



Evaluation of the Influence of Different ET_0 Estimation Methods in Simulation of Wheat Actual Evapotranspiration and Biomass by AquaCrop Model

H. Ramezani Etedali^{1*}, F. Safari²

Received: 22-05-2022

Revised: 21-12-2022

Accepted: 24-12-2022

Available Online: 24-12-2022

How to cite this article:

Ramezani Etedali, H., & Safari, F. (2023). Evaluation of the Influence of Different ET_0 Estimation Methods in Simulation of Wheat Actual Evapotranspiration and Biomass by AquaCrop Model. *Journal of Water and Soil* 37(1): 1-14. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2022.76839.1171>

Introduction

Evaluation of plant models in agriculture has been done by many researchers. The purpose of this work is to determine the appropriate plant model for planning and predicting the response of crops in different regions. This action is made it possible to study the effect of various factors on the performance and efficiency of plant water consumption by spending less time and money. Since the most important agricultural product in Iran is wheat, so proper management of wheat fields has an important role in food security and sustainable agriculture in the country. The main source of food for the people in Iran is wheat and its products, and any action to increase the yield of wheat is necessary due to limited water and soil resources. Evapotranspiration is a complex and non-linear process and depends on various climatic factors such as temperature, humidity, wind speed, radiation, type and stage of plant growth. Therefore, in the present study, by using daily meteorological data of Urmia, Rasht, Qazvin, Mashhad and Yazd stations, the average daily evapotranspiration values based on the results of the FAO-Penman-Monteith method are modeled and the accuracy of the two methods temperature method (Hargreaves-Samani and Blaney-Criddle) and three radiation methods (Priestley-Taylor, Turc and Makkink) were compared with FAO-56 for wheat.

Materials and Methods

The present study was conducted to evaluate the accuracy and efficiency of the AquaCrop model in simulation of evapotranspiration and biomass, using different methods for estimation reference evapotranspiration in five stations (Urmia, Qazvin, Rasht, Yazd and Mashhad). Four different climates (arid, semi-arid, humid and semi-humid) were considered in Iran for wheat production. The equations used to estimate the reference evapotranspiration in this study are: Hargreaves-Samani (H.S), Blaney-Criddle (B.C), Priestley-Taylor (P.T), Turc (T) and Makkink (Mak). Then, the results were compared with the data of the mentioned stations for wheat by error statistical criteria including: explanation coefficient (R^2), normal root mean square error (NRMSE) and Nash-Sutcliffe index (N.S).

Results and Discussion

The value of the explanation coefficient (R^2) of simulation ET and biomass in the Blaney-Criddle method is close to one, which shows a good correlation between the data. The NRMSE and Nash-Sutcliffe values for both parameters and the five stations are in the range of 0-20 and close to one, respectively, which indicates the AquaCrop model's ability to simulate ET and biomass. On the other hand, the value of R^2 in the Hargreaves-Samani method for biomass close to one, NRMSE in the range of 0-10 and Nash-Sutcliffe index is more than 0.5, which indicates a good simulation. The NRMSE index in the evaluation of ET and biomass wheat is excellent for the Blaney-Criddle method and about Hargreaves-Samani for ET is poor and for the biomass is excellent.

The Turc method with NRMSE in the range of 0-30, explanation coefficient close to or equal to one and a

1 and 2- Associate Professor and Ph.D. Student, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir)

Nash-Sutcliffe index of one or close to one can be used to simulate ET and biomass at all five stations. Also, for biomass simulation, Priestley-Taylor and Makkink methods have acceptable statistical values in all five stations.

Based on the value of explanation coefficient (R^2) of estimation ET and biomass wheat for radiation methods, the correlation between the data in all three radiation methods is high. Percentage of NRMSE index of Makkink method for wheat in ET evaluation in Qazvin station is poor category and in Urmia and Rasht is good and in Mashhad and Yazd is moderate and about biomass in all five stations (Qazvin, Rasht, Mashhad, Urmia and Yazd) is excellent category, the error percentage of Priestley-Taylor method for wheat in ET evaluation in Yazd station is good and the rest of the stations is poor, about biomass is excellent in all five stations (Qazvin, Rasht, Mashhad, Urmia and Yazd). The error rate of Turc method for wheat in ET evaluation in Urmia, Rasht and Mashhad stations is good and in Qazvin and Yazd is poor and about biomass is excellent in all five stations (Qazvin, Rasht, Mashhad, Urmia and Yazd).

Conclusion

According to the results obtained using Blaney-Criddle method with R^2 value close to one, NRMSE in the range of 0-20% (excellent to good) and Nash-Sutcliffe index close to one and Turc method with R^2 value close to one, NRMSE in the range of 0-10% (excellent) and Nash-Sutcliffe index close to one was showed a good accuracy of AquaCrop model in simulation of evapotranspiration and biomass with these methods of estimation of evapotranspiration compared to other methods.

Keywords: AquaCrop, Blaney-Criddle, Plant model, Reference evapotranspiration, Turc

ارزیابی تاثیر روش های مختلف برآورد ET_o در شبیه سازی تبخیر و تعرق واقعی و زیست توده گندم با مدل آکواکراپ

هادی رضائی اعتدالی^{۱*} - فاطمه صفری^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳

چکیده

ارزیابی مدل های گیاهی در بخش کشاورزی توسط بسیاری از پژوهشگران انجام شده است. تعیین مدل گیاهی مناسب برای برنامه ریزی و پیش بینی واکنش گیاهان زراعی در مناطق مختلف ضروری است. این عمل سبب می شود با صرف هزینه و وقت کمتر بتوان اثر عوامل مختلف را بر عملکرد و کارایی مصرف آب گیاهان بررسی کرد. با توجه به اینکه معادله FAO-56 بعنوان روش مرجع برای برآورد ET در مدل AquaCrop استفاده می شود و به دلیل تعداد ورودی زیاد استفاده از آن دشوار است. روش های دیگری همچون روش های دمایی و تشعشعی وجود دارد که با حداقل داده ورودی می توان ET را با همان میزان دقت برآورد کرد. با توجه به اهمیت این موضوع، تحقیق حاضر به منظور بررسی دقت و کارایی مدل AquaCrop در شبیه سازی تبخیر و تعرق و زیست توده، تحت تاثیر روش های مختلف دمایی (بلانی-کریدل و هارگریوز-سامانی) و تشعشعی (پریستلی-تیلور، مک کینک و تورک) برآورد تبخیر و تعرق مرجع در پنج ایستگاه (ارومیه، قزوین، رشت، یزد و مشهد) و چهار اقلیم (خشک، نیمه خشک، مرطوب و نیمه مرطوب) مختلف در ایران و برای گیاه گندم انجام شد. طبق نتایج، روش بلانی-کریدل با مقدار R² بیشتر از ۰/۵، NRMSE در محدوده ۱۰-۰ درصد (عالی) و شاخص NS نزدیک به یک (۰/۹۹) و روش تورک با مقدار R² بیشتر از ۰/۵، NRMSE در محدوده ۵۰-۱۰ درصد و شاخص NS برابر با ۰/۹ روش های مناسب برای شبیه سازی تبخیر و تعرق در تمام ایستگاه ها بودند. در مورد شبیه سازی زیست توده، روش های بلانی-کریدل و هارگریوز-سامانی با مقادیر R² برابر با ۰/۹، NRMSE در محدوده ۱۰-۰ درصد (عالی) و شاخص NS برابر با ۰/۹۹ بعنوان روش های مناسب و روش های پریستلی-تیلور، مک کینک و تورک با آماره های R² برابر با ۰/۹، NRMSE در محدوده ۱۰-۰ درصد (عالی) و شاخص NS برابر با ۰/۹۹ بعنوان روش های تشعشعی مناسب انتخاب شدند. در این پژوهش دقت خوب مدل AquaCrop در شبیه سازی تبخیر و تعرق و زیست توده با این روش های برآورد تبخیر و تعرق نسبت به سایر روش ها نشان داده شد.

