



## Evaluation and Simulation of Agricultural Crops Water Footprint in Different Climates of Iran Considering Climate Change Scenarios

Kh. Ghorbani<sup>1</sup>, T. Aligholinia<sup>2\*</sup>, H. Rezaie<sup>3</sup>, and  
G. Ghorbani Nasrabad<sup>3</sup>

### Abstract

Climate change is one of the most important environmental challenges that has a significant impact on fundamental resources, including water resources and so it is necessary to assess this phenomenon and predict its impact on the environment, environmental resources, agriculture and water resources. In this study, climatic parameters were simulated for six different climates of Iran using the general ocean circulation model GFDL-CM3 under two commonly used scenarios RCP4.5 and RCP8.5 and in two time periods of 2021-2040 and 2041-2060. Then results were used to predict the water footprint of agricultural crops for its two components; blue water and green water footprints. For this aim, 31 stations from all over Iran were selected and classified into six climate classes using the UNESCO classification and their 30-year meteorological statistics data were given as the input to the LARS-WG model. With the production of 200 series of data, meteorological data were generated over the desired time periods. The results showed that during future periods the temperature in the study areas will increase from 0.5 °C to 2.03 °C and rainfall changes will increase from -16 mm to 100.2 mm. This will cause changes in green and blue water footprints in different climates of Iran from -13.44% to 37.53% in green water footprint and -18.77% to 38.20% in blue water footprint. Among the studied climates, the SA-K-W and PH-C-W climates will have the largest reduction in green water footprint and the highest increase in blue water footprint, and will be most affected by climate change and its consequences.

**Keywords:** UNESCO Climate, Blue Water, Green Water, Climate Change, Water Footprint, LARS-WG.

Received: March 31, 2020

Accepted: July 22, 2020

## ارزیابی و شبیه‌سازی ردپای آب محصولات کشاورزی در اقلیم‌های مختلف ایران با لحاظ سناریوهای تغییر اقلیم

خلیل قربانی<sup>۱</sup>، توحید علیقلی‌نیا<sup>۲\*</sup>، حسین رضایی<sup>۳</sup>  
و قربان قربانی نصرآباد<sup>۴</sup>

### چکیده

پدیده تغییر اقلیم یکی از مهمترین چالش‌های زیست محیطی است که بر روی منابع پایه از جمله منابع آب تأثیرات بسزایی دارد، لذا ارزیابی این پدیده و پیش‌بینی تأثیر آن بر محیط زیست، منابع زیست محیطی، کشاورزی و منابع آبی، امری لازم و ضروری است. در این تحقیق، به شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی با مدل گردش عمومی جوی اقیانوسی GFDL-CM3 تحت دو سناریوی پرکاربرد RCP4.5 و RCP8.5 در دو دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۲۱ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱ در شش اقلیم مختلف ایران پرداخته شده و با استفاده از نتایج آن، محاسبات پیش‌بینی ردپای آب محصولات کشاورزی در دو جزء ردپای آب آبی و آب سبز انجام گردید. برای این منظور ابتدا ۳۱ ایستگاه از سطح کل ایران انتخاب و با اقلیم‌بندی یونسکو در شش کلاس اقلیمی طبقه‌بندی گردیدند و سپس داده‌های ۳۰ ساله آماری هواشناسی آنها وارد مدل ریزمقیاس‌کننده LARS-WG گردیده و با تولید ۲۰۰ سری داده به تولید داده‌های هواشناسی در دوره‌های زمانی مورد نظر پرداخته شد. نتایج نشان داد که در طی دوره‌های آتی دما در بین مناطق مورد مطالعه از ۰/۵ درجه تا ۲/۰۳ درجه افزایش پیدا می‌کند و تغییرات بارندگی نیز از ۱۶- میلی‌متر کاهش تا ۱۰۰/۲ میلی‌متر افزایش خواهد داشت و این سبب تغییرات ردپای آب سبز و آبی محصولات در اقلیم‌های مختلف ایران به ترتیب از ۱۳/۴۴- درصد تا ۳۷/۵۳ درصد در ردپای آب سبز و ۱۸/۷۷- درصد تا ۳۸/۲۰ درصد در ردپای آب آبی می‌گردد. در بین اقلیم‌های مورد بررسی نیز دو اقلیم SA-K-W (نیمه خشک سرد گرم) و PH-C-W (خیلی مرطوب خنک گرم) با بیشترین کاهش ردپای آب سبز و بیشترین افزایش ردپای آب آبی مواجه خواهند شد و بیشتر از سایر اقلیم‌ها تحت تأثیر تغییر اقلیم و عواقب ناشی از آن قرار خواهند گرفت.

**کلمات کلیدی:** اقلیم‌بندی یونسکو، آب آبی، آب سبز، تغییر اقلیم، ردپای آب، LARS-WG.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۵/۱

1- Associate Professor, Department of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural, Gorgan, Iran. Email: gorbani.khalil@yahoo.com

2- Ph.D. Student of Water engineering, Department of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural, Gorgan, Iran. Email: tohid323@yahoo.com

3- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. Email: h.rezaie@urmia.ac.ir

4- Assistant Professor, Cotton Research Institute of Iran, Agriculture Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Gorgan, Iran. Email: ghorbang@yahoo.com

\*- Corresponding Author

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

۲- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۴- استادیار مؤسسه تحقیقات پنبه کشور، سازمان تحقیقات آموزشی و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران.

\*- نویسنده مسئول  
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

et al., 2014; Berger and Finkbeiner, 2010; Bayart et al., 2010) و استاندارد بین‌المللی (ISO) (ISO, 2013) توسعه یافته است. محاسبات ردپای آب روشی مناسب برای ارزیابی آب مصرفی محصول و عملکرد آن و همچنین معیاری برای اندازه‌گیری بهره‌وری آب زراعی و تولید محصول می‌باشد (Morillo et al., 2015). شاخص ردپای آب در سال‌های اخیر به‌طور گسترده‌ای توسط متخصصان در نقاط مختلف دنیا مورد استفاده قرار گرفته و محققان بسیاری ردپای محصولات مختلفی نظیر گندم (Hoekstra and Chapagain, 2012), چای (Jefferies et al., 2007; Aligholnia et al., 2019), پنبه (Chico et al., 2012), برنج (Hoekstra and Chapagain, 2011), ذرت (Nana et al., 2013), انگور (Ene et al., 2013), سبزی‌زمینی (Herath et al., 2014; Rodriguez et al., 2014) و سیب‌زمینی (Rodriguez et al., 2014) پرداختند. با این حال مطالعات اندکی تاکنون به بررسی ردپای آب و تأثیر تغییر اقلیم در آن پرداخته‌اند که از آن جمله می‌توان به مطالعه Bocchiola et al. (2013) اشاره کرد که در آن به بررسی اثر تغییر اقلیم بر ردپای آب و عملکرد ذرت پرداختند. آنها در مطالعه خود از مدل CropSyst تحت سه سناریو بدون آبیاری، آبیاری دستی در زمان‌های ثابت و آبیاری اتوماتیک بر اساس نیاز آبی در بازه ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۰ استفاده نمودند. سپس به بررسی اثر تغییر اقلیم در دوره ۲۰۵۴-۲۰۴۵ با استفاده از ۴ مدل PCM, CCSM3, HadCM3 و ECHAM5 تحت سناریو A2 پرداختند. نتایج بیانگر افزایش دما و کاهش بارندگی در دوره‌های آتی می‌باشد که موجب کاهش عملکرد و افزایش ردپای آب به‌ویژه آب آبی به دلیل افزایش تبخیر و تعرق و نیاز آبی خواهد شد.

در ایران نیز با توجه به گستردگی تنوع اقلیمی و همچنین رواج کشاورزی در این مناطق و محدودیت منابع آب، بررسی ردپای آب محصولات کشاورزی در اقلیم‌های مختلف آن و ارزیابی تغییر اقلیم در شرایط‌های مختلف مکانی لازم‌الاجرا است. مطالعاتی که در زمینه تغییر اقلیم در ایران صورت گرفته است نشان می‌دهد که در دوره‌های آتی تغییر اقلیم رخ خواهد داد (Karimi et al., 2018). مسلماً تغییر در پارامترهای اقلیمی موجب بروز پیامدهایی در سیستم‌های زیست‌محیطی و کشاورزی گردیده و به طور مستقیم می‌تواند منابع آبی به‌خصوص آب‌های سطحی و زیر زمینی را تحت تأثیر قرار دهد. در این تحقیق با عنایت به این امر که تاکنون هیچ‌گونه مطالعه جامعی در زمینه بررسی تغییرات اقلیمی و تأثیر آن در ردپای آب محصولات کشاورزی صورت نگرفته است، ضمن بررسی این مهم در تمامی اقلیم‌های موجود در گستره ایران به ارزیابی شرایط تغییر اقلیم و ردپای دو جزء آب آبی و سبز در آنها پرداخته شده است.

