

## Estimating the Winter Wheat Water Requirement under Climate Change Scenarios in Gorgan Plain

ALI AREFINIA<sup>1</sup>, KHALED AHMADAALI<sup>\*2</sup>, MOSAED NASIRI MARYAN<sup>3</sup>

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2. Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.

(Received: Nov. 26, 2019- Revised: March. 21, 2020- Accepted: Apr. 21, 2020)

### ABSTRACT

Climate change through increased water demand, especially in agricultural sector, is the main challenge facing water resources management. Wheat is one of the staple and strategic crop throughout the world, particularly in Iran. In this study, historical observations from 1985-2005 were used to simulate the effects of climate change on the winter wheat water requirement across Gorgan plain. SDSM4.2 and CanESM2 models were used to downscale winter wheat water requirement under three concentration pathway scenarios; RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 in four periods (2020-2039, 2040-2059, 2060-2070, and 2080-2099). The Hargreaves-Samani (HS) model with less input variables in comparison with FAO-Penman-Monteith (PMF-56), was used for downscaling water requirement. The results of RCP2.6 scenario showed that the maximum and minimum annual water requirement of winter wheat are 403 and 286 mm in 2040-2059 and 2020-2039 periods, respectively. These values for RCP4.5 scenario were predicted to be 361 and 336 mm in 2020-2039 and 2040-2059 periods, respectively. For RCP8.5 scenario, they were predicted to be 336 and 199 mm in 2020-2039 and 2060-2079 periods, respectively. The growing period will be reduced in all three proposed scenarios and the reduction rate in RCP8.5 scenario is more than that in RCP4.5 scenario. According to the results, climate change is generally expected to reduce agricultural water consumption in Gorgan plain by reducing the cumulative winter wheat water requirement.

**Keywords:** CanESM2, Downscaling, Hargreaves-Samani, Effective Rainfall.

## برآورد نیاز آبی گندم زمستانه دشت گرگان در شرایط تغییر اقلیم

علی عارفی نیا<sup>۱</sup>، خالد احمدالی<sup>۲\*</sup> و مساعد نصیری مریان<sup>۳</sup>

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱/۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۲/۲)

### چکیده

پدیده تغییر اقلیم، با افزایش تقاضای آب به خصوص در بخش کشاورزی، مدیریت منابع آبی را به شدت با چالش مواجه کرده است. گندم جزء محصولات اصلی و استراتژیک در سراسر جهان و علی‌الخصوص کشور ایران است. در این تحقیق به شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر نیاز آبی گندم زمستانه رقم کوهدشت در دشت گرگان با استفاده از داده‌های تاریخی ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۵ پرداخته شد. پارامترهای مورد نیاز جهت محاسبه نیاز آبی گیاه تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از مدل SDSM و داده‌های مدل CanESM2 تحت سه سناریوی انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در چهار بازه زمانی (۲۰۲۰-۲۰۳۹)، (۲۰۴۰-۲۰۵۹)، (۲۰۶۰-۲۰۷۹) و (۲۰۸۰-۲۰۹۹) ریزمقیاس شدند. مدل هارگریوز-سامانی که متغیرهای ورودی کمتری نسبت به مدل فائو-پنمن-مونتیث دارد، جهت ریزمقیاس نمایی نیاز آبی استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار نیاز آبی سالانه گندم زمستانه تحت RCP2.6 برابر ۴۰۳ و ۲۸۶ میلی‌متر به ترتیب مربوط به بازه‌های (۲۰۴۰-۲۰۵۹) و (۲۰۲۰-۲۰۳۹) است. همچنین این مقادیر در RCP4.5 برابر ۳۶۱ و ۳۳۶ میلی‌متر به ترتیب مربوط به بازه‌های (۲۰۲۰-۲۰۳۹) و (۲۰۴۰-۲۰۵۹) و در RCP8.5 برابر ۳۳۶ و ۱۹۹ میلی‌متر به ترتیب در بازه‌های (۲۰۲۰-۲۰۳۹) و (۲۰۶۰-۲۰۷۹) پیش‌بینی شد. طول دوره رشد در هر سه سناریوی مورد بررسی کاهش می‌یابد و روند کاهشی آن، در RCP8.5 شدیدتر از RCP4.5 است. به طور کلی بر اساس نتایج این تحقیق انتظار می‌رود که تغییرات اقلیمی با کاهش میزان تجمعی نیاز آبی گندم زمستانه باعث کاهش میزان مصرف آب در بخش کشاورزی در دشت گرگان شود.

واژه‌های کلیدی: مدل CanESM2، ریزمقیاس نمایی، رابطه هارگریوز-سامانی، بارش مؤثر.

### مقدمه

بالقوه‌ای در وضعیت منابع آب داشته باشد (IPCC, 2013). تغییر اقلیم برای جوامع انسانی یک تهدید جدی و به طور بالقوه غیرقابل بازگشت است (IPCC, 2014) که می‌تواند تأثیرات مختلفی بر زندگی انسان داشته باشد. در دهه‌های اخیر نگرانی در مورد افزایش متوسط دمای کره زمین و آثار مخرب آن بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Sarzaeim and Bozorg-Haddad, 2015). انتظار می‌رود تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم، مناطق خشک یا نیمه‌خشک جهان مانند ایران بیشترین پیامدهای منفی این پدیده را متحمل شوند (Parry et al, 2004) و با توجه به محدودیت منابع آبی کشور ما، نیاز به بررسی اثر تغییرات اقلیمی در شرایط آینده و اعمال آن بر مدیریت صحیح کشاورزی احساس می‌شود. با توجه به تأثیرپذیری شدید بخش کشاورزی از تغییرات آب و هوا، این بخش یکی از حساس‌ترین بخش‌ها در شرایط تغییر

تغییر اقلیم به معنی تغییر در پارامترهای اقلیمی از جمله دما، بارش و غیره در طول زمان است که می‌تواند متأثر از عوامل طبیعی یا ناشی از فعالیت‌های انسانی باشد (Bast, 2010). اگر چه تغییر اقلیم، ناشی از عوامل مختلف طبیعی و غیرطبیعی است اما مطالعات مختلف ثابت نموده است که تغییرات ناشی از عوامل غیرطبیعی که در نتیجه دخالت انسان ایجاد شده‌اند، بیش‌ترین نقش را در تغییر اقلیم جهانی طی سال‌های اخیر داشته‌اند (Mavi and Tupper, 2004).

افزایش گازهای گلخانه‌ای به خصوص دی‌اکسید کربن می‌تواند موجب تغییر در دما، بارش و تابش شود. با توجه به شواهد و مطالعات بین‌المللی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم<sup>۱</sup> (IPCC)، در مورد پدیده تغییر اقلیم به نظر می‌رسد که این پدیده می‌تواند آثار

\* نویسنده مسئول: khahmadauli@ut.ac.ir

تأثیرات تغییر اقلیم بر پهنه‌بندی اقلیمی استان گلستان، از داده‌های بارش سالانه ۶۰ ایستگاه و دمای بیشینه و کمینه ۲۲ ایستگاه هواشناسی طی دوره آماری پایه ۱۹۸۲-۲۰۱۰ استفاده کردند. آن‌ها در این مطالعه از مولد داده LARS-WG بر اساس خروجی مدل HADCM3، تحت سناریوهای مختلف استفاده نمودند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم، بارش و دما در استان گلستان افزایش می‌یابد اما مقدار آن‌ها در دوره‌های مختلف متفاوت است؛ به طوری که در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۴۰)، افزایش بارش بر دما برتری دارد و باعث مرطوب‌تر شدن اقلیم‌ها می‌شود ولی در دوره اقلیم آینده دور (۲۰۷۱-۲۱۰۰) افزایش دما اثر بیشتری دارد و باعث گرم و خشک‌تر شدن اقلیم‌ها می‌شود.