واژه های کلیدی: بلانی-کریدل، تبخیر و تعرق مرجع، تورک، مدل گیاهی، AquaCrop

مقدمه

زیرزمینی می شود. ضمن آن که تخمین کمتر از حد مورد نیاز گیاه نیز باعث اعمال تنش رطوبتی کنترل شده به گیاه شده و در نتیجه کاهش محصول را به همراه خواهد داشت. با توجه به اهمیت تبخیر و تعرق و کاربردهای متنوع آن در علوم مختلف، محاسبه مقدار آن به ویژه تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی از اهمیت بالایی برخوردار است. تبخیر و تعرق در کل جهان حدود ۶۰ درصد از بارندگی زمین را به

تبخیر و تعرق از عمده ترین اجزاء چرخه هیدرولوژیکی است که تخمین درست آن در طراحی و مدیریت سیستم های آبیاری، مطالعات منابع آب و موارد مشابه دیگر از اهمیت زیادی برخوردار است. تخمین بیش از حد آب مورد نیاز گیاه ضمن هدر دادن آب آبیاری باعث ماندابی شدن اراضی، شستشوی مواد غذایی خاک و آلوده نمودن منابع آب

۱ و ۲- به ترتیب دانشیار و دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

(*- نویسنده مسئول: (Email: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir)

دلیل مدیریت صحیح مزارع گندم، نقش مهمی در امنیت غذایی و کشاورزی پایدار در کشور دارد. منبع اصلی غذای مردم در ایران، گندم و فرآورده‌های آن است و هر اقدامی برای بالابردن عملکرد محصول گندم با توجه به منابع محدود آب و خاک ضروری است (Ahmadi et al., 2017). مدل‌های گیاهی در جهت بهینه‌سازی عوامل مدیریتی، اجازه شبیه‌سازی محصول را می‌دهند و قابلیت کارکرد سناریوهای مختلف را دارند. یکی از مدل‌های گیاهی پرکاربرد، مدل آکوکراب است که برای محدوده وسیعی از محصولات زراعی شامل محصولات علوفه‌ای، سبزیجات، غلات، میوه‌ها، محصولات روغنی و غده‌ای می‌تواند به کار گرفته شود (Vanuytrecht, 2014). مدل آکوکراب در تحقیقات مختلفی در مناطق مختلف، در شبیه‌سازی محصول گندم به کار رفته است.

اقبال و همکاران (Iqbal et al., 2014) مدل آکوکراب نسخه ۳/۱ را برای محصول زمستانه گندم در دشت شمالی چین واسنجی و صحت‌سنجی کردند. نتایج بررسی آنها نشان داد، عملکرد زیست‌توده در شرایط مختلف کم آبیاری با دقت مناسبی توسط مدل برآورد می‌شود. همچنین این مدل توسط مابهودی و همکاران (Mabhaudhi et al., 2014) در منطقه نیمه‌خشک آفریقای جنوبی برای یکی از گیاهان گرمسیری آن بنام تارو مورد ارزیابی قرار گرفت و زیست‌توده با ضریب تعیین ۰/۹۹ و ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۱/۷۴ تن در هکتار برآورد شد. مدل آکوکراب برای تعدادی محصول و برخی از مناطق ایران نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. این مدل در منطقه کرج برای پیش‌بینی عملکرد گندم و سویا در شرایط کم آبیاری نتایج قابل قبولی ارائه داد (Alizadeh et al., 2010; Babazadeh and Sarai Tabrizi, 2012).

زندپارسا و همکاران (Zand-Parsa et al., 2016)، در پژوهشی مقادیر رطوبت خاک در عمق‌های مختلف، ماده خشک و عملکرد دانه گندم زمستانه در پنج تیمار آبیاری دیم، ۰/۵، ۰/۸، ۱ و ۱/۲ برابر آبیاری کامل را طی دو سال زراعی ۱۳۸۸-۸۹ و ۱۳۸۹-۹۰ واقع در اراضی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز توسط مدل‌های آکوکراب و WSM^۱ شبیه‌سازی کردند. داده‌های اندازه‌گیری شده در سال اول زراعی برای واسنجی مدل‌ها و در سال دوم برای اعتبار‌سنجی مورد استفاده قرار گرفتند. صحت برآورد رطوبت خاک توسط مدل‌ها، مبنای مقایسه دقت برآورد مقادیر شبیه‌سازی شده تبخیر و تعرق واقعی گیاه قرار گرفت. بر اساس نتایج، در مدل WSM، مقدار رطوبت خاک در لایه‌های مختلف عمق ریشه در سال اعتبار‌سنجی با مقدار نرمال شده ریشه میانگین مربع خطا (NRMSE) برابر ۰/۱۴ خوب برآورد شده است ولی مدل آکوکراب در برآورد آن دقت کمتری داشت (NRMSE=0.26). مقادیر برآورد تبخیر و تعرق گیاهی در تیمار آبیاری