آب و هوای جهان در حال تغییر است (Christensen, 2007; Parry et al., 2007; Shortle et al., 2009) و انتظار می‌رود که عواقب آن قابل توجه باشد (Holst et al., 2013). در این میان بخش‌های آب و کشاورزی حساس‌ترین بخش‌هایی هستند که تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی قرار می‌گیرند (IPCC, 2001; Tao et al., 2003; Piao et al., 2010). تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر روی بخش‌های اجتماعی-اقتصادی و به‌خصوص کشاورزی انجام شده است (Darwin et al., 1995; Rosenzweig and Hillel, 1998; Thomas et al., 2004; Risbey, 2008; Müller et al., 2011; Aaheim et al., 2012; Gosling, 2013). با این حال مطالعات مختلف نتایج متفاوتی را از اثرات تغییرات آب و هوایی (اقلیم) را در تولید محصولات کشاورزی نشان داده‌اند. برخی از مطالعات دریافته‌اند که افزایش درجه حرارت می‌تواند تأثیرات مثبتی بر روی محصولات کشاورزی به‌خصوص در کشورهای توسعه یافته مانند آمریکا (Mendelsohn and Dinar, 2003; Shortle et al., 2009; Deschenes and Greenstone, 2007) و آلمان (Lippert et al., 2009) داشته باشد. در حالی که برخی دیگر از مطالعات به این نتیجه رسیده‌اند که گرم شدن کره زمین می‌تواند به محصولات کشاورزی کشورهای در حال توسعه مانند آفریقا و آمریکای جنوبی آسیب برساند (Feres et al., 2008; Mendelsohn, 2009). بنابراین علیرغم پیشرفت‌های قابل توجهی که در علم و تکنولوژی صورت گرفته، آب و هوا نقش اساسی را در بهره‌وری تولید محصولات کشاورزی بازی می‌کند (Bocchiola et al., 2013). از طرف دیگر اقلیم یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار در میزان مصرف آب کشاورزی بوده که با تغییر در میزان آب مصرفی گیاهان نمادینه می‌شود. به‌عبارت دیگر با تغییر اقلیم مقدار بارش، تبخیر-تعرق و سایر متغیرهای مرتبط، الگوهای آبیاری مورد نیاز ( $IWR^1$ ) و کارایی مصرف آب ( $WUE^2$ ) تغییر یافته و در نتیجه مصرف آب تولیدات محصولات کشاورزی تغییر خواهد کرد (Komuscu et al., 1998; Silva et al., 2007). لذا ارزیابی اثر تغییر اقلیم در الگو و میزان مصرف آب آبیاری محصولات کشاورزی (آب سبز و آب آبی) در سال‌های آتی برای استفاده پایدار و حفاظت از منابع آب شیرین در دسترس ضروری به‌نظر می‌رسد (Morillo et al., 2015).

یکی از مهمترین ابزارها که اغلب برای اجرای چنین رویکردی مورد استفاده قرار می‌گیرد، رویکرد محاسباتی ردپای آب است. مفهوم ردپای آب برای اولین بار توسط هواکسترا (۲۰۰۳) معرفی گردید (Hoekstra, 2003). و اخیراً در شبکه ارزیابی چرخه زندگی (Mazzi

## ۲- مواد و روش‌ها

بر اساس مطالعات اقلیمی، تنوع آب و هوایی در ایران قابل توجه بوده و بر اساس اقلیم‌نمای یونسکو شش اقلیم با آب و هوای مختلف یعنی خیلی مرطوب خنک گرم (PH-C-W<sup>3</sup>)، نیمه‌خشک سرد گرم (SA-K-W<sup>4</sup>)، نیمه‌خشک خنک خیلی گرم (SA-C-VW<sup>5</sup>)، خشک خنک گرم (A-C-W<sup>6</sup>)، خشک معتدل گرم (A-M-W<sup>7</sup>) و خشک خنک خیلی گرم (A-C-VW<sup>8</sup>) را شامل می‌گردد (Zare Abyaneh et al., 2010). روش یونسکو یکی از روش‌های مورد استفاده در پهنه‌بندی اقلیمی است که پارامترهای اصلی مورد استفاده در آن رژیم رطوبتی (توضیحات پیوست الف)، تیپ زمستان (توضیحات پیوست ب) و تابستان (توضیحات پیوست ج) می‌باشد (UNESCO, 1979). رژیم رطوبتی بر مبنای شاخص خشکی با استفاده از لایه‌های رقوم بارندگی و پتانسیل تبخیر و تعرق، از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$AI = P(\text{mm/year}) / PET(\text{mm/year}) \quad (1)$$

که در آن P: بارندگی و PET: پتانسیل تبخیر و تعرق می‌باشد. رژیم رطوبتی نه تنها میزان آب قابل دسترس (بارندگی)، بلکه تقاضا برای آب (تبخیر و تعرق) را نیز مد نظر قرار می‌دهد که در مقایسه با سایر روش‌ها (برای مثال: دومارتن، گوسن و غیره) از یک امتیاز ویژه برخوردار است. تیپ زمستانه و تابستانه نیز به ترتیب بر اساس میانگین دمای سردترین و گرمترین ماه‌های سال تعیین می‌گردند. برای کسب اطلاعات بیشتر در خصوص روش یونسکو به (De Pauwe, 2000; FAO, 1974; UNESCO, 1979; Ghaffari et al., 2015) مراجعه گردد.

در این مطالعه ضمن اقلیم‌بندی تمامی استان‌های ایران در ۶ اقلیم ذکر شده، شاخص ردپای آب آبی و آب سبز در سرتاسر دشت‌های ایران با اقلیم‌های متفاوت و متنوع مورد بررسی قرار خواهد گرفت و سپس با ارزیابی سناریوهای تغییر اقلیم در دوره‌های آتی به بررسی تغییرات

ردپای آب محصولات در هر اقلیم به صورت جداگانه پرداخته خواهد شد. برای این منظور ۳۱ ایستگاه سینوپتیک در سرتاسر ایران به‌عنوان ایستگاه‌های هواشناسی مبنای استخراج داده‌های روزانه هواشناسی مورد نیاز مطالعه برای یک دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۱ الی ۲۰۱۰) انتخاب شده است و پس از بررسی آماری، مرتب‌سازی و آنالیز داده‌ها نسبت به مدل‌بندی و سناریوسازی و شبیه‌سازی آنها در دوره‌های آتی پرداخته شد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب و محدوده‌ی تحت پوشش آنها را نشان می‌دهد. ضمناً میانگین سالیانه پارامترهای مختلف هواشناسی (دما، بارندگی، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی) ایستگاه‌های انتخابی در جدول ۱ ارائه شده است. علاوه بر این؛ انتخاب محصولات زراعی مورد مطالعه برای محاسبه ردپای آب در هر اقلیم بر اساس سطح زیر کشت، طول دوره رشد و نیاز آبی متفاوت و داده‌های در دسترس انجام پذیرفته و شامل محصولات زراعی گندم، جو، برنج، لوبیا، پنبه، توتون، چغندرقتد، گوجه‌فرنگی، سیب‌زمینی، یونجه و ذرت علوفه‌ای می‌باشد.

## ۳- تغییر اقلیم و تولید سری زمانی پارامترهای هواشناسی برای سال‌های آتی

مدل‌های سه بعدی گردش عمومی GCM<sup>9</sup> که بر پایه قوانین فیزیکی استوار می‌باشند، از جمله ابزارهای تولید سناریوهای اقلیمی در دوره‌های آتی هستند (Bates et al., 1998). مدل‌های گردش عمومی جوی اقیانوسی بسختی می‌توانند مستقیماً برای پیش‌بینی‌های منطقه‌ای استفاده شوند، زیرا قادر به حفظ مشخصات آماری داده‌ها در سطح منطقه‌ای نبوده و نیازمند ریزمقیاس‌نمایی هستند (Burlando and Rosso, 2002; Groppelli et al., 2011). در این مطالعه از روش آماری جهت ریزمقیاس کردن خروجی مدل‌های GCM استفاده میشود. تاکنون دو رویکرد برای روشهای ریزمقیاس‌نمایی آماری ارائه شده است.

Table 1- Annual average of different meteorological parameters of the selected climates in the study area

جدول ۱- میانگین سالیانه پارامترهای مختلف هواشناسی اقلیم‌های منتخب در محدوده مطالعاتی

Climate	Sun hour (hr)	Wind speed (m/s)	Relative humidity (%)	Rainfall (mm)	Maximum temperature (°C)	Minimum temperature (°C)
SA-K-W	7.7	2.2	55.0	322.3	19.1	5.1
SA-C-VW	7.7	1.9	48.4	456.6	22.8	8.9
A-C-W	8.5	2.5	36.8	150.7	24.4	9.9
A-M-W	8.3	2.8	57.3	217.8	31.6	19.8
PH-C-W	5.0	1.6	80.0	1063.4	21.4	12.5
A-C-VW	8.6	2.4	36.0	103.7	26.3	11.2

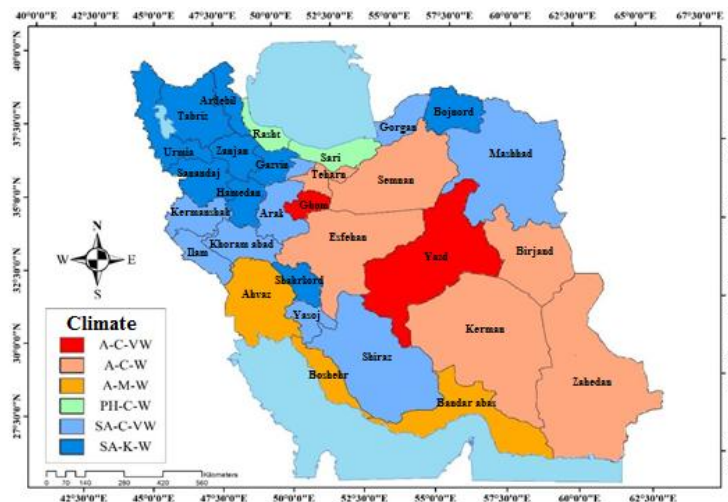


Fig. 1- Climatic division of Iranian Provinces in terms of UNESCO Climate Classification  
 شکل ۱- تقسیم‌بندی اقلیمی استان‌های ایران از نظر اقلیم‌بندی یونسکو (Zare Abyaneh et al., 2010)

رویکرد اول که بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد استفاده از مدل‌های رگرسیونی یا تابع انتقال است که در آن با استفاده از رابطه بین پارامترهای مختلف جوی و سینوپتیکی (متغیرهای پیش‌بینی‌کننده) و پارامتر اقلیمی که لازم است دورنمایی از آن در آینده داشته باشیم (متغیر پیش‌بینی شونده) یک تابع انتقال ارائه می‌شود.

رویکرد دوم استفاده از مولدهای تصادفی آب وهوایی است که بر اساس سری‌های فوریه ارائه می‌شود. یکی از روش‌هایی که بر اساس این رویکرد بنا شده است، مدل آماری  $LARS-WG^{10}$  است (Semenov and Barrow, 1997). این مدل تولیدکننده آب و هوای تصادفی است که برای شبیه‌سازی سری‌های زمانی دمای حداقل و حداکثر، بارش و تابش آفتابی در شرایط اقلیمی سابق و آینده به کار می‌رود. در این مدل از متغیرهای بزرگ مقیاس اتمسفری استفاده نمی‌شود و متغیرهای اقلیمی محلی به تناسب تنظیم می‌شود تا تغییر اقلیم را نشان دهند (Sajjad khan et al., 2006). این مدل از توزیع‌های نیمه تجربی برای طول دوره سری خشک و تر، بارش و دما استفاده می‌کند. سری‌های فوریه درجه حرارت را تخمین می‌زنند. درجه حرارت‌های کمینه و بیشینه روزانه بصورت فرآیندهای تصادفی با میانگین و انحراف معیارهایی که وابسته به وضعیت تر یا خشک بودن روز مورد نظر هستند مدل‌سازی می‌شوند.

