

Study of Spatial and Temporal Characteristics of ETo and Temperature in Khorasan Razavi Province Using CRU TS Dataset and Their Future Projections Based on CMIP5 Climate Models

Mansoureh Kouhi,^{1*} Zahra Shirmohammadi Aliakbarkhani,² Azadeh Mohamadian³ Majid Habibi Nokhandan.⁴

1. Assistance Prof. of Climatological and Climate Change Research Institute (CRI), Mashhad, Iran
2. Assistance Prof., Faculty of Agriculture and Animal Science, Torbat-e Jam Educational Complex, Khorasan Razavi, Iran
3. M.Sc. in Water and Irrigation Engineering, Member of Applied Climatology Research Group, Climatological and Climate Change Research Institute, Mashhad, Iran
4. Associate Prof., Head of Applied Climatology Research Group, Climatological and Climate Change Research Institute, Mashhad, Iran

Abstract

Evapotranspiration is significantly affected by global climate changes as an essential component of both climate and hydrological cycles. Comprehensive analyses of the spatiotemporal changes of ETo enhance the understanding of hydrological processes and improve water resource management. The main objective of this study is to investigate and predict the temporal trend and spatial distributions of the mean maximum temperature (Tmax), the mean minimum temperature (Tmin) and reference evapotranspiration (ETo) during 1961-2014, 2021-2050 and 2051-2080 over Khorasan Razavi Province using CRUTS3.23 dataset and the outputs of four CMIP5 climate models. The results were as follows: (i) the ability of CRU dataset in simulating monthly mean of Tmax and Tmin is suitable, (ii) generally, ETo increased from north to south across the province (ii) from 1961 to 2014, annual ETo exhibited an increasing continuous trend across the area under study (iii) the mean annual minimum temperature projected to increase by 1.6 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios during two future periods. During 2051-2080, this variable will have an increase by 3° C under RCP8.5 scenario. The maximum temperature will increase by 4° C during the middle future period under RCP8.5 scenario. (v) The difference between mean annual ETo values of two periods was statistically significant in all grid points covering this province. The results showed that these increases may lead to the increase in crop water requirements and aggravate the water shortage in this area in view of the increase in ETo in response to ongoing climate change.

Keywords: Climate Change, ETo, CRU Gridded Dataset, Climate Model.

* Correspondence Address: Climatological and Climate Change Research Institute, Saber Ave., Jomhuri Eslami Blvd., Mashhad.
Email: man_koohi@yahoo.com
<https://doi.org/10.52547/gisj.12.1.55>



نخستین شماره از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران / سال دوازدهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۹
Iranian Remote Sensing & GIS / Vol.12, No. 1, Spring 2020

۷۲-۵۵

توزیع مکانی- زمانی دما و تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از داده‌های CRU در خراسان رضوی و پیش‌نگری تغییرات آبی بر مبنای مدل‌های اقلیمی CMIP5

منصوره کوهی^{۱*}، زهرا شیرمحمدی‌علی اکبرخانی^۲، آزاده محمدیان^۳، مجید حبیبی نوخندان^۴

۱. استادیار پژوهشکده اقلیم‌شناسی و تغییر اقلیم، مشهد، ایران
۲. استادیار گروه مهندسی آب، مجتمع آموزش عالی کشاورزی و دامپروری، تربت جام، ایران
۳. کارشناس ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، پژوهشکده اقلیم‌شناسی و تغییر اقلیم، مشهد، ایران
۴. دانشیار پژوهشکده اقلیم‌شناسی و تغییر اقلیم، مشهد، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۱۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۱۲

چکیده

تبخیر- تعرق گیاه مرجع متغیری است که مهم‌ترین جزء چرخه هیدرولوژی محسوب می‌شود. با توجه به ارتباط مستقیم تبخیر- تعرق مرجع با متغیرهای اقلیمی، انتظار می‌رود افزایش دمای هوا و تغییرات فراسنج‌های مرتبط با دما در روند و مقدار ET_o تأثیر بگذارد. در این مطالعه، ضمن بررسی مهارت داده‌های شبکه‌ای CRU در برآورد میانگین سالیانه سه متغیر دمای کمینه، بیشینه و تبخیر- تعرق در استان خراسان رضوی، پیش‌نگری تغییر در مقدار، نوسانات مکانی و روند زمانی این سه متغیر، با استفاده از برون‌داد چهار مدل سری CMIP5، تحت دو سناریوی واداشت تابشی (۴.۵ و ۸.۵) طی دو دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۸۰) بررسی شد. نتایج نشان داد داده‌های CRU دارای مهارت مناسبی در شبیه‌سازی دما در منطقه‌اند. میانگین سالیانه دمای کمینه، در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱، تحت هر دو سناریو، بیش از ۱/۶ C افزایش خواهد یافت که تحت RCP8.5، مساحت بیشتری از استان دچار این افزایش خواهد شد. این منطقه، طی دوره ۲۰۸۰-۲۰۲۱، با افزایش بیش از ۳ C در میانگین سالیانه دمای کمینه مواجه خواهد شد. افزایش دمای بیشینه در سناریوی RCP8.5 طی دوره میانی، در تمامی استان، حدود ۴ C برآورد شد. مقایسه مقادیر ET_o مشاهداتی با برون‌داد چهار مدل اقلیمی در تمامی نقاط شبکه برای دوره پایه نشان داد، به‌رغم تفاوت در مقدار، نحوه پراکنش مکانی مقادیر ET_o مدل با توزیع مکانی مقادیر مشاهداتی هم‌خوانی مناسبی دارد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، طی دو دوره مورد بررسی، این متغیر افزایش خواهد یافت و همان‌طور که انتظار می‌رود، تحت سناریوی RCP8.5، درصد افزایش بیش از سناریوی مقابل است.

کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، تبخیر- تعرق، داده‌های شبکه‌ای CRU، مدل اقلیمی.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: مشهد، بلوار جمهوری اسلامی، خیابان صابر، پژوهشکده اقلیم‌شناسی، صندوق پستی ۶۷۶-۹۱۷۳۵، تلفن: ۰۵۱۳۳۸۲۲۴۸۱، ۰۹۱۵۳۱۲۳۵۴۶

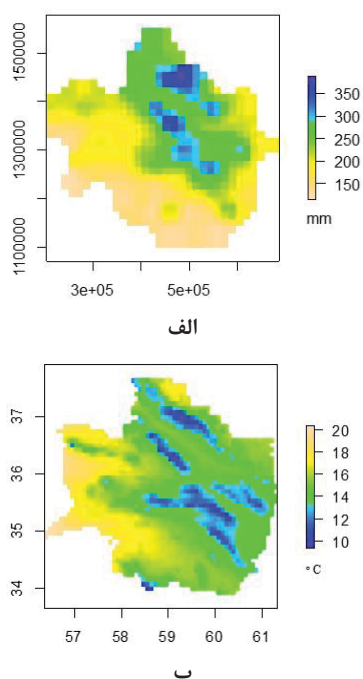
۱- مقدمه

انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت انسان، که به صورت تابشی فعال‌اند، منجر به گرمایش جهانی شده است (IPCC, 2013). تبخیر-تعرق گیاه مرجع^۱ متغیری است که بزرگ‌ترین جزء چرخه هیدرولوژی محسوب می‌شود. از این متغیر می‌توان برای کمی کردن مقدار هدررفت آب از حوضه، طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری و زهکشی، زمان‌بندی آبیاری، مطالعات زیست‌محیطی و ارزیابی آثار هیدرولوژیکی تغییر اقلیم بهره جست. با توجه به ارتباط مستقیم تبخیر-تعرق مرجع با متغیرهای اقلیمی، انتظار می‌رود افزایش دمای هوا و تغییرات در فراسنج‌های مرتبط با دما بر روند و مقدار این متغیر تأثیر بگذارد. اگرچه در سال‌های گذشته، از سری‌های زمانی و یا روش‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی تغییرات آبی ETo استفاده شده است (طلاتیپه و همکاران، ۱۳۹۲؛ زارع ابیانه و همکاران، ۱۳۹۴)، در حال حاضر، مدل‌های گردش جهانی^۲ با در دسترس قرار دادن متغیرهای اقلیمی مورد نیاز در برآورد و تخمین تبخیر-تعرق، به‌منزله معتبرترین ابزار در پیش‌نگری‌های اقلیمی شناخته می‌شوند. در این مطالعه، پیش‌نگری نوسانات مکانی و روند زمانی سه متغیر دمای کمینه، دمای بیشینه و ETo، با استفاده از برون‌داد چهار مدل سری CMIP5^۳ تحت شدیدترین سناریوی تابشی (RCP8.5)^۴ و یک سناریوی حد متوسط (RCP4.5) برای استان خراسان رضوی طی دو دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و آینده میانی (۲۰۸۰-۲۰۵۱)، بررسی شده است. سناریوی RCP8.5 سناریوی حد بالای واداشت تابشی و درواقع، بدترین حالت ممکن گرمایش جهانی را نمایندگی می‌کند. از چنین سناریویی به‌طبع، انتظار افزایش معنادار ETo آینده می‌رود؛ بنابراین، در این پژوهش، با هدف پوشش سایر سناریوهای مورد تأیید هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)^۵، از یک سناریوی حد متوسط (RCP4.5) نیز استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد بررسی

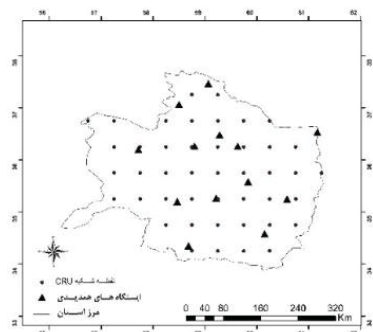
استان خراسان رضوی، با وسعتی بیش از ۱۲۴ هزار کیلومترمربع، در شمال شرق ایران واقع شده است. این استان دارای تنوع اقلیمی است اما، در کل، اقلیم آن در دو طبقه خشک و نیمه‌خشک سرد قرار می‌گیرد. شکل ۱ میانگین دو متغیر دمای میانگین و بارش در دوره نرمال اقلیمی اخیر (۲۰۱۰-۱۹۸۱) را نشان می‌دهد. میانگین بارش سالیانه استان بین ۱۵۰ میلی‌متر در مناطق جنوبی و شرقی و مرکزی، تا حدود ۳۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر در مناطق شمالی و مرتفع، متغیر است (شکل ۱-الف).