جو برمی‌گرداند (Oki and Kanai, 2006). بطور کلی معادلات محاسبه تبخیر و تعرق بر اساس تابش خالص خورشید (R_n)، حداقل و حداکثر دما، سرعت باد و رطوبت نسبی هستند (Allen et al., 1998). هرگونه تغییر در پارامترهای اقلیمی ورودی موجب تغییر در ET می‌شوند (Vicente-Serrano et al., 2014). Wu و همکاران (Wu et al., 2019) تغییرات مکانی و زمانی در نیاز آب آبیاری گندم را با استفاده از بارش موثر و تبخیر و تعرق محصول مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آنها نیاز آب آبیاری را محاسبه کرده و دریافتند که با نیاز آبی محصول متفاوت است و به شدت به در دسترس بودن داده‌های هواشناسی بستگی دارد. در زمینه محاسبه تبخیر و تعرق و تأثیری که روش‌های مختلف محاسبه آن بر عملکرد، زیست‌توده و نیاز خالص آبیاری محصول دارد، مطالعات زیادی در سطح جهان و ایران انجام گرفته است. بر اساس نتایج پژوهشی که صفری و همکاران (Safari et al., 2021) به منظور واسنجی و اصلاح ضرایب معادلات برآورد تبخیر و تعرق بر روی چهار ایستگاه سینوپتیک ایران با اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک، مرطوب و نیمه‌مرطوب انجام دادند، روش بلانی-کریدل بعنوان روش برتر برای محاسبه ET در هر چهار اقلیم انتخاب شد. در پژوهشی دیگر، سه روش (بلانی-کریدل، تورنت وایت و هارگریوز-سامانی) برای برآورد ET پتانسیل در شهرستان امیدیه مورد مقایسه قرار گرفتند که بر اساس نتایج روش بلانی-کریدل نسبت به سایر روش‌ها با بیشترین ضریب همبستگی و کمترین میزان خطای استاندارد با روش FAO-56 از دقت بیشتری برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل برخوردار بود (Asareh and Davoudi, 2014). نتایج حاصل از مطالعه‌ای که در ایستگاه سینوپتیک زاهدان انجام شد نشان داد روش‌های بر پایه انتقال جرم از نظر آماری ضعیف‌ترین عملکرد را نسبت به سایر روش‌ها در مقایسه با روش استاندارد FAO-56 نشان دادند؛ اما مدل‌های دمایی و تشعشعی مانند مدل تورک، جنسن-هیز، هارگریوز و بلانی-کریدل می‌توانند جایگزین مناسبی برای روش ترکیبی نسبتاً پیچیده FAO-56، برای اقلیم گرم و خشک شهرستان زاهدان باشند (Kahkhamoghadam, 2017). در پژوهشی که در ترکیه انجام شد، روش هارگریوز-سامانی برای این منطقه اصلاح شد. آنها میزان تبخیر و تعرق را برای ۲۷۵ ایستگاه هواشناسی و هفت منطقه جغرافیایی با استفاده از روش‌های FAO-56 و هارگریوز-سامانی به دست آوردند، سپس ضرایب معادله هارگریوز-سامانی را واسنجی و معادله واسنجی شده سرعت باد را به‌عنوان یک پارامتر ورودی اضافه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که روش هارگریوز-سامانی اصلاح شده تخمین خوبی نسبت به داده‌های واقعی لایسیمتر دارد (Cobaner et al., 2017).

مهمترین محصول کشاورزی در ایران گندم است و به همین

پیچیده و غیرخطی است و به عوامل متعدد اقلیمی نظیر دما، رطوبت، سرعت باد، تابش، نوع و مرحله رشد گیاه و غیره وابسته است (Sayyadi et al., 2009). بنابراین، در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه مربوط به ایستگاه‌های ارومیه، رشت، قزوین، مشهد و یزد، مقادیر تبخیر و تعرق متوسط روزانه بر اساس نتایج حاصل از روش فائو-پنمن-مانتیت مدل‌سازی و دقت دو روش دمایی (هارگریوز-سامانی و بلانی-کریدل) و سه روش تشعشعی (پریستلی-تیلور، تورک و مک‌کینک) با FAO-56 برای گندم مقایسه شد. بنابراین می‌توان نوآوری این تحقیق را ارزیابی این مدل در برآورد زیست توده و تبخیر و تعرق واقعی را با استفاده از سایر روش‌های برآورد تبخیر و تعرق که گاه متغیرهای اقلیمی کمتری نیاز دارند در مقابل روش پایه FAO-56 که در مدل بعنوان روش اصلی و پایه شناخته می‌شود بیان کرد.

مواد و روش‌ها

مناطق مورد مطالعه

ایران با وسعتی حدود ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومتر مربع و متوسط بارش سالانه ۲۴۱ میلی‌متر در نیمکره شمالی، در قاره آسیا و در قسمت غربی فلات ایران واقع شده است (Ghaffari et al., 2004). این کشور بین دو نصف‌النهار ۴۴° و ۶۴° شرقی و دو مدار ۲۵° و ۴۰° شمالی قرار گرفته است. حدود ۹۴/۸ درصد از سطح آن، در زمره مناطق خشک و نیمه‌خشک با ریزش‌های جوی کم و تبخیر و تعرق زیاد قرار دارد (Ghaffari et al., 2004). برای انجام این پژوهش، ایران را براساس اقلیم‌های کوپن به ۴ اقلیم مختلف (خشک، مرطوب، نیمه‌خشک و نیمه مرطوب) دسته‌بندی و به ترتیب شهرهای یزد، رشت، مشهد، قزوین و ارومیه بعنوان نماینده این اقلیم‌ها انتخاب (شکل ۱) و آمار هواشناسی آنها مورد استفاده قرار گرفت (https://cgie.org.ir/fa/news/156320). خصوصیات ایستگاه‌های هواشناسی در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

کامل، در هر دو مدل نزدیک به هم ولی با افزایش تنش رطوبتی، از دقت برآورد مدل آکواکراپ کاسته شد. مدل WSM مقدار ماده خشک و عملکرد دانه را با NRMSE به ترتیب برابر ۰/۱۵ و ۰/۱۸ خوب برآورد کرده است و مدل آکواکراپ با NRMSE به ترتیب برابر ۰/۱۹ و ۰/۳۹ در برآورد آنها دقت کمتری داشت.

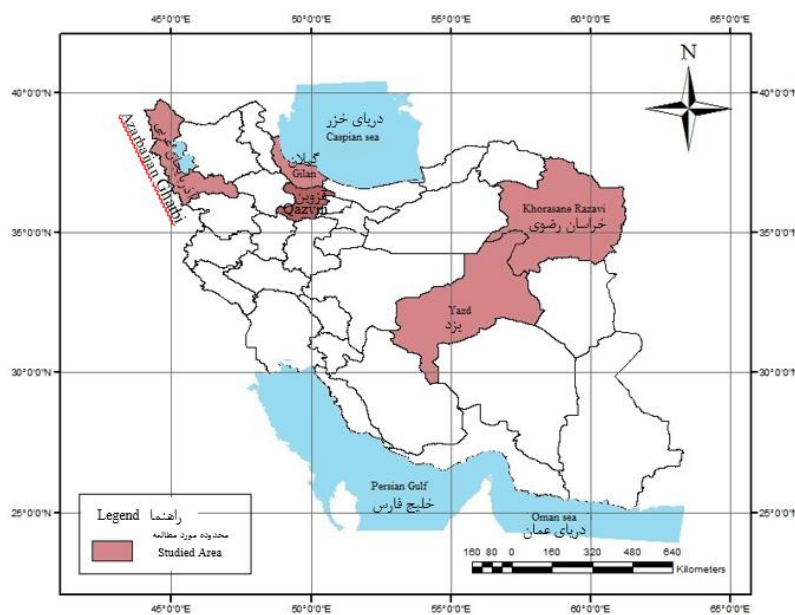
امیری و همکاران (Amiri et al., 2015) توانایی مدل آکواکراپ را برای پیش‌بینی عملکرد دانه و زیست‌توده کل گندم زمستانه تحت تنش آبی، به مدت دو سال برر سی کردند. نتایج نشان داد مدل در پیش‌بینی عملکرد دانه و زیست‌توده محصول دارای دقت قابل قبولی است. عبدالله‌زاده و همکاران (Abdollahzadeh et al., 2019) میزان تبخیر و تعرق واقعی و نیاز خالص آبیاری محصولات گندم، جو و ذرت دانه‌ای را در دشت مغان با استفاده از مدل آکواکراپ تعیین و نتایج را با مدل کراپ وات و نت وات مقایسه کردند. براساس نتایج، تبخیر و تعرق و نیاز آبی حاصل از مدل آکواکراپ در مقایسه با کراپ وات کمتر و نتایج در مقایسه با نت وات برای گندم و ذرت دانه‌ای مقادیر بیشتر و برای جو کمتر برآورد شده است. در پژوهشی که جرعنوش و همکاران (Jorenush et al., 2019) برای شبیه‌سازی عملکرد گندم و تعیین تاریخ کشت در استان فارس توسط آکواکراپ انجام دادند، نتایج نشان داد که مدل دقت بالایی در شبیه‌سازی پوشش تاجی، زیست‌توده و عملکرد دانه گندم دارد. نتایج مطالعه‌ای در دهلی هندوستان نشان داد که مدل آکواکراپ، دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب در ارقام مقاوم و غیرمقاوم به شوری گندم دارد. در این تحقیق مشخص شد که توانایی مدل در شبیه‌سازی عملکرد بیش از دو پارامتر دیگر است (Kumar et al., 2014).