برای مدل‌بندی و پیش‌بینی سری زمانی پارامترهای مختلف هواشناسی در ایستگاه‌های منتخب برای سال‌های آتی از جدیدترین نسخه این مدل (LARS-WG 6) استفاده شده است. بدین منظور داده‌های تاریخی ۳۰ ساله (۱۹۸۱ الی ۲۰۱۰) پارامترهای هواشناسی در ایستگاه‌های منتخب جمع‌آوری شده و کنترل کیفی روی آنها صورت گرفت. سپس مدل ریزمقیاس نمای آماری  $LARS\_WG$  برای شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی در دوره پایه و دوره آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گرفت. برای مدل  $LARS\_WG$  با توجه به آمار موجود دوره ۲۰۱۰-۱۹۸۱ به عنوان دوره پایه مورد انتخاب شد، پارامترهای اقلیمی مورد نیاز جهت اجرای مدل جمع‌آوری و مورد پردازش قرار گرفت. در مرحله واسنجی، مدل داده‌های دیده‌بانی شده دوره ۲۰۰۰-۱۹۸۱ را دریافت نموده که با بررسی آنها مشخصه آماری داده‌ها استخراج می‌شوند، سپس به منظور بررسی صحت‌سنجی و اطمینان از توانمندی مدل، مدل متناسب با داده‌های منطقه مطالعاتی بدون در نظر گرفتن سناریوهای انتشار اجرا شد. بدین صورت که در رویه Weather generator (قسمت تولید داده) در مدل  $LARS\_WG$  یک سناریو حالت پایه در دوره ۲۰۱۰-۲۰۰۱ تدوین و مدل برای این دوره اجرا گردید. ارزیابی عملکرد مدل نیز با آماره‌های آماری  $R$  و  $RMSE$  صورت گرفت (روابط ۲ و ۳).

$$R = \frac{\text{Cov}(O_i, E_i)}{\sqrt{\text{Var}(O_i)\text{Var}(E_i)}} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2} \quad (3)$$

مدل  $LARS-WG$  به دلیل سادگی، دسترس بودن و نتایج قابل قبول، بطور گسترده‌ای توسط محققین در نقاط مختلف دنیا برای تولید یا پیش‌بینی داده‌های هواشناسی در سال‌های آتی به‌ازای سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است.

که در آن‌ها،  $O_i$ : مقادیر مشاهداتی،  $E_i$ : مقادیر برآوردی،  $Cov(O_i, E_i)$  و  $Var(O_i, E_i)$  به ترتیب کوواریانس و واریانس بین داده‌های مشاهداتی و برآوردی می‌باشند.

بعد از کالیبره کردن و ارزیابی مدل، باید پارامترهای هواشناسی تولید شوند. در تحقیق حاضر به منظور برآورد داده‌های اقلیمی بارش، دما و ساعت آفتابی آینده از مدل گردش عمومی جوی اقیانوسی GFDL-CM3 تحت دو سناریو پرکاربرد خط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای RCP4.5 (که یک سناریوی ثابت با افزایش نیروی واداشت تابشی کل تا سال ۲۰۷۰ و با غلظت‌های پایدار بعد از سال ۲۰۷۰ می‌باشد) و RCP8.5 (به طور مداوم در حال افزایش نیروی واداشت تابشی تا انتهای قرن ۲۱ و تقریباً برابر با ۸/۵ وات بر مترمربع می‌باشد) استفاده شد و سپس سری‌های زمانی پارامترهای مختلف هواشناسی ایستگاه‌ها برای سال‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱ از مدل مذکور تولید شده است.

#### ۴- آب مصرفی گیاه و ردپای آب

از آنجایی که کشاورزی عمده‌ترین بخش مصرف‌کننده آب در دنیا شناخته می‌شود، لذا تولیدات کشاورزی اغلب دارای ردپای آب قابل توجهی هستند. شاخص ردپای آب به‌عنوان یک شاخص جامع نشان‌دهنده مجموع مقادیر آبی است که هم به‌صورت مستقیم (نیاز آبی گیاه) و هم به‌صورت غیرمستقیم برای تولید نهایی آن محصول مصرف می‌شود. بنابراین در بررسی ردپای آب یک محصول باید هر دو بخش مصرف مستقیم و غیرمستقیم مورد محاسبه قرار گیرند (Hoekstra, 2003). قدم اول در محاسبه نیاز آبی گیاهان، برآورد مقدار دقیق تبخیر-تعرق گیاه مرجع می‌باشد. محاسبه و پیش‌بینی مقدار دقیق تبخیر-تعرق روزانه و به‌تبع آن برآورد دقیق نیاز آبی گیاهان زمینه را برای طراحی مناسب تأسیسات آبیاری فراهم نموده و ضمن کاهش هزینه‌های اجرا، امکان ارائه برنامه‌ی مناسب و بهینه بهره‌برداری از منابع آب بخش آبیاری و کشاورزی را فراهم می‌کند. در این تحقیق به‌منظور محاسبه تبخیر-تعرق و نیاز آبی از نرم‌افزار CropWat 8.0 استفاده گردید. داده‌های میانگین ماهیانه هواشناسی شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعت آفتابی پارامترهای ورودی مدل مذکور هستند. برای مشخصات گیاهان و خاک نیز از مقادیر پیشنهادی فائو که به‌عنوان پیش‌فرض در مدل مذکور لحاظ شده، استفاده گردید. این نرم‌افزار با استفاده از معادله فائو-پنمن-مونتیث به محاسبه تبخیر-تعرق می‌پردازد. معادله مذکور بر اساس توازن انرژی روی یک سطح مرطوب پوشیده از گیاه ارائه

گردیده و به‌عنوان دقیق‌ترین و استانداردترین روش برای برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع معرفی گردیده است و انتخاب این مدل، به‌عنوان مدل استاندارد، براساس مطالعات ایرماک و همکارانش و همچنین رحیمی خوب بود که می‌تواند فرض منطقی باشد، زیرا در مدل پنمن-مانیتث از شش متغیر هواشناسی شامل: دما، تشعشع خورشیدی، ساعت‌های آفتابی، رطوبت نسبی و سرعت باد استفاده شده است (Irmak et al., 2002; Rahimi khoob, 2009).

بطور معمول رشد محصول و عملکرد آن تحت تأثیر تنش آبی است و این تأثیر بوسیله رابطه خطی زیر (رابطه ۴) بین عملکرد و تبخیر-تعرق محصول توسط دورنباس و کاسام (۱۹۷۹) مدل و پیشنهاد شده است. مدل مذکور با داشتن دقت قابل قبول در برآورد متوسط بلندمدتی از عملکرد محصول مورد توجه محققین زیادی در سراسر دنیا بوده و در مطالعات متعدد در نقاط مختلف دنیا و به طور مختص در نرم‌افزار اکوکرپ مورد استفاده قرار گرفته است (Nairizi and Rrydzewski, 1977; Doorenbos and Kassam, 1979; Raes et al., 2009; Amiri et al., 2018).

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \times \left(1 - \frac{\sum ET_a [t]}{\sum CWR [t]}\right) \quad (4)$$

که در آن  $K_y$ ، فاکتور پاسخ عملکرد (ضریب تنش آب)؛  $Y_a$ ، عملکرد واقعی محصول (ton.ha)؛  $Y_m$ ، عملکرد ماکزیمم (ton.ha)؛  $CWR$  نیاز آبی محصول در طول دوره رشد (mm) و  $ET_a$  تبخیر-تعرق محصول در طول دوره رشد (mm) می‌باشد که به صورت رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$ET_a = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (5)$$

که در آن،  $ET_a$ : تبخیر-تعرق مرجع (mm/day)،  $R_n$ : تابش خالص ورودی به سطح گیاه (MJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>)،  $G$ : شار گرمای خاک (MJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>)،  $T$ : میانگین روزانه دمای هوا (°C)،  $U_2$ : میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری (m/sec)،  $e_a$ : فشار بخار اشباع (KPa)،  $e_d$ : فشار بخار واقعی (KPa)،  $e_d - e_a$ : کمبود فشار بخار اشباع (KPa)،  $\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار اشباع (KPa/°C)،  $\gamma$ : ضریب ثابت سایکرومتری (KPa/°C)،  $900$ : ضریب برای گیاه مرجع (Kg °K / day) و  $0.34$ : ضریب باد برای گیاه مرجع (sec/m) می‌باشند.

در این تحقیق نیز، برای تعیین متوسط بلند مدت عملکرد محصولات زراعی در سال‌های آتی و تحت شرایط تغییر اقلیم از رابطه (۴) استفاده شده است. بدین منظور سری‌های زمانی تولید شده پارامترهای هواشناسی برای دوره‌های آماری (۲۰۴۰-۲۰۲۱ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱)

تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 جهت برآورد تبخیر- تعرق محصول و نیاز آبی محصولات مورد استفاده قرار گرفته و سپس براساس رابطه (۴) متوسط بلند مدت عملکرد محصولات زراعی مختلف در دوره‌های آبی مذکور محاسبه شده است.