شکل ۱. میانگین بارش سالیانه برحسب میلی‌متر (راست) و دمای سالیانه (°C) (ب) در خراسان رضوی داده‌ها: مرکز ملی خشکسالی

1. Reference evapotranspiration
2. Global circulation models
3. Coupled Model Intercomparison Project
4. Representative Concentration Pathways
5. Intergovernmental Panel on Climate Change

سال ۱۳۹۵ (انجام‌شدن این طرح) در ایستگاه درگز ۶، خواف و فریمان ۸، تربت‌جام ۲۱، نیشابور ۲۳، گناباد و گل‌مکان ۲۷، کاشمر ۲۸، سرخس و قوچان ۳۰، تربت‌حیدریه ۵۵، سبزوار ۶۰ و مشهد ۶۳ سال است.



شکل ۲. نقاط شبکه CRU در محدوده استان خراسان رضوی و موقعیت ایستگاه‌های مورد بررسی

از نظر دمایی، استان خراسان رضوی تابستان‌هایی گرم و زمستان‌هایی تقریباً سرد دارد و میانگین دمای سالیانه، از شمال به جنوب، افزایش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که میانگین سالیانه دمای شهرستان فریمان $12/3^{\circ}\text{C}$ است و سردترین منطقه خراسان رضوی محسوب می‌شود و شهرستان سبزوار، با دمای میانگین سالیانه $18/3^{\circ}\text{C}$ ، گرم‌ترین نقطه استان به حساب می‌آید میانگین بیشینه دمای استان $22/5^{\circ}\text{C}$ و میانگین کمینه دمای استان، طی دوره آماری، $9/3^{\circ}\text{C}$ محاسبه شده است (شکل ۱- ب).

۲-۲- داده‌ها

در این پژوهش، از داده‌های مشاهداتی به صورت شبکه‌ای و نقطه‌ای (ایستگاهی) و برون‌داد مدل‌های اقلیمی ریزمقیاس‌شده، با روش تصحیح اریبی^۱ (Reclamation, 2013)، به منظور پیش‌نگری دمای کمینه و بیشینه و برآورد تبخیر- تعرق استفاده شده است.

۲-۲-۱- داده‌های مشاهداتی شبکه‌ای و نقطه‌ای

در این مقاله، از داده‌های شبکه‌ای سری‌های زمانی واحد تحقیقات اقلیمی^۲ (CRU TS3.23) انگلستان، به‌منزله داده‌های مشاهداتی شبکه‌ای، استفاده شده است (<http://data.ceda.ac.uk>). از آنجاکه این داده‌ها در تصحیح اریبی برون‌داد مدل‌های اقلیمی جهانی به کار رفته و دارای قدرت تفکیک یکسان با برون‌داد ریزمقیاس‌شده مدل‌های اقلیمی‌اند، در این پژوهش، از متغیرهای میانگین ماهیانه دمای بیشینه و دمای کمینه CRU به منظور صحت‌سنجی برون‌داد مدل‌های اقلیمی استفاده شده است. در شکل ۲، نقاط شبکه CRU و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هم‌دید خراسان رضوی نشان داده شده است.

به‌منظور صحت‌سنجی مجموعه داده‌های شبکه CRU، مقادیر دمای کمینه و بیشینه برآوردی این بانک با مقادیر مشاهداتی در ایستگاه‌های هم‌دید خراسان رضوی مقایسه شد. طول دوره آماری این متغیرها تا

۲-۲-۲- برون‌داد مدل‌های اقلیمی

مدل‌های گردش عمومی جو- اقیانوس (AOGCM)^۳ مدل‌هایی استانداردند که در ارزیابی گزارش چهارم هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم (AR4)^۴ به کار رفته‌اند. این مدل‌ها براساس شناخت مؤلفه‌های فیزیکی و دینامیکی سامانه اقلیم (جو، اقیانوس، سطح زمین و یخ دریا) طراحی شده و پیش‌نگری‌های این مدل‌ها براساس واداشت گازهای گلخانه‌ای و آتروسلفاست (IPCC, 2013). این مدل‌ها قادرند برآوردهای کمی مورد اطمینانی از تغییر اقلیم آتی، به‌ویژه در مقیاس‌های بزرگ و قاره‌ای، فراهم آورند (IPCC, 2007; Meinshausen et al., 2009). طی سال ۱۳-۲۰۱۲، برنامه جهانی تحقیقات اقلیمی (WCRP)^۵ پیش‌نگری‌های جهانی اقلیم را، براساس فاز پنجم پروژه هم‌سنج مدل جفت‌شده (CMIP)^۶، در اختیار جامعه

1. Bias Correction and Statistical Downscaling (BCSD)
2. Climatic Research Unit
3. Atmosphere-Ocean Global Circulation Model
4. IPCC Fourth Assessment Report
5. World Climate Research Programme
6. Coupled Model Intercomparison Project

عدم قطعیت بالای آن‌ها در خروجی‌های روزانه، به‌ویژه بارش، استفاده مستقیم از برون‌داد این مدل‌ها طی مطالعات تحلیل آثار تغییر اقلیم در بخش‌های گوناگون و استفاده از آن‌ها در مدل‌های هیدرولوژیکی اطمینان‌بخش نیست (Semenov, 2008). برای استفاده از این داده‌ها، باید خروجی‌های این مدل‌ها به‌روش‌های متفاوتی، در سطوح ایستگاهی، ریزمقیاس شود. روش‌های ریزمقیاس کردن شامل ریزمقیاس کردن دینامیکی با استفاده از مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای همچون RegCM¹ (Giorgi, 1990)، ریزمقیاس کردن آماری با استفاده از مدل‌هایی چون ASD² (Hessami et al., 2008) و SDSM (Wilby et al., 2001) و مدل‌های تولیدکننده تصادفی آب‌وهوا مانند LARS-WG می‌شود (Semenov and Brooks, 1999).

علمی قرار داد (Taylor et al., 2012). مزیت CMIP5 بر نسخه قبلی در قدرت تفکیک بالاتر مدل‌های استفاده‌شده در آن، تعداد بیشتر مدل‌ها و مجموعه غنی‌تری از میدان‌های خروجی (علاوه بر دما و بارش) است. در مدل‌های سری CMIP5، از سناریوهای جدید به نام «نماینده خط‌سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای» (RCP)¹ استفاده شده است که شامل چهار سناریو با نام‌های RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 می‌شود. این سناریوها براساس میزان واداشت تابشی آن‌ها در سال ۲۱۰۰ نام‌گذاری شده‌اند (جدول ۱).

۲-۳- روش‌های ریزمقیاس کردن

به‌دلیل قدرت تفکیک پایین زمانی و مکانی GCMs و

جدول ۱. مشخصات سناریوهای RCP

| سناریو | غلظت دی‌اکسید کربن (ppm) تا سال ۲۱۰۰ | واداشت تابشی (Wm ²) تا سال ۲۱۰۰ | کشور و مؤسسه طراح | فرض‌های کلیدی |
|--------|--------------------------------------|---|---|--|
| RCP8.5 | ۱۳۷۰ | ۸.۵ | گروه مدل‌سازی MESSAGE و مؤسسه بین‌المللی تحلیلی سیستم‌های کاربردی اتریش (IIASA) | بدون اتخاذ هیچ‌گونه سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای تغییر اقلیم، آب‌وهوای کره زمین در خط‌سیر انتشار پیش خواهد رفت؛ تا اینکه ادامه این روند منجر به واداشت تابشی به‌میزان ۸.۵ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌شود. در این هنگام، غلظت دی‌اکسید کربن به ۱۰۰۰ ppm می‌رسد و همچنان روند افزایشی خواهد داشت. |
| RCP6 | ۸۵۰ | ۶ | گروه مدل‌سازی AIM در مؤسسه ملی مطالعات محیطی ژاپن | واداشت تابشی بعد از سال ۲۱۰۰، به‌دلیل استفاده از فناوری‌های جدید و سیاست‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای، ثابت می‌ماند. |
| RCP4.5 | ۶۵۰ | ۴.۵ | گروه مدل‌سازی MiniCAM و مؤسسه (JGCR) در شمال غرب اقیانوس آرام | واداشت تابشی ناشی از این گازها، پیش از سال ۲۱۰۰، در مقدار ۴.۵ وات بر مترمربع ثابت می‌ماند. |
| RCP2.6 | ۴۹۰ | ۲.۶ | گروه مدل‌سازی IMAGE از مؤسسه ارزیابی‌های محیطی هلند | در میانه این قرن، واداشت تابشی به حدود ۳.۱ می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد و به ۲.۶ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌رسد. برای رسیدن به این سطح واداشت تابشی، گازهای گلخانه‌ای باید کاهش بسیار معتنابهی بیابند. |

1. Representative Concentration Pathways
2. REGIONal Climate Model
3. Automated Statistical Downscaling

معادلات رایج در محاسبه تبخیر- تعرق مرجع دامنه‌ای از انواع روش‌ها، شامل معادلات دما- مینا و تابش- مینا و معادلات ترکیبی، را دربر می‌گیرد. به ترتیب پیچیدگی، این مدل‌ها شامل بلانی - کریدل^۳ (Doorenbos and Pruitt, 1977)، تورنت‌وایت^۴ (Thornthwaite, 1948)، هارگریوز- سامانی^۵ (Hargreaves and Samani, 1982)، فائو- پنمن- مانتیث^۶ می‌شوند که آخرین مورد از روش هارگریوز- سامانی در محاسبه تابش بهره می‌برد (Allen et al., 1998).

