



Estimation of crop irrigation water demand using climatic data and Cropwat model

Parvin Golfam¹ 

1. Corresponding author, Ph.D., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: P.Golfam@stu.qom.ac.ir

(Received 11 Sep 2024, Revised 13 Dec 2024, Accepted 08 Jan 2025, Published online 25 Mar 2025) - Research Article

Extended Abstract

Background and Objective

The agricultural sector is the largest consumer of water in the world. Therefore, estimating water consumption plays a very important role in future long-term policies. This will become much more important, especially in the future years, under the climate change effect.

Methodology

In the present study, the Cropwat model has been used to estimate the irrigation water demand of various crops in the Marun basin, which is located in Khuzestan province, under the 2.6 Representative Concentration Pathway (RCP) scenario in the future time interval (2016-2040). The Cropwat model developed by the Food and Agriculture Organization of the United Nations was used to estimate the irrigation water requirements of the crops in the Marun Basin. The inputs of this model include climate data and information on each agricultural crop. First, different climate models were evaluated under the International Panel on Climate Change (IPCC) Fifth Assessment Report. The results showed that based on the error criteria, the two climate models, GFDL-CM3 and MIROC5 were proper for simulating the temperature and precipitation variables in the future time interval, respectively. In the next step, the Cropwat model has been used to estimate agricultural water irrigation demand. In the present study, for the first time, the trends in changes in reference plant evapotranspiration, effective rainfall, irrigation water requirements for the crops, and agricultural water demand for each agricultural crop in the Marun basin were calculated using the Cropwat model under the RCP 2.6 climate scenario in the time interval (2016-2040). Final water demand for crops will increase in the future compared to the baseline. Agricultural water demand for vegetables, forage crops, grain maize, oilseeds, wheat, barley, and pulses will increase by 38%, 47%, 33%, 17%, 19%, 20%, and 33%, respectively, under the RCP 2.6 scenario compared to the baseline interval. Overall, for all crops, agricultural water demand will be increased by 39% in the future time interval compared to the baseline period under the 2.6 RCP scenario.

Findings

The results show that the climatic variable of temperature will increase by 19% and the rainfall variable will decrease by 5% compared to the baseline time interval (1977-2001). The Cropwat model showed the total long-term average monthly ET₀ will increase by 30% under the RCP 2.6 scenario compared to the baseline period and the effective precipitation in the future time interval will be increased by 7% compared to the base period under the 2.6 RCP scenario. Among all agricultural crops,



forage crops by 47% increase and oilseeds by 17% increasing compared to the baseline time interval have the largest and lowest increase in water demand compared to other agricultural crops, respectively.

Conclusion

The results of the present study provide important information to planners and policymakers of water and food resources so that, by identifying water-intensive agricultural products in the Marun basin in the future years under climate change impact, present sustainable strategies such as changing the cultivation pattern based on water and food security and prevent more severe stresses in the Marun River basin.

Keywords: Agricultural irrigation water, Cropwat model, Climate change, Marun basin.

Cite this article: Golfam Parvin. Estimation of crop irrigation water demand using climatic data and Cropwat model. *Water Resources and Climate Change*. (2025); 1(1): 51-61. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.11311.1001>



برآورد تقاضای آبی محصولات زراعی با استفاده از داده‌های اقلیمی و مدل Cropwat

پروین گلفام✉

۱. دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: P.Golfam@qom.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹، تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵) - مقاله پژوهشی

چکیده

بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در سرتاسر جهان به‌شمار می‌آید. از این‌رو تخمین میزان مصرف آب نقش بسیار مهمی در سیاست‌گذاری‌های بلندمدت آینده دارد. در پژوهش حاضر از مدل Cropwat برای تخمین تقاضای آبیاری انواع محصولات کشاورزی در حوضه آبریز مارون واقع در استان خوزستان تحت سناریوی مسیر غلظت^۲ (RCP) در بازه زمانی آینده (۲۰۴۰-۲۰۱۶) استفاده شده است. بدین‌منظور، ابتدا اثرات پدیده تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی دما و بارش به‌ترتیب تحت مدل‌های اقلیمی GFDL-CM3 و MIROC5 ارزیابی می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که متغیر اقلیمی دما ۱۹ درصد افزایش و متغیر بارندگی ۵ درصد کاهش نسبت به بازه زمانی پایه (۲۰۰۱-۱۹۷۷) خواهند داشت. همچنین، نتایج مدل Cropwat نشان می‌دهند که کل آب مورد برای آبیاری محصولات کشاورزی تحت سناریوی RCP 2.6 نسبت به بازه زمانی پایه به‌میزان ۳۹ درصد افزایش خواهد یافت. از میان تمام محصولات کشاورزی، نباتات علوفه‌ای با ۴۷ درصد و دانه‌های روغنی با افزایش ۱۷ درصد نسبت به بازه زمانی پایه به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین افزایش تقاضای آب نسبت به سایر محصولات کشاورزی را خواهند داشت.

کلیدواژه‌ها: آبیاری کشاورزی، تغییر اقلیم، حوضه آبریز مارون.

استناد: گلفام پروین. برآورد تقاضای آبی محصولات زراعی با استفاده از داده‌های اقلیمی و مدل Cropwat. منابع آب و تغییر اقلیم. ۱۴۰۴؛ ۱(۱):

۵۱-۶۱. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.11311.1001>

2- Representative Concentration Pathway



۱- مقدمه

گوجه‌فرنگی، پنبه، نیشکر و برنج در مصر استفاده کردند. نتایج نشان دادند که برای مدیریت مؤثر منابع آب، برنامه‌ریزی بهینه آبیاری، انتخاب الگوی کشت مناسب و استفاده از سامانه‌های آبیاری مدرن ضروری بودند [۵].