به منظور محاسبه ردپای آب محصولات از رابطه (۶) استفاده گردید. ردپای آب (WF) محصولات کشاورزی متشکل از سه جزء آب آبی، آب سبز و آب خاکستری بوده و ردپای کل محصول تولید شده از روابط (۶) و (۷) برآورد می‌شود (Hoekstra, 2003):

$$WF = \sum_i w_{fi} \quad (6)$$

$$WFi = WFi_{blue} + WFi_{green} + WFi_{grey} \quad (7)$$

که در آن WF، ردپای کل محصولات تولیدی برحسب (m<sup>3</sup>. year)، w<sub>fi</sub> ردپای آب برای هر نوع از محصول، W<sub>fi</sub><sub>blue</sub> ردپای آب آبی برحسب (m<sup>3</sup>. year) که از منابع آب سطحی و زیرزمینی تأمین می‌شود، W<sub>fi</sub><sub>green</sub> ردپای آب سبز برحسب (m<sup>3</sup>. year) که نشان‌دهنده بخشی از تبخیر-تعرق گیاه که توسط بارندگی تأمین می‌شود یا میزان مصرف محصول از بارندگی می‌باشد و W<sub>fi</sub><sub>grey</sub> ردپای آب خاکستری برحسب (m<sup>3</sup>. year) به‌عنوان حجم آبی که برای جذب آلاینده‌های ناشی از کشاورزی (نیترژن و فسفر) از آب برگشتی به‌منظور ساختن آب شیرین و قابل استفاده می‌باشد و یا به عبارت دیگر میزان آبی که لازم است تا بتوان کیفیت آب‌های آلوده شده ناشی از کشاورزی را به سطح استاندارد و مطلوب رساند.

ردپای آب آبی محصولات تولیدی به آب آبیاری (I<sub>r</sub>) مرتبط بوده و از طریق نیاز آبیاری (m<sup>3</sup>.ha) در سطح زیر کشت واقعی (ha) در هر سال براساس روابط (۸) و (۹) محاسبه می‌شود. نیاز آبیاری با توجه به نوع محصول و بارندگی در طول سال متفاوت بوده و کاملاً مبتنی بر وضعیت واقعی محصولات کشاورزی می‌باشد.

$$WF_{blue} = 10 \times ET_{blue} \times A \quad (8)$$

$$ET_{blue} = \max \{0, E_{Tc} - P_e\} \quad (9)$$

که در این معادلات ET<sub>blue</sub>، تبخیر-تعرق آب آبی برحسب (mm) از طریق تبخیر-تعرق گیاه در طول دوره رشد، P<sub>e</sub>، بارش مؤثر برحسب (mm)، E<sub>Tc</sub>، تبخیر-تعرق گیاه مرجع در طول دوره رشد و A، سطح زیر کشت محصولات برحسب (ha) می‌باشد. عدد ۱۰ نیز به‌منظور تبدیل عمق آب در میلی‌متر به حجم آب در سطح زمین m<sup>3</sup>.ha می‌باشد.

آب سبز به حجم آبی اطلاق می‌شود که در مناطق غیراشباع خاک به‌صورت رطوبت خاک ذخیره می‌شود. این منبع آبی در مناطق دیم به‌صورت مؤثر صرف تعرق گیاهی می‌شود و یا از سطح خاک و آب‌های آزاد به‌صورت تبخیر از دسترس خارج می‌گردد. بنابراین ردپای آب سبز مطابق روابط (۱۰) و (۱۱) به بارندگی مؤثر و تعرق گیاه مرتبط بوده و با مدل CropWAT قابل محاسبه می‌باشد (Hoekstra, 2003):

$$WF_{green} = 10 \times ET_{green} \times A \quad (10)$$

$$ET_{green} = \min \{P_e, E_{Tc}\} \quad (11)$$

که در این معادلات ET<sub>green</sub>، تبخیر-تعرق آب سبز بر حسب (mm) از طریق تبخیر-تعرق گیاه در طول دوره رشد است. آب خاکستری مصرفی به‌صورت آب موردنیاز برای جذب آلودگی نیترژن و فسفر از کودهای شیمیایی با استفاده از رابطه (۱۲) ارزیابی می‌شود:

$$WF_{grey} = (\delta \times U_N \times 10^6) \cdot \rho_0 \quad (12)$$

که در آن U<sub>N</sub> میزان کود نیترژن به‌کار رفته برحسب (ton)، δ میزان آشوبی برآورد شده برای آب شیرین که بین ۵ الی ۱۵ درصد است و ρ<sub>0</sub> غلظت مجاز نیترات آب آشامیدنی است که از مقدار محدوده یا حد مجاز سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (10 mg L<sup>-1</sup>) استفاده شده است. از آنجایی که در این تحقیق، هدف ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم در ردپای آب مصرفی محصولات در اقلیم‌های مختلف می‌باشد، لذا صرفاً به بررسی دو جزء آب آبی و سبز در محاسبه ردپای آب کل در دوره‌های آبی پرداخته می‌شود.

## ۵- مراحل تحقیق

بطور خلاصه این مطالعه شامل سه مرحله اصلی شامل؛ کالیبره کردن مدل اقلیمی، تولید داده‌های هواشناسی دوره‌های آبی و برآورد نیاز آبی با تفکیک ردپای آب سبز و آب آبی محصول در هر کدام از ایستگاه‌های منتخب بوده شده است. بنابراین ابتدا با استفاده از سری‌های زمانی روزانه ۳۰ ساله (۲۰۱۰-۱۹۸۱)، پارامترهای هواشناسی هر ایستگاه منتخب (بارندگی، دمای حداقل و حداکثر و ساعت آفتابی) تعیین گردیده و سپس براساس پارامترهای مذکور مدل ریزمقیاس اقلیمی LARS-WG کالیبره گردیده است. سپس سری‌های زمانی روزانه پارامترهای هواشناسی برای دو دوره آبی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱ تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 در هر ایستگاه منتخب با استفاده از مدل اقلیمی کالیبره شده، تولید شده است. در مرحله آخر سری‌های زمانی روزانه پارامترهای هواشناسی جانشین یا تولیدی از مدل اقلیمی برای برآورد نیاز آبی محصولات مختلف و برآورد میزان آب سبز و آب آبی آن‌ها در محدوده تحت پوشش ایستگاه منتخب مورد استفاده قرار گرفته‌است.

## ۶- نتایج

مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، مدل دارای عملکرد قابل قبول در پیش‌بینی متغیرهای مورد بررسی می‌باشد. با این حال دقت مدل در اقلیم‌های مختلف متفاوت بوده و بهترین عملکرد مدل بر اساس آماره‌های RMSE و R در اقلیم‌های SA-K-W و A-C-W می‌باشد که این به دلیل نزدیک بودن ارقام پارامترهای هواشناسی و عدم تغییرات محسوس آنها در طول دوره بررسی می‌باشد.

جداول ۲ و ۳ به ترتیب میانگین مربعات خط و ضریب همبستگی برای داده‌های بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر و ساعت آفتابی ریزمقیاس شده توسط مدل LARS-WG را در طول دوره واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهند. چنانچه نتایج نشان می‌دهند، در هر دو

**Table 2- Performance indicators of LARS-WG model in the assessment period**

### جدول ۲- شاخص‌های عملکرد مدل LARS-WG در دوره واسنجی

Statistics	SA-K-W		SA-C-VW		A-C-W		A-M-W		PH-C-W		A-C-VW	
	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE
Min Tem	0.42	1.89	-0.43	1.34	-0.45	1.24	0.71	1.53	-1.10	1.58	-0.56	1.88
Max Tem	-0.10	1.39	-0.27	2.26	-0.59	1.90	0.27	1.29	-1.28	2.13	0.13	2.73
Rainfall	-0.12	7.49	0.27	14.03	0.20	12.47	0.40	16.90	0.44	39.80	-0.98	12.63
Sun hour	-0.36	6.48	0.37	6.70	-0.74	7.39	0.24	7.02	-0.15	8.19	0.71	6.79

**Table 3- Performance indicators of LARS-WG model in validation period**

### جدول ۳- شاخص‌های عملکرد مدل LARS-WG در دوره صحت‌سنجی

Statistics	SA-K-W		SA-C-VW		A-C-W		A-M-W		PH-C-W		A-C-VW	
	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE
Min Tem	1.01	2.44	-0.47	1.61	-0.65	1.27	-0.76	1.37	-1.39	2.25	0.74	2.41
Max Tem	-0.80	2.39	-0.72	2.35	0.68	2.00	-1.53	1.89	-1.60	2.29	0.76	3.10
Rainfall	0.14	12.49	1.07	24.29	-0.11	9.47	-0.26	15.90	0.52	19.33	1.02	16.34
Sun hour	-0.49	7.48	1.10	8.97	-0.86	9.15	-1.50	8.65	0.87	9.50	0.63	3.45

در دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰ عمدتاً افزایشی و در دوره‌های ۲۰۴۱-۲۰۶۰ کاهش‌ی خواهد بود. تغییرات ساعت آفتابی نیز مطابق تغییرات بارندگی و دما بوده بطوریکه با افزایش دما و کاهش بارندگی، ساعت آفتابی نیز افزایش یافته و با کاهش دما و افزایش بارندگی، ساعت آفتابی نیز کاهش می‌یابد. مطابق نتایج، بیشترین افزایش دما و کاهش بارندگی در هر شش اقلیم موجود در ایران در سناریو RCP4.5 در دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ رخ خواهد داد. بیشترین میزان افزایش دما و بیشترین میزان کاهش بارندگی در سناریو RCP4.5 و دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ در اقلیم SA-K-W (استان‌های شمال غربی و کوهستانی کشور) به ترتیب با مقادیر ۲ درجه افزایش دما و ۱۶/۰۵ میلی‌متر کاهش بارندگی رخ خواهد داد. این موضوع حاکی از تحت تأثیر قرار گرفتن مناطق سردسیر در اقلیم SA-K-W از نوسانات پارامترهای هواشناسی و بروز پدیده تغییر اقلیم در این مناطق می‌باشد. از طرفی با افزایش ارتفاع دقت مدل برای پیش‌بینی دما کاهش می‌یابد و در منطقه شمال غرب، بخصوص در فصل بهار بخشی از بارش‌ها ناشی از شرایط اوروگرافیک و محلی بوده و هر چه از منبع سینوپتیکی بارش (دریای مدیترانه) در بخش‌های

بعد از کالیبره کردن مدل زیر مقیاس LARS-WG (با استفاده از سری زمانی تاریخی پارامترهای مختلف هواشناسی) در هر ایستگاه، سری‌های زمانی روزانه پارامترهای هواشناسی برای سال‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱ تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 با استفاده از مدل GFDL-CM3 تولید شدند. مقادیر میانگین سری زمانی ماهیانه سه پارامتر اصلی هواشناسی یعنی بارندگی، دما و ساعات آفتابی ۳۱ ایستگاه سینوپتیک منتخب برای دوره تاریخی و دو دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۴۱-۲۰۶۰) تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 برای اقلیم‌های شش‌گانه ایران در جدول ۴ ارائه شده است. ضمناً میزان تغییرات دما و بارندگی در سال‌های آتی تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 به صورت شماتیک در شکل ۲ گزارش شده است.