پژوهشگران بسیاری در سراسر دنیا روش فائو-پنمن-مانتیت را در مقایسه با لایسیمتر به عنوان روشی دقیق، معتبر و استاندارد برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع معرفی کرده‌اند که در این پژوهش نیز به عنوان روش مبنا مورد استفاده قرار گرفته است (Kumar et al., 1998; Naderi and Alizadeh, 2002). تبخیر و تعرق فرآیندی

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

Table 1- Details of meteorological stations studied

ایستگاه Station	اقلیم Climate	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	ارتفاع از سطح دریا Elevation (m)
ارومیه Urmia	نیمه مرطوب Semi-humid	45° 3'	37° 40'	1328
رشت Rasht	مرطوب Humid	49° 37'	37° 19'	-8.6
مشهد Mashhad	نیمه خشک Semi-arid	59° 38'	36° 16'	999.2
قزوین Qazvin	نیمه خشک Semi-arid	50° 0'	36° 16'	1279.1
یزد Yazd	خشک Arid	54° 17'	31° 54'	1237.2



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و محدوده‌های مورد مطالعه
Figure 1- Geographical location and studied areas

جدول ۲- معادلات مورد استفاده در پژوهش

Table 2- Equations used in research

شماره ردیف Number	نام معادله Name of Eq.s	فرم معادله Equation form	منابع References
1	FAO-56	$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{890}{T + 273} \right) U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34U_2)}$	FAO-56 (1998)
2	Hargreaves-Samani	$ET_o = 0.0023R_a \sqrt{T_{max} - T_{min}} (T_{mean} + 17.8)$	Hargreaves and Samani (1985)
3	Blaney-Criddle	$ET_o = a + b(P(0.46T_{mean} + 8.13))$	Blaney and Criddle (1950)
4	Priestley-Taylor	$ET_o = 1.26 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \left(\frac{R_n - G}{\lambda} \right)$	Priestley and Taylor (1972)
5	Makkink	$ET = 0.61 \left(\frac{\Delta}{\Delta - \gamma} \right) \left(\frac{R_s}{2.45} \right) - 0.12$	Makkink (1957)
6	Turc	$ET = 0.013 \frac{(23.89R_s + 50)T_{avg}}{(T_{avg} + 15)}$	Turc (1961)

روش پژوهش

۲۰۲۰/۱۲/۳۱ جمع‌آوری و تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از روش‌های

مذکور در جدول بالا محاسبه شد.

به دلیل ناکافی بودن داده‌های لایسیمتری، از روش فائو-پنمن-مانتیت (FAO-56) با توجه به اینکه دارای دقت بالا در برآورد تبخیر و تعرق مرجع است، از برآوردهای این روش بعنوان داده مشاهده‌ای و مرجع برای صحت‌سنجی استفاده شد.

معرفی مدل آکواکراپ

اساس تخمین عملکرد محصول در مدل آکواکراپ رابطه Kassam و Doorenbos است که در شماره ۳۳ نشریه آبیاری و زهکشی سازمان خواربار جهانی (فائو) ارائه شده است. با اعمال

معادلات مورد استفاده برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع در این پژوهش از دو گروه دمایی شامل: هارگریوز-سامانی (H.S) و بلانی-کریدل (B.C) و گروه تشعشعی شامل: پریستلی-تیلور (P.T)، تورک (T) و مک‌کینک (Mak) انتخاب شدند. فرم اصلی معادلات در جدول ۲ ارائه شده است.

داده‌های تبخیر و تعرق مرجع بعنوان ورودی‌های مدل برای اجرای مدل آکواکراپ مورد نیاز است. به همین منظور، متغیرهای هواشناسی شامل حداکثر و حداقل دمای هوا، حداکثر و حداقل رطوبت نسبی هوا، ساعات آفتابی و سرعت باد در ارتفاع دو متری سطح زمین از ایستگاه‌های ارومیه، رشت، قزوین، مشهد و یزد از تاریخ ۱۹۸۰/۱/۱ تا

روش‌های ذکر شده در جدول ۲ محاسبه شد.

شاخص‌های آماری

در این تحقیق نتایج حاصل از سناریوها با داده ایستگاه‌های مذکور برای گندم توسط معیارهای آماری خطا شامل آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و شاخص نش-سانکلیف (N.S)، مقایسه شدند. ضریب تبیین یکی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی ارتباط میان دو متغیر x و y است که به صورت بی بعد نمایش داده می‌شود. این ضریب ارتباط مستقیمی با ضریب همبستگی دارد. به این ترتیب که با جذر گرفتن از ضریب تبیین می‌توان ضریب همبستگی میان دو سری مورد بررسی را به دست آورد. همانند ضریب همبستگی هر چه مقدار ضریب تبیین به یک نزدیک‌تر باشد، ارتباط قوی‌تری میان دو متغیر وجود دارد. در صورت ضرب ضریب تبیین در عدد ۱۰۰ مقدار به دست آمده بیان‌گر درصد واریانس تغییرات متغیر x است که با متغیر y تو صیف می‌شود. طبقه بندی ضریب پیرسون در جدول ۳ آورده شده است (Junior et al., 2017). رابطه ضریب تبیین به شرح زیر است:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Pi - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})^2} \quad (4)$$

که Pi: مقادیر پیش‌بینی شده، Oi: مقادیر اندازه‌گیری شده و \bar{O} : میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد (Bannayan and Hoogenboom., 2009). برای محاسبه ضریب تبیین از نرم‌افزار اکسل استفاده شد.

شاخص NRMSE سطح تخمین را نشان می‌دهد. تقسیم‌بندی NRMSE توسط جمیسون و همکاران (Jamieson et al., 1991) در جدول ۴ آورده شده است.