یتیک^۹ و شن^{۱۰}، اثرات تغییر اقلیم بر محصول ذرت در شرایط آب و هوای مدیترانه‌ای را با Cropwat بررسی کردند. نتایج نشان دادند که میانگین تبخیر و تعرق در فصل رشد، به‌میزان ۰/۴۹ میلی‌متر بر روز افزایش خواهد داشت [۶]. نتایج تحقیق سولگانی^{۱۱} و همکاران با استفاده از داده‌های اقلیمی-کشاورزی و مدل Cropwat، نشان دادند که نیاز آب آبیاری و برنامه‌ریزی آبیاری محصولات کشاورزی شامل نیشکر، موز، پنبه و گندم در پاکستان در فصول گرم به‌دلیل دمای بالا و رطوبت نسبی کم، بسیار متغیر بود [۷]. مکارمی و همکاران، نیاز آبی و آب مجازی سبزی، آب مجازی صادر و واردشده برای محصولات گندم، برنج، جو و مرکبات استان مازندران را با روش‌های فائو-پنمن-مانتیت و USDA در مدل Cropwat محاسبه کردند. نتایج نشان دادند که آب مورد نیاز برنج از آب آبی تأمین شده بود، در حالی که آب مصرفی گندم، جو و مرکبات از منابع آب سبز بود [۸]. روشی^{۱۲} و سورندران^{۱۳}، با استفاده از مدل Cropwat نشان دادند که کشت برنج بی‌هوازی^{۱۴} سبب صرفه‌جویی آب به‌میزان ۳۶/۴ درصد شد [۹]. آگراوال^{۱۵} و همکاران، اثرات تغییر اقلیم بر نیاز آبی محصول و نیاز آبیاری خالص^{۱۶} (NIR) برنج را تحت RCP 4.5 با مدل Cropwat بررسی کردند. نتایج نشان دادند که NIR در سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به‌ترتیب ۴ و

منابع آب در دسترس حال کاهش هستند، این در حالی است که مصرف‌کنندگان آب به‌دلایل مختلف نظیر افزایش جمعیت، رشد شهرنشینی و تغییر سبک زندگی، گسترش و توسعه صنایع و زیرساخت‌های اقتصادی و پدیده تغییر اقلیم در حال افزایش هستند [۱]. ماجا^۲ و آیونا^۳ بیان کردند که رشد جمعیت و منابع طبیعی، در توانایی کشاورزان برای سازگاری با تغییرات اقلیمی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه نقش مهمی ایفا می‌کنند [۲]. بخش کشاورزی به‌عنوان تأمین‌کننده مواد غذایی، بزرگ‌ترین و مهم‌ترین مصرف‌کننده آب، است. بنابراین، برآورد میزان مصرف آب در بخش کشاورزی، یکی از اساسی‌ترین ارکان سیاست‌گذاری‌های پایدار آینده به‌شمار می‌آید. یکی از متداول‌ترین مدل‌های برآورد آب مورد نیاز برای آبیاری محصولات کشاورزی، مدل Cropwat است که تاکنون پژوهش‌های متعددی بر مبنای آن انجام شده است و در ادامه برخی از آنها شرح داده خواهند شد.

موسکی^۴ و همکاران، نیاز آبیاری و اثر برنامه‌ریزی آبیاری را بر کشت جاتروفاف^۵ در بوتسوانا^۶ را با مدل Cropwat ارزیابی کردند. نتایج نشان دادند که برای عملکرد رضایت‌بخش جاتروفاف، تغییر تاریخ کاشت باید هم‌زمان با بارندگی در نظر گرفته شود [۳]. ماینجی^۷ و همکاران، تبخیر و تعرق محصولات کشاورزی شامل نخود، فلفل شیرین و گوجه‌فرنگی در نیجریه را با استفاده از مدل Cropwat تخمین زدند [۴]. گابرا^۸، از مدل Cropwat برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع و نیاز خالص آبیاری برای گندم، لوبیا، سیب‌زمینی، چغندر، شنبدر، ذرت،

9- Yetik

10- Şen

11- Solgani

12- Sruthi

13- Surendran

14- Anaerobic Rice

15- Agrawal

16- Net Irrigation Requirement

2- Maja

3- Ayona

4- Moseki

5- Jatropha

6- Botswana

7- Maingi

8- Gabr

[۱۴]. نتایج تحقیقات کومار^{۲۲} و همکاران در منطقه پیندراوان^{۲۳} با مدل Cropwat نشان دادند که میانگین بهره‌وری ۲۰ ساله آب برنج برابر با ۰/۵۹ کیلوگرم بر مترمکعب بود [۱۵].

بیگلری^{۲۴} و همکاران، الگوی کشت محصولات کشاورزی را براساس نتایج مدل Cropwat تحت سه سناریوی انتشار A2، B1 و A1B و هزینه‌های نهاده‌های کشاورزی، بهره‌برداری و قیمت محصولات بهینه‌سازی کردند [۱۶]. چامپانری^{۲۵} و همکاران، پتانسیل ادغام کسر آبیاری^{۲۶} (DI) با مدل Cropwat را بررسی کردند. نتایج نشان دادند که برنامه‌ریزی DI مبتنی بر Cropwat می‌تواند یک رویکرد هوشمند در آبیاری باشد که سبب افزایش امنیت آب و بازده اقتصادی خواهد شد [۱۷].

در پژوهش حاضر، برای نخستین‌بار روند تغییرات تبخیر و تعرق گیاه مرجع، بارندگی مؤثر، آب مورد نیاز آبیاری محصولات کشاورزی و تقاضای آب کشاورزی هریک از محصولات کشاورزی در حوضه آبریز مارون تحت سناریوی اقلیمی RCP 2.6 در بازه زمانی (۲۰۱۶-۲۰۴۰) با مدل Cropwat محاسبه شدند. سد مارون، دومین سد مرتفع سنگ‌ریزه‌ای ایران و تأمین‌کننده آب کشاورزی در دشت‌های کشاورزی بهبهان، جازان، خلف‌آباد و شادگان واقع در امتداد رودخانه مارون است. کشاورزی به‌عنوان یکی از منابع اصلی درآمد ساکنین حوضه آبریز مارون است و پیش‌بینی روند تغییرات تقاضای آب در بخش کشاورزی متأثر از پدیده تغییر اقلیم در سال‌های آینده، برای سیاست‌گذاری‌های پایدار در بخش‌های آب و غذا ضروری است.