برای حل معادلات توازن انرژی ترکیبی، با توجه به عدم دسترسی به تمامی داده‌های ورودی، همانند بسیاری از مطالعات بررسی اثرات تغییر اقلیم، در تحقیق حاضر نیز، برای تخمین ETo، از معادلات تجربی دما یا تابش - مینا، مانند روش هارگریوز- سامانی، استفاده شده است (سیاری و همکاران، ۱۳۹۰؛ بابائیان و کوهی، ۱۳۹۱؛ Elmahdi et al., 2009). معادله هارگریوز- سامانی تفاوت روزانه دمای بیشینه و کمینه را، به‌منزله نماینده‌ای در برآورد تابش خالص، به کار می‌برد (رابطه (۱)).

$$ETo = 0.0023 (T_{mean} + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a$$

رابطه (۱)

سه روش آماری دیگر شامل تصحیح اریبی، فاکتور تغییر و نگاشت چندک نیز، برای تولید داده‌های روزانه و ماهیانه اقلیمی شبکه‌بندی شده طی دوره‌های آتی، به کار می‌رود. از بین روش‌های یادشده، نگاشت چندک برای متغیرهایی چون بارش و تابش خورشیدی، که ماهیتی تصادفی دارند، کاربرد دارد. رهیافت تصحیح اریبی^۱ برون داد خام روزانه پیش‌بینی شده GCM را، با استفاده از تفاوت در میانگین و تغییرپذیری بین GCM و مشاهدات در دوره پایه، اصلاح می‌کند (Reclamation, 2013). در این پژوهش، از برون داد چهار مدل اقلیمی استفاده شده و مشخصات مدل‌های اقلیمی منتخب در این پژوهش، در جدول ۲، آورده شده است.

۲-۴- برآورد تبخیر- تعرق مرجع

براساس استاندارد سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO)^۲، تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ETo) عبارت است از میزان آبی که مزرعه‌ای پوشیده از گیاه مرجع (نظیر چمن)، در دوره زمانی مشخصی، مصرف می‌کند؛ به طوری که گیاهان این مزرعه، در طول دوره رشد، با کمبود آب مواجه نشوند. این متغیر به دو روش مستقیم (لایسمتر) و غیرمستقیم (استفاده از روش‌های ترکیبی، آئرودینامیک و تجربی) برآورد می‌شود.

جدول ۲. مدل‌های اقلیمی جهانی مورد بررسی در این پژوهش

| نام مدل | نوع | قدرت تفکیک | گروه مدل‌سازی | کشور |
|---------------|---------|------------|---|-------------|
| CSIRO-Mk3-6-0 | AO | ۱.۸°×۱.۸° | سازمان پژوهش‌های صنعتی و علمی کشورهای مشترک‌المنافع | استرالیا |
| IPSL-CM5A-LR | ChemESM | ۱.۸°×۳.۸° | سازمان همکاری با کوئینزلند مؤسسه پیر-سیمون لاپلاس | فرانسه |
| GFDL-ESM2G | ESM | ۲.۱°×۲.۶° | آزمایشگاه دینامیک سیالات ژئوفیزیکی- NOAA | ایالات متحد |
| CCSM4 | AO | ۰.۹°×۱.۲۵° | دانشگاه میامی | ایالات متحد |

1. Bias correction
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations
3. Blaney & Criddle
4. Thornthwaite
5. Hargreaves-Samani
6. FAO Penman-Monteith

۲-۶- آزمون روند

با هدف طرح ویژگی‌های زمانی تبخیر- عرق طی دوره مشاهداتی و آتی، تحلیل روند میانگین سالیانه این متغیرها با دو روش پارامتری کمترین مربعات خطا و روش ناپارامتری من- کندال انجام شده است.

با توجه به ناپارامتری بودن آزمون من- کندال، برای تعیین مقدار شیب روند، از روش سن^۲ (۱۹۶۸) و تیل^۳ (۱۹۵۰) استفاده شد (رابطه ۸)). مزیت و برتری اصلی روش مورد نظر بر روش رگرسیون خطی این است که، در این روش، داده‌های پرت موجود در سری داده‌ها اثر اندکی در تعیین شیب روند دارند (Novotny and Stefan, 2007).

$$\beta = \text{Median} \left[\frac{X_j - X_i}{j - i} \right] \quad \text{برای هر } j > i \quad \text{رابطه (۸)}$$

در این رابطه، X_i و X_j ، به ترتیب، آمین و آمین داده مشاهده‌ای‌اند. β نیز مقدار شیب است که مقدار آن، به منزله میانه دنباله مقادیر داخل کره‌شده، معرفی شده است.

۳- نتایج

با توجه به اینکه سطوح اقلیمی دما و بارش CRU کل خشکی‌های جهان را پوشش می‌دهند، لازم است مقادیر مربوط به متغیرهای مورد نیاز برای نقاط شبکه پوشش‌دهنده منطقه مورد مطالعه استخراج شود. بدین منظور، با استفاده از بسته‌های نرم‌افزاری موجود و کدنویسی در محیط نرم‌افزار R، داده‌های مربوط به میانگین ماهیانه دمای بیشینه و کمینه روزانه، درمورد دوره ۲۰۱۴-۱۹۶۱، از مجموعه داده‌های CRU TS3.23 پوشش‌دهنده استان خراسان رضوی (۴۵ نقطه شبکه) استخراج شد و با ترسیم نمودار تیلور، میزان نزدیکی مقادیر شبکه‌ای این دو متغیر با مقادیر مشاهداتی نقطه‌ای، به صورت ایستگاه به ایستگاه، مقایسه شد.

1. Taylor
3. Theil

2. Sen

در این معادله، T_{\max} ، T_{\min} و T_{mean} ، به ترتیب، دمای بیشینه و دمای کمینه و دمای میانگین برحسب درجه سلسیوس و Ra تابش برون‌زمینی ($\text{Mj m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) به‌شمار می‌آیند.

۲-۵- معیارهای دقت مدل

نمودار تیلور^۱ (۲۰۰۱) میزان نزدیکی و هم‌خوانی یک یا چند الگو را با داده‌های مشاهداتی، به صورت ترسیمی، ارائه می‌دهد. شباهت بین دو الگو، برحسب مقدار ضریب همبستگی آن‌ها و تفاوت جذر میانگین مربعات خطا و دامنه نوسانات (مقادیر انحراف معیار داده‌ها)، به صورت کمی نشان داده می‌شود. دلیل اینکه هر نقطه این نمودار در فضای دوبعدی قادر است سه آماره را هم‌زمان نشان دهد استفاده از رابطه (۲) است.

$$\hat{E}^2 = \text{Var}(X_r - X_f) = \sigma_f^2 + \sigma_r^2 - 2\sigma_f\sigma_r R \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه، X_r و X_f ، به ترتیب، کمیت میدان آزمون و کمیت میدان مرجع را نشان می‌دهند. R ضریب وابستگی بین میدان‌های مرجع و آزمون، \hat{E} تفاوت مرکزی شده RMS بین میدان‌ها و σ_f^2 و σ_r^2 واریانس میدان‌های مرجع و مورد آزمون محسوب می‌شوند.

اگر f میدان آزمون و r میدان مرجع باشد، واریانس هر کمیت و ضریب وابستگی با استفاده از روابط (۳) تا (۷) به دست می‌آید.

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})(r_n - \bar{r})}{\sigma_f \sigma_r} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\hat{E}^2 = \frac{1}{N} \left[\sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})(r_n - \bar{r}) \right]^2 \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})^2 \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (r_n - \bar{r})^2 \quad \text{رابطه (۶)}$$

نمودار (با همبستگی مشخص شده با کسینوس زاویه سمت رأس) براساس شباهت رابطه (۲) و قانون کسینوس ترسیم می‌شود (رابطه (۷)).

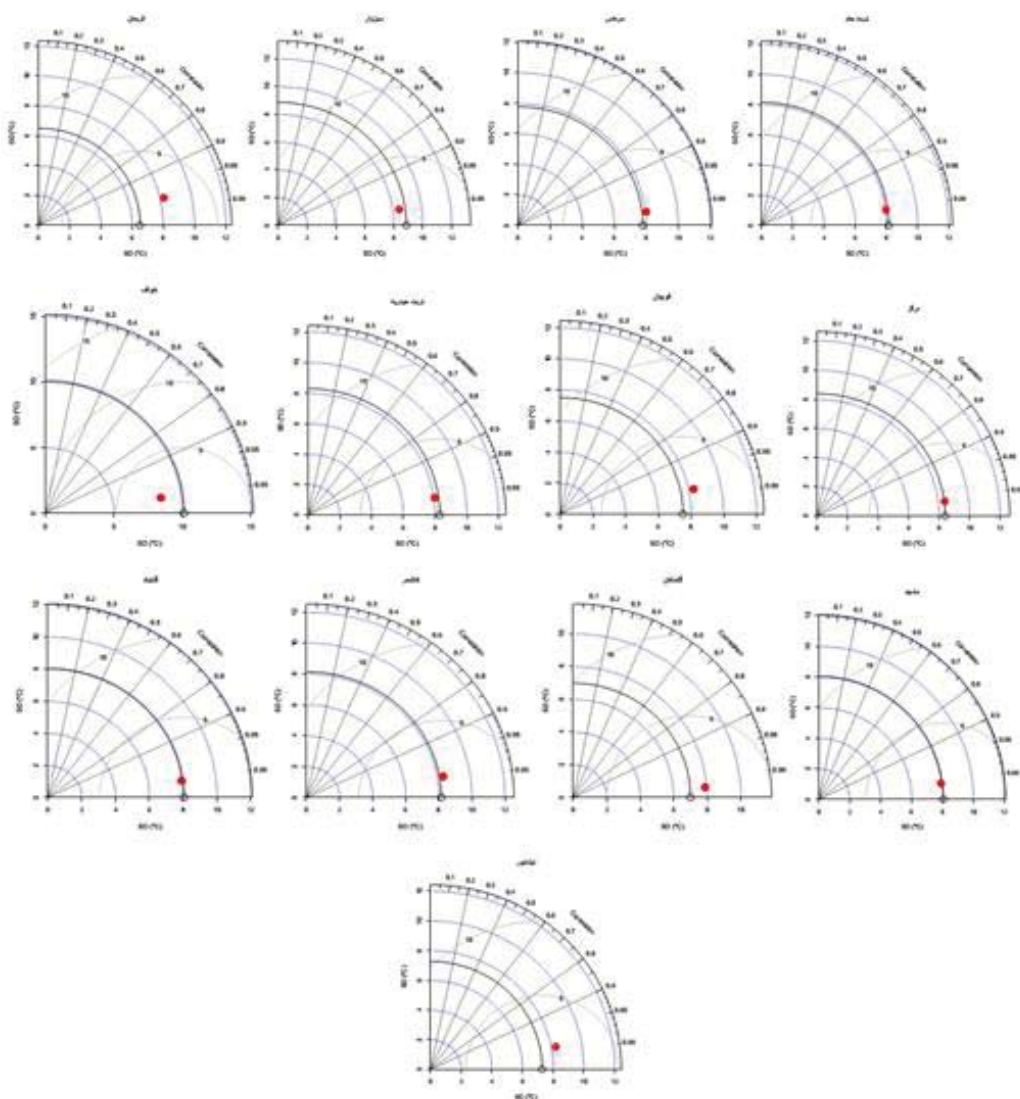
$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \varphi \quad \text{رابطه (۷)}$$