مطابق نتایج بدست آمده از هر سناریو در دو دوره مورد بررسی، دما در تمامی حالات در دوره‌های آتی افزایش خواهد یافت. به طور کلی انتظار می‌رود دما در کل کشور از ۰/۵ درجه تا ۲/۰۳ درجه افزایش پیدا کند. این در حالی است که مطابق نتایج شبیه‌سازی شده تغییرات بارندگی

**Table 4- Mean values of meteorological parameters of simulated data under two RCP4.5 and RCP8.5 scenarios**

**جدول ۴- میانگین مقادیر پارامترهای هواشناسی داده‌های شبیه‌سازی شده تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5**

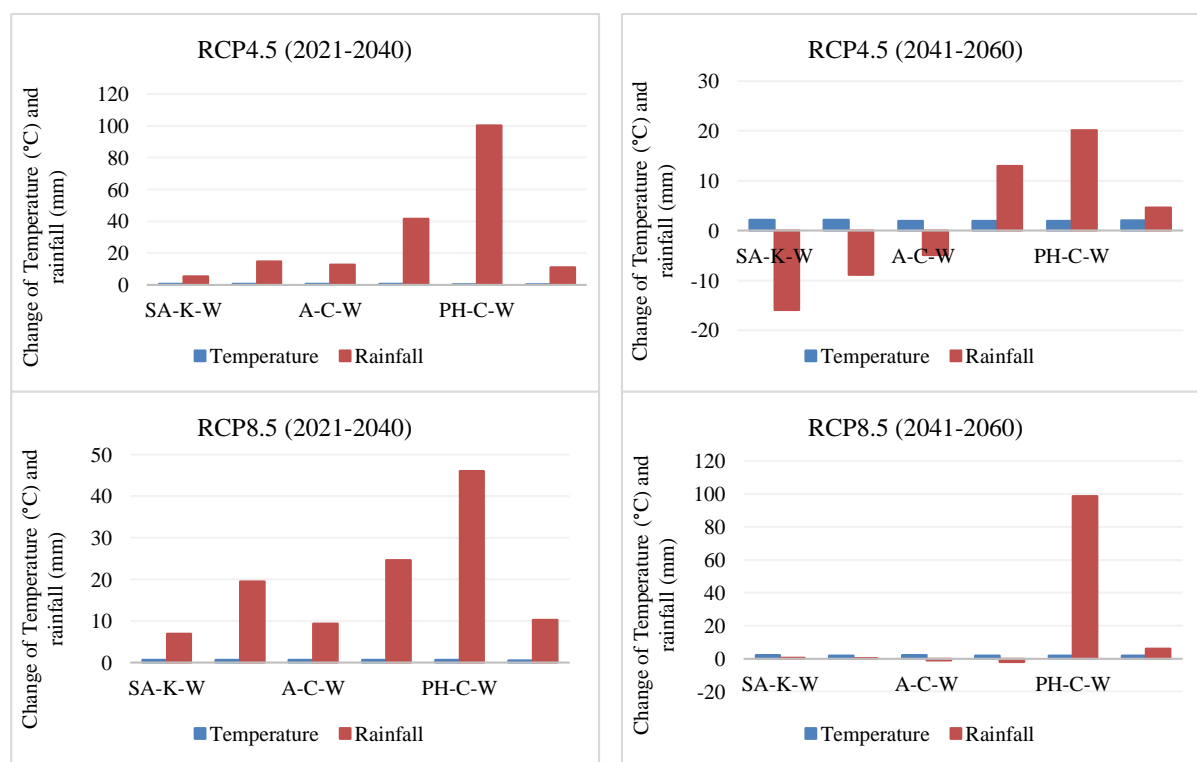
Parameter	Scenario and simulated courses	SA-K-W	SA-C-VW	A-C-W	A-M-W	PH-C-W	A-C-VW	Average changes
Temperature	Average of historical values	12.41	16.81	16.90	25.97	17.97	19.05	-
	RCP4.5 (2021-2040)	12.98	17.34	17.43	26.47	18.43	<b>*19.50</b>	0.50
	RCP4.5 (2041-2060)	<b>**14.61</b>	18.93	18.87	27.92	19.94	21.05	2.03
	RCP8.5 (2021-2040)	13.12	17.47	17.54	26.61	18.66	19.60	0.65
	RCP8.5(2041-2060)	14.47	18.80	18.94	27.90	19.93	21.00	1.34
Rainfall	Average of historical values	316.45	420.68	150.57	221.95	1136.09	100.40	-
	RCP4.5 (2021-2040)	321.83	435.42	163.33	263.55	<b>**1236.28</b>	111.45	30.95
	RCP4.5 (2041-2060)	<b>"300.50</b>	411.86	145.66	234.95	1156.25	105.05	1.35
	RCP8.5 (2021-2040)	323.45	440.25	159.90	246.56	1182.12	110.65	19.46
	RCP8.5(2041-2060)	317.14	<b>*420.99</b>	<b>149.66'</b>	219.92	1234.68	106.60	-2.32
Sun hour	Average of historical values	7.85	7.69	8.51	8.32	8.58	8.40	-
	RCP4.5 (2021-2040)	7.92	7.75	8.63	8.44	<b>"7.11</b>	<b>*8.45</b>	-0.18
	RCP4.5 (2041-2060)	8.03	7.81	8.68	8.49	7.12	8.45	-0.13
	RCP8.5 (2021-2040)	<b>7.84'</b>	7.76	8.65	8.47	7.22	8.50	-0.15
	RCP8.5(2041-2060)	<b>**8.08</b>	7.75	8.64	8.47	7.17	8.45	0.02

\* The lowest increase

' The lowest reduction

\*\* The highest increase

" The highest reduction



**Fig. 2- Amount of changes in temperature (°C) and precipitation (mm) in the coming years with RCP4.5 and RCP8.5 scenarios**

شکل ۲- تغییرات دما (°C) و بارندگی (م.م) در سال‌های آتی تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5



بخش‌های کوهستانی مرتفع دورتر باشد، مدل بارش را کمتر از دوره‌های تاریخی شبیه‌سازی خواهد کرد (Rasouli et al., 2014).

شکل‌های ۲ نیز میزان تغییرات دو پارامتر دما و بارندگی را در اقلیم‌های شش‌گانه ایران نشان می‌دهد. مطابق نتایج حاصل از این اشکال، بیشترین میزان تغییرات بارندگی مربوط به اقلیم PH-C-W (استان‌های شمالی و حاشیه دریای مازندران) و A-M-W (استان‌های جنوبی و حاشیه خلیج فارس) می‌باشد که این به دلیل افزایش دمای پهنه‌های اقیانوسی جنوب و تزریق رطوبت بیشتر ناشی از افزایش تبخیر از سطوح آبی پهنه‌های آبی در شمال (دریای مازندران) و جنوب (شمال اقیانوس هند، دریای عمان، خلیج فارس و دریای سرخ) به مناطق شمالی و جنوبی کشورمان می‌باشد.

مسلماً تغییرات پارامترهای هواشناسی باعث بروز تغییرات اقلیمی شده و هرگونه تغییر در اقلیم و پارامترهای هواشناسی در جنبه‌های مختلف محیطی و زیست‌محیطی تأثیرگذار خواهد بود. بنابراین لزوم توجه به این مساله ضروری بوده و بررسی و شبیه‌سازی تغییرات آن می‌تواند در کاهش خسارات و جلوگیری از بروز مشکلات ناشی از تغییرات اقلیمی مفید بوده و موثر باشد. در این تحقیق نیز در همین راستا بعد از شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی تحت دو سناریو در دو دوره مختلف، به بررسی تأثیر آنها بر آب مصرفی و ردپای آب گیاهان کشاورزی پرداخته شده است. جدول ۵ میزان ردپای آب در دوره‌های تاریخی و شبیه‌سازی شده در سناریوهای آبی را نشان می‌دهد.

مطابق جدول ۵ مقدار ردپای آب آبی هم در دوره‌های تاریخی و هم در دوره‌های شبیه‌سازی شده آبی بسیار بیشتر از ردپای آب سبز محصولات بوده که این نشان‌دهنده استفاده بیشتر محصولات کشاورزی ایران از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در دسترس موجود می‌باشد. بیشترین مقدار آب سبز مربوط به اقلیم PH-C-W بوده که مرطوب‌ترین و پر بارش‌ترین اقلیم ایران محسوب می‌شود. در سایر اقلیم‌ها هرچه اقلیم خشک‌تر و گرم‌تر می‌شود، میزان ردپای آب سبز کاهش یافته و ردپای آب آبی افزایش می‌یابد. بررسی سناریوهای شبیه‌سازی شده نیز نشان می‌دهد که ردپای آب در هر دو جزء آب آبی و آب سبز در آینده دستخوش تغییرات خواهند بود که این تغییرات عمدتاً در جزء آب سبز محصولات با کاهش یا افزایش اندکی رخ خواهد داد اما در جزء آب آبی محصولات با تغییرات چشمگیر در هر شش اقلیم نسبت به دوره تاریخی رخ خواهد داد. شکل‌های ۳ میزان تغییرات ردپای آب آبی و سبز محصولات را در سناریو و دوره‌های مورد بررسی را در هر شش اقلیم مورد مطالعه را نشان می‌دهند. مطابق این شکل در هر دو اقلیم A-C-VW و A-M-W ردپای آب محصول در تمامی حالات شبیه‌سازی شده با افزایش ردپای آب سبز و کاهش ردپای آب آبی روبرو خواهند بود. بررسی تغییرات ردپای آب سبز نشان می‌دهد که در دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰ در هر دو سناریو مورد بررسی ردپای آب سبز افزایش خواهد یافت اما در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰، میزان ردپای آب سبز در اقلیم‌های سرد و مرطوب (PH-C-W, SA-K-W, A-C-W) کاهش یافته و در سایر اقلیم‌ها افزایش می‌یابد.