۲- مواد و روش‌ها

۹ درصد افزایش خواهند یافت [۱۰]. شن^{۱۷}، نیازهای آبی آبیاری و مقادیر تبخیر و تعرق ذرت در دو بازه زمانی آینده شامل (۲۰۲۵-۲۰۵۴) و (۲۰۹۸-۲۰۶۹) را تحت سناریوهای اقلیمی RCP 4.5 و RCP 8.5 در منطقه کوکورو^{۱۸} واقع در پاکستان با مدل Cropwat را بررسی کردند. نتایج نشان دادند که مقادیر میانگین روزانه تبخیر و تعرق در هر دو بازه زمانی آینده نسبت به بازه زمانی پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱) افزایش قابل توجهی خواهد داشت. همچنین، آب آبیاری در هر دو بازه زمانی آینده تحت هر دو سناریوی RCP 4.5 و RCP 8.5 به‌طور مستمر افزایش خواهد یافت که نشان‌دهنده اتخاذ راه‌کارهای تطبیقی پیشگیرانه برای تضمین پایداری امنیت غذایی بلندمدت است [۱۱]. حسین^{۱۹} و همکاران، نیازهای آبیاری محصولات پنبه، برنج و گندم در ناحیه پنجاب را با مدل Cropwat تعیین کردند. نتایج نشان دادند که برنج بیش‌ترین نیاز آبیاری خالص و ناخالص را به‌ترتیب با مقادیر ۷۲/۴ و ۱۰۳/۵ میلی‌متر در میان سایر محصولات داشت. همچنین به‌منظور کاهش کمبود آب، برداشت از منابع آب زیرزمینی و فن‌آوری‌های مدیریت آب ضروری بود [۱۲]. پاندی^{۲۰} و همکاران، نیاز آبیاری و زمان بهینه آبیاری را برای کشت کلم در منطقه کشمیر با مدل Cropwat محاسبه کردند. نتایج نشان دادند که در صورت تنظیم فاصله آبیاری براساس مرحله رشد، تنش رطوبتی خاک، دستیابی به بیشینه عملکرد محصول را محدود نخواهد کرد [۱۳]. سومرو^{۲۱} و همکاران، برنامه‌ریزی آبی محصولات کشاورزی موز، نیشکر، پنبه و گندم در حیدرآباد پاکستان را با مدل Cropwat تحلیل کردند. نتایج نشان دادند که سهم بارندگی در نیشکر، موز، پنبه و گندم به‌ترتیب ۱۶۳، ۴۵/۶، ۲۰/۸ و ۱۱/۳ میلی‌متر بود

22- Kumar

23- Pindrawan

24- Biglari

25- Champaneri

26- Deficit Irrigation

17- Şen

18- Cukurova

19- Hussain

20- Pandey

21- Soomro

تولید برق استفاده نمی‌شود، بنابراین، سناریوی RCP 2.6 با وضعیت میدانی منطقه تطابق بیش‌تری دارد و نتایج حاصل از آن سبب خواهد شد، نتایج دقیق‌تری برای ارزیابی اثرات پدیده تغییر اقلیم بر تقاضای آب مورد نیاز برای آبیاری محصولات کشاورزی به‌دست آید.

به‌منظور انتخاب مدل اقلیمی مناسب برای تخمین تغییرات دما و بارندگی در بازه زمانی آینده، چهار معیار خطا شامل: (۱) هم‌بستگی، (۲) خطای جذر میانگین مربعات، (۳) خطای مطلق میانگین (۴) ضریب نش-ساتکلیف در نظر گرفته شدند که به‌ترتیب از روابط (۱) تا (۴) محاسبه می‌شوند:

$$r = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_{obs} - \bar{x}_{obs})(x_{mod} - \bar{x}_{mod})]^2}{\sum_{i=1}^n (x_{obs} - \bar{x}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (x_{mod} - \bar{x}_{mod})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{obs} - x_{mod})^2}{n}} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_{obs} - x_{mod}|}{n} \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{obs} - x_{mod})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{obs} - \bar{x}_{mod})^2} \quad (4)$$

که در آنها، r = خطای هم‌بستگی، $RMSE$ = خطای جذر میانگین مربعات، MAE = خطای مطلق میانگین و NSE = ضریب کارایی نش-ساتکلیف، x_{obs} = مقدار دما و یا بارندگی مشاهداتی در بازه زمانی پایه، x_{mod} = مقدار دما یا بارندگی حاصل از مدل اقلیمی متناظر با پارامتر مشاهداتی، \bar{x}_{mod} = مقادیر متوسط دما و بارش حاصل از مدل اقلیمی، n = تعداد ماه‌ها در بازه زمانی هستند.

۲-۲- تولید سناریوهای دما و بارش تحت اثر تغییر اقلیم در بازه زمانی آینده

پس از استخراج دما و بارندگی ماهانه در بازه پایه و تغییر اقلیم از مدل‌های اقلیمی، سناریوی اقلیمی براساس روابط (۵) و (۶) و سری زمانی متغیرهای اقلیمی مطابق روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند [۱۹]:

$$\Delta Temp = \bar{T}_{mfi} - \bar{T}_{mbi} \quad (5)$$

$$\Delta Pre = \bar{P}_{mfi} - \bar{P}_{mbi} \quad (6)$$

$$TE = T_{oi} + \Delta Temp \quad (7)$$

در این بخش، گام‌های پژوهش حاضر شرح داده خواهند شد. بدین‌منظور، ابتدا اثرات تغییرات اقلیمی بر متغیرهای دما و بارندگی در حوضه آبریز مارون تحت گزارش پنجم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم^{۲۷} (IPCC) [۱۸] بررسی می‌شود. سپس با استفاده از مدل Cropwat، آب آبیاری مورد نیاز برای هر یک از محصولات کشاورزی تحت سناریوی اقلیمی RCP 2.6 در بازه زمانی آینده محاسبه خواهد شد.