توخالی روی محور x متناسب است. در ادامه، توضیحات درباره مقایسه این دو سری داده دما، به تفکیک، برای دو متغیر دمای کمینه و بیشینه آورده شده است.

۳-۱- دمای کمینه

بیشترین میزان همخوانی بین مقادیر ایستگاهی دمای کمینه و داده‌های شبکه‌ای CRU در ایستگاه‌های مشهد، تربت‌جام، درگز، تربت‌حیدریه، کاشمر، گناباد، سرخس به‌دست آمده است (شکل ۳). در این

همان‌طور که در بخش ۲-۵ آمده است، با توجه به امکان بررسی هم‌زمان سه معیار دقت مرکزی در نمودار تیلور، از این ابزار برای بررسی میزان انطباق الگوهای دمای ماهیانه درون‌یابی‌شده CRU، با داده‌های مشاهداتی نقطه‌ای (ایستگاهی)، استفاده شد. دمای مشاهداتی با دایره توخالی روی محور x و دمای مدل (CRU) با دایره توپر مشخص شده است. در نمودار تیلور، تفاوت میانگین مربعات خطا بین الگوی ایستگاهی و CRU (دایره توپر) با فاصله نقطه تا دایره



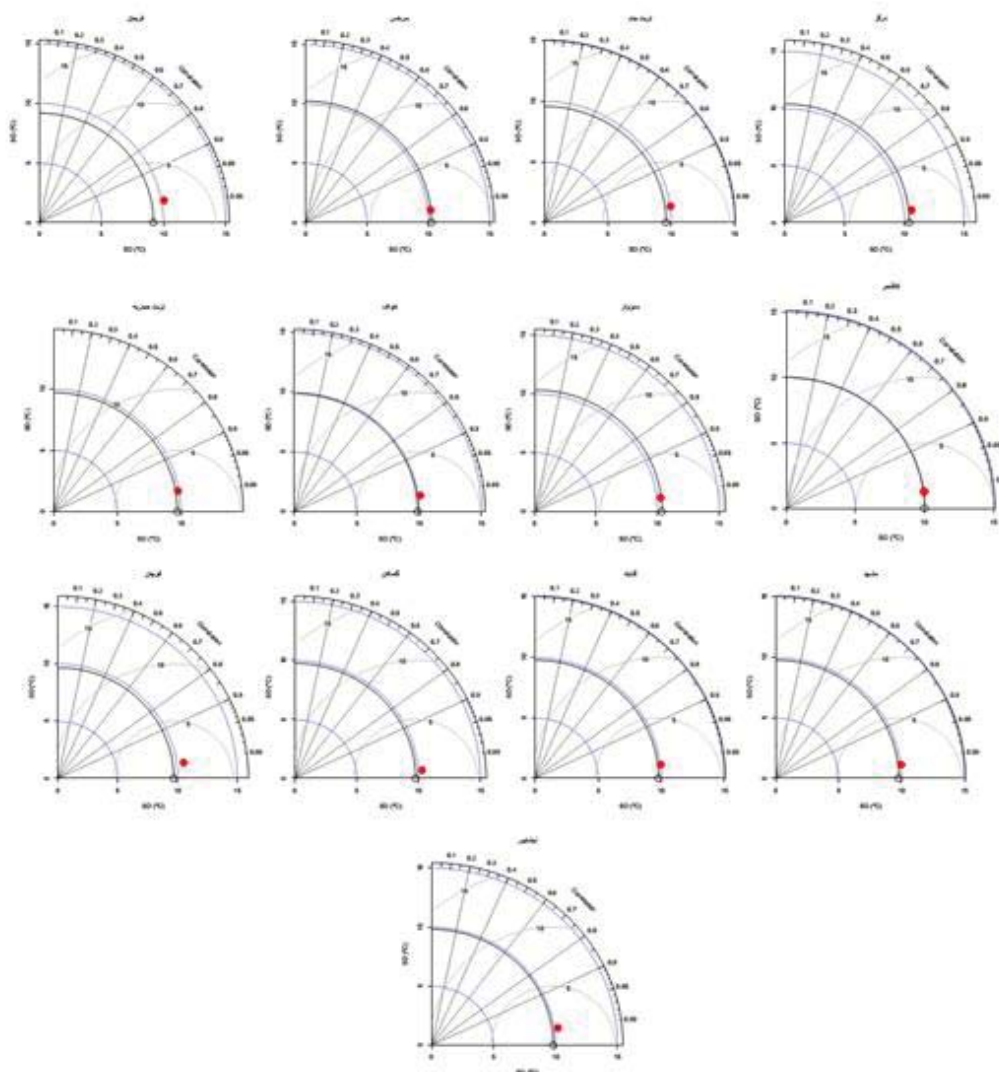
شکل ۳. مقایسه میانگین ماهیانه دمای کمینه داده‌های نقطه‌ای (ایستگاه‌های هم‌دیدگی خراسان رضوی) با شبکه‌ای CRU

سری داده‌های ماهیانه دمای بیشینه در هر ایستگاه (دایره توخالی) با مقادیر دمای میانگین ماهیانه به دست آمده از نقطه شبکه CRU هر ایستگاه (دایره توپر) مقایسه صورت گرفت. براساس این نمودار، در تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی، مقادیر میانگین ماهیانه دمای بیشینه دو سری مشاهداتی و CRU شدت همبستگی بیش از ۰.۹۹ دارند. مقدار RMSE برای این ایستگاه‌ها بین ۱-۲°C به دست آمد. نتایج ضعیف ارزیابی این متغیر متعلق به ایستگاه‌های فریمان و قوچان است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، به‌رغم شدت

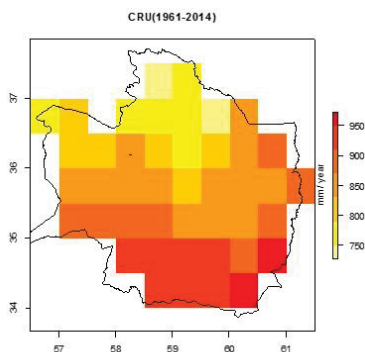
ایستگاه‌ها، مقدار ضریب همبستگی دو سری داده بیش از ۰.۹۹ شده است. مقادیر انحراف معیار دو سری داده نیز با هم برابرند و مقدار RMSE بین ۱-۱.۵°C است. در ایستگاه‌های فریمان، قوچان، گل‌مکان و نیشابور، مقدار انحراف معیار برآوردی برای داده‌های شبکه‌ای CRU بیش از مقادیر مشاهداتی و در ایستگاه خواف، کمتر از انحراف معیار داده‌های نقطه‌ای به دست آمد.

۳-۲- دمای بیشینه

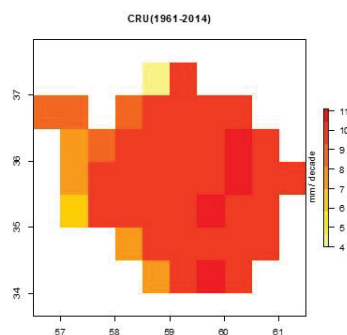
همانند دمای کمینه و با استفاده از نمودار تیلور، بین دو



شکل ۴. مقایسه میانگین ماهانه دمای بیشینه روزانه نقطه‌ای (ایستگاه‌های هم‌دید خراسان رضوی) با شبکه‌ای CRU



شکل ۵. توزیع مکانی تبخیر-تعرق مرجع سالیانه، طی دوره ۲۰۱۴-۱۹۶۱



شکل ۶. توزیع مکانی مقدار شیب خط رگرسیونی تبخیر-تعرق سالیانه، طی دوره ۲۰۱۴-۱۹۶۱

به‌منظور بررسی معناداری روند متغیر طی دوره مورد بررسی، آزمون کمترین مربعات خطا انجام گرفت. نتایج نشان داد شیب خط اختلاف معناداری با صفر دارد؛ بنابراین، روند (افزایشی) در سری داده‌ها تأیید می‌شود. به‌منظور برآورد مقدار شیب روند در روش من-کندال، از روش سن-تیل استفاده شد. در شکل ۷، توزیع مکانی مقدار شیب به روش من-کندال نشان داده شده است. مطابق شکل، مقدار شیب به‌دست‌آمده در دامنه از ۷.۵ تا ۱۶ میلی‌متر بر سال قرار دارد. در این روش، مقدار این شیب در قسمت مرکزی و شمالی بیش از ناحیه شرقی استان است. در این روش، در مقایسه با روش رگرسیون خطی، مقدار شیب خط روند

همبستگی بالا بین دو سری داده، که پیروی دما در دو سری داده را از الگوی زمانی مشابه نشان می‌دهد، در این دو ایستگاه، مقادیر SD بیش از انحراف معیار داده‌های مشاهداتی است. تفاوت مقادیر SD دمای درون‌یابی‌شده در نقاط شبکه CRU TS3.23 با مقادیر مشاهداتی ایستگاهی بیش از ۱ C به‌دست آمد.