(Ashofteh *et al.*, 2012) اثرات تغییر اقلیم را با استفاده از سه مدل GCM تحت یک سناریوی انتشار بر رواناب ورودی به مخزن آیدومغوش و مقدار نیاز آبی محصولات را در بخشی از منطقه آذربایجان شرقی بررسی کردند. نتایج نشان دادند که میانگین مقدار رواناب سالانه و نیاز آبی محصولات به ترتیب حدود ۰/۷ درصد کاهش و ۱۶ درصد افزایش می‌یابند.

(Tao *et al.*, 2015) با استفاده از مدل SDSM تحت سناریوهای RCP به بررسی اثرات تغییر اقلیم در حوضه رودخانه خیابک جیان چین پرداختند. نتایج نشان داد که در دوره‌های آتی، میزان تبخیر-تعرق پتانسیل در تمامی سناریوها افزایش خواهد یافت و میزان این افزایش بستگی به نوع سناریو دارد و بیشترین افزایش در سناریوی RCP8.5 مشاهده شد.

آبیاری محصولات زراعی به منابع آب در دسترس، رطوبت خاک و برنامه آبیاری وابسته است و برابر تغییرات آب و هوایی بسیار آسیب‌پذیر است. اگرچه مناطقی که آبیاری می‌شوند تنها ۱۷ درصد از کل اراضی زراعی را تشکیل می‌دهند، اما این مناطق بخش فراوانی از کل تولید را تأمین می‌کنند و تقریباً ۷۰ درصد از برداشت جهانی آب و بیش از ۹۰ درصد از آب مصرفی را به خود اختصاص داده‌اند (Doll, 2002; Wissler *et al.*, 2008).

نتیجه تحقیقات (Elgaali *et al.*, 2007) نشان داد که نیاز آبی گیاهان در نتیجه تغییرات اقلیم در برخی از مناطق مانند حوضه رودخانه آرکانزاس در جنوب شرقی کلرادو افزایش پیدا کرده است. همچنین مطالعات متعددی در رابطه با تأثیر تغییرات اقلیم بر کشاورزی جهانی و منطقه‌ای انجام شده که بیشتر این مطالعات بر برآورد تغییرات عملکرد محصول متمرکز شده‌اند (Mo *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2010; Teixeira *et al.*, 2013).

اقلیم است. با افزایش درجه حرارت و تغییرپذیری بیشتر در میزان بارش تحت شرایط تغییر اقلیم، منابع آب قابل‌دسترس کمتر می‌شوند، از این رو رقابت شدید بر سر استفاده از آب به‌ویژه در بخش کشاورزی به وجود خواهد آمد (Tao *et al.*, 2008) و مقدار آب مصرفی محصولات زراعی تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

برای بررسی اثرات تغییر اقلیم از مدل‌های اقلیمی استفاده می‌شود. این مدل‌ها شامل مجموعه معادلاتی هستند که قوانین فیزیکی حاکم بر دستگاه اقلیم را بیان می‌کنند و با ساده‌سازی روابط متقابل، فرایندهای پیچیده حاکم را شبیه‌سازی می‌کنند (Kamal and Massah Bovani, 2012). از میان مدل‌های اقلیمی، مدل‌های گردش عمومی جو<sup>۱</sup> (GCMs) که مدلی سه‌بعدی بوده و قادر به پیش‌بینی تغییرات زمانی و مکانی جو هستند، کاربرد بیشتری دارند (Hourdin *et al.*, 2006). یکی از محدودیت‌های استفاده از خروجی این مدل‌ها این است که توان تفکیک مکانی آن‌ها با دقت مورد نیاز مدل‌های منطقه‌ای تطابق ندارد و برای قابل‌استفاده نمودن این خروجی‌ها نیاز به ریزمقیاس‌نمایی می‌باشد که با روش‌های مختلفی انجام می‌گیرد.

در سال‌های اخیر محققین مختلفی به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر حوزه‌های مختلف مرتبط با منابع آب پرداخته‌اند که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. نتایج تحقیقات پژوهشگران مختلف نشان داده که تغییر اقلیم، مقدار تبخیر-تعرق و نیاز آبی گیاهان و به تبع آن مدیریت منابع آب در درازمدت را دستخوش تغییرات زیادی خواهد کرد (Goyal, 2004).

(Jamali *et al.*, 2013) عنوان کردند که کشورهای خاورمیانه از جمله ایران در مقابل تغییرات اقلیمی آسیب‌پذیر هستند. به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر هیدرولوژی حوضه کرخه، از دو مدل GCM به نام‌های مدل جفت‌شده اقلیم جهانی<sup>۲</sup> (CGCM3) و مدل جفت‌شده مرکز هادلی<sup>۳</sup> (HadCM3) و سه سناریوی انتشار استفاده شد. نتایج حاکی از آن بود که در کوتاه‌مدت، میانگین سالانه دما و رواناب به ترتیب در حدود ۰/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش و ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. این در حالی است که مقادیر میانگین سالانه بارش تغییر محسوسی ندارد اما زمان وقوع آن دچار تغییر می‌شود. در بلندمدت نیز میانگین سالانه دما ۲ الی ۴ درجه سانتی‌گراد افزایش و میانگین سالانه بارندگی و رواناب به ترتیب حدود ۱۵ تا ۱۷ درصد و ۲۵ تا ۳۲ درصد کاهش می‌یابند.