۲-۱- انتخاب مدل اقلیمی مناسب

در پژوهش حاضر، برای بررسی اثرات پدیده تغییر اقلیم بر دما و بارندگی در بازه زمانی آتی از گزارش پنجم IPCC استفاده خواهد شد. در گزارش پنجم IPCC سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5، RCP 6 و RCP 8.5 براساس میزان واداشت تابشی^{۲۸} در سال ۲۱۰۰ برای ارائه غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای به‌کار گرفته شده‌اند. سناریوهای مسیر غلظت معرف (RCP) براساس متغیرهای مختلفی نظیر فن‌آوری، وضعیت اجتماعی-اقتصادی و خط‌مشی‌ها در آینده به چهار سناریو شامل: RCP 2.6، RCP 4.5، RCP 6 و RCP 8.5 تقسیم‌بندی شدند. استفاده از هر یک از سناریوهای فوق، منجر به سطح متفاوت انتشار گازهای گلخانه‌ای و اثرات اقلیمی متفاوت خواهد شد. از این‌رو، انتخاب سناریوی اقلیمی متناسب با وضعیت هر منطقه، مهم‌ترین اثر را بر برآورد چگونگی روند تغییرات عرضه و تقاضای آب خواهد داشت. در سناریوی اقلیمی RCP 2.6، به‌دلیل رشد جمعیت کم و رشد فن‌آوری‌های نوین، میزان استفاده از انرژی و سوخت‌های فسیلی کم‌تر از سایر سناریوها در نظر گرفته شده است. با توجه به آن‌که، در وضعیت فعلی تنها منبع تأمین‌کننده برق در حوضه آبریز مارون، سد و نیروگاه برق‌آبی مارون است و از سوخت‌های فسیلی برای

27- Intergovernmental Panel on Climate Change

28- Radiative Forcing

زمین در ماه t ام (m/s) ؛ γ = ثابت سایکرومتری^{۳۱} در ماه t ام $(KPa/^\circ C)$ ، هستند.

بهمنظور تعمیم نتایج محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع به هریک از محصولات کشاورزی، تبخیر و تعرق گیاه مرجع در ضریب گیاهی هر محصول ضرب شده و نیاز آبی هریک از محصولات از رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$WatReq_t = KC_t * ET_0 \quad (10)$$

که در آن، $WatReq_t$ = نیاز آبی محصول در ماه t ام $(mm/month)$ ؛ و KC_t = ضریب گیاهی محصول مورد نظر در ماه t ام (بدون واحد) هستند.

پس از محاسبه نیاز آبی هریک از محصولات کشاورزی، بارندگی مؤثر از رابطه (۱۱) حاصل می‌شود:

$$PreEff = \begin{cases} \frac{Pre}{125} (125 - 0.2Pre), & IF \text{ Pre} < 250mm \\ 125 + 0.1 \text{ Pre}, & IF \text{ Pre} > 250mm \end{cases} \quad (11)$$

که در آن، $PreEff$ = بارندگی مؤثر در ماه t ام (mm) و Pre = بارندگی در هر ماه است.

در گام نهایی، کل تقاضای آب در بخش کشاورزی،

از رابطه (۱۲) به دست می‌آید:

$$WD = \sum_{i=1}^{365} (ET_0 * KC_t - PreEff) \quad (12)$$

که در آن، WD = حجم تقاضای آب در بخش کشاورزی $(10^6 m^3)$ ؛ A = سطح زیر کشت (ha) هستند.

۳- مورد مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر، حوضه آبریز مارون واقع در استان خوزستان در جنوب غرب کشور ایران با مساحت ۳۸۰۱ کیلومتر مربع، متعلق به حوضه زهره-جراحی است [۲۱]. سد مارون، دومین سد مرتفع سنگ‌ریزه‌ای ایران و تأمین‌کننده آب کشاورزی در دشت‌های کشاورزی بهبهان، جایزان، خلف‌آباد و شادگان به ترتیب با مساحت‌های ۱۳۵۰۰ هکتار، ۶۵۰۰ هکتار،

$$PE = P_{oi} + \Delta Pre \quad (8)$$

که در آن، $\Delta Temp$ و ΔPre = میانگین بلندمدت دما و بارندگی برای ماه t ام؛ \bar{T}_{mfi} و \bar{P}_{mfi} = میانگین بلندمدت دما و بارندگی شبیه‌سازی شده توسط مدل اقلیمی در بازه زمانی آتی برای ماه t ام؛ \bar{T}_{mbi} و \bar{P}_{mbi} = میانگین بلندمدت و بارندگی شبیه‌سازی شده در بازه زمانی پایه برای ماه t ام؛ T_{oi} و P_{oi} = سری زمانی دما و بارندگی مشاهداتی برای ماه t ام؛ TE و PE = سری زمانی دما و بارندگی حاصل از پدیده تغییر اقلیم در بازه آتی برای ماه t ام هستند.

۲-۳- مدل Cropwat

در پژوهش حاضر، مدل Cropwat توسعه یافته توسط سازمان خوارو بار جهانی^{۲۹} (FAO) [۲۰] برای تخمین آب آبیاری مورد نیاز محصولات کشاورزی در حوضه آبریز مارون به کار گرفته شد. ورودی‌های این مدل شامل داده‌های اقلیمی و اطلاعات هریک از محصولات کشاورزی است. مقدار تبخیر-تعرق گیاه مرجع در مدل Cropwat براساس معادله فائو-پنمن-مانتیث^{۳۰} از رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (RN - G) + [\gamma \cdot \frac{900}{T + 273} U_2 (e_{ai} - e_{di})]}{\Delta + \xi (1 + 0.34 U_2)} \quad (9)$$