۳-۳- توزیع مکانی تبخیر-تعرق مرجع سالیانه طی دوره پایه

با استفاده از لایه‌های اطلاعاتی میانگین ماهیانه دمای کمینه و بیشینه روزانه CRU و میانگین ماهیانه مقدار تشعشع خورشیدی، با کدنویسی در نرم‌افزار R، با استفاده از رابطه (۱)، مقدار تبخیر-تعرق مرجع ماهیانه طی دوره مذکور محاسبه شد.

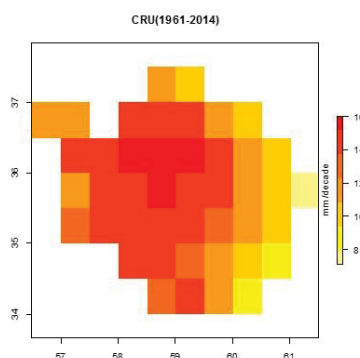
در ادامه، مقادیر این متغیر در مقیاس سالیانه، برای نقاط شبکه CRU، محاسبه شد. در شکل ۵، توزیع مکانی میانگین سالیانه این متغیر، طی دوره مورد بررسی، آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دامنه این متغیر در محدوده خراسان رضوی از ۷۲۰ تا ۹۸۰ میلی‌متر در سال است. در توزیع مقدار ETo شیب مکانی از جنوب به شمال وجود دارد و با افزایش عرض جغرافیایی، از میزان این متغیر کاسته می‌شود.

به‌منظور بررسی روند این متغیر طی دوره مذکور، از آزمون من-کندال و کمترین مربعات خطا استفاده شد و معناداری هر دو آزمون، در هر نقطه شبکه، برای مقادیر سالیانه متغیر به‌دست آمد. براساس محاسبات انجام‌شده و طبق آزمون من-کندال، برای تمامی نقاط شبکه پوشش‌دهنده این استان، روند این متغیر معنادار (در سطح $\alpha=0.05$) و افزایشی است. مقدار شیب خط رگرسیونی برازش‌یافته بر مقادیر سالیانه این متغیر طی دوره مورد بررسی در شکل ۶ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، طی این دوره، بیشتر مناطق استان شاهد روند افزایشی معنادار، به‌میزان ۱۰ تا ۱۱ میلی‌متر بر دهه، بوده‌اند.

بیشتر برآورد شده است.

مندرج در جدول ۲، استفاده شد. با توجه به اینکه دوره تاریخی سری مدل‌های اقلیمی CMIP5 از ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۵ و داده‌های مشاهداتی از ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۵ را دربر می‌گیرد، مقادیر میانگین ماهیانه دمای کمینه و بیشینه و تبخیر- تعرق مرجع برای دوره ۱۹۶۱-۲۰۰۵ استخراج و مقدار سالیانه متغیرهای مذکور، برای هر چهار مدل، به دست آمد تا توانمندی مدل‌های اقلیمی مقایسه و ارزیابی شود.

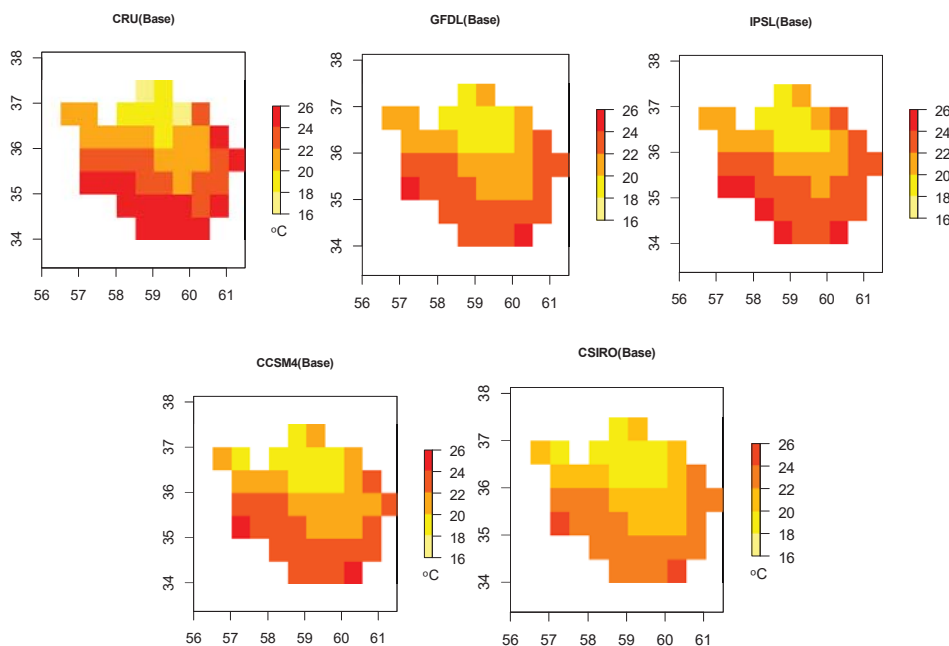
در ادامه این بخش، میزان مهارت چهار مدل اقلیمی در شبیه‌سازی مقدار و الگوی پراکنش مکانی سه متغیر بررسی و سپس، پیش‌نگری‌های انجام‌شده مطرح می‌شود.



شکل ۷. مقدار شیب برآوردشده به‌روش سن-تیل، طی دوره ۱۹۶۱-۲۰۱۴

۳-۴-۱- ضعف و قدرت مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی میانگین ماهیانه دما، طی دوره ۱۹۶۱-۲۰۰۵ به‌منظور بررسی توانمندی مدل‌های به‌کاررفته در بیان سناریوهای تغییر اقلیم، مقادیر ماهیانه دمای کمینه و بیشینه از برون‌داد مدل‌های اقلیمی، برای دوره پایه، استخراج و نقشه‌های مورد نظر ترسیم شد (شکل ۸).

۳-۴-۲- پیش‌نگری تغییرات میانگین دمای کمینه، بیشینه و تبخیر- تعرق مرجع طی دوره‌های آتی به‌منظور پیش‌نگری تغییرات سه متغیر میانگین دمای کمینه، دمای بیشینه و تبخیر- تعرق طی دوره‌های آتی و طرح سناریوهای اقلیمی این متغیرها، از برون‌داد چهار مدل اقلیمی آرشیو در CMIP5، با مشخصات

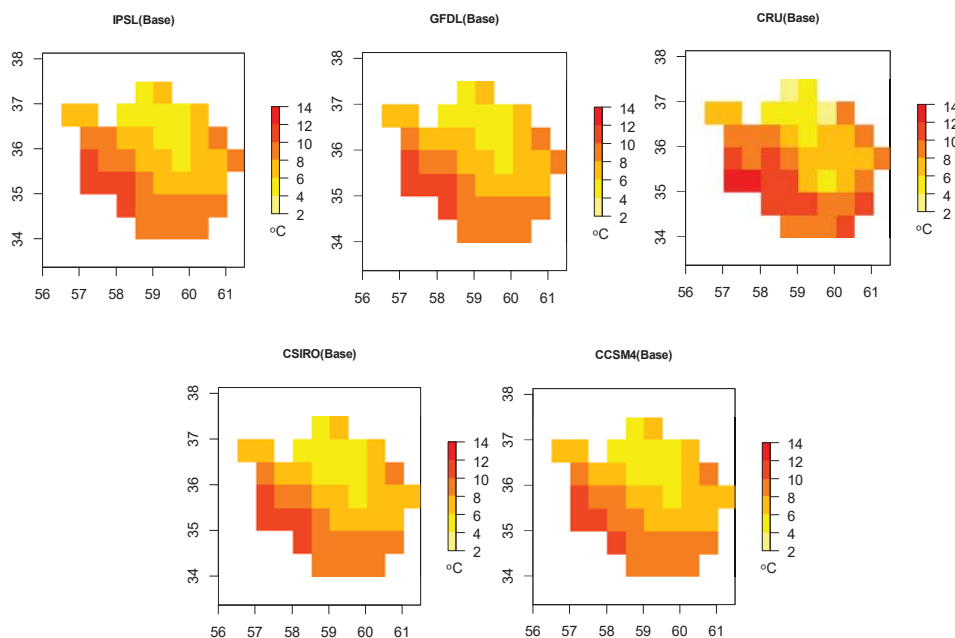


شکل ۸. مقدار و پراکنش مکانی میانگین سالیانه دمای بیشینه براساس مقادیر مشاهداتی و چهار مدل اقلیمی

بیشینه، مقدار تبخیر-تعرق ماهیانه به‌روش هارگریوز-سامانی و برای دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۶۱) محاسبه شد و مقدار میانگین سالیانه این متغیر به‌دست آمد. طبق شکل ۱۰، هر چهار مدل دامنه تغییرات ETo را اندک برآورد کرده‌اند (دامنه ۷۵۰ تا ۹۵۰ میلی‌متر بر سال). باین‌حال، در هر چهار مدل، تغییرات مکانی از الگوی مشابهی پیروی می‌کند و بیشترین مقدار میانگین سالیانه تبخیر-تعرق، طی دوره مورد بررسی، در جنوب استان به‌دست آمد. این متغیر، همانند شکل ۵ (داده‌های مشاهداتی)، در چهار مدل نیز دارای شیب مکانی قوی است. بیشترین مقدار این متغیر در جنوب استان و کمترین آن در نوار شمالی استان حاصل شده است. با استفاده از معیارهای دقت، همچون ضریب همبستگی و RMSE، بین مقدار میانگین سالیانه تبخیر-تعرق محاسبه‌شده با داده‌های شبکه‌ای CRU، طی دوره ۱۹۶۱-۲۰۰۵ و چهار مدل اقلیمی، مقایسه‌ای انجام شد. آزمون معناداری ضریب همبستگی نشان داد، در

این متغیر در مقیاس سالیانه، براساس داده‌های مشاهداتی، دامنه‌ای از $17.1-25.7^{\circ}\text{C}$ را دربر می‌گیرد. دامنه این متغیر در مدل CCSM4 بین ۱۸.۸ تا ۲۴.۳، در مدل GFDL از ۱۸.۹ تا ۲۴.۵ و در IPSL بین ۱۹.۱ تا ۲۴.۷ درجه سلسیوس به‌دست آمد که نشان می‌دهد دامنه این متغیر، با استفاده از مدل‌های اقلیمی، کم برآورد می‌شود. براساس نقشه ۸، این متغیر دارای شیب مکانی است و بیشترین مقادیر این متغیر در بخش جنوبی استان مشاهده می‌شود. توزیع مکانی دمای برآوردشده با استفاده از چهار مدل نیز با مقادیر داده‌های مشاهداتی هم‌خوانی مناسبی دارد. در شکل ۹، مقایسه بین مقادیر سالیانه دمای کمینه مشاهداتی و مدل‌های اقلیمی نشان داده شده است. درمورد این متغیر نیز، دامنه دما در مدل‌های اقلیمی کمتر از مقادیر مشاهداتی بود.