(Ghorbani *et al.*, 2017) در مطالعه‌ای به منظور بررسی

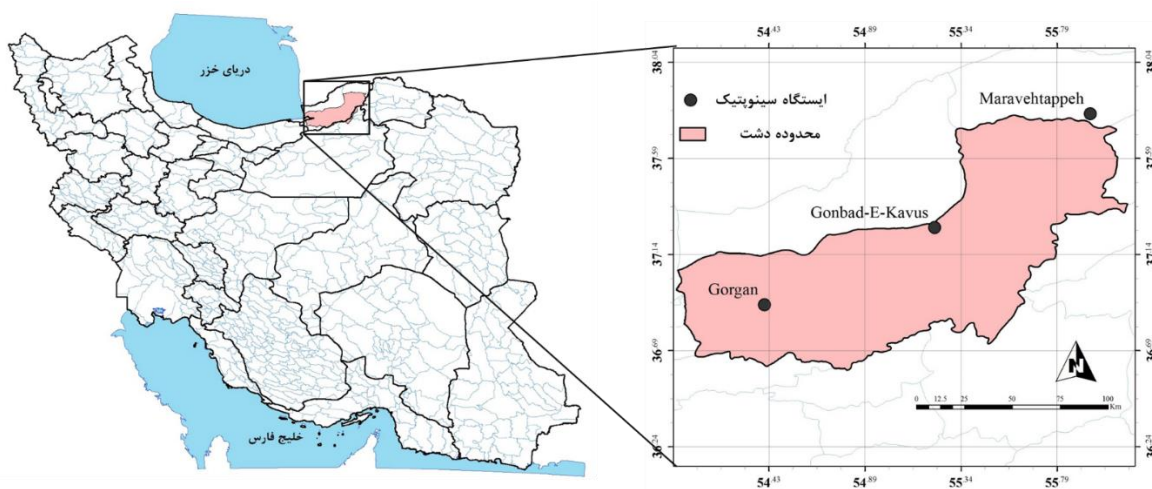
## مواد و روش‌ها

### منطقه مطالعاتی

دشت گرگان، دشتی رسوبی و هموار است که در جنوب شرقی دریای خزر در حوضه آبریز ساحلی شمالی ایران بین عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۱۶ دقیقه شرقی واقع شده و متوسط ارتفاع دشت از سطح دریا ۶۰ متر است (Shamanian *et al.*, 2006). میانگین بلندمدت بارش سالانه این دشت ۵۸۳ میلی‌متر بوده و اقلیم منطقه بر اساس طبقه‌بندی دومارتن، مرطوب است. بافت خاک غالب دشت لومی است. بر اساس آمارنامه‌های وزارت جهاد کشاورزی (۱۳۹۶-۱۳۹۰)، این استان به عنوان یکی از مهم‌ترین استان‌های تولیدکننده گندم کشور محسوب می‌شود. میانگین کل سطح زیر کشت محصولات موجود در این استان ۶۸۷۱۵۵ هکتار است که از این مقدار ۳۵۹۲۵۱ هکتار آن را اراضی آبی و ۳۲۷۹۰۴ هکتار آن را اراضی دیم شامل می‌شوند. از کل اراضی آبی این استان حدود ۲۲۴۰۰۰ هکتار آن زیر کشت غلات بوده و از این میزان به‌طور میانگین ۱۶۹۶۱۰ هکتار، زیر کشت محصول گندم است که تقریباً ۲۵ درصد کل اراضی این استان را شامل می‌شود و حجم تولید گندم در آن، سالانه به حدود ۳۱۸۲۷۹ تن می‌رسد. لذا گندم از مهم‌ترین محصولات زیر کشت در این منطقه به شمار می‌رود. میانگین بلندمدت سالانه تبخیر-تعرق، بارندگی مؤثر و نیاز آبی گندم زمستانه در این دشت برای بازه (۲۰۰۵-۱۹۸۵) میلادی به ترتیب ۶۴۱، ۱۹۲ و ۴۴۹ میلی‌متر است. شکل ۱ موقعیت دشت گرگان را در میان دشت‌ها و استان‌های کشور نشان می‌دهد.

(Yang *et al.*, 2019; Geng *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2017). مطالعاتی نیز در زمینه تغییر اقلیم و اثر آن برآورد نیاز آبی صورت گرفته است که از میان آن‌ها می‌توان به مطالعات Doll (2002) به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر نیاز آبیاری و Xing (2018) *et al.* در برآورد نیاز آبی گندم زمستانه در شرایط تغییر اقلیم در چین اشاره کرد.

با توجه به مرور منابع ملاحظه می‌شود که در مناطق مختلف، اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر-تعرق دارای ماهیت و شدت-های متفاوتی است و متعاقباً اثرات آن بر منابع آب و خاک نیز متفاوت بوده و لازم است این اثرات در مناطق مختلف بررسی شوند. از میان مدل‌های مختلف، روش فائو-پنمن-مانتیت<sup>۱</sup> (PMF-56) که هم بیان انرژی و هم تئوری آئروپنمیک را در مدل در نظر می‌گیرد، به‌عنوان مناسب‌ترین مدل در برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل شناخته شده و توسط سازمان خوار و بار جهانی<sup>۲</sup> (FAO) برای محاسبه‌ی تبخیر-تعرق پتانسیل در همه‌ی اقلیم‌ها توصیه شده است (Xu *et al.*, 2006). این روش به پارامترهای زیادی جهت محاسبه  $ET_0$  نیاز دارد؛ به خصوص در شرایط تغییر اقلیم که نیاز به برآورد این پارامترها است، طولانی-شدن روند محاسبات، استفاده از این روش را مشکل نموده است. لذا مطالعه حاضر با هدف برآورد نیاز آبی گندم زمستانه با استفاده از روش هارگریوز-سامانی، که ورودی‌های آن کمتر از روش فائو-پنمن-مانتیت است، تحت شرایط تغییر اقلیم در بازه زمانی (۲۰۲۰-۲۰۳۹)، (۲۰۴۰-۲۰۵۹)، (۲۰۶۰-۲۰۷۹) و (۲۰۹۹-۲۰۸۰) برای دشت گرگان با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های معرف این منطقه صورت گرفت.



شکل ۱- موقعیت دشت گرگان

## تغییر اقلیم

یکی از اصلی‌ترین هدف‌های مطالعه پدیده تغییر اقلیم، انجام پیش‌بینی چشم‌انداز اقلیم زمین در بخش کشاورزی و محاسبه نیاز آبی محصولات زراعی است. برای انجام یک پیش‌بینی اقلیمی سه مرحله به شرح زیر وجود دارد: مرحله اول انتخاب یک سناریو برای پیش‌بینی وضعیت زمین است. در مرحله دوم، وضعیت اقلیمی کره زمین شبیه‌سازی می‌شود؛ به این صورت که در این مرحله، رفتار اقلیمی زمین در قالب یک مدل تعریف شده و با توجه به سناریو انتخاب‌شده در مرحله پیش به عنوان شرایط اولیه در مدل، رفتار اقلیمی زمین شبیه‌سازی می‌شود. این پیش‌بینی‌ها به دلیل مقیاس مکانی مورد استفاده در مدل‌های GCM، در فواصل مکانی بزرگی انجام می‌پذیرند و نتایج آن‌ها برای مقیاس‌های کوچک‌تری، مانند حوضه آبریز، قابل‌تعمیم نیستند. برای رفع این مشکل، مرحله سوم که ریزمقیاس‌سازی است، انجام می‌شود. مجموعه مدل‌های GCM کانادایی که CanESM2 آخرین نسخه آن است، در مطالعات متعددی در منطقه خاورمیانه مورد ارزیابی و استفاده قرار گرفته و نتایج قابل‌قبولی را ارائه نموده است. به عنوان نمونه می‌توان به تحقیق (Zolghadr-Asli et al. 2019) که به تجزیه و تحلیل عدم قطعیت‌های تغییرات آب و هوا بر عملکرد سیستم‌های برق آبی پرداخته‌اند و نیز تحقیق (2017) et al. Sarzaeim که در ارتباط با پیش‌بینی رواناب تحت شرایط تغییر اقلیم با روش‌های داده‌کاوی بود، اشاره کرد. مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM) را می‌توان به عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم برای ارزیابی تغییرات اقلیمی در مقیاس محلی توصیف کرد که برای ارزیابی‌های اقلیمی از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری پایدار بهره می‌گیرد. امروزه این مدل در بسیاری از تحقیقات و بررسی‌های اقلیمی به عنوان یکی از گزینه‌های مناسب پژوهشگران محسوب می‌شود؛ تا جایی که سازمان محیط‌زیست انگلستان و ولز<sup>۱</sup> از این مدل برای انجام ارزیابی‌های تغییرات اقلیمی بهره می‌گیرد. بزرگترین مزیت این مدل این است که برخلاف مدل‌های WGEN، LARS-WG و CLIGEN که از مطرح‌ترین نمونه مدل‌های بررسی‌های اقلیمی به شمار می‌روند، به طور مستقیم از خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی جو برای ساخت سناریوهای خود استفاده می‌کند. لذا در تحقیق حاضر به منظور ریزمقیاس‌سازی داده‌های خروجی مدل کانادایی گردش عمومی (CanESM2) از روش آماری با استفاده از SDSM بهره گرفته شده است.