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Oi - Pi)^2}{n}} \quad (5)$$

اصلاحاتی در آن از جمله تفکیک تبخیر و تعرق واقعی (ET) به تبخیر از سطح خاک (E_s) و تعرق (T_s)، و نیز عملکرد به بیوماس (B) و شاخص برداشت (HI) استنتاج شده است (Raes et al., 2012):

$$\left(1 - \frac{Y}{Y_x}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_x}\right) \quad (1)$$

که در آن Y_x : حداکثر عملکرد، Y: عملکرد واقعی، ET_x : حداکثر تبخیر و تعرق، ET: تبخیر و تعرق واقعی و K_y فاکتور تناسب بین افت نسبی عملکرد و کاهش نسبی تبخیر و تعرق است. با پیشرفت‌های علمی و تجربی در روابط گیاه-آب از سال ۱۹۷۹، همراه با نیاز مبرم به بهبود بهره‌وری آب، فائو، نشریه ۳۳ خود را اصلاح و تکمیل نموده و بصورت مدل آکوآکراپ ارائه داد. برای محاسبه عملکرد از زیست‌توده، مدل آکوآکراپ از رابطه ۲ استفاده می‌کند (Raes et al., 2012):

$$Y = f_{HI} \times HI_0 \times B \quad (2)$$

که در آن HI_0 : شاخص برداشت مرجع (طی مرحله بلوغ فیزیولوژیک)، Y: عملکرد دانه، f_{HI} : ضریبی است که شاخص برداشت مرجع را تنظیم می‌کند. مقدار زیست‌توده تولیدی بصورت روزانه در مدل آکوآکراپ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$B = WP^* \sum_i \frac{Tr_i}{ET_{O_i}} \quad (3)$$

که WP^* : بهره‌وری آب مصرفی گیاه، Tr: تعرق روزانه و ET_0 : تبخیر و تعرق مرجع روزانه می‌باشند (Raes et al., 2022). مهمترین داده‌های اقلیمی مورد نیاز مدل عبارتند از: حداقل، حداکثر و میانگین دمای روزانه، تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0) و بارندگی. مدل از داده‌های حداکثر و حداقل دمای روزانه برای محاسبه درجه روز رشد به منظور تعدیل عملکرد زیست‌توده بر اثر خسارات ناشی از سرما، استفاده می‌کند. داده‌های دمای روزانه، مقدار بارندگی روزانه و همه اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه ET_0 از اطلاعات آماری سالهای ۲۰۲۰-۱۹۸۰ ایستگاه‌های قزوین، رشت، ارومیه، مشهد و یزد استفاده و ET_0 با

جدول ۳- تقسیم‌بندی نتایج شبیه‌سازی ضریب پیرسون

R^2	$0.1 >$	0.1-0.2	0.2-0.5	$0.5 <$
نتایج شبیه‌سازی	همبستگی ندارد	ضعیف	متوسط	قوی
Estimation result	Not correlated	Weak	Moderate	Strong

جدول ۴- تقسیم‌بندی نتایج شبیه‌سازی بر اساس NRMSE

NRMSE	0-10	10-20	20-30	>30
نتیجه تخمین	عالی	خوب	متوسط	ضعیف
Estimation result	Excellent	Good	Moderate	Weak

سامانی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که روش بلانی-کریدل همخوانی بهتری با شرایط ایران دارد.

طبق جدول نتایج گندم (جدول ۶)، روش تورک با NRMSE در محدوده ۰-۳۰، ضریب تبیین نزدیک یا برابر با یک و شاخص NS یک یا نزدیک به یک برای شبیه سازی ET و زیست توده در هر پنج ایستگاه قابل استفاده است. همچنین برای شبیه سازی زیست توده هر سه روش در هر پنج ایستگاه دارای مقادیر آماری قابل قبول است (جدول ۶). طی پژوهشی که توکلی و همکاران (Tavakoli et al., 2013) در استان خراسان شمالی با اقلیم خشک و نیمه خشک انجام دادند، میزان تبخیر و تعرق را با روش های هارگریوز-سامانی، تورک، پریستلی-تیلور، مک کینک و تشت تبخیر کلاس A در شرایط کمبود داده، به همراه روش استاندارد فائو-پنمن-مانتیت برای ارزیابی روش های مطرح شده (به دلیل عدم وجود داده های لایه سیمتری) مقایسه کردند. براساس ارزیابی آنها، این معادلات دقت قابل قبولی در مقایسه با مطالعات انجام شده دارند که با نتایج پژوهش حاضر برای اقلیم های خشک و نیمه خشک تطابق (قزوین، یزد و مشهد) دارد.

محققان با استفاده از ۷ روش، مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل را در چهار منطقه اقلیمی متفاوت (خشک، نیمه خشک، مرطوب و نیمه مرطوب) هند تعیین کرده و نتایج حاصل را با روش FAO-56 مقایسه کردند. آنها نتیجه گرفتند که در میان روش های مورد مطالعه، روش هارگریوز در دوره های زمانی روزانه و ماهانه نتایج نزدیک به روش FAO-56 ارائه می کند و در همه اقلیم ها به استثنای اقلیم مرطوب روش تورک (روش تشعشی) مناسب تر است. نتایج حاصل از تحلیل عاملی نشان می دهد که سرعت باد مهم ترین عامل در مناطق خشک و ساعات آفتابی مهم ترین عامل در مناطق مرطوب و نیمه مرطوب است (Nandagiri and Koovor, 2005). در این پژوهش نیز برای اقلیم مرطوب (ایستگاه رشت) روش تورک اولویت دارد.

شکل ۲ و ۳ مقایسه مقادیر زیست توده و تبخیر و تعرق واقعی شبیه سازی شده گندم در روش های مختلف برآورد ETO با استفاده از مدل آکوآکراپ در ایستگاه های مورد مطالعه را نشان می دهند. با توجه به نمودارها اختلاف زیاد بین مقادیر شبیه سازی در روش های مختلف با روش پایه FAO-56 وجود ندارد. همچنین براساس آماره ضریب تبیین، همبستگی بین داده ها در تمامی روش ها اعم از دمای و تشعشی برای گندم وجود دارد.

ضریب نش-ساتکلیف (NS) یکی از رایج ترین شاخص هایی است که برای ارزیابی کارایی مدل های هیدرولوژیکی استفاده می شود (Nash and Sutcliffe, 1970). این شاخص حالتی استاندارد از تابع حداقل مربعات خطاهاست:

$$NS = 1 - \frac{\sum_1^N (ET(Sim) - ET(Obs))^2}{\sum_1^N (ET(Obs) - \overline{ET(Obs)})^2} \quad (6)$$

دامنه تغییرات این شاخص از $-\infty$ تا +۱ بوده و مقدار بهینه این شاخص یک است. براساس پژوهش های مختلف صورت گرفته در این زمینه از جمله مطالعات گاسمن و همکاران (Gassman et al., 2007) اگر مقدار ضریب نش-ساتکلیف بالاتر از ۰/۵ باشد مدل شبیه سازی خوبی داشته است.

نتایج و بحث

جدول ۵ و ۶ نتایج مربوط به ارزیابی آماری ET و زیست توده را برای هر ۵ ایستگاه هواشناسی در سال های ۱۹۸۰-۲۰۲۰ برای گندم به تفکیک روش های برآورد ETO ارائه می دهد.