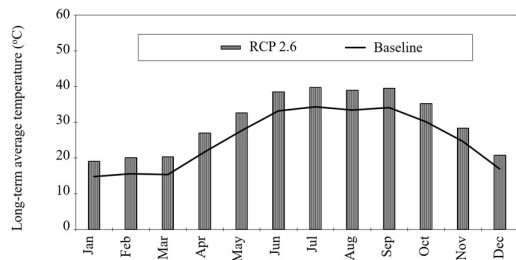
که در آن، ET_0 = تبخیر و تعرق گیاهان مرجع یا تبخیر و تعرق پتانسیل در ماه t ام $(mm/month)$ ؛ Δ = شیب فشار بخار اشباع با دما در ماه t ام $(KPa/^\circ C)$ ؛ RN = شار تشعشع خالص در سطح زمین در ماه t ام $(10^6 J/m^2/month)$ ؛ G = شار گرمایی در ماه t ام $(10^6 J/m^2/month)$ ؛ $(e_{ai} - e_{di})$ = کمبود فشار بخار اشباع در ماه t ام (KPa) ؛ T = متوسط دمای هوا در طول بازه $(^\circ C)$ ؛ U_2 = سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح

29- Food and Agriculture Organization of the United Nations

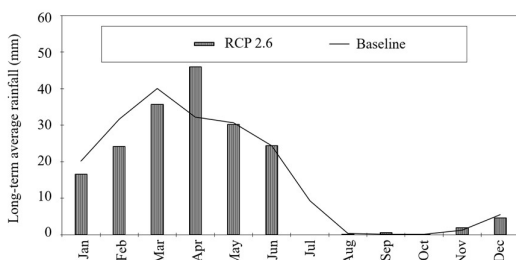
30- Monteith-Penman-Fao

31- Psychrometer

کشاورزی از جمله میزان تقاضای آب در بازه زمانی آینده اثر خواهد گذاشت که در ادامه شرح داده خواهند شد.



(a)



(b)

Figure 1. Trends in changes in (a) temperature and (b) rainfall over the future period

شکل ۱- روند تغییرات (الف) دما و (ب) بارندگی در بازه زمانی آینده

۴-۲- نتایج مدل Cropwat

در این بخش، نتایج حاصل از مدل Cropwat شرح داده خواهد شد. ابتدا، تبخیر و تعرق گیاه مرجع در هر ماه از بازه زمانی پایه (۱۹۷۷-۲۰۰۱) براساس معادله فائو-پنمن-مانیتیت محاسبه شد. یکی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده در برنامه‌ریزی دقیق آبیاری، محاسبه تبخیر و تعرق گیاه در طول دوره رشد است. هم‌چنین این پارامتر در تعیین عملکرد محصول، فیزیولوژی گیاهی و تعیین خشک‌سالی بسیار کاربردی است.

در گام بعدی، با قرار دادن مقادیر ماهانه دمای آینده در معادله ET_0 مقدار تبخیر و تعرق در بازه زمانی آینده تحت سناریوی RCP 2.6 به‌دست آمد. در جدول ۱، میانگین بلندمدت ماهانه تبخیر و تعرق گیاه مرجع در بازه

۲۲۰۶۵ هکتار و ۸۱۹۵ هکتار واقع در امتداد رودخانه مارون است. سایر اهداف ساخت و بهره‌برداری از سد مارون شامل تأمین انرژی برق‌آبی بخش خانگی ساکنان شهرها و کنترل سیلاب هستند.

رودخانه مارون با طول ۴۲۲ کیلومتر در امتداد شرق به غرب جریان دارد. حجم سد مارون برابر با ۱۲۰۰۰۰۰۰۰۰ میلیون مترمکعب است. محصولات کشاورزی [۲۲] در این حوضه شامل: (۱) جالیز و سبزیجات شامل خیار، گوجه، هندوانه و خربزه، (۲) نباتات علوفه‌ای شامل یونجه و شبدر، (۳) غلات شامل گندم، جو و ذرت دانه‌ای، (۴) دانه‌های روغنی شامل کنجد، و حبوبات شامل باقلا و لوبیا چشم‌بلبلی است.

۴-۳- بحث و بررسی نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از مدل‌های اقلیمی و مدل Cropwat بخش ۲ برای حوضه آبریز مارون شرح داده خواهد شد.

۴-۱- روند تغییرات دما و بارندگی در بازه زمانی آینده

پس از محاسبه معیارهای خطا برای مدل‌های متعدد اقلیمی موجود در گزارش پنجم اقلیمی، مدل‌های GFDL-CM3 و MIROC5 به‌ترتیب برای تولید سناریوهای اقلیمی دما و بارندگی انتخاب شدند. ضرائب r ، MAE ، $RMSE$ و NSE برای مدل GFDL-CM3 به‌ترتیب ۰/۹۹/۵، ۲/۱۳، ۲/۱۳ و ۰/۹۶ و برای مدل MIROC5 به‌ترتیب ۰/۷۴/۹۱، ۱۰/۷۹، ۷/۵۷ و ۰/۵۴ بودند که بهترین عملکرد را در میان سایر مدل‌های مدل‌های اقلیمی داشتند.

روند تغییرات دما و بارندگی تحت سناریوی RCP 2.6 در بازه زمانی آینده نسبت به بازه زمانی پایه در شکل ۱ آورده شده است.