این کار در دو مرحله انجام شد: ابتدا در یک بازه زمانی

مشابه میان متغیرهای مشاهداتی بزرگ‌مقیاس<sup>۲</sup> (NCEP)، متغیرهای مستقل و متغیرهای مشاهداتی محلی که متغیرهای وابسته هستند، رگرسیون چندگانه برقرار شد تا بهترین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده از مجموع متغیرهای NCEP که شامل ۲۶ پارامتر مختلف است، برای متغیرهای مورد نظر مانند دما و بارش، شناسایی شوند و رابطه میان آن‌ها استخراج شد. سپس با اعمال این رابطه بر متغیرهای بزرگ‌مقیاس حاصل از مدل GCM سناریوهای مختلف انتشار در بازه زمانی آتی، مقادیر متغیرهای دما و بارش در همان بازه زمانی آتی اما در مقیاس محلی به دست آمد. در این تحقیق بخشی از داده‌ها برای انجام واسنجی (بازه ۱۹۹۹-۱۹۸۶) و بخشی دیگر برای انجام اعتبارسنجی مدل (بازه ۲۰۰۵-۲۰۰۰) و انتخاب متغیرهای مناسب و با همبستگی بالا از بین متغیرهای NCEP انتخاب شدند. برای ارزیابی مدل‌ها در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی از ضریب تعیین ( $R^2$ )<sup>۳</sup> و ضریب کارایی‌نش-ساتکلیف ( $NSE$ )<sup>۴</sup> که در روابط (۱) و (۲) ارائه شده، استفاده شد.

(رابطه ۱)

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Y_{sim,i} - \bar{Y}_{sim,i})(Y_{obs,i} - \bar{Y}_{obs,i})]^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{sim,i} - \bar{Y}_{sim,i})^2 \sum_{i=1}^n (Y_{obs,i} - \bar{Y}_{obs,i})^2}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{sim,i} - Y_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{obs,i} - \bar{Y}_{obs,i})^2} \quad (2)$$

که در آن،  $n$  تعداد داده‌های مشاهداتی،  $Y_{sim}$  خروجی شبیه‌سازی‌شده توسط مدل،  $Y_{obs}$  خروجی مشاهداتی،  $\bar{Y}_{sim}$  میانگین مقادیر خروجی شبیه‌سازی‌شده توسط مدل و  $\bar{Y}_{obs}$  میانگین مقادیر خروجی مشاهده‌شده است. دامنه تغییرات ضریب نش-ساتکلیف از  $-\infty$  تا  $+1$  بوده و مقدار بهینه این شاخص یک است. بر اساس پژوهش‌های مختلف صورت گرفته در این زمینه از جمله مطالعات (Gassman et al. 2007) اگر مقدار آن بالاتر از  $0/5$  باشد مدل شبیه‌سازی خوبی داشته است. ضریب تعیین بین صفر تا یک تغییر می‌کند و مقدار آن اگر کمتر از  $0/2$  باشد، بسیار ضعیف،  $0/2$  تا  $0/4$  ضعیف،  $0/4$  تا  $0/6$  متوسط،  $0/6$  تا  $0/8$  قوی و بیشتر از  $0/8$  بسیار قوی است (Rezaei, 2013).

داده‌های تاریخی بارش، کمینه و بیشینه دما برای ایستگاه‌های معرف این دشت شامل گرگان، گنبد و مراوه‌تپه از سایت سازمان هواشناسی کشور اخذ شد و داده‌های بزرگ‌مقیاس مدل CanESM2 از سایت مربوط به مدل (<http://climate-scenarios.canada.ca>) تهیه شد. پارامترهای موردنیاز برای محاسبه نیاز آبی گیاه در معادله هارگریوز-سامانی شامل دما، کمینه، دما بیشینه و بارش تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از

3. Coefficient of determination  
4. Coefficient of Nash - Sutcliffe

1. England and Wales Environment Agency  
2. National Centers for Environmental Prediction

بیشترین مساحت سطح زیر کشت گندم در دشت گرگان را رقم کوهدشت شامل می‌شود که بر اساس تحقیقات (Sharma *et al.*, 2004)، دمای ۵ درجه سانتی‌گراد بهترین دما برای درجه حرارت آستانه رشد این رقم از گندم است. در نتیجه در این تحقیق میزان  $T_{base}$  همین عدد در نظر گرفته شده است. با داشتن مقادیر دمای بیشینه و کمینه و همچنین طول دوره رشد می‌توان از طریق رابطه (۵) به راحتی مقدار  $GDD$  را برای گندم در منطقه مورد مطالعه به دست آورد. در این تحقیق میزان  $GDD$  برابر ۲۳۶۱ به دست آمد. در نهایت با محاسبه تعداد روزهای مورد نیاز جهت تأمین  $GDD$  بهینه، دوره رشد گیاه (DGP) در هر یک از بازه‌های در نظر گرفته‌شده در این تحقیق تحت سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در شرایط تغییر اقلیم محاسبه شده است.

در نهایت برای محاسبه نیاز آبی از رابطه (۶) استفاده شد (Ramezani Etedali *et al.*, 2019; Allen *et al.* 1998; Monteith, 1965; Monteith and Unsworth 1990):

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$CWR = 10 \times (ET_c - p_{eff})$$

که در آن:  $ET_c$  تبخیر-تعرق گیاه گندم زمستانه در دوره رشد محاسبه‌شده (میلی‌متر)،  $K_c$  ضریب گیاهی گندم زمستانه بر اساس ضرایب گیاهی موجود در سند ملی آب کشور و  $CWR$  نیاز آبی گیاه (مترمکعب بر هکتار) است.

## نتایج و بحث

نتایج پیش‌نمایی پارامترهای تغییر اقلیم دشت گرگان شامل میانگین بلندمدت ماهانه بیشینه و کمینه دما در بازه‌های زمانی (۲۰۲۰-۲۰۳۹)، (۲۰۴۰-۲۰۵۹)، (۲۰۶۰-۲۰۷۹) و (۲۰۸۰-۲۰۹۹) تحت سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در ماه‌های رشد گندم زمستانه (آذر تا خرداد) در همان طور که در جداول ۱ و ۲ مشاهده می‌شود، همه سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای به کار برده شده در این تحقیق، نشان دهنده افزایش میانگین بلند مدت ماهانه دمای بیشینه و کمینه در ماه‌های مربوط به دوره رشد گندم زمستانه در بازه‌های زمانی (۲۰۲۰-۲۰۳۹)، (۲۰۴۰-۲۰۵۹)، (۲۰۶۰-۲۰۷۹) و (۲۰۸۰-۲۰۹۹) نسبت به شرایط پایه هستند. در پیش‌نمایی میانگین بلند مدت ماهانه دمای بیشینه و کمینه در ماه‌های مربوط به دوره رشد گندم زمستانه، مقادیر حاصل از سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 به ترتیب بیشینه و کمینه میزان افزایش را نشان می‌دهند. این امر، مطابق با شرایط اولیه تعریف شده برای هر سناریو انتشار است. به عبارت دیگر، شرایط کم شدت، متعادل، و بحرانی که

مدل SDSM4.2.9 با استفاده از داده‌های مدل CanESM2 تحت سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای بازه ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ تولید شدند. سپس برای محاسبه نیاز آبی گیاه از میانگین ۲۰ ساله داده‌ها در چهار بازه زمانی (۲۰۲۰-۲۰۳۹)، (۲۰۳۹-۲۰۵۹)، (۲۰۵۹-۲۰۷۹) و (۲۰۷۹-۲۰۹۹) به صورت ماهانه استفاده شد.

## محاسبه تبخیر-تعرق و نیاز آبی

به منظور محاسبه نیاز آبی، ابتدا تبخیر-تعرق پتانسیل با استفاده از روش هارگریوز-سامانی همراه با بارش مؤثر به صورت ماهانه در بازه (۲۰۰۵-۱۹۸۶) به ترتیب با استفاده از رابطه (۳) و رابطه (۴) محاسبه شد.

معادله هارگریوز-سامانی (Hargreaves and Samani, 1985):  
(رابطه ۳)

$$ET_0 = (0.408 \times 0.0023R_a \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2}\right) + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5}$$

که در آن:  $ET_0$  تبخیر-تعرق پتانسیل (میلی‌متر بر روز)،  $T_{max}$  و  $T_{min}$  به ترتیب بیشینه و کمینه (درجه سانتی‌گراد) و  $R_a$  تابش خارج از جو (مگاژول بر مترمربع در روز) است.