براساس جدول ۵، مقدار ضریب تبیین (R^2) برای شبیه سازی ET و زیست توده در روش بلانی-کریدل نزدیک به یک بوده که همبستگی مناسبی را بین داده ها نشان می دهد. مقدار NRMSE و NS نیز در مورد هر دو پارامتر و پنج ایستگاه به ترتیب در محدوده ۰-۲۰ و نزدیک به یک است که نشان دهنده توانا بودن مدل آکوآکراپ برای شبیه سازی ET و زیست توده می باشد. از طرفی مقدار R^2 در روش هارگریوز-سامانی برای زیست توده نزدیک به یک، NRMSE در محدوده ۰-۱۰ و شاخص NS بیش از ۰/۵ بوده که نشان دهنده شبیه سازی خوب است (جدول ۵). پا شاخواه و همکاران (Pashakhah et al., 2014) به بررسی تبخیر و تعرق مرجع با روش های بلانی-کریدل، هارگریوز و ترنت وایت برای اقلیم های مختلف ایران براساس اقلیم نمای یونسکو در مقایسه با روش استاندارد FAO-56 پرداختند، نتایج آنها نشان داد روش بلانی-کریدل در اقلیم های خشک، نیمه خشک و مرطوب بهترین برآورد را داراست. نتایج این مطالعه بیان کرد در شرایطی که در اقلیم های مورد مطالعه به دلیل عدم دسترسی به داده های مورد نیاز، برآورد تبخیر و تعرق مرجع از روش FAO-56 ممکن نباشد، با بهره گیری از معادلات واسنجی شده می توان به برآوردهای مشابه از نظر آماری با روش FAO-56 دست یافت. همچنین روشن و همکاران (Roshan et al., 2012) در مطالعات خود در زمینه ارزیابی مدل مناسب تبخیر و تعرق پتانسیل در ایران، از چهار روش تورنت وایت، جنسن-هیز، بلانی-کریدل و هارگریوز-

جدول ۵- ارزیابی آماری معادلات دمایی در گیاه گندم

Table 5- Results of statistical evaluation of temperature equations for wheat

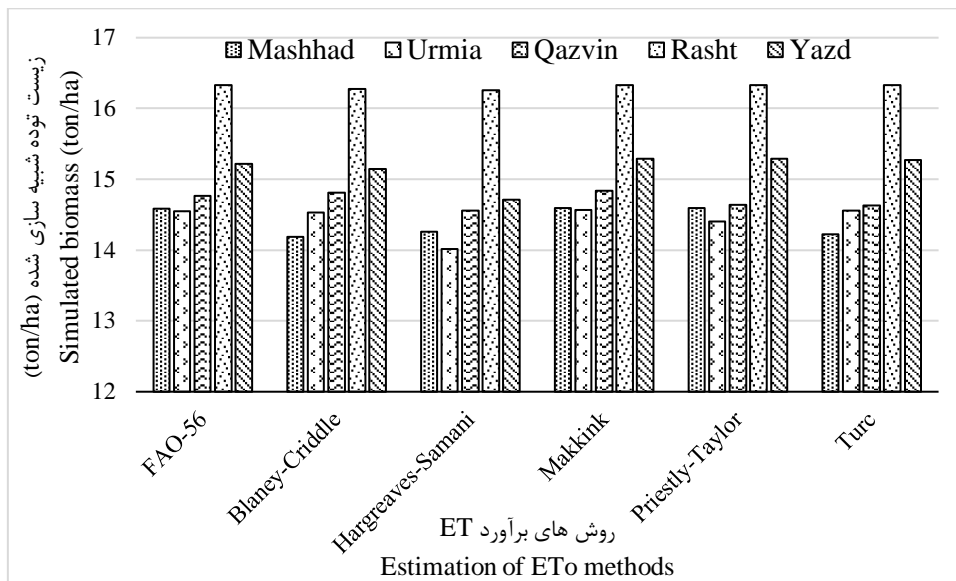
معادله Equation	ایستگاه Station	اقلیم Climate	NRMSE	نش-ساتکلیف Nash-Sutcliffe	R ²	معادله رگرسیونی Regression equation
(mm) ET						
H.S	ارومیه Urmia	نیمه مرطوب Semi-humid	144.239	0.642	0.338	y= 0.31x+138.17
	رشت Rasht	مرطوب Humid	210.269	0.531	0.518	y= 0.27 x+39.51
	مشهد Mashhad	نیمه خشک Semi-arid	162.564	0.606	0.224	y= 0.21 x+195.45
	یزد Yazd	خشک Arid	118.008	0.697	0.021	y= 0.09 x+363.28
	قزوین Qazvin	نیمه خشک Semi-arid	92.13	0.762	0.125	y= 0.25 x+349.48
B.C	ارومیه Urmia	نیمه مرطوب Semi-humid	5.126	0.997	0.837	y= 0.83 x+74.17
	رشت Rasht	مرطوب Humid	7.201	0.994	0.887	y= 0.75 x+67.12
	مشهد Mashhad	نیمه خشک Semi-arid	7.768	0.994	0.829	y= 0.86 x+36.02
	یزد Yazd	خشک Arid	7.859	0.994	0.81	y= 1.12 x-83.002
	قزوین Qazvin	نیمه خشک Semi-arid	16.707	0.961	0.876	y= 0.75 x+247.93
(ton/ha) Biomass						
H.S	ارومیه Urmia	نیمه مرطوب Semi-humid	4.134	0.998	0.929	y= 0.93 x+1.54
	رشت Rasht	مرطوب Humid	0.749	0.999	0.995	y= 1.01 x-0.13
	مشهد Mashhad	نیمه خشک Semi-arid	2.304	0.999	0.993	y= 0.99 x+0.37
	یزد Yazd	خشک Arid	3.39	0.998	0.992	y= 0.97 x+0.86
	قزوین Qazvin	نیمه خشک Semi-arid	1.709	0.999	0.983	y= 0.95 x+0.96
B.C	ارومیه Urmia	نیمه مرطوب Semi-humid	0.303	0.999	0.998	y= 1.001 x+0.02
	رشت Rasht	مرطوب Humid	0.519	0.999	0.998	y= 0.97 x+0.51
	مشهد Mashhad	نیمه خشک Semi-arid	3.083	0.998	0.966	y= 0.97 x+0.83
	یزد Yazd	خشک Arid	0.523	0.999	0.997	y= 0.99x+0.07
	قزوین Qazvin	نیمه خشک Semi-arid	0.455	0.999	0.998	y= 0.99 x+0.03