در ادامه و با توجه به توانمندی مطلوب مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی میانگین سالیانه دمای کمینه و

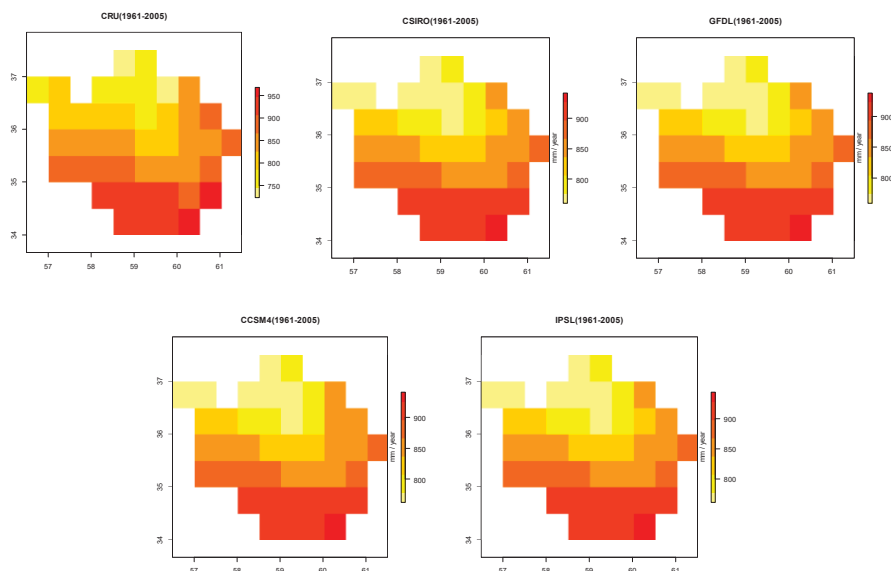


شکل ۹. پراکنش مکانی میانگین سالیانه دمای کمینه براساس مقادیر مشاهداتی و چهار مدل اقلیمی

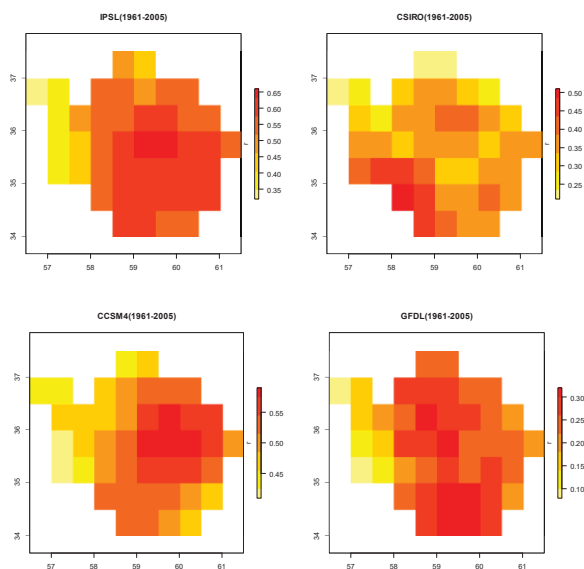
منصوره کوهی و همکاران

در دو مدل IPSL و GFDL مشابه است. این درحالی است که، در مدل CSIRO، بیشترین مقدار همبستگی در جنوب غرب استان به دست آمده است. در مدل CCSM4، مناطق مرکز و شمال شرق استان بیشترین مقدار ضریب همبستگی را بین دو سری زمانی مورد بررسی دارند.

هر چهار مدل، این ضریب در سطح $\alpha=0.05$ معنادار است. همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، بیشترین مقدار ضریب همبستگی بین مقدار تبخیر-تعرق محاسبه شده با داده های شبکه ای CRU با استفاده از مدل IPSL به دست آمده است (در بخش مرکزی و شرقی استان). پراکندگی مکانی این ضریب



شکل ۱۰. مقدار و توزیع مکانی تبخیر-تعرق مرجع طی دوره ۱۹۶۱-۲۰۰۵، براساس داده های شبکه بندی CRU و برون داد چهار مدل اقلیمی

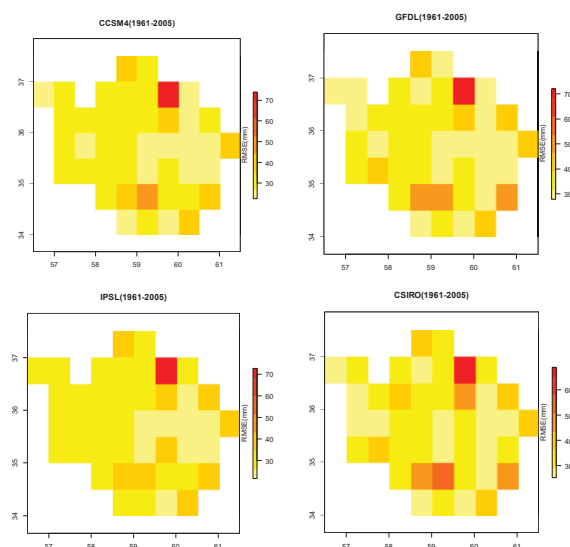


شکل ۱۱. مقدار ضریب همبستگی ساده بین میانگین سالانه تبخیر-تعرق محاسبه شده، با استفاده از داده های مشاهداتی و چهار مدل اقلیمی

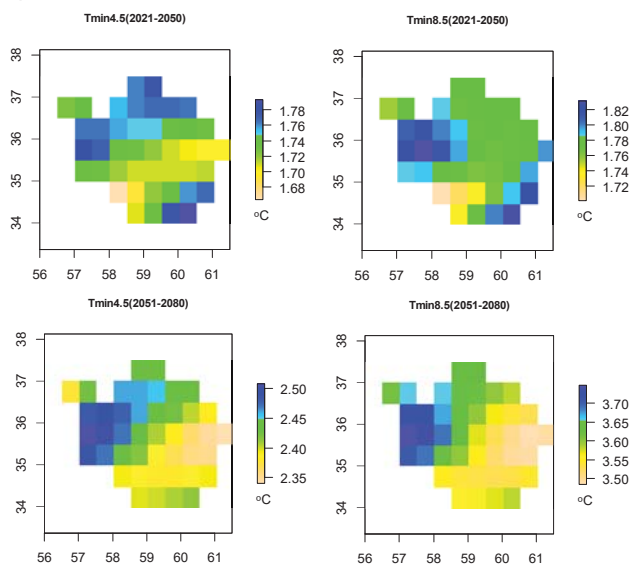
۲-۴-۳- پیش‌نگری‌های دما تحت سناریوهای واداشت تابشی

مقادیر میانگین سالیانه دمای کمینه و بیشینه چهار مدل منتخب، در دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۶۱) و دو دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و آینده میانی (۲۰۸۰-۲۰۵۱)، تحت دو سناریوی ۴.۵ و ۸.۵ استخراج شد و برای دو دوره آتی، میانگین چهار مدل به دست آمد. تفاوت مطلق مقادیر سالیانه دمای کمینه با دوره پایه، برای تمامی نقاط شبکه، محاسبه و نقشه پراکنش مکانی ترسیم شد (شکل ۱۳).

مقدار و پراکنش مکانی معیار RMSE محاسبه شده بین دو سری داده‌های شبکه‌ای CRU و چهار مدل اقلیمی برای نقاط شبکه ۰ نیز در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دامنه این متغیر، در چهار مدل، مشابه است و سه مدل GFDL، IPSL، و CCSM4 الگوی مکانی مشابهی دارند. براساس معیار RMSE، چهار مدل توانمندی بیشتری در شبیه‌سازی مقدار سالیانه این متغیر، در بخش مرکزی و غربی این استان دارند.