**Table 5- Water footprint rates in historical periods and simulated rates in future scenarios**

**جدول ۵- میزان ردپای آب در دوره‌های تاریخی و شبیه‌سازی شده در سناریوهای آبی**

WF	Scenario and simulated courses	SA-K-W	SA-C-VW	A-C-W	A-M-W	PH-C-W	A-C-VW
GWF	Average of historical values	286.0	247.7	115.7	173.9	540.6	86.7
	RCP4.5 (2021-2040)	292.3	254.3	121.6	187.8	552.8	93.4
	RCP4.5 (2041-2060)	284.1	252.9	109.0	181.5	534.0	87.9
	RCP8.5 (2021-2040)	292.5	253.5	120.5	186.8	<b>*555.7</b>	93.4
	RCP8.5(2041-2060)	280.2	254.9	110.6	181.4	552.3	86.7
BWF	Average of historical values	1739.6	1755.4	2264.0	2295.9	845.2	<b>*2397.8</b>
	RCP4.5 (2021-2040)	1779.8	1719.6	2023.0	2149.7	943.6	2190.2
	RCP4.5 (2041-2060)	1917.5	1790.0	2082.9	2198.5	1074.4	2242.0
	RCP8.5 (2021-2040)	1765.3	1715.7	2068.3	2166.2	946.7	2187.3
	RCP8.5(2041-2060)	1871.3	1799.8	2083.6	2207.3	1026.6	2242.1

\*Highest amount of Water footprint      BWF: Blue Water footprint      GWF: Green Water footprint

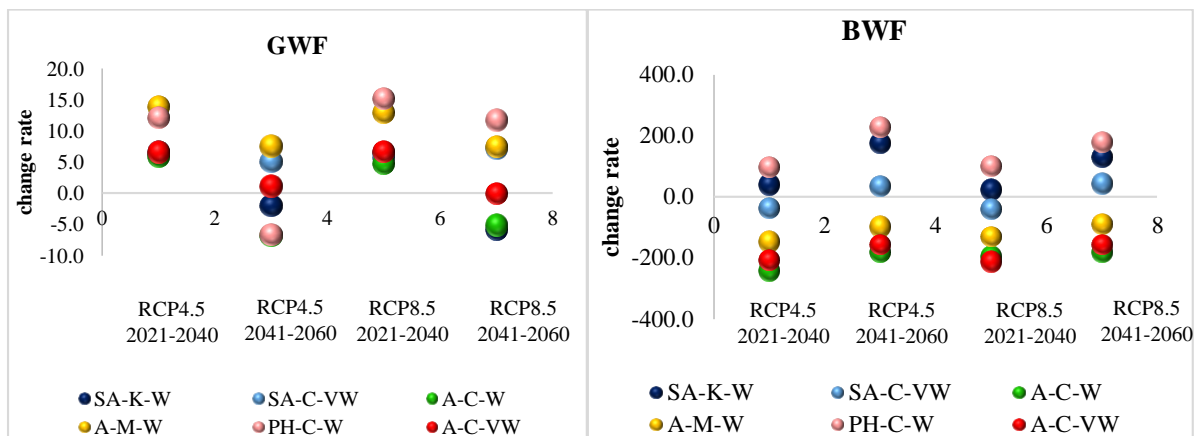


Fig. 3- Changes in Blue Water footprint (BWF) and Green Water footprint (GWF) products in the studied periods and for the climates studied

شکل ۳- میزان تغییرات ردپای آب آبی (BWF) و سبز (GWF) محصولات در دوره‌های مورد بررسی و اقلیم‌های مورد مطالعه

اقلیم‌های شش‌گانه از ۱۸/۷۷- درصد تا ۳۸/۲۰ درصد تغییر خواهد کرد. بیشترین مقدار افزایش ردپای آب آبی، عمدتاً در دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و بیشترین درصد کاهش آن نیز در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ رخ خواهد داد. بررسی شکل ۴ نشان می‌دهد که درصد تغییرات ردپای آب آبی در دو اقلیم SA-K-W و PH-C-W در تمامی حالات مورد بررسی و در هر دو سناریو، افزایشی خواهد بود و در سایر اقلیم‌ها، میزان درصد تغییرات ردپای آب کاهش خواهد یافت که این به دلیل افزایش بارندگی و کاهش دما در این مناطق و تأثیرگذاری آن در کاهش آب مصرفی محصولات و در نتیجه کاهش ردپای آب آبی می‌باشد.

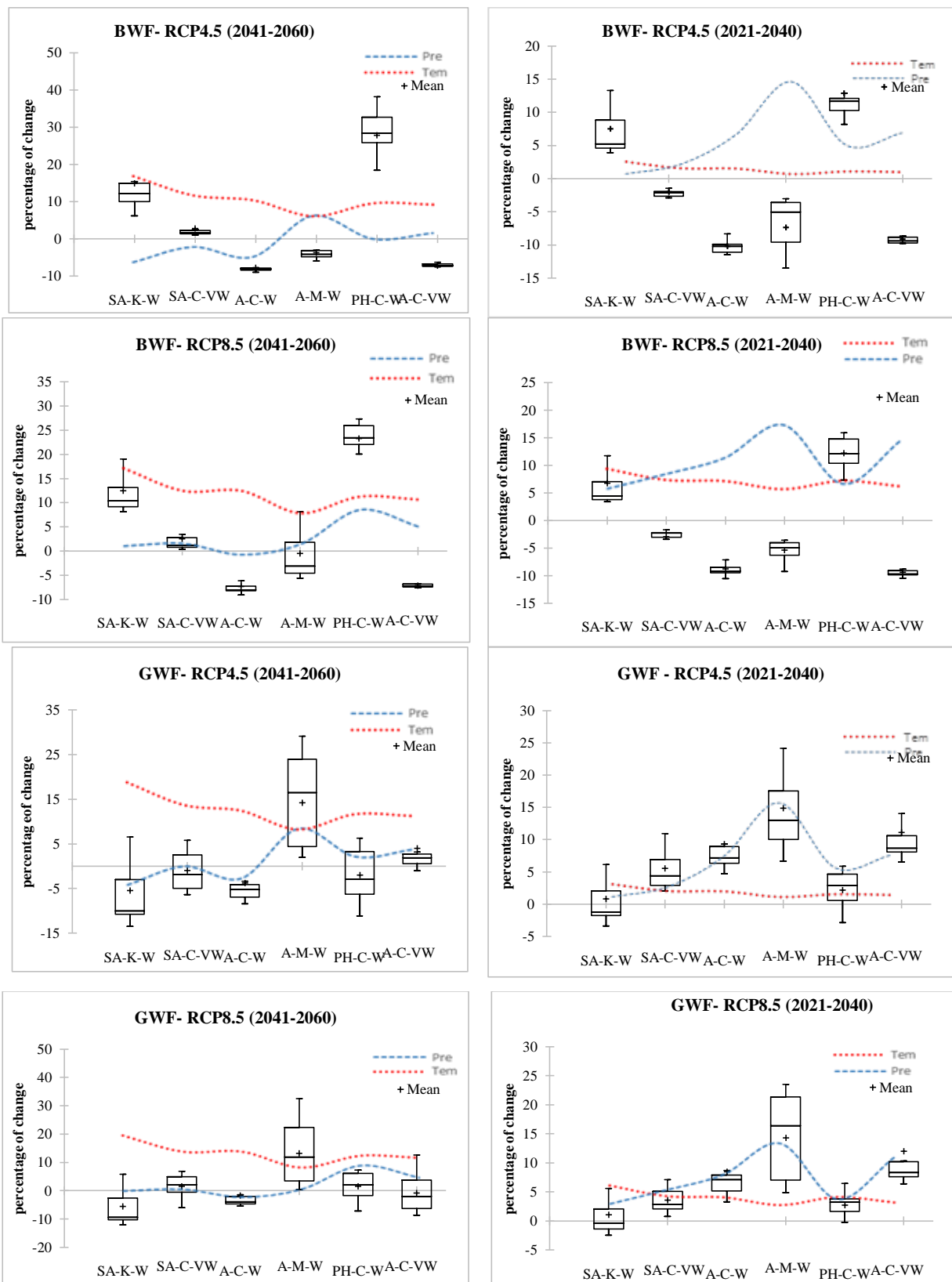
#### ۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

شبیه‌سازی سناریوهای اقلیمی تحت دو سناریو پرکاربرد خط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای RCP4.5 (که یک سناریوی ثابت با افزایش واداشت تابشی تا سال ۲۰۷۰ و با غلظت‌های پایدار بعد از سال ۲۰۷۰ می‌باشد) و RCP8.5 (به طور مداوم در حال افزایش واداشت تابشی تا انتهای قرن ۲۱ و تقریباً برابر با ۸/۵ وات بر مترمربع می‌باشد) نشان می‌دهد که پارامترهای هواشناسی نظیر دما، بارندگی و ساعت آفتابی طی دوره‌های آتی دستخوش تغییرات خواهند شد بنحوی که تغییرات دما تماماً افزایشی بوده و تغییرات بارندگی بسته به موقعیت مکانی و زمانی و سناریو تعریف شده هم تغییرات کاهش داشته و هم تغییرات افزایشی دارد.

ارزیابی تغییر اقلیم و تغییرات پارامترهای هواشناسی نشان می‌دهد که در طی دوره‌های آتی دما در بین مناطق مورد مطالعه از ۰/۵ تا ۲/۰۳ درجه افزایش پیدا می‌کند و تغییرات بارندگی نیز از ۱۶- میلی‌متر کاهش

این در حالی است که تغییرات ردپای آب آبی برای سه اقلیم با ماهیت گرم و خشک (A-C-W, A-C-VW, A-M-W) روند کاهشی و برای سایر اقلیم‌های سردتر و مرطوب‌تر افزایش ردپای آب را نشان می‌دهد. متفاوت بودن میزان تغییرات ردپای آب در اقلیم‌ها و سناریو و دوره‌های مختلف مورد بررسی، نشان‌دهنده تأثیرگذاری متفاوت پارامترهای اقلیمی در این مناطق بوده که این نیز نیازمند بررسی بیشتر و جامع‌تر می‌باشد. به همین منظور و در راستا بررسی تأثیرگذاری پدیده‌های اقلیمی در ردپای آب محصولات، درصد تغییر ردپای آب محصولات کشاورزی اقلیم‌های شش‌گانه ایران در دو جزء آب آبی و سبز مورد ارزیابی قرار گرفته و ضمن ارائه آنها در اشکال ۴ درصد تغییرات دو پارامتر دما و بارش نیز همزمان مورد تحلیل واقع شده و روند تغییرات آنها ارائه شده است.