جدول ۶- ارزیابی آماری معادلات تشعشعی در گیاه گندم

Table 6- Results of statistical evaluation of radiation equations for maize

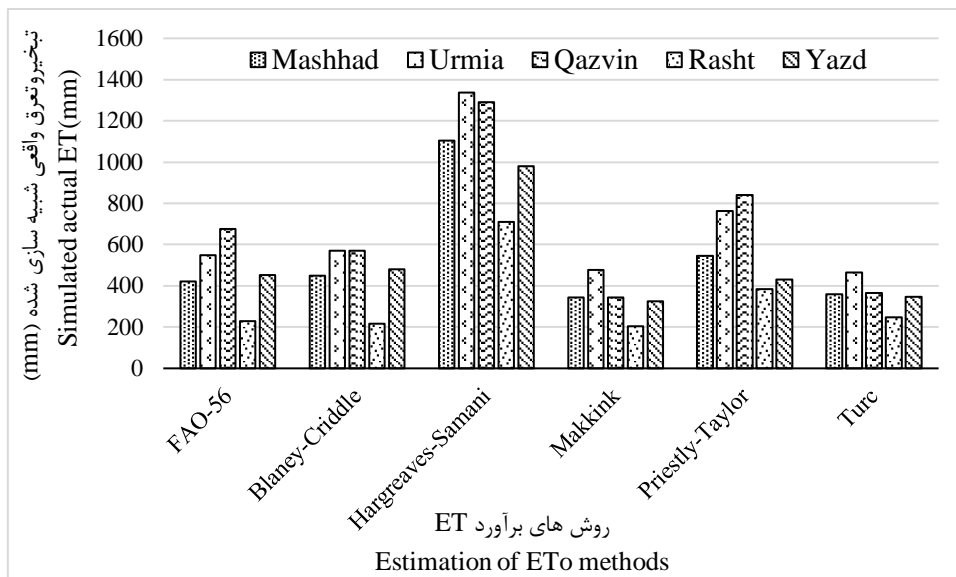
معادله Equation	ایستگاه Station	اقلیم Climate	NRMSE (mm) ET	نش-ساتکلایف Nash-Sutcliffe	R ²	معادله رگرسیون Regression equation
P.T	ارومیه Urmia	نیمه مرطوب Semi-humid	40.92	0.911	0.047	y= 0.15 x+431.75
	رشت Rasht	مرطوب Humid	68.83	0.83	0.346	y= 0.36 x+89.17
	مشهد Mashhad	نیمه خشک Semi-arid	32.708	0.934	0.091	y= 0.22 x+299.3
	یزد Yazd	خشک Arid	13.274	0.98	0.014	y= 0.13 x+394.7
	قزوین Qazvin	نیمه خشک Semi-arid	35.226	0.925	0.681	y= 0.28 x+440.04
T	ارومیه Urmia	نیمه مرطوب Semi-humid	16.354	0.961	0.337	y= 0.85 x+152.84
	رشت Rasht	مرطوب Humid	10.208	0.991	0.664	y= 0.87 x+12.04
	مشهد Mashhad	نیمه خشک Semi-arid	17.777	0.955	0.341	y= 0.84 x+118.43
	یزد Yazd	خشک Arid	24.339	0.897	0.548	y= 2.06 x-265.94
	قزوین Qazvin	نیمه خشک Semi-arid	46.77	0.294	0.68	y= 0.68 x+428.31
MAK	ارومیه Urmia	نیمه مرطوب Semi-humid	14.63	0.971	0.247	y= 0.56 x+281.28
	رشت Rasht	مرطوب Humid	12.748	0.979	0.63	y= 0.82 x+60.66
	مشهد Mashhad	نیمه خشک Semi-arid	20.821	0.933	0.335	y= 0.81 x+144.28
	یزد Yazd	خشک Arid	29.242	0.829	0.477	y= 1.79 x-129.13
	قزوین Qazvin	نیمه خشک Semi-arid	50.156	0.098	0.688	y= 0.63 x+457.92
(ton/ha) Biomass						
P.T	ارومیه Urmia	نیمه مرطوب Semi-humid	1.423	0.999	0.981	y= 0.94 x+1.01
	رشت Rasht	مرطوب Humid	0.073	0.999	0.999	y= 0.99 x+0.006
	مشهد Mashhad	نیمه خشک Semi-arid	0.262	0.999	0.999	y= 0.98 x+0.26
	یزد Yazd	خشک Arid	0.726	0.999	0.994	y= 0.95 x+0.56
	قزوین Qazvin	نیمه خشک Semi-arid	1.224	0.999	0.986	y= 1.04 x-0.51
T	ارومیه Urmia	نیمه مرطوب Semi-humid	0.237	0.999	0.998	y= 1.01 x-0.15
	رشت Rasht	مرطوب Humid	0.076	0.999	0.999	y= 0.99 x+0.008
	مشهد Mashhad	نیمه خشک Semi-arid	2.883	0.999	0.966	y= 0.94 x+1.21
	یزد Yazd	خشک Arid	0.512	0.999	0.997	y= 0.98 x+0.26

MAK	قزوین	نیمه خشک	1.701	0.999	0.965	$y = 1.07x - 0.90$
	Qazvin	Semi-arid				
	ارومیه	نیمه مرطوب	0.207	0.999	0.999	$y = 0.99x - 0.02$
	Urmia	Semi-humid				
	رشت	مرطوب	0.071	0.999	0.999	$y = 0.99x + 0.02$
	Rasht	Humid				
	مشهد	نیمه خشک	0.199	0.999	0.999	$y = 0.98x + 0.18$
	Mashhad	Semi-arid				
	یزد	خشک	0.629	0.999	0.996	$y = 0.97x + 0.29$
	Yazd	Arid				
	قزوین	نیمه خشک	0.667	0.999	0.996	$y = 0.98x + 0.09$
	Qazvin	Semi-arid				



شکل ۲- مقایسه مقدار زیست توده شبیه سازی شده گندم با روش های مختلف برآورد ET_o

Figure 2- Comparison of simulated biomass of wheat with different estimation of ET_o methods



شکل ۳- مقایسه مقدار تبخیر و تعرق واقعی شبیه سازی شده گندم با روش های مختلف برآورد ET_o

Figure 3- Comparison of the actual simulated evapotranspiration of wheat with different estimation of ET_o methods

نتیجه گیری

محدوده (۰-۲۰) و R^2 و NS نزدیک به یک برای شبیه‌سازی تبخیر و تعرق واقعی و استفاده از هر دو روش بلانی-کریدل و هارگریوز-سامانی برای زیست‌توده قابل قبول است. همچنین در مورد روش‌های تشعشعی، روش تورک برای شبیه‌سازی تبخیر و تعرق واقعی و تمامی روش‌های تشعشعی مورد بررسی برای شبیه‌سازی زیست‌توده مطلوب اند. پس با توجه به پهناور بودن کشور ایران و اقلیم‌های متفاوت آن، پیشنهاد می‌شود تبخیر و تعرق در همه اقلیم‌ها و شهرها با روش‌های ارائه شده و یا سایر روش‌های اندازه‌گیری تبخیر و تعرق محاسبه شود و روش‌های برتر در هر اقلیم مشخص و برای کارهای تحقیقاتی معرفی گردند.

ارزیابی مدل AquaCrop برای گیاهان رایج در یک منطقه نقش مهمی در مقایسه عملکرد محصول در شرایط مختلف دارد. گندم یکی از محصولات استراتژیک در کشور است. از طرفی، با توجه به اهمیت دقت در برآورد تبخیر و تعرق مرجع و استفاده از آن برای شبیه‌سازی میزان عملکرد و زیست‌توده با نرم‌افزار AquaCrop، دقت داده‌ها در برابر داده‌های مشاهده‌ای بدست آمده برای هر پنج ایستگاه ارزیابی و طبق نتایج حاصله، از بین دو روش دمایی (بلانی-کریدل و هارگریوز-سامانی) برای گندم روش بلانی-کریدل با میزان NRMSE در