شکل ۱۲. مقدار RMSE میانگین سالیانه تبخیر- تعرق محاسبه شده، با استفاده از داده‌های مشاهداتی و چهار مدل اقلیمی



شکل ۱۳. تفاوت میانگین سالیانه دمای کمینه مدل‌های اقلیمی با دوره پایه طی دو دوره آتی، تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5

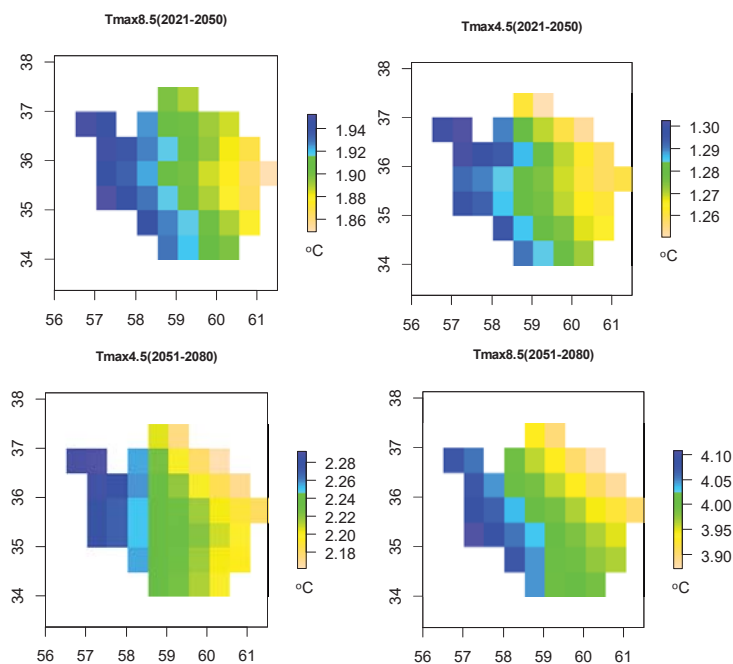
بیشترین افزایش در سناریوی واداشت تابشی ۸.۵ و در دوره میانی، حدود C ۴ برآورد شده است که در قسمت غربی استان رخ خواهد داد.

۳-۴-۳- سناریوهای تغییر اقلیم تبخیر- تعرق مرجع
 مقدار ETo ماهیانه با استفاده از دو متغیر دمای کمینه و بیشینه چهار مدل اقلیمی، محاسبه شد و مقادیر سالیانه این متغیر به دست آمد. درصد نرخ تغییر ETo، طی دو دوره آتی با استفاده از رابطه (۹) محاسبه شد (Wilby et al., 2001).

$$\Delta 2020s = \frac{(V_{2020s} - V_{base}) \times 100}{V_{base}} \quad \text{رابطه (۹)}$$

در این رابطه، V_{base} مقدار میانگین متغیر مورد نظر (در اینجا، تبخیر- تعرق) در دوره پایه و V_{2020} نشان دهنده مقدار این متغیر برای دوره ۲۰۲۰ (۲۰۲۱-۲۰۵۰) است.

همان طور که مشاهده می شود، در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱، احتمالاً دمای کمینه در کل استان افزایشی بیش از C ۱.۶ خواهد داشت. اگرچه مقدار تفاوت متغیر با دوره پایه تحت دو سناریوی مشابه برآورد شده است؛ در RCP8.5، مساحت بیشتری از استان شاهد افزایش میانگین سالیانه این متغیر خواهد بود. در دوره میانی، اگرچه الگوی مکانی مقادیر تفاوت با دوره پایه مشابه است؛ مقدار افزایش برآورد شده، تحت سناریوی RCP8.5، بیش از C ۱ از سناریوی مقابل بیشتر است. بنابراین، تحت سناریوی مذکور (که منطبق بر شرایط فعلی و سناریوی رایج است)، احتمالاً طی دوره ۲۰۵۱-۲۰۸۰، این استان با افزایش بیش از C ۳ در میانگین سالیانه دمای کمینه مواجه خواهد شد. در شکل ۱۴، تفاوت مقادیر میانگین سالیانه دمای بیشینه با دوره پایه نشان داده شده است. مشاهده می شود که میانگین سالیانه دمای بیشینه چهار مدل، تحت دو سناریو و در دو دوره، افزایش خواهد یافت.

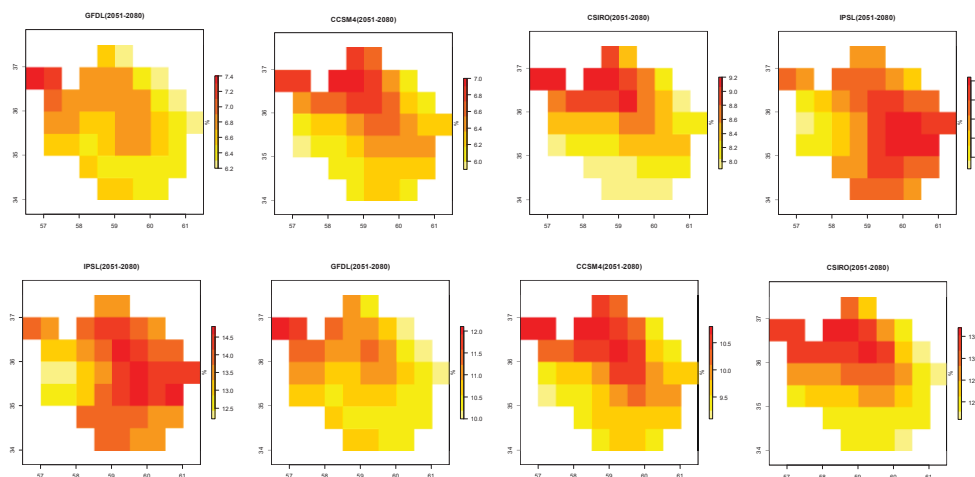


شکل ۱۴. تفاوت میانگین سالیانه دمای بیشینه مدل های اقلیمی با دوره پایه طی دو دوره آتی، تحت دو سناریوی RCP8.5 و RCP4.5

آزمون مقایسه میانگین t نشان داد میانگین دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱)، تحت دو سناریوی مورد بررسی در چهار مدل، با دوره پایه تفاوت معناداری دارد و از آن بزرگتر است و تحت سناریوی RCP4.5، در چهار مدل، درصد افزایش این متغیر کمتر از سناریوی مقابل است. در شکل ۱۵، پراکندگی مکانی معیار درصد نرخ تغییر محاسبه شده برای چهار مدل، تحت دو سناریوی RCP4.5 (بالا) و RCP8.5 (پایین)، برای دوره ۲۰۵۱-۲۰۸۰ آورده شده است. بیشترین درصد افزایش این دوره، در مقایسه با دوره پایه، با استفاده از دو مدل IPSL و CSIRO پیش‌بینی شده است. مطابق این شکل، می‌توان هم‌خوانی الگوی مکانی تبخیر- تعرق مرجع را، در دوره مورد نظر، بررسی کرد: تحت سناریوی ۴.۵، در دو مدل CCSM4 و CSIRO، الگوی مکانی مشابه است و بیشترین درصد افزایش در شمال غرب و مرکز استان پیش‌بینی شده است. تحت سناریوی واداشت تابشی ۸.۵، به‌غیر از مدل IPSL، الگوی مکانی سه مدل مشابه‌اند.

در انتها نیز، روند زمانی این متغیر طی دوره ۲۱۰۰-۱۹۶۱، در چهار مدل اقلیمی منتخب و تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5، با استفاده از آزمون

کمترین مربعات خطا، بررسی شد. براساس نتایج آزمون آماری مربوط، شیب خط برازش یافته بر این متغیر، در تمامی نقاط شبکه و در چهار مدل تحت دو سناریو، اختلاف معناداری با صفر دارد که می‌توان نتیجه گرفت، طی دوره آتی، این متغیر دارای روند صعودی معنادار خواهد بود. در نقاط شبکه در دو مدل GFDL و CCSM4، مقدار شیب دارای کمترین مقادیر است و توزیع مکانی این متغیر، تحت این سناریو در این دو مدل، از الگوی مکانی مشابهی پیروی می‌کند. در الگوی مورد نظر، مقدار شیب خط از سمت جنوب شرق به سمت شمال غرب کاهش می‌یابد. براساس محاسبات انجام شده، تحت سناریوی واداشت تابشی ۴.۵، مدل IPSL بیشترین مقدار شیب را در نقاط شبکه نشان داد. از نظر توزیع مکانی، در این مدل، تقریباً تمامی نقاط شبکه دارای شیب بین ۹.۵ تا ۱۰.۵ میلی‌متر بر دهه خواهند بود. تحت سناریوی ۸.۵، در چهار مدل، مقدار شیب افزایش نشان می‌دهد و مدل CSIRO بیشترین مقادیر شیب را، برای این متغیر، نشان داد. در این مدل، مساحت بیشتری از استان دارای مقادیر شیب بالا (۱۳.۵ تا ۱۴.۵ میلی‌متر بر دهه) به دست آمد. در چهار مدل، الگوی مکانی مقادیر شیب مشابه بود (شکل‌های مورد اشاره آورده نشده است).



شکل ۱۵. درصد افزایش تبخیر- تعرق مرجع سالیانه در دوره ۲۰۵۱-۲۰۸۰ در مقایسه با دوره پایه

۴- نتیجه‌گیری

و ۸.۵ ارائه شد. نتایج نشان داد که طی دوره پایه، به‌رغم تفاوت در مقدار، نحوه پراکنش و الگوی مکانی، مقادیر این متغیر در مدل‌های مورد بررسی با توزیع مکانی مقادیر مشاهداتی هم‌خوانی مناسبی دارد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، طی دو دوره آبی، این دو متغیر افزایش خواهد یافت و همان‌طور که انتظار می‌رود، تحت سناریوی RCP8.5، درصد افزایش بیش از سناریوی مقابل است (Ahmadi & Baaghdeh, 2018). طبق شرایط پیش‌نگری‌شده، نیاز آبی در منطقه مورد بررسی افزایش خواهد یافت که این امر منجر به تشدید کمبود آب در این استان (که در حال حاضر نیز با تنش‌های ناشی از کمبود آب روبه‌روست) خواهد شد. در نتایج این پژوهش، عدم قطعیت‌هایی وجود دارد. مهم‌ترین عدم قطعیت در پیش‌نگری‌های اقلیمی و ارزیابی آثار آن، ناشی از کاربرد مدل‌های اقلیمی و به‌علت ساختار این مدل‌هاست. به‌منظور کاهش عدم قطعیت، در این مقاله، از برون‌داد چهار مدل اقلیمی و تحت دو سناریوی متفاوت (شدید و متوسط) استفاده شده است. یکی دیگر از علل افزایش عدم قطعیت در نتایج به‌دست‌آمده استفاده از روش ریزگردانی آماری است. در این پژوهش، از روش تصحیح اریبی بهره گرفته شد.