مطابق شکل ۴ و بررسی شبیه‌سازی سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 و دوره‌های زمانی مورد بررسی، پیش‌بینی می‌گردد ردپای آب سبز محصولات در اقلیم‌های مختلف ایران از ۱۳/۴۴- درصد تا ۳۷/۵۳ درصد تحت شرایط مختلف تغییر یابد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین میزان درصد تغییرات نیز در دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ در هر دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 رخ خواهد داد. همچنین مطابق نتایج به‌دست آمده، بیشترین میزان افزایش درصد ردپای آب سبز در اقلیم A-M-W و بیشترین مقدار کاهش درصد آن در اقلیم‌های SA-K-W و PH-C-W رخ خواهد داد که این با روند درصد تغییرات بارندگی کاملاً مطابقت داشته و از آن تبعیت می‌کند. ارزیابی درصد تغییرات ردپای آب آبی نیز نشان می‌دهد که به طور کلی در دوره‌های آتی با توجه به سناریوهای مورد بررسی، ردپای آب آبی محصولات در



**Fig. 4- Percentage of changes in blue water footprint (BWF) and green water footprint (GWF) with changes in temperature and precipitation**

شکل ۴- درصد تغییرات آب آبی (BWF) و سبز (GWF) با تغییرات دما و بارش

تا ۱۰۰/۲ میلیمتر افزایش خواهد داشت و این سبب تغییرات ردپای آب سبز و آبی محصولات در اقلیم‌های مختلف ایران به ترتیب از ۱۳/۴۴- درصد تا ۳۷/۵۳ درصد در ردپای آب سبز و ۱۸/۷۷- درصد تا ۲۸/۲۰ درصد در ردپای آب آبی می‌گردد.

بیشترین میزان افزایش درصد ردپای آب سبز و همچنین بیشترین میزان کاهش درصد ردپای آب آبی در اقلیم A-M-W و بیشترین مقدار درصد کاهش آب سبز و به تبع آن افزایش آب آبی محصولات در اقلیم‌های SA-K-W (استان‌های کوهستانی و شمال غربی کشور) و PH-C-W (استان‌های شمالی حاشیه دریای مازندران) رخ خواهد داد و با توجه به این نکته که عمدتاً کشاورزی در مناطق سردتر و در اقلیم‌های A-C-W، SA-K-W و PH-C-W انجام می‌گردد، کاهش آب آبی در این اقلیم‌ها می‌تواند آینده منابع آبی در این مناطق را با مشکلات جدی روبرو سازد. بنابراین لزوم توجه به تغییرات اقلیمی و تغییرات آب مصرفی و ردپای آب محصولات کشاورزی بخصوص در این اقلیم‌ها بیش از پیش ضروری بوده و باید به دنبال راهکارهای کاهش آب مصرفی و ردپای آب در این مناطق بود.

در انتها با توجه به پدیده تغییر اقلیم پیش‌بینی شده در دوره‌های آبی و تأثیر آن در افزایش آب مصرفی و ردپای آب محصولات پیشنهاد می‌گردد، به‌منظور حفظ منابع آب سطحی و زیرزمینی در دسترس و استفاده بهینه از منابع آب ناشی از نزولات جوی، با در نظر گرفتن منافع ملی و حفظ استقلال سیاسی و اقتصادی کشور، برنامه‌ریزی‌های دقیق در بهره‌برداری و مصرف منابع آبی انجام‌شود تا بتوان با کاهش آب مصرفی در بخش کشاورزی از طریق کشت محصولات کم‌مصرف در راستای احیای منابع آبی کشور قدم مؤثری برداشت. لذا با توجه به نتایج تحقیق، محصولاتی که ردپای آب کمتر و عملکرد بیشتری دارند، برای کشت در منطقه مورد مطالعه پیشنهاد می‌گردد. لازم به ذکر است که زمانی این امر به‌صورت مؤثر عملی خواهد بود که به بررسی تمامی محصولات در سایر دشت‌های کشور پرداخته شود و با دید کلان برنامه‌ریزی‌های اصولی، هدفمند و یکپارچه در بخش کشاورزی انجام گردد. همچنین بالا بردن راندمان آبیاری با بهبود سیستم‌های آبیاری و جایگزینی سیستم‌های تحت‌فشار به‌جای سیستم‌های سنتی، از جمله راهکارهای اساسی در کاهش ردپای آب محصولات می‌باشد چراکه پدیده تغییر اقلیم، پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر بوده و فقط با بالا بردن راندمان آبیاری و مدیریت آب و آبیاری می‌توان میزان ردپای آب محصولات را کاهش داد.

### پیوست‌ها

#### Description A: Concepts of a moisture regime based on UNESCO classification

#### پیوست الف: مفاهیم رژیم رطوبتی بر اساس طبقه‌بندی یونسکو

توضیحات	شاخص خشکی	رژیم رطوبتی
<ul style="list-style-type: none"> <li>بارندگی کم و نا منظم که در هر فصلی امکان بارش وجود دارد</li> <li>تغییرات سالانه بارندگی خیلی زیاد تا ۱۰۰٪</li> <li>تقریباً فاقد پوشش گیاهی دائمی به استثناء بعضی بوته‌ها در بستر رودخانه‌ها، امکان رویش گیاهان یکساله در بعضی از سال‌های خوب</li> </ul>	AI<0.03	فراخشک
<ul style="list-style-type: none"> <li>بارندگی سالانه ۸۰-۱۰۰ میلی متر تا ۲۰۰-۳۵۰ میلی متر</li> <li>تغییرات سالانه بارندگی زیاد ۵۰٪ تا ۱۰۰٪</li> <li>دارای پوشش گیاهی پراکنده</li> <li>دیمکاری اقتصادی مقدور نمی‌باشد</li> </ul>	AI=0.03-0.2	خشک
<ul style="list-style-type: none"> <li>بارندگی سالانه در مناطقی با بارش زمستانه بین ۲۵۰-۳۰۰ میلی متر تا ۴۵۰-۵۰۰ میلی متر</li> <li>بارندگی سالانه در مناطقی با بارش تابستانه بین ۳۰۰-۴۰۰ میلی متر تا ۷۰۰-۸۰۰ میلی متر</li> <li>تغییرات سالانه بارندگی ۲۵٪ تا ۵۰٪</li> </ul>	AI=0.2-0.5	نیمه خشک
<ul style="list-style-type: none"> <li>تغییرات سالانه بارندگی کمتر از ۲۵٪</li> <li>دارای کشاورزی نرمال</li> </ul>	AI=0.5-0.75 AI=0.75-1 AI>1	نیمه مرطوب مرطوب خیلی مرطوب

### Description B: Concepts of winter type based on UNESCO classification

#### پیوست ب: مفاهیم تیپ زمستانه بر اساس طبقه‌بندی یونسکو

واکنش گیاهان زراعی	میانگین متوسط روزانه دما در سردترین ماه سال	تیپ زمستان
<ul style="list-style-type: none"> <li>• رشد گیاهان در زمستان مقدور است</li> <li>• نیاز کمتر به رشد و توسعه سریع در مراحل فنولوژیک در بهار دارد</li> </ul>	Tmean=10-20 °C	ملایم (Mild)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• محدودیت رشد گیاه</li> <li>• نیاز بیشتر به رشد و توسعه سریع مراحل فنولوژیک در بهار دارد</li> </ul>	Tmean=0-10 °C	خنک (Cool)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• نیاز به خاک‌های با ظرفیت نگهداری آب بالا</li> <li>• موارد بالا+ نیاز به گیاهانی با خواب زمستانه برای تحمل سرمای زمستان</li> </ul>	Tmean<0 °C	سرد (Cold)

### Description C: Concepts of summer type based on UNESCO classification

#### پیوست ج: مفاهیم تیپ تابستانه بر اساس طبقه‌بندی یونسکو

واکنش گیاهان زراعی	میانگین متوسط روزانه دما در گرمترین ماه سال	تیپ تابستان
<ul style="list-style-type: none"> <li>• توسعه سریع مراحل فنولوژیک</li> <li>• تبخیر و تعرق بالا و افزایش نیاز آبی گیاه</li> </ul>	Tmean>30 °C	خیلی گرم (Very warm)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• تبخیر و تعرق بالا و افزایش نیاز آبی گیاه</li> <li>• از دسترس خارج شدن سریع رطوبت خاک</li> </ul>	Tmean=20-30 °C	گرم (Warm)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• کاهش باروری بالقوه گیاه</li> <li>• سازگار با گیاهانی که از توسعه سریع مراحل رشدی در دمای پایین برخوردار باشند</li> </ul>	Tmean=10-20 °C	ملایم (Mild)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ایجاد محدودیت شدید در باروری بالقوه گیاهان</li> <li>• پایین بودن باروری بالقوه گیاهان</li> </ul>	Tmean=0-10 °C	خنک (Cool)

AquaCrop model. Irrigation Sciences and Engineering 41(1):57-72

پی‌نوشت‌ها

Aligholinia T, Sheibany H, Mohamadi O, Hesam M (2019) Comparison and evaluation of blue, green and gray water footprint of wheat in different climates of Iran. Iran-Water Resources Research 15(3):234-245 (In Persian)

- 1- Irrigation Water Requirement
- 2- Water Use Efficiency
- 3- Very Humid- Cool- Warm
- 4- Semi Arid- Cold- Warm
- 5- Semi Arid- Cool- Very Warm
- 6- Arid- Cool- Warm