برای محاسبه بارش مؤثر از روش USDA SCS استفاده شد. در این روش مقداری از باران که در طی دوره رشد یک گیاه دریافت شده و برای مصارف آن در دسترس قرار گیرد، بارش مؤثر نامیده می‌شود (Ali and Mubarak, 2017). مقدار بارش مؤثر ماهانه طبق رابطه (۴) محاسبه شد (Smith, 1992).

$$p_{eff} = \begin{cases} \frac{p(125-0.2p)}{125} & p \leq 250 \text{ mm} \\ 125 + 0.1p & p > 250 \text{ mm} \end{cases} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن:  $p$  بارش ماهانه (میلی‌متر)،  $p_{eff}$  بارش مؤثر ماهانه (میلی‌متر) است.

به منظور بیان رابطه بین طول دوره رشد<sup>۱</sup> (DGP) و دما، مفهوم درجه-روز رشد<sup>۲</sup> ( $GDD$ ) ارائه شده است (Bazgree *et al.*, 2007). بر اساس تحقیقات (Bazgree *et al.*, 2007)، بهترین شاخص پیش‌بینی مراحل رشد گندم است. مقدار  $GDD$  با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$GDD = \sum \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base} \right) \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن:  $GDD$  مقدار درجه-روز (سانتی‌گراد)،  $T_{max}$  و  $T_{min}$  درجه حرارت‌های بیشینه و کمینه روزانه (سانتی‌گراد) و  $T_{base}$  درجه حرارت آستانه رشد گیاه است که پایین‌تر از این مقدار، رشدی وجود ندارد (Bazgree *et al.*, 2007). سرانجام مقدار (DGP) از جمع تجمعی تعداد روزهای مورد نیاز برای رسیدن به  $GDD$  بهینه، به دست می‌آید.

لحاظ هر دو شاخص به کار گرفته شده، مدل از درجه اعتبار قوی و مناسبی برخوردار بوده است. در جدول ۴ نتایج پیش‌نمایی طول دوره رشد گیاه (DGP)، تبخیر-تعرق گیاه ( $ET_c$ )، بارش موثر ( $P_{eff}$ ) و نیاز آبی گیاه (CWR) در شرایط تغییر اقلیم تحت سه سناریو انتشار RCP 2.6، RCP 4.5، RCP 8.5 در بازه زمانی (۲۰۳۹-۲۰۲۰)، (۲۰۵۹-۲۰۴۰)، (۲۰۷۹-۲۰۶۰) و (۲۰۸۰-۲۰۹۹) ارائه شده است.

برای ساخت هر PCR از ابتدا توسط IPCC تعریف شده بود، در این نتایج نیز صادق است. نتایج حاصل از واسنجی مدل در دوره پایه ۱۹۸۶-۱۹۹۹ و انتخاب بهترین متغیرهای بزرگ مقیاس از بین ۲۶ متغیر پیش‌بینی‌کننده و همچنین نتایج حاصل از اعتبار سنجی در دوره ۲۰۰۰-۲۰۰۵ و با به کارگیری دو شاخص ضریب تعیین ( $R^2$ ) و ضریب کارایی نش - ساتکلیف (NSE) در جدول ۳ ارائه شده است. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود از

جدول ۱- میانگین بلندمدت ماهانه دمای کمینه در شرایط تغییر اقلیم (درجه سانتی‌گراد)

بازه زمانی	RCP	میانگین بلندمدت دمای کمینه (درجه سانتی‌گراد)					
		آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت
۲۰۳۹-۲۰۲۰	۲/۶	۲/۷	۱/۶	۲/۰	۲/۴	۱۳/۲	۱۴/۸
	۴/۵	۲/۸	۱/۹	۲/۶	۲/۸	۱۳/۴	۱۵/۲
	۸/۵	۳/۲	۲/۲	۳/۲	۳/۲	۱۵/۶	۱۶/۴
۲۰۵۹-۲۰۴۰	۲/۶	۲/۸	۱/۸	۲/۱	۲/۶	۱۳/۵	۱۵/۱
	۴/۵	۳/۰	۲/۴	۲/۹	۳/۰	۱۳/۹	۱۵/۵
	۸/۵	۳/۶	۲/۹	۳/۴	۳/۶	۱۵/۱	۱۶/۹
۲۰۷۹-۲۰۶۰	۲/۶	۲/۶	۲/۱	۲/۳	۳/۰	۱۳/۶	۱۵/۴
	۴/۵	۳/۳	۲/۵	۳/۰	۳/۹	۱۵/۴	۱۷/۴
	۸/۵	۴/۶	۳/۹	۳/۷	۴/۷	۱۵/۸	۱۷/۷
۲۰۹۹-۲۰۸۰	۲/۶	۲/۴	۲/۸	۲/۰	۳/۴	۱۳/۹	۱۶/۹
	۴/۵	۳/۹	۳/۵	۳/۳	۳/۷	۱۵/۴	۱۷/۳
	۸/۵	۵/۸	۴/۳	۴/۸	۵/۵	۱۸/۷	۱۹/۱

جدول ۲- نتایج مربوط به انتخاب تغییرهای پیش‌بینی‌کننده مؤثر انتخاب‌شده در مرحله واسنجی و نتایج اعتبارسنجی مدل

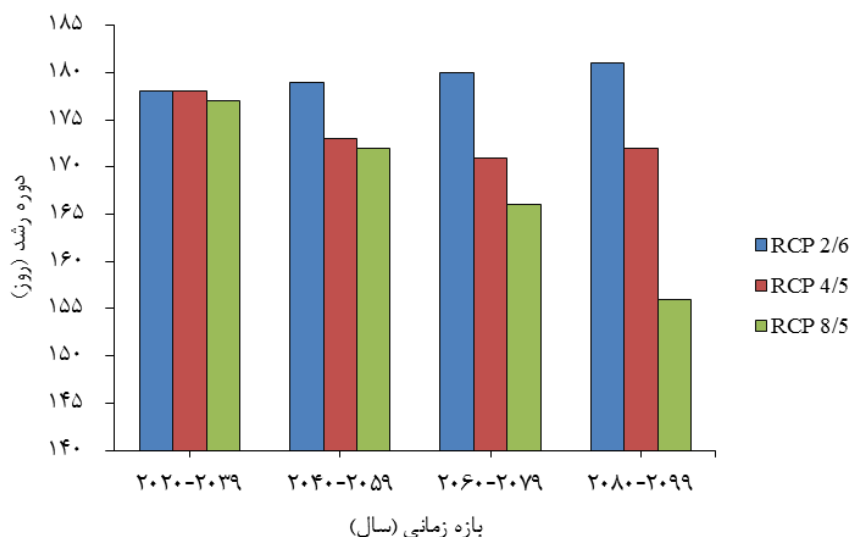
پارامتر	متغیرهای بزرگ مقیاس پیش‌بینی‌کننده مؤثر و دارای همبستگی قوی با هریک از پارامترها	$R^2$ مرحله واسنجی	$R^2$ مرحله اعتبارسنجی	(NSE)
کمینه دما	میانگین دما در نزدیکی سطح، رطوبت ویژه در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، چرخندگی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، میانگین دما در ارتفاع ۲ متری، واگرایی در سطح زمین	۰/۸۶	۰/۸۳	۰/۸۲
بیشینه دما	میانگین دما در نزدیک سطح، جهت باد در نزدیک سطح، میانگین دما در ارتفاع ۲ متری، نیروی جریان هوا در سطح زمین، چرخندگی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال	۰/۸۹	۰/۸۵	۰/۸۳
بارش	رطوبت ویژه در نزدیکی سطح، رطوبت نسبی در نزدیکی سطح، جهت باد در نزدیکی سطح، ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، چرخندگی در سطح زمین	۰/۷۸	۰/۷۳	۰/۷۲