مطابق شکل ۱، میانگین بلندمدت ماهانه دما تحت سناریوی RCP 2.6 نسبت به بازه زمانی پایه ۱۹ درصد افزایش و بارندگی ۵ درصد کاهش خواهد داشت. افزایش دما و کاهش بارندگی، بر ویژگی‌های مهم محصولات

بارندگی تحت سناریوی RCP 2.6 رخ خواهد داد که در نتیجه آن بیشینه تبخیر و تعرق در بازه زمانی آینده نیز در ماه ژولای با مقدار ۳۳۹/۳ میلی‌متر رخ خواهد داد. بنابراین، با افزایش دما و به دنبال آن، افزایش تبخیر، آب مورد نیاز برای آبیاری گیاهان افزایش خواهد یافت. روند تغییرات بارندگی مؤثر در بازه زمانی پایه و بازه زمانی آینده تحت سناریوی RCP 2.6 در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- روند تغییرات بارندگی مؤثر

Table 2. Trend of changes in effective rainfall

Month	Effective rainfall (mm)	
	Baseline	Scenario RCP 2.6
Jan	39.1	33.4
Feb	48.6	38.3
Mar	63.3	43.2
Apr	66.5	44.8
May	50.2	38.5
Jun	31.3	33.3
Jul	20.8	28.6
Aug	14.8	29.0
Sep	11.2	30.9
Oct	9.8	35.6
Nov	16.7	35.3
Dec	24.1	34.9

مطابق جدول ۲، میانگین بلندمدت ماهانه بارش مؤثر در بازه زمانی پایه (۲۰۰۱-۱۹۷۷) و در بازه زمانی آینده (۲۰۴۰-۲۰۱۶) تحت سناریوی RCP 2.6 در ماه آوریل بیشینه است. کمینه بارش مؤثر در بازه زمانی پایه در ماه اکتبر و در بازه زمانی آینده در ماه جولای رخ خواهد داد. مقدار بارش مؤثر در بازه زمانی آینده نسبت به بازه زمانی پایه تحت سناریوی RCP 2.6، به میزان ۷ درصد افزایش خواهد یافت. با توجه به آن که، بارش مؤثر مقدار بارندگی است که برای تأمین نیاز آبی گیاه در نظر گرفته می‌شود، افزایش مقدار آن تحت سناریوی RCP 2.6 بیانگر آن است که در حوضه آبریز مارون، آب مورد نیاز

زمانی پایه و آینده تحت سناریوی RCP 2.6 آورده شده است.

جدول ۱- روند تغییرات تبخیر و تعرق گیاه مرجع

Table 1. Trend of changes in evapotranspiration of the reference crop

Month	Reference plant evapotranspiration (mm)	
	Baseline	Scenario RCP 2.6
Jan	47.6	110.0
Feb	87.2	121.2
Mar	101.4	122.4
Apr	163.2	192.1
May	240.1	255.5
Jun	259.9	323.8
Jul	298.7	339.3
Aug	311.8	330.6
Sep	256.9	336.7
Oct	168.0	285.0
Nov	123.4	207.5
Dec	57.2	127.7

مطابق جدول ۱، مجموع میانگین بلندمدت ماهانه ET_0 تحت سناریوی RCP 2.6 نسبت به بازه زمانی پایه ۳۰ درصد، افزایش خواهد یافت. افزایش تبخیر و تعرق به دلیل افزایش دما در بازه زمانی آینده است. بیشینه تبخیر و تعرق در بازه زمانی پایه در ماه آگوست رخ داده است، در حالی که در بازه زمانی آینده در ماه ژولای رخ خواهد داد. این امر نشان‌دهنده حساسیت محصولات کشاورزی حوضه آبریز مارون به تغییرات دما است، به نحوی که این تغییرات در فصل تابستان شدیدتر رخ خواهد داد. پارامترهای اقلیمی، زنجیره‌ای از متغیرهای بهم پیوسته هستند، به طوری که تغییر در یکی از متغیرها، تغییرات به نسبت مشابهی را در سایر متغیرها ایجاد خواهد کرد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در حوضه آبریز مارون، در ماه ژولای بیشینه دما و کمینه

زمانی پایه به ترتیب ۳۷ درصد در ماه اکتبر و ۳۸ درصد در ماه نوامبر افزایش خواهند یافت.

به طور کلی میانگین آب آبیاری سالانه گندم، جو، حبوبات، دانه‌های روغنی، ذرت دانه‌ای، نباتات علوفه‌ای و جالیز و سبزی تحت سناریوی RCP 2.6 نسبت به بازه زمانی پایه به ترتیب، ۱۶، ۱۷، ۳۱، ۱۴، ۲۵، ۳۲ و ۲۸ درصد افزایش خواهد یافت.

روند تغییرات نیاز آبیاری محصولات در بازه زمانی پایه و بازه زمانی آینده مشابه هستند و بنابراین نیاز به تغییر در الگوی رهاسازی آب از مخزن سد برای تأمین آب مورد نیاز محصولات کشاورزی وجود نخواهد داشت.

پس از محاسبه آب آبیاری محصولات کشاورزی در هر ماه، تقاضای آب کشاورزی براساس سطح زیرکشت هر محصول محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- تقاضای آب کشاورزی محصولات کشاورزی

Table 3. Agricultural water demand of agricultural crops

Crop	Agricultural water demand (10^6 m^3)	
	Baseline	Scenario RCP 2.6
Vegetables	1839.5	2555.6
Forage crops	118.6	174.5
Grain corn	786.9	1054.3
Oilseeds	177.6	207.9
Wheat	1983.4	2365.8
Barley	88.5	117.8
Beans	5806.3	7453.7

مطابق جدول ۳، تقاضای نهایی آب برای محصولات کشاورزی در بازه زمانی آینده نسبت به بازه زمانی پایه افزایش پیدا خواهد کرد. تقاضای آب کشاورزی برای جالیز و سبزی، نباتات علوفه‌ای، ذرت دانه‌ای، دانه‌های روغنی، گندم، جو و حبوبات در بازه زمانی آینده تحت سناریوی RCP 2.6 نسبت به بازه زمانی پایه به ترتیب، ۳۸، ۴۷، ۳۳، ۱۷، ۱۹، ۲۰ و ۳۳ درصد افزایش خواهند یافت.

برای حفظ رطوبت خاک افزایش خواهد یافت. همچنین، نتایج نشان‌دهنده آن هستند که ارتباط بسیار قوی و مستقیم میان تغییرات پارامترهای اقلیمی دما و بارش و نیز بارندگی مؤثر وجود دارد. بنابراین در برنامه‌ریزی آبیاری محصولات کشاورزی در بازه زمانی آینده، سهم بارش‌های جوی کاهش و بیش‌تر تأمین آب از طریق رهاسازی از سد صورت خواهد گرفت.

