hatami, I. (2013). Producing climate map for Kurdistan Province using information technology system. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 22(87), 24-28. (In Farsi).
- IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Khalili, A. (1997). Synthesis proceeding of integrated water plan of Iran. Jamab Consulting Engineering Co., Climate Section, The Ministry of Energy, Tehran, Iran. (In Farsi).
- Koocheki, A. and Kamali, GH. (2010). Climate Change and Rainfed Wheat Production in Iran. *Iranian Journal of Field Crops Research*. 8(3), 508-520. (In Farsi)
- Lang, D., Zheng, J., Shi, J., Liao, F., Ma, X., Wang, W., Chen, X. and Zhang, M. (2017). A comparative study of potential evapotranspiration estimation by eight methods with FAO Penman–Monteith method in southwestern China. *Water*, 9(10), 734.

- Ministry of Agricultural-jihad. (2019). Agricultural Research, Education and Extension Organization, (AREEO), Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center. Retrieved January 5, 2019. <http://kurdistan.areeo.ac.ir/HomePage.aspx?lang=en-US&site=kurdistan.areeo.ac&tabid=3811>. (In Farsi).
- Ministry of Agriculture-Jahad. (2018). *Agriculture Iran Statistics- crops (2016-2017)*. Retrieved January 5, 2019. <https://www.maj.ir/Index.aspx?lang=1&sub=65#>. (In Farsi).
- Modala, N.R., Ale, S., Goldberg, D., Olivares, M., Munster, C., Rajan, N. and Feagin, R. (2017). Climate change projections for the Texas High Plains and Rolling Plains. *Theoretical and Applied Climatology*, 129 (1), 263–280.
- NASA. (2019). *Global land-ocean temperature index. National aeronautics and space administration*. Retrieved June 2019, <http://data.giss.nasa.gov/gistemp>.
- Nouri, M., Homaei, M. and Bannayan, M. (2017). Assessing reference evapotranspiration changes during the 21st century in some semi-arid regions of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 48(2), 241-252. (In Farsi).
- Nikfal, A., Sehatkashani, S., Saadatabadi, A. R., and Fathi, E. (2018). Numerical Modeling of Potential Evapotranspiration using WRF Regional Model–Urmia Lake Basin Case Study. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 4(6), 1395-1404. (In Farsi).
- Porkamar, F. (2017). *Evaluating the Efficiency of CMIP5 Models to Predict the Monthly Precipitation in Iran*. M.A. dissertation in Applied Climatology. Razi University. (In Farsi).
- Raes, D. (2012). The ETo Calculator: Evapotranspiration from a Reference Surface, Reference Manual, Version 3.2. FAO Publication.
- Rahimi, J. (2016). Uncertainty of Statistical Downscaling Methods in Quantifying Last Spring Frost Risk under Different Climate Change Scenarios in Iran. Ph. D. dissertation of Agrometeorology. University of Tehran. (In Farsi).
- Salmi, T., Maatta, A., Anttila, P., Ruoho-Airola, T., Amnell, T. (2002). Detecting Trends of Annual Values of Atmospheric Pollutants by the Mann-Kendall Test and Sen's Slope Estimates the Excel Template Application MAKESENS. *Finnish Meteorological Institute: Helsinki, Finland*, 31.
- Senatore, A., Hejabi, S., Mendicino, G., Bazrafshan, J. and Irannejad, P. (2019). Climate Conditions and drought assessment with the Palmer Drought, Severity Index in Iran: evaluation of CORDEX South Asia climate projections (2070–2099). *Climate Dynamics*, 52, 865–891.
- Shikuku, K., Winowiecki, L., Twyman, J., Eitzinger, A., Perez, J.G., Mwangera, C. and Läderach, P. (2017). smallholder farmers' attitudes and determinants of adaptation to climate risks in East Africa. *Climate Risk Management*, 16, 234-245.
- Su, B., Jian, D., Li, X., Wang, Y., Wang, A., Wen, S., Tao, H. and Hartmann, H. (2017). Projection of actual evapotranspiration using the COSMO-CLM regional climate model under global warming scenarios of 1.5° C and 2.0° C in the Tarim River basin, China. *Atmospheric Research*, 196, 119-128.
- Szepszo, G., Illy, T., Szabó, P., Otto, J., Viktor, E., Madsen, M.S., Christensen, O.B., Kämäräinen, M., Mäkelä, A., Ruosteenoja, K. (2017): Inter-comparison matrix for CMIP and CORDEX data used in climate service. *DECM (C3S_51_Lot4) D2.3 project report*, 43 p. https://www.met.hu/doc/tevekenyseg/.../C3S_51_Lot4_D2.3_submitted.
- Tabari, H. and Hosseinzadeh Talaei, P. H. (2011a). Analysis of trends in temperature data in arid and semi-arid regions of Iran. *Global and Planetary Change*, 79(1-2), 1-10.
- Tabari, H. and Hosseinzadeh Talaei, P. H. (2011b). Temporal variability of precipitation over Iran: 1966–2005. *Journal of Hydrology*, 396(3-4), 313-320.
- VijayaVenkataRaman, S., Iniyan, S. and Goic, R. (2012). A Review of Climate Change, Mitigation and Adaptation. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 878-897.
- Willmott, C. J., Robeson, S. M. and Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, 32(13), 2088-2094.
- Wu, L., Feng, L., Zhang, Y., Gao, J. and Wang, J. (2017). Comparison of five wheat models simulating phenology under different sowing dates and varieties. *Agronomy Journal*, 109(4), 1280-1293.
- Zare Abianeh, H., Bayat Varkeshi, M. and Marofi, S. (2012). Investigating Water Table Depth Fluctuations in the Malayer Plain. *Water and Soil Science*, 22(2), 173-190. (In Farsi).