جدول ۳- نتایج پیش‌نمایی DGP،  $ET_c$ ،  $P_{eff}$  و CWR در شرایط تغییر اقلیم تحت سناریوها در بازه‌های زمانی متفاوت

سناریو	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	۲۰۳۹-۲۰۲۰	۲۰۵۹-۲۰۴۰	۲۰۷۹-۲۰۶۰	۲۰۳۹-۲۰۲۰	۲۰۵۹-۲۰۴۰	۲۰۷۹-۲۰۶۰	۲۰۳۹-۲۰۲۰	۲۰۵۹-۲۰۴۰	۲۰۷۹-۲۰۶۰
DGP	۱۷۸	۱۷۹	۱۸۰	۱۷۸	۱۷۹	۱۸۱	۱۷۸	۱۷۹	۱۸۰
$ET_c$	۴۸۷	۵۹۵	۶۰۴	۵۵۳	۵۴۳	۵۳۹	۵۵۳	۵۴۳	۴۰۴
$P_{eff}$	۲۰۱	۱۹۲	۲۰۹	۱۹۷	۱۸۶	۱۹۳	۱۹۲	۱۸۶	۱۸۵
CWR	۲۸۶	۴۰۳	۳۹۵	۳۳۶	۳۵۷	۳۴۶	۳۳۶	۳۵۷	۲۱۹

مختلف نشان داده شده است. شکل (۲) پیش‌نمایی دوره رشد گندم زمستانه تحت سه سناریو مختلف تغییر اقلیم در دشت گرگان را نشان می‌دهد.

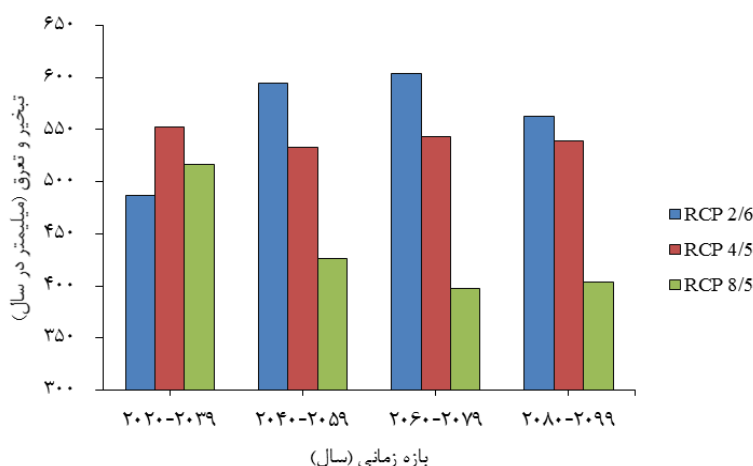
در شکل‌های (۲) الی (۵) به ترتیب روند تغییرات دوره رشد، تبخیر-تعرق، بارش مؤثر و نیاز آبی گندم زمستانه دشت گرگان در بازه‌های زمانی (۲۰۲۰-۲۰۳۹)، (۲۰۴۰-۲۰۵۹)، (۲۰۶۰-۲۰۷۹) و (۲۰۸۰-۲۰۹۹) به منظور مقایسه سناریوهای



شکل ۱- پیش‌نمایی دوره رشد گندم زمستانه تحت سه سناریو مختلف تغییر اقلیم

می‌شود، که افزایش میانگین بلندمدت بیشینه و کمینه دما در RCP های مختلف به میزان قابل توجهی موجب کاهش طول دوره رشد نسبت به حالت پایه شده است که با نتیجه تحقیق (Sadati *et al.*, 2016) که حاکی از کاهش طول دوره رشد در شرایط تغییر اقلیم است، مطابقت دارد. شکل (۳) میانگین تبخیر-تعرق گندم زمستانه تحت سه سناریو مختلف تغییر اقلیم نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۲) مشخص است، بر اساس هر سه سناریو انتشار دوره رشد نسبت به حالت پایه که ۱۹۹ روز بوده است با توجه به افزایش دما تحت شرایط تغییر اقلیم کاهش یافته است. بیشترین و کمترین میزان کاهش دوره رشد به ترتیب مربوط به RCP2.6 و RCP8.5 است. با توجه به افزایش شدیدتر میانگین بلندمدت دما تحت RCP8.5، روند کاهش طول دوره رشد بیشتر از دو سناریو دیگر است. با توجه به (شکل ۲) مشاهده



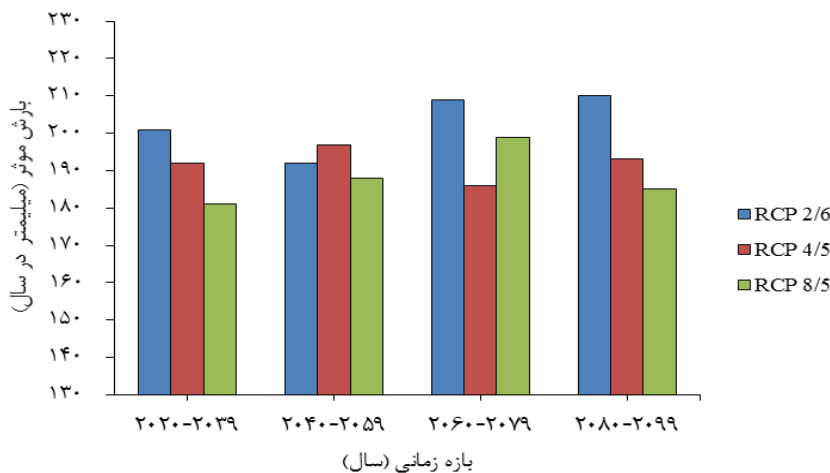
شکل ۳- میانگین تبخیر-تعرق گندم زمستانه تحت سه سناریو مختلف تغییر اقلیم

تغییرات تبخیر-تعرق گندم زمستانه هرچند ثابت نیست اما نوسان زیادی ندارد. همچنین بر اساس RCP8.5، روند تغییرات تبخیر-تعرق گندم زمستانه از بازه (۲۰۲۰-۲۰۳۹) تا بازه (۲۰۹۹-۲۰۸۰) همواره نزولی پیش‌بینی شده است. در شکل (۳) مشاهده

با توجه به شکل (۳) ملاحظه می‌شود که میزان تبخیر-تعرق گندم زمستانه تحت RCP2.6 از بازه (۲۰۳۹-۲۰۲۰) تا بازه (۲۰۶۰-۲۰۷۹) صعودی و سپس تا پایان قرن نزولی پیش‌بینی شده است. در حالی که بر اساس RCP4.5، روند



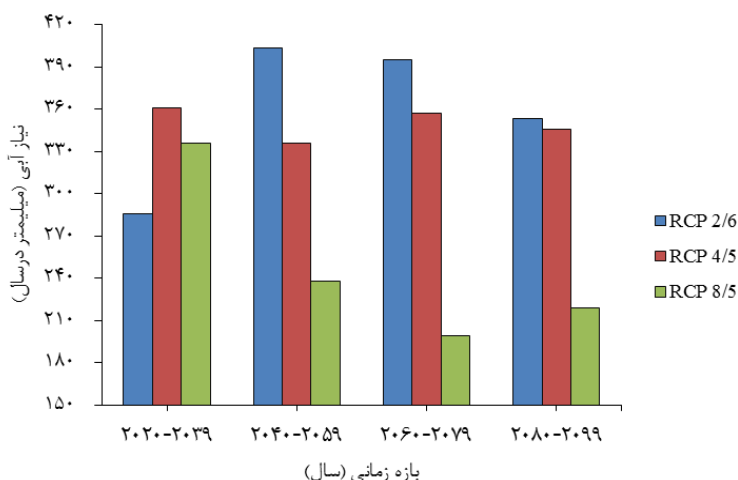
است، ممکن است تغییر محسوسی در میزان تبخیر-تعرق ایجاد کند. نتایج پژوهش‌های دیگر نیز نشان می‌دهد که مجموع تبخیر-تعرق محصول در آینده کاهش خواهد یافت (Rahmani *et al.*, 2016; Saadati *et al.*, 2016; Yarmohammadi *et al.*, 2018). حداکثر و حداقل تبخیر-تعرق برآوردشده با سه سناریو تغییر اقلیم به ترتیب ۶۰۴ و ۳۹۸ میلی‌متر در سال برای گندم زمستانه در دشت گرگان محاسبه شده است.