میانگین بلندمدت ماهانه آب مورد نیاز آبیاری محصولات محاسبه شد که نتایج آن در شکل ۲ آورده شده است.

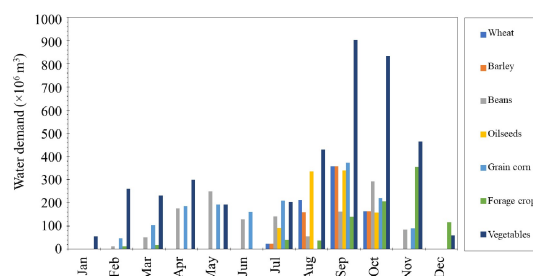


Figure 2. Long-term average monthly crop irrigation water demand per month

شکل ۲- میانگین بلندمدت ماهانه تقاضای آب آبیاری محصولات در هر ماه

شکل ۲، نشان‌دهنده توزیع زمانی و نیاز آبیاری هر یک از گروه‌های محصولات کشاورزی در بازه زمانی آینده تحت سناریوی RCP 2.6 است. مطابق شکل ۲، بیشینه نیاز آبیاری برای محصولات گندم، جو، دانه‌های روغنی، ذرت دانه‌ای، مجموعه محصولات جالیز و سبزی در ماه سپتامبر رخ می‌دهد، اما برای نباتات علوفه‌ای در ماه نوامبر و حبوبات در ماه اکتبر رخ می‌دهد.

مطابق شکل ۲، بیشینه آب آبیاری محصولات گندم، جو، دانه‌های روغنی، ذرت دانه‌ای و جالیز و سبزی تحت سناریوی RCP 2.6 نسبت به بازه زمانی پایه در ماه سپتامبر، به ترتیب ۲۰، ۲۱، ۲۰، ۲۱ و ۱۸ درصد افزایش خواهد یافت. همچنین، بیشینه آب آبیاری حبوبات و نباتات علوفه‌ای تحت سناریوی RCP 2.6 نسبت به بازه

شبیه‌سازی متغیرهای دما و بارندگی در بازه زمانی آینده مناسب بودند. نتایج مدل‌های اقلیمی نشان دادند که دما در بازه زمانی آینده تحت سناریوی RCP 2.6، ۱۹ درصد افزایش و بارش ۵ درصد نسبت به بازه زمانی پایه کاهش خواهد یافت.

نتایج مدل Cropwat نشان دادند که تبخیر و تعرق محصولات کشاورزی در بازه زمانی آینده تحت سناریوی RCP 2.6 افزایش و بارش مؤثر به‌عنوان مهم‌ترین عامل برای رشد محصولات کشاورزی کاهش خواهد یافت. تبخیر و تعرق بخش مهمی از چرخه آب‌شناسی به‌شمار می‌آید و عامل بسیار اثرگذاری بر مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی آبیاری تولیدات کشاورزی محسوب می‌شود.

هم‌چنین، براساس نتایج مدل Cropwat، تقاضای آب کشاورزی برای تمام محصولات در بازه زمانی آینده نسبت به بازه زمانی پایه افزایش خواهد یافت. در مجموع تقاضای آب کل محصولات کشاورزی در بازه زمانی آینده (۲۰۱۶-۲۰۴۰) نسبت به بازه زمانی پایه تحت سناریوی RCP 2.6، به‌ترتیب ۳۹ درصد افزایش خواهد یافت.

نتایج حاصل از پژوهش حاضر، اطلاعات مهمی در اختیار برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران منابع آب و غذا قرار می‌دهد تا از طریق شناسایی محصولات کشاورزی آب‌بر در حوضه آبریز مارون در سال‌های آینده تحت اثر پدیده تغییر اقلیم، بتوانند راه‌کارهای پایدار نظیر تغییر الگوی کشت مبتنی بر تأمین امنیت آب و غذا ارائه کنند و از ایجاد تنش‌های شدیدتر محتمل در این حوضه آبریز پیشگیری کنند.

کمینه افزایش تقاضای آب در بازه زمانی آینده نسبت به بازه زمانی پایه مربوط به دانه‌های روغنی یعنی دانه کنجد است، در حالی که نباتات علوفه‌ای شامل شبدر و یونجه بیشینه افزایش تقاضای مصرف آب تحت سناریوی RCP 2.6 را دارند.

به‌طور کلی برای تمام محصولات کشاورزی، تقاضای آب بخش کشاورزی در بازه زمانی آینده نسبت به بازه زمانی پایه تحت سناریوهای RCP 2.6، ۳۹ درصد افزایش خواهد یافت.

۵- نتیجه‌گیری

اثرات پدیده تغییر اقلیم در ترکیب با رشد مداوم جمعیت، بخش کشاورزی را بیش از پیش آسیب‌پذیر ساخته است. آسیب‌پذیر بودن بخش کشاورزی، به‌معنای شکننده‌تر شدن وضع معیشتی است که می‌تواند آغازگر بحران‌های اجتماعی-اقتصادی باشد. با توجه به وسعت حوضه مارون و تکیه بر منابع آب برای تولید غذا و انرژی، برنامه‌ریزی برای تولید برق از نیروگاه برق‌آبی مارون و به‌طور هم‌زمان، تأمین آب کافی برای آبیاری محصولات کشاورزی، نیازمند بررسی تقاضای آب بخش کشاورزی تحت اثر پدیده تغییر اقلیم در سال‌های آینده است.

در پژوهش حاضر، روند تغییرات آب آبیاری محصولات کشاورزی منطقه در حوضه آبریز مارون تحت اثرات پدیده تغییر اقلیم ارزیابی شد. ابتدا مدل‌های مختلف اقلیمی تحت گزارش پنجم IPCC ارزیابی شدند. نتایج نشان دادند که براساس معیارهای خطا، دو مدل اقلیمی GFDL-CM3 و MIROC5 به‌ترتیب برای

Declarations

- **Ethical Approval**
 - The paper is not currently being considered for publication elsewhere. The author has been personally and actively involved in substantial work leading to the paper, and will take public responsibility for its content.
- **Competing interests**
 - Conflict of Interest - None
- **Availability of data and materials**
 - Data will be made available on the request.
- **Authors Contributions**

Parvin Golfam developed the theory and performed the computations and verified the analytical methods. Parvin Golfam wrote the manuscript.