Bates B C, Charles S P, Hughes J P (1998) Stochastic downscaling of numerical climate model simulations. Environmental Modelling and Software 13:325-331

- 7- Arid- Mild- Warm
- 8- Arid- Cool- Very Warm
- 9- General Circulation Model
- 10- Long Ashton Research Station Weather Generator

Bayart J B, Bulle C, Deschenes L, Margni M, Pfister S, Vince F, Koehler A (2010) A framework for assessing off-stream freshwater use in LCA. International Journal of Life Cycle Assess 15 (5):439e453

۸- مراجع

Berger M, Finkbeiner M (2010) Water footprinting: How to address water use in life cycle assessment? Sustainability 2:919e944

Aaheim A, Amundsen H, Dokken T, Wei T (2012) Impacts and adaptation to climate change in European economies. Global Environmental Change 22:959-968

Amiri E, Khorsand A, Daneshian J, Yousefi M (2018) Predicting biomass and grain yield in canola under different water regimes and fertilizers using

- Economia, Administracao e Sociologia Rural (SOBER)
- Ghaffari A, Ghasemi V, De Pauw E (2015) Agro-climatically zoning of Iran by UNESCO approach. *Iranian Dryland Agronomy Journal* 4(1):63-74 (In Persian)
- Gosling S N (2013) The likelihood and potential impact of future change in the largescale climate-earth system on ecosystem services. *Environmental Science and Policy* 27(1):S15–S31
- Groppelli B, Bocchiola D, Rosso R (2011) Spatial downscaling of precipitation from GCMs for climate change projections using random cascades: A case study in Italy. *Water Resources Research* 47:W03519
- Herath I, Green S, Horne D, Singh R, Clothier B (2014) Quantifying and reducing the water footprint of rain-fed potato production, part I: Measuring the net use of blue and green water. *Cleaner Production* 81:111-119
- Hoekstra A Y (2003) Virtual water trade. In: *Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade*, Delft, The Netherlands. Value of Water Research Report Series, vol. 12, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands
- Hoekstra A Y, Chapagain A K (2007) Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management* 21:35–48
- Holst, Rainer, Xiaohua Yu, and Carola Grün (2013) Climate change, risk and grain yields in China. *Journal of Integrative Agriculture* 12.7:1279-1291
- Irmak S, Haman DZ, Jones JW (2002) Valuation of class pans coefficients for estimating reference evapotranspiration in Humid location. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering, ASCE*, 128(3):153-159
- IPCC (2001) *Climate change 2001: The scientific basis*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 785
- ISO 14046 (2013) *Environmental management-water footprint-principles, requirements and guidelines*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
- Jefferies D, Munoz I, Hoedges J, King V J, Aldaya M M, Ercin A E, Mila I, Canals L L and Hoekstra A Y (2012) Water footprint and life cycle assessment as approaches to assess potential impacts of products on water consumption. Key learning points from pilot studies on tea and margarine. *Cleaner Production* 12:155-166
- Bocchiola D, E Nana, A Soncini (2013) Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy. *Agricultural Water Management* 116:50-61
- Burlando P, Rosso R (2002) Effects of transient climate change on basin hydrology. *Precipitation Scenarios for the Arno River Basin, central Italy. Hydrological Processes* 16:1151–1175
- Chapagain A K B, Hoekstra A Y (2012) The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics* 70:749–758
- Chico D, Aldaya M, Garrido A (2013) A water footprint assessment of a pair of jeans: the influence of agricultural policies on the sustainability of consumer products. *Cleaner Production* 57:238–248
- Christensen J H, Hewitson B, Busuioc A, Chen A, Gao X, Held R, Magaña Rueda V (2007) *Regional climate projections. Climate Change, 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, University Press, Cambridge, Chapter 11:847-940
- Darwin R, Tsigas M, Lewandowski J, Ranases A (1995) *World agriculture and climate change: Economic Adaptations. Technical Report Agricultural Economic Report Number 703*, United States Department of Agriculture, Economic Research Service, Washington, DC
- Ene A S, Teodosiu C, Robu B, Volf I (2013) Water footprint assessment in the winemaking industry: A case study of office paper. *Cleaner Production* 24:30–35
- FAO (1974) *FAO-UNESCO Soil Map of the World. Vol.I: Legend*. UNESCO, Paris
- Deschenes O, Greenstone M (2007) The economic impacts of climate change: evidence from agricultural output and random fluctuations in weather. *The American Economic Review* 97:354-385
- De Pauw E (2000) *Agroclimatic characteristics of mediterranean countries*. Rabat, Morocco. Advanced Course Organized by CIHEAM/IAMZ, CRR- INRA-Settat and ICARDA
- Doorenbos J, Kassam A H (1979) *Yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage paper, No. 33, Rome, Italy
- Feres J G, Reis E J, Speranza J (2008) Assessing the impact of climate change on the brazilian agricultural sector. In: 46th congress, July 20–23, 2008, Rio Branco, Acre, Brazil, Sociedade Brasileira de

- central Iraq using LARS-WG stochastic weather generator. *Engineering* 6(13):948-959
- Piao S, Ciais P, Huang Y, Shen Z, Peng S, Li J, Zhou L, Liu H, Ma Y, Ding Y, Friedlingstein P, Liu C, Tan K, Yu Y, Zhang T, Fang J (2010) The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature* 467:43-51
- Qian B, Hayhoe H, Gameda S (2005) Evaluation of the stochastic weather generators LARS-WG and AAFC-WG for climate change impact studies. *Climate Research* 29(1):3-21
- Raes D, Steduto P, Hsiao T C, Fereres E (2009) Reference manual AquaCrop. FAO, Land and Water Division, Rome, Italy
- Rahimikhoob A (2009) An evaluation of common pan coefficient equations to estimate reference evapotranspiration in a subtropical climate (North of Iran). *Journal of Irrigation Science* 27:289-296
- Rasuli A, Rezaei-Banafsheh M, Massah A R, Khorshiddoust A M, Ghermezcheshmeh B (2014) Investigation impact of Morpho-climatic parameters on accuracy of LARS-WG model. *Iranian Journal of Watershed Management Science* 8(24) (In Persian)
- Risbey J S (2008) The new climate discourse: Alarmist or alarming? *Global Environmental Change* 18:26-37
- Rodriguez C I, de Galarreta V R, Kruse E E (2015) Analysis of water footprint of potato production in the Pampean region of Argentina. *Cleaner Production* 81:182-190
- Rosenzweig C, Hillel D (1998) Climate change and the global harvest: Potential impacts of the greenhouse effect on agriculture. Oxford University Press, USA, 324 pp.
- Shortle J, Abler D, Blumsack S, Crane R, Kaufman Z, McDill M, Najjar R, Ready R, Wagener T, Wardrop D (2009) Pennsylvania climate impact assessment. Report to the Department of Environmental Protection, Environment and Natural Resources Institute, The Pennsylvania State University, USA
- Silva C S D, Weatherhead E K, Knox J W, Rodriguez-Diaz J A (2007) Predicting the impacts of climate change- A case study of paddy irrigation water requirements in Sri Lanka. *Agricultural Water Management* 93:19-29
- Tao F, Yokozawa M, Hayashi Y, Lin E (2003) Future climate change, the agricultural water cycle, and agricultural production in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 95:203-215
- Khan M S, Coulibaly P, Dibike Y (2006) Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. *Journal of Hydrology* 319(1-4):357-382
- Karimi M, Kaki S, Rafati S (2018) Iran's future climate conditions and hazard in climate research. *Journal of Spatial Analysis Environmental hazards* 5(3):1-22 (In Persian)
- Komuscu A U, Erkan A, Oz S (1998) Possible impacts of climate change on soil moisture availability in the southeast Anatolia development project region: An analysis from an agricultural drought perspective. *Climate Change* 40:519-545
- Lippert C, Krimly T, Aurbacher J (2009) A Ricardian analysis of the impact of climate change on agriculture in Germany. *Climatic Change* 97:593-610
- Mazzi A, Manzardo A, Scipioni A (2014) Water footprint to support environmental management: An overview. In: Salomone R, Saije G (Eds.), *Pathways to Environmental Sustainability: Methodologies and Experiences*, Springer International Publishing AG, Cham Dordrecht, The Netherlands, ISBN 978-3-319-03825-4
- Mendelsohn R (2009) The impact of climate change on agriculture in developing countries. *Journal of Natural Resources Policy Research* 1:5-19
- Mendelsohn R, Dinar A (2003) Climate, water, and agriculture. *Land Economics* 79:328-341
- Morillo J G, Díaz J A, Camacho E, Montesinos P (2015) Linking water footprint accounting with irrigation management in high value crops. *Journal of Cleaner Production* 87:594-602
- Müller C, Cramer W, Hare WL, Lotze-Campen H (2011) Climate change risks for African agriculture. *Nature Climate Change* 108:4313-4315
- Nairizi S, Rydzewski J R (1977) Effects of dated soil moisture stress on crop yields. *Experimental Agriculture* 13:51-59
- Nana E, Corbari C, Bocchiola D (2014) A model for crop yield and water footprint assessment: Study of maize in the Po valley. *Agricultural Systems* 127:139-149
- Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, van der Linden P J, Hanson C E (2007) Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge
- Osman Y, Al-Ansari N, Abdellatif M, Aljawad S B, Knutsson S (2014) Expected future precipitation in

- Cultural Organization, Paris, 54 pp. ISBN 92-3-101484-6
- Zare Abyaneh H, Bayat varkeshi M, Sabzi Parvar AK, Maroufi S, Ghasemi A (2010) Estimation of estimation methods of evapotranspiration of the reference plant and its zoning in Iran. *Natural Geographic Research* 74:110-95 (In Persian)
- Thomas C, Cameron A, Green R, Bakkenes M, Beaumont L, Collingham Y, Erasmus B, Siqueira M, Grainger A, Hannah L, Hughes L, Huntley B, Jaarsveld A, Midgley G, Miles L, Ortega-Huerta M, Peterson A, Phillips O, Williams S (2004) Extinction risk from climate change. *Nature* 427:145-148
- UNESCO (1979) Map of the world distribution of arid regions. Map at scale 1:25,000,000 with explanatory note. United Nations Educational, Scientific and