شکل ۴- میانگین بارش مؤثر تحت سه سناریو مختلف تغییر اقلیم

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، بر اساس RCP2.6 که سناریو حالت خوش‌بینانه است، مقدار بارش مؤثر در بازه‌های زمانی مورد مطالعه نسبت به سایر سناریوها بیشتر است و روند تغییرات آن از بازه (۲۰۲۰-۲۰۳۹) تا (۲۰۴۰-۲۰۵۹) نزولی و سپس تا پایان قرن صعودی است. بر اساس RCP4.5 تغییرات بارش مؤثر حول یک مقدار میانگین (۱۹۰ میلی‌متر) نوسان دارد و ثابت نیست و مقدار بارش مؤثر در RCP8.5 ابتدا

از بازه (۲۰۲۰-۲۰۳۹) تا (۲۰۳۹-۲۰۶۰) صعودی و سپس تا پایان قرن نزولی است. بین حداکثر و حداقل مقدار بارش مؤثر پیش‌بینی شده در سه سناریو، حداکثر ۳۰ میلی‌متر تفاوت وجود دارد. این امر نشانگر این است که سه سناریو تقریباً پیش‌بینی یکسانی از بارش در بازه (۲۰۲۰-۲۰۳۹) تا (۲۰۸۰-۲۰۹۹) برای دشت گرگان داشته‌اند. شکل (۵) روند تغییرات نیاز آبی گندم زمستانه تحت سه سناریو مختلف انتشار را نشان می‌دهد.



شکل ۵- میانگین نیاز آبی گندم زمستانه تحت سه سناریو مختلف تغییر اقلیم

در شکل‌های (۳) و (۵) نیز مشاهده می‌شود که تبخیر-تعرق و نیاز آبی گندم زمستانه روندی مشابه و تقریباً نزدیک به هم دارند. به طور کلی بر اساس (شکل ۵) می‌توان بیان نمود که مقدار نیاز آبی گندم زمستانه بر اساس هر سه سناریو انتشار در

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، بر اساس RCP2.6 که سناریو حالت خوش‌بینانه است، مقدار بارش مؤثر در بازه‌های زمانی مورد مطالعه نسبت به سایر سناریوها بیشتر است و روند تغییرات آن از بازه (۲۰۲۰-۲۰۳۹) تا (۲۰۴۰-۲۰۵۹) نزولی و سپس تا پایان قرن صعودی است. بر اساس RCP4.5 تغییرات بارش مؤثر حول یک مقدار میانگین (۱۹۰ میلی‌متر) نوسان دارد و ثابت نیست و مقدار بارش مؤثر در RCP8.5 ابتدا

(۲۰۸۰-۲۰۹۹) روند تغییرات شبیه به RCP 8.5 خواهد بود. همچنین در RCP 4.5 بارش مؤثر از روند مشخصی تبعیت نمی‌کند. نتایج اثرات تغییر اقلیم بر طول دوره رشد گندم زمستانه دشت گرگان نشان داد که مقدار این متغیر در هر سه سناریوی مورد بررسی کاهش خواهد داشت. نرخ کاهش طول دوره رشد، تحت سناریوی RCP 8.5 شدیدتر از سناریوی RCP 4.5 است اما طول دوره رشد تحت سناریوی RCP 2.6 روندی ثابت خواهد داشت. همچنین نتایج نشان داد که روند کاهش و یا افزایش طول دوره رشد، شدیداً وابسته به پارامتر دما است. میزان تبخیر-تعرق نیز با کاهش طول دوره رشد نیز کاهش می‌یابد. نتایج اثرات تغییر اقلیم بر نیاز آبی نشان داد که تحت سناریوی RCP 2.6 بیشترین مقدار نیاز آبی گندم زمستانه برابر ۴۰۳ میلی‌متر در سال و در بازه زمانی (۲۰۴۰-۲۰۵۹) و کمترین مقدار آن برابر ۲۸۶ میلی‌متر در سال و در بازه (۲۰۲۰-۲۰۳۹) خواهد بود. در سناریوی RCP 4.5 بیشترین مقدار نیاز آبی ۳۶۱ میلی‌متر در سال در بازه (۲۰۲۰-۲۰۳۹) و کمترین آن ۳۳۶ میلی‌متر در سال در بازه (۲۰۲۰-۲۰۳۹) و تحت سناریوی RCP 8.5 بیشترین مقدار نیاز آبی ۳۳۶ میلی‌متر در سال در بازه (۲۰۲۰-۲۰۳۹) و کمترین مقدار آن ۱۹۹ میلی‌متر در سال در بازه (۲۰۶۰-۲۰۷۹) پیش‌بینی شد. در کل می‌توان بیان کرد که روند نیاز آبی تقریباً از روند تغییرات تبخیر-تعرق پیروی می‌کند. نتایج تحقیق حاضر در رابطه با تأثیر شرایط احتمالی تغییر اقلیم آینده بر نیاز آبی گندم زمستانه در دشت گرگان می‌تواند ابزار سودمندی برای مدیران، برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران بخش آب به منظور مدیریت صحیح و پایدار منابع آب و در راستای توسعه پایدار کشاورزی باشد.

## REFERENCES

- Ali, M. H., and Mubarak, S. (2017). Effective rainfall calculation methods for field crops: An Overview, Analysis and New Formulation. *Asian Research Journal of Agriculture*, 1-12.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. (1998). Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO.
- Ashofteh, P. S., Haddad, O. B., and A. Mariño, M. (2012). Climate change impact on reservoir performance indexes in agricultural water supply. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(2), 85-97.
- Bast, J. L. (2010). *Seven theories of climate change*. Heartland Institute.
- Doll, P. (2002). Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective. *Climatic change*, 54(3), 269-293.
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The soil and water assessment tool:

تمام بازه‌های زمانی نسبت به حالت پایه که میزان آن ۴۴۹ میلی‌متر است، کاهش داشته است. علت اصلی این کاهش را می‌توان در کاهش میزان تبخیر-تعرق گیاه به علت کاهش طول دوره رشد گیاه دانست. نتایج پژوهش‌های Xing et al. (2018) بر روی برآورد نیاز آبی گندم زمستانه در کشور چین نیز این موضوع را تأیید می‌کند که در شرایط تغییر اقلیم، DGP، ETC و CWR در بیشتر مناطق کاهش خواهد یافت. حداکثر و حداقل نیاز آبی پیش‌بینی شده با سه سناریو تغییر اقلیم به ترتیب ۴۰۳ و ۱۹۹ میلی‌متر در سال برای گندم زمستانه در دشت گرگان برآورد شد.