۵- سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از نتایج طرح پژوهشی با عنوان «بررسی مشخصات زمانی تبخیر- تعرق پتانسیل طی دوره ۲۰۱۴-۱۹۶۱ و پیش‌بینی تغییرات آن طی دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۱ در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی» بوده که با حمایت معاونت پژوهشی مجتمع آموزش عالی کشاورزی و دامپروری تربت‌جام انجام شده است. بدین طریق، از حمایت مالی این مجتمع تقدیر و تشکر می‌شود.

۶- منابع

بابائیان، ا.، کوهی، م.، ۱۳۹۱، **ارزیابی شاخص‌های اقلیم کشاورزی تحت سناریوهای تغییر اقلیم**

هدف این پژوهش بررسی نوسانات مکانی و روند زمانی میانگین دمای بیشینه، کمینه و ETo، طی دوره پایه ۲۰۱۴-۱۹۶۱، و ارائه پیش‌نگری از میزان تغییرات این متغیر طی دوره‌های آبی، تحت دو سناریوی واداشت تابشی، در استان خراسان رضوی بوده است. همانند مطالعات مشابه (حسینی و همکاران، ۱۳۹۶؛ عینی و همکاران، ۱۳۹۷؛ Shi et al., 2017; Wang et al., 2006; Zhao & Fu, 2017)، در این پژوهش نیز از داده‌های شبکه‌بندی ماهیانه ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) واحد تحقیقات اقلیمی (CRU) استفاده شد. نتایج ارزیابی داده‌های میانگین دمای کمینه و بیشینه این پایگاه داده، در مقایسه با داده‌های ایستگاهی، نشان داد داده‌های شبکه‌ای CRU هم‌خوانی مناسبی با مقادیر ایستگاهی دارند. مقدار تبخیر- تعرق مرجع، با استفاده از روش هارگریوز- سامانی (با توجه به نیاز داده‌های محدود)، برای تمامی نقاط شبکه CRU محاسبه شد. توزیع مکانی این متغیر در محدوده خراسان رضوی نشان داد مقدار سالیانه این متغیر، از سمت شمال به جنوب، افزایش می‌یابد. بررسی روند زمانی این متغیر، با استفاده از دو روش کمترین مربعات خطا و من- کندال، نشان از روند معنادار افزایشی در مقدار سالیانه این متغیر، طی دوره پایه، در تمامی نقاط شبکه داشت که با نتایج به‌دست‌آمده با پژوهش سبزی‌پرور (۱۳۹۰) هم‌خوانی دارد. این پژوهشگران روند این متغیر را در ایستگاه‌های مشهد و سبزوار، در مقیاس سالیانه، افزایشی و مقدار شیب را برای مشهد، طی دوره ۲۰۰۵-۱۹۶۵، ۷.۵ میلی‌متر بر دهه به‌دست آوردند. توانمندی چهار مدل اقلیمی سری CMIP5 در برآورد مقادیر میانگین سالیانه دمای کمینه و بیشینه و تبخیر- تعرق در تمامی نقاط شبکه، طی دوره پایه و با استفاده از معیارهای دقت، ارزیابی شد و در ادامه، پیش‌نگری‌ای از میزان تغییرات و پراکنش مکانی این سه متغیر، طی دو دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و آینده میانی (۲۰۸۰-۲۰۵۱)، تحت دو سناریوی واداشت تابشی ۴.۵

- Ahmadi, H., Baaghdeh, M., 2018, **Impacts of climate change on apple tree cultivation areas in Iran**, Climatic Change, 153, PP.91-103.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Dirks, R. & Smith, M., 1998, **Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements**, FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56. Rome, Italy, PP. 103-156.
- Doorenbos, J. & Pruitt, W.O., 1977, **Guidelines for Predicting Crop Water Requirements**, FAO Irrigation and Drainage Paper, 24.
- Elmahdi, A., Shahkarami, N., Morid, S. & Massah Bavani, A.R., 2009, **Assessing the Impact of AOGCMs Uncertainty on the Risk of Agricultural Water Demand Caused by Climate Change**, 18th World IMACS/ MODSIM Congress, Cairns, Australia, PP. 13-17.
- Giorgi, F., 1990, **Simulation of Regional Climate Using a Limited Area Model Nested in a General Circulation Model**, Journal of Climate, 3(9), PP. 941-963.
- Hargreaves, G.H. & Samani, Z.A., 1982, **Estimating Potential Evapotranspiration**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 108, PP. 225-230.
- Hessami, M., Gachon, P., Ouarda, T.B.M.J. & St-Hilaire A., 2008, **Automated Regression-based Statistical Downscaling Tool**, Environmental Modelling and Software, 23, PP. 813-834.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, **Climate Change 2007: The Physical Science Basis / Contribution of Working Group I to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, Cambridge, UK, New York, USA, PP. 24-57.
- در ایستگاه‌های منتخب خراسان رضوی، آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، دوره ۲۶، شماره ۴، صص. ۹۶۷-۹۵۳.
- حسینی موغاری، م.، عراقی‌نژاد، ش.، ابراهیمی، ک.، ۱۳۹۶، بررسی دقت اطلاعات بارش شبکه‌بندی‌شده جهانی در حوضه دریاچه ارومیه، تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۸، شماره ۳، صص. ۵۸۷-۵۹۸.
- زارع ایبانه، ح.، افروزی، ع.، میرزائی، م.، باقری، ح.، ۱۳۹۴، پیش‌بینی تبخیر-تعرق مرجع ماهانه با استفاده از مدل سری‌های زمانی، آب و خاک، جلد ۳۰، شماره ۱، صص. ۹۹-۱۱۱.
- سبزی پرور، ع.ا.، شادمانی، م.، ۱۳۹۰، تحلیل روند تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از آزمون من-کندال و اسپیرمن در مناطق خشک ایران، دانش آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۴، صص. ۸۲۳ تا ۸۳۴.
- سیاری، ن.، علیزاده، ا.، بنایان اول، م.، فریدحسینی، ع.، حسامی کرمانی، م.، ۱۳۹۰، مقایسه دو مدل گردش عمومی جو (HadCM3, CGCM2) در پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی و نیاز آبی گیاهان تحت تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه کشف‌رود)، آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۴، صص. ۹۱۲-۹۲۵.
- طلاتیپه، ن.، بهمنش، ج.، منتظری، م.، ۱۳۹۲، پیش‌بینی تبخیر-تعرق پتانسیل با استفاده از مدل‌های سری زمانی (مطالعه موردی: ارومیه)، آب و خاک، جلد ۲۷، شماره ۱، صص. ۲۱۳-۲۲۳.
- عینی، م.ر.، جوادی، س.، دلاور، م.، ۱۳۹۷، ارزیابی عملکرد داده‌های بازتحلیل‌شده پایگاه‌های اقلیمی جهانی CRU و NCEP CFSR در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی مدل SWAT، مطالعه موردی: حوضه آبریز مهارلو، تحقیقات منابع آب ایران، دوره ۱۴، شماره ۱، صص. ۳۲-۴۴.

- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013, **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Meinshausen, N., Hare, W., Raper, S.C.B., Frieler, K., Knutti, R., Frame, D.J. & Allen, M.R., 2009, **Greenhouse-gas Emission Targets for Limiting Global Warming to 2 C**, Nature, 458, PP. 1158-1162.
- Novotny, E.V. & Stefan, H.G., 2007, **Stream Flow in Minnesota: Indicator of Climate Change**, Journal of Hydrology, 334, PP. 319-333.
- Reclamation, 2013, **Downscaled CMIP3 and CMIP5 Climate Projections: Release of Downscaled CMIP5 Climate Projections, Comparison with Preceding Information, and Summary of User Needs**, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, Colorado, 116 p., available at: http://gdo-dcp.ucllnl.org/downscaled_cmip_projections/techmemo/downscaled_climate.pdf.
- Semenov, M., 2008, **Simulation of Extreme Weather Events by a Stochastic Weather Generator**, Climate Research, 35, PP. 203-212.
- Semenov, M.A. & Brooks, R.J., 1999, **Spatial Interpolation of the LARS-WG Stochastic Weather Generator in Great Britain**, Climate Research, 11, PP. 137-148.
- Sen, P.K., 1968, **Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's tau**, Journal of the American Statistical Association, 63, PP.1379-1389.
- Shi, H., Li, T. & Wei, J., 2017, **Evaluation of the Gridded CRU TS Precipitation Dataset with the Point Rain Gauge Records over the Three-River Headwaters Region**, Journal of Hydrology, 548, PP. 322-332.
- Taylor, K.E., 2001, **Summarizing Multiple Aspects of Model Performance in a Single Diagram**, Journal of Geophysical Research, 106, PP. 7183-7192.
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J. & Meehl, G.A., 2012, **An Overview of CMIP5 and the Experiment Design**, Bulletin of the American Meteorological Society, 93, PP. 485-498.
- Theil, H., 1950, **A Rank-invariant Method of Linear and Polynomial Regression Analysis**, I. Nederlands Akad, Wetensch. Proc. 53, PP. 386-392.
- Thornthwaite, C.W., 1948, **An Approach Toward a Rational Classification of Climate**, Geographical Review, 38, PP. 55-94.
- Wang, Z., Xie, P., Lai, C., Chen, X., Wu, X., Zeng, Z. & Li, Z., 2017, **Spatiotemporal Variability of Reference Evapotranspiration and Contributing Climatic Factors in China During 1961-2013**, Journal of Hydrology, 544, PP. 97-108.
- Wilby, R.L., Dawson, C.W. & Barrow, E.M., 2001, **A Decision Support Tool for the Assessment of Regional Climate Change Impacts**, Journal of Environmental Modeling and Software, 17, PP. 147-159.
- Zhao, T. & Fu, C., 2006, **Comparison of Products from ERA40, NCEP-2, and CRU with Station Data for Summer Precipitation over China**, Advances in Atmospheric Sciences, 23, PP. 593-604.