References

- [1] Sabale R, Venkatesh B, Jose M. Sustainable water resource management through conjunctive use of groundwater and surface water: A review. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2022 Nov 11; 8 (17). doi: **10.1007/s41062-022-00992-9**.
- [2] Maja MM, Ayona SF. The impact of population growth on natural resources and farmers' capacity to adapt to climate change in low-income countries. *Earth Systems and Environment*. 2021 Mar 16; 5, 271-283. doi: **10.1007/s41748-021-00209-6**.
- [3] Moseki O, Murray-Hudson M, Kashe K. Crop water and irrigation requirements of *Jatropha curcas* L. in semi-arid conditions of Botswana: Applying the CROPWAT model. *Agricultural Water Management*. 2019 Nov 20; 225, 105754. doi: **10.1016/j.agwat.2019.105754**.
- [4] Mainigi S, Ndiiri J, Mati B. Estimation of crop water requirements for Garden Pea, Sweet Pepper and Tomato using the CropWAT model in Maragua Watershed, Murang'a County, Kenya. *International Journal of Agricultural Science*. 2020; 5: 112-123.
- [5] Gabr, ME-S. Management of irrigation requirements using FAO-CROPWAT 8.0 model: A case study of Egypt. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2022 Sep 6; 8: 3127-3142. doi: **10.1007/s40808-021-01268-4**.
- [6] Yetik AK, Şen B. Evaluation of the impacts of climate change on irrigation requirements of maize by CROPWAT model. *Journal of Crop Health*. 2022 Oct 10; 75: 1297-1305. doi: **10.1007/s10343-022-00751-x**.
- [7] Solgani GSh, Shah SA, Alharbi RS, Panhwar S, Keerio HA, Kim T-W, Memon JA, Bughio AD. Investigation of irrigation water requirements for major crops using CROPWAT model based on climate data. *Water*. 2022 Agu 21; 14(16), 2578. doi: **10.3390/w14162578**.
- [8] Makaremi M, Moradirad A, Ghomi F. Water crisis management strategy through investigation of virtual water using CROPWAT software. *Journal of Water & Wastewater Science and Engineering*. 2022 Apr; 7(1): 23-33. doi: **10.22112/JWWSE.2021.256319.1224** [In Persian].
- [9] Sruthi P, Surendran U. Evaluation of nutrient management and method of planting on crop productivity of aerobic rice and estimating the water saving in aerobic using FAO-CROPWAT model. *Paddy and Water Environment*. 2023 Jun 19; 21: 467-477. doi: **10.1007/s10333-023-00941-x**.
- [10] Agrawal A, Srivastava PK, Tripathi VK, Maurya S, Sharma R, D. J. Sh. Future projections of crop water and irrigation water requirements using a bias-corrected regional climate model coupled with CROPWAT. *Water and Climate Change*. 2023 Mar 13; 14 (4), 1147-1161. doi: **10.2166/wcc.2023.349**.
- [11] Şen B. Determining the changing irrigation demands of maize production in the Cukurova Plain under climate change scenarios with the CROPWAT model. *Water*. 2023 Dec 7; 15(24), 4215. doi: **10.3390/w15244215**.
- [12] Hussain S, Mubeen M, Nasim W, Fahad Sh, Ali M, Ehsan MA, Reza A. Investigation of irrigation water requirement and evapotranspiration for water resource management in Southern Punjab, Pakistan. *Sustainability*. 2023 Jan 17; 15(3): 1768. doi: **10.3390/su15031768**.
- [13] Pandey Y, Dadhich SM, Singh PK. Estimating irrigation scheduling for Cabbage (*Brassica oleracea*) using the CROPWAT 8.0 Model in the temperate region of Kashmir. *Journal of Community Mobilization and Sustainable Development*. 2023 Sep 3; 18(3): 1031-1038. doi: **10.5958/2231-6736.2023.00053.4**.
- [14] Soomro Sh, Solangi GhSh, Siyal AA, Golo A, Bhatti NB, Soomro AGh, Memon AH, Panhwar S, Keerio HA. Estimation of irrigation water requirement and irrigation scheduling for major crops using the CROPWAT model and climatic data. *Water Practice & Technology*. 2023 Mar 1; 18(3): 685-700. doi: **10.2166/wpt.2023.024**.
- [15] Kumar F, Sinha J, Jangre N. Rice water productivity mapping for Pindrawan Command Area using CROPWAT 8.0 Model and GIS. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2024 Mar; 23(1): 79-87. doi: **0.5958/2455-7145.2024.00009.6**.

- [16] Biglari N, Sayari N, Bakhtiari B, Madadi MR. A nonlinear mathematical model integrated with the CROPWAT decision support tool to optimize cropping patterns under different climate conditions. *Journal of Water and Climate change*. 2024 Nov 29; doi: **10.2166/wcc.2024.418**.
- [17] Champaneri DD, Desai KD, Ahlawat TR, Shrivastava A, Pampaniya NK. Assessment of CROPWAT 8.0 model accuracy under deficit irrigation scheduling: A sustainable path toward smart water supply. *Water Supply*. 2024 Sep 18; 24(10): 3423-3437. doi: **10.2166/ws.2024.208**.
- [18] IPCC. Summary for policymakers. *Climate change 2013. The science of climate change*. In Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2013.
- [19] Ashofteh P-S, Bozorg-Haddad O, Mariño MA. Climate change impact on reservoir performance indexes in agricultural water supply. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2012 Jul 27; 139(2): 85-97, doi: **10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000496**.
- [20] FAO. *Cropwat 8.0 for windows user guide*. Rome. Italy. 2009.
- [21] Iran Water Resources Management Company Website, 2016.
- [22] Jahad Agricultural Organization of Khuzestan Website, 2016.