## نتیجه‌گیری

نتایج کلی تجزیه و تحلیل‌های آماری اثرات تغییر اقلیم احتمالی آینده بر نیاز آبی گندم زمستانه رقم کوه‌دشت در دشت گرگان برای دوره‌های ۲۰۲۰-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۵۹، ۲۰۶۰-۲۰۷۹ و ۲۰۸۰-۲۰۹۹ تحت سه سناریوی انتشار RCP 4.5، RCP 2.6 و RCP 8.5 نشان داد که به طور کلی تحت هر سه سناریو، انتشار میانگین بلندمدت دمای ماهانه حداکثر و حداقل دشت گرگان در مقایسه با دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۰۵) افزایش خواهد یافت. نرخ افزایش این میانگین‌ها در سناریو RCP 8.5 بیشتر از RCP 4.5 و آن هم بیشتر از RCP 2.6 است که با شرایط اولیه در نظر گرفته شده برای این سناریوها توسط IPCC تطابق دارد. در ارتباط با بارش مؤثر نتایج نشان داد که تحت سناریو RCP 8.5 از بازه (۲۰۲۰-۲۰۳۹) تا (۲۰۶۰-۲۰۷۹) این متغیر روند صعودی خواهد داشت و از ۲۰۸۰ تا پایان قرن روند نزولی خواهد بود. این نتایج در RCP 2.6 به این صورت است که بارش مؤثر از بازه (۲۰۲۰-۲۰۳۹) تا (۲۰۶۰-۲۰۷۹) روند نزولی داشته و در بازه

historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211-1250.

Geng, X., Wang, F., Ren, W., and Hao, Z. (2019). Climate Change Impacts on Winter Wheat Yield in Northern China. *Advances in Meteorology*, 1-12.

Ghorbani, Kh., Bazrafshan-Daryasary, M., Meftah-Halaghi, M., Ghahraman, N. (2017). The effects of climate change on DeMartone climatic classification in Golestan province. *Journal of Water and Soil*. 47(2), 319-332. (In Farsi).

Goyal, R. K. (2004). Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India). *Agricultural Water Management*, 69(1), 1-11.

Hargreaves, G. H., Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric.*, 1, 2, pp: 96-99.

Hourdin, F., Musat, I., Bony, S., Braconnot, P., Codron,

- F., Dufresne, J. L. ... and Krinner, G. (2006). The LMDZ4 general circulation model: climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection. *Climate Dynamics*, 27(7-8), 787-813.
- Jamali, S., Abrishamchi, A., Marino, M. A., and Abbasnia, A. (2013). Climate change impact assessment on hydrology of Karkheh Basin, Iran. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*. 166(2), 93-104.
- Kamal, A.R, Massah Bovani, A.R. (2012). Comparison of future uncertainty of AOGCM-TAR and AOGCM-AR4 models in the projection of runoff basin. *Journal of earth and space physics*. 38(3), 175-188. (In Farsi).
- Liu, S., Mo, X., Lin, Z., Xu, Y., Ji, J., Wen, G., and Richey, J. (2010). Crop yield responses to climate change in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *Agricultural water management*, 97(8), 1195-1209.
- Mavi, H. S., and Tupper, G. J. (2004). *Agrometeorology: principles and applications of climate studies in agriculture*. CRC Press.
- Mo, X., Liu, S., Lin, Z., and Guo, R. (2009). Regional crop yield, water consumption and water use efficiency and their responses to climate change in the North China Plain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 134(1-2), 67-78.
- Monteith, J. L. 1965. Evaporation and environment. In Vol. 19 of 19<sup>th</sup> Symp. of the Society for Experimental Biology, 205-234. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Monteith, J. L., and Unsworth, M. H. (1990). *Principles of environmental physics*. 2nd ed. New York: Edward-Arnold.
- Parry, M. L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M., & Fischer, G. (2004). Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global environmental change*, 14(1), 53-67.
- Rahmani, M., Jami Al-Ahmadi, M., Shahidi, A., and Hadizadeh Azghandi, M. (2016). Effects of climate change on length of growth stages and water requirement of wheat (*Triticum aestivum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.) (Case study: Birjand plain). *Journal of Agroecology*, 7(4), 443-460. (In Farsi).
- Ramezani Etedali, H., Ahmadaali, K., Gorgin, F., and Ababaei, B. (2019). Optimization of the cropping pattern of main cereals and improving water productivity: application of the water footprint concept. *Irrigation and Drainage*, 68(4), 765-777.
- Rezaei, A. (2013). Concepts of statistics and probabilities. *Nashr Mashhad Publication*, 431. (In Farsi).
- Saadati, Z., Delbari, M., Panahi, M., Amiri, E., Rahimian, M., and Ghodsi, M. (2016). Evaluation of the Effects of Climate Change on Wheat Growing Period and Evapotranspiration Using the CERES-Wheat Model (Case Study: Mashhad). *Water and soil science*, 26(1), 67-79.
- Sarzaeim, P. and Bozorg-Haddad, O. (2015). Runoff prediction under climate change conditions: artificial neural network. Proceeding of The third international conference on Advances in Civil, Structural and Environmental Engineering, Zurich, Switzerland, 10-11 October.
- Sarzaeim, P., Bozorg-Haddad, O., Bozorgi, A., & Loáiciga, H. A. (2017). Runoff projection under climate change conditions with data-mining methods. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(8), 04017026.
- Shamanian, G. H., Raghimi, M., and Yakhkeshi, E. (2006). Hydrogeochemistry of groundwater in Gorgan plain: an implication for ground water contamination susceptibility. *Journal of Agriculture and natural resources science*, 13 (4), 1-10. (In Farsi).
- Sharma, A., Sood, R. K., and Kalubarme, M. H. (2004). Agro meteorological wheat yield forecast in Himachal Pradesh. 153-160.
- Smith, M. (1992). CROPWAT-A computer program for irrigation planning and management. Irrigation and Drainage Paper 46. Rome: FAO.
- Tao, F., Yokozawa, M., Liu, J., Zhang, Z., (2008). Climate-crop yield relationships at province scale in China and the impacts of recent climate trend. *Climate Res.* 38, 83-94.
- Tao, X. E., Chen, H., Xu, C. Y., Hou, Y. K., & Jie, M. X. (2015). Analysis and prediction of reference evapotranspiration with climate change in Xiangjiang River Basin, China. *Water Science and Engineering*, 8(4), 273-281.
- Teixeira, E. I., Fischer, G., Van Velthuisen, H., Walter, C., and Ewert, F. (2013). Global hot-spots of heat stress on agricultural crops due to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 206-215.
- Wang, W., Ding, Y., Shao, Q., Xu, J., Jiao, X., Luo, Y., and Yu, Z. (2017). Bayesian multi-model projection of irrigation requirement and water use efficiency in three typical rice plantation region of China based on CMIP5. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 89-105.
- Wisser, D., Frolking, S., Douglas, E. M., Fekete, B. M., Vörösmarty, C. J., and Schumann, A. H. (2008). Global irrigation water demand: Variability and uncertainties arising from agricultural and climate data sets. *Geophysical Research Letters*, 35(24), 1-5.
- Xing, W., Wang, W., Shao, Q., and Ding, Y. (2018). Estimating Net Irrigation Requirements of Winter Wheat across Central-Eastern China under Present and Future Climate Scenarios. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144(7), 05018005.
- Xu, C. Y., Gong, L., Jiang, T., Chen, D., and Singh, V. P. (2006). Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. *J. hydrol.* 327(1), 81-93.
- Yang, C., Fraga, H., van Ieperen, W., Trindade, H., &

- Santos, J. A. (2019). Effects of climate change and adaptation options on winter wheat yield under rainfed Mediterranean conditions in southern Portugal. *Climatic Change*, 154(1-2), 159-178.
- Yarmohammadi, S., Zakerinia, M., Ghorbani, K., and Soltani, A. (2018). Investigation of the effect of climate change on evapotranspiration and wheat water requirement in Bojnord region. *Water Engineering*, 10(35), 97-110. (In Farsi).
- Zolghadr-Asli, B., Bozorg-Haddad, O., and Chu, X. (2019). Effects of the uncertainties of climate change on the performance of hydropower systems. *Journal of Water and Climate Change*, 10(3), 591-609.