منابع

1. Abdollahzadeh, M., Ramezani etedali, H., Ababaei, B., & Nazari, B. (2019). Estimation of actual evapotranspiration and net irrigation water requirement for strategic agricultural crop in Moghan plain using AquaCrop model. *Nivar* 43(104-105): 113-122. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.30467/nivar.2019.141476.1101>.
2. Ahmadi, K., Gholizadeh, H., Ebadzadeh, H., Hosseinpour, R., Abdshah, H., Kazemian, A., & Rafiei, M. (2017). Agricultural statistics (crops). *Ministry of Agriculture* 1: 5-20. (In Persian)
3. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy, 300 pp.
4. Alizadeh, H.A., Nazari, B., Parsinejad, M., Ramezani, H., Etedali, H.R., & Janbaz, H.R. (2010). Evaluation of AquaCrop Model on wheat deficit irrigation in Karaj area. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 4(2): 273-283. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.267026.668022>.
5. Amiri, E., Bahrani, A., Khorasand, A., & Haghjoo, M. (2015). Evaluating Aquacrop model performance to predict grain yield and wheat biomass, under water stress. *Water and Soil Science (Agricultural Science)*, 25(4/2): 217-229. (In Persian with English abstract)
6. Asareh, A., & Davoudi, H. (2014). Evaluating the methods of estimating potential evapotranspiration in Omidiyeh Town. *Journal of Water Science and Engineering* 10(4): 63-74. (In Persian)
7. Babazadeh, H., & Sarai Tabrizi, M. (2012). Assessment of AquaCrop model under soybean deficit irrigation management conditions. *Journal of Water and Soil* 26(2): 329-339. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.14156>.
8. Bannayan, M., & Hoogenboom, G. (2009). Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field Crops Research* 111: 290-302.
9. Blaney, H.F., & Criddle, W.D. (1950). *Determining water requirements in irrigated areas from climatologically and irrigation data*. Washington Soil Conservation Service (SCS). (Vol. 96).
10. Cobaner, M., Citakoğlu, H., Haktanir, T., & Kisi, O. (2017). Modifying Hargreaves-Samani equation with meteorological variables for estimation of reference evapotranspiration in Turkey. *Hydrology Research* 48(2): 480-497. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.217>.
11. FAO. (1998). *Crop Evapotranspiration (Guidelines for Computing Crop Water Requirements)*. Irrigation and Drainage Paper No.56.
12. Ghaffari, A., Ghasemi, V., & De Pauw, V. (2004). Agricultural climate zone classification with UNESCO method. *Drought and Drought* 12: 30-35.
13. Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., & Arnold, J.G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Trans. ASABE* 50(4): 1211-1250.
14. Hargreaves, G.H., & Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1(2): 96-99.
15. Iqbal, M.A., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A., & Rio, S. (2014). Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management* 135: 61-72.
16. Jamieson, P.D., Porter, J.R., & Wilson, D.R. (1991). A test of computer simulation model ARG-WHEAT1 on wheat crops in New Zealand. *Field Crops Research* 27: 337-350.
17. Joinior, W., Loireau, M., Fargette, M., Filho, B., & Wele, A. (2017). Correlation between soil erodibility and satellite

- data on areas of current desertification: a case study in Senegal. *Ci Trop Recife* 42(2): 51-66.
18. Jorenush, M., Boroomand nasab, S., Naseri, A., Pakparvar, M., & Taghvaeian, S. (2019). AquaCrop evaluation to simulate wheat production and planting date in Fars province. *Journal of Water and Irrigation Management* 9(1): 95-107. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/JWIM.2019.287266.701>.
 19. Kakhmoghadam, P. (2017). Evaluation of reference evapotranspiration models for warm arid climate (Case study: Zahedan station). *Journal of Water and Soil Conservation* 25(1): 309-317. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.11565.2603>.
 20. Kumar, M., Raghuwanshi, N.S., Singh, R., Wallender, W.W., & Pruitt, W.O. (2002). Estimating evapotranspiration using artificial neural network. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE* 128(4): 224-233.
 21. Kumar, P., Sarangi, A., Singh, DK., & Parihar, SS. (2014). Evaluation of AquaCrop model in predicting wheat yield and productivity under irrigated saline regimes. *Irrigation and Drainage* 63: 474-487. <https://doi.org/10.1002/ird.1841>.
 22. Mabhaudhi, T., Modi, A.T. and Beletse, Y.G. 2014. Parameterisation and evaluation of the FAO-AquaCrop model for a South African taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) landrace. *Agricultural and Forest Meteorology* 192-193: 132-139. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.03.013>.
 23. Makkink, G.F. (1957). Testing the Penman Formula by Means of Lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers* 11(3): 277-288.
 24. Naderi, N., & Alizadeh, A. (1998). *Determining reference crop evapotranspiration in Mashad and comparing with empirical methods*. MSc Thesis, Ferdowsi University of Mashhad. 110 pp. (In Persian)
 25. Nandagiri, L., & Kovoor, G.M. (2005). Sensitivity of the food and agriculture organization Penman-Monteith evapotranspiration estimates to alternative procedures for estimation of parameters. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131(3): 238-248.
 26. Nash, J.E., & Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models, Part 1, A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282-290.
 27. Oki, T., & Kanae, S. (2006). Global hydrological cycles and world water resources. *Science* 313(5790): 1068-1072.
 28. Pashakhah, P., Pirmoradian, N., Khazdouz, N., & Moshfegh, M. (2014). Calibration and evaluation of three empirical methods for estimating reference evapotranspiration in different climates of Iran. *Nivar*. 38(87-86): 39-50. (In Persian with English abstract)
 29. Priestley, C.H.B., & Taylor, R.J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather Review* 100(2): 81-92.
 30. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, TC., & Freres, E. (2012). *Reference manual AquaCrop*, FAO, land and water division. Rome Italy.
 31. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, TC., & Freres, E. (2022). *Reference manual AquaCrop*, FAO, land and water division. Rome Italy.
 32. Roshan, G., Khoshakhlagh, F., & Karampur, M. (2012). Assessing, modifying and synthesizing a suitable model for estimation of potential evapotranspiration in Iran. *Physical Geography Research Quarterly* 43(78): 49-68. (In Persian with English abstract)
 33. Safari, F., Kaviani, A., Azizian Ghatari, A., & Ramezani Etedali, H. (2021). Modified the coefficients of Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, Priestley-Taylor, Makkink and Turk equations to estimate the evapotranspiration of the reference plant. *Environment and Water Engineering*. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/jewe.2021.293310.1593>.
 34. Sayyadi, H., Oladghaffari, A., Faalian, A., & Sadreddini, A. (2009). Comparison of RBF and MLP neural networks performance for estimation of reference crop evapotranspiration. *Water and Soil Science* 19(1): 1-12. (In Persian with English abstract)
 35. Tavakoli, E., Ghahraman, B., Davari, K., & Ansari, H. (2013). Estimation of reference evapotranspiration with incomplete data (a case study: North Khorasan Province). *Journal of Water and Soil Science (JWSS)* 17(65): 211-221. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/20.1001.1.24763594.1392.17.65.12.4>.
 36. Turc, L. (1961). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: A simple climate formula evolved up to date. *Annales Agronomiques* 12: 13-49.
 37. Vanuytrecht, E. (2014). AQUACROP: FAO crop water productivity yield response model. *Environmental Modelling and Software* 62: 351-360. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005>.
 38. Vicente-Serrano, S.M., Azorin-Molina, C., & Sanchez-Lorenzo, A. (2014). Sensitivity of reference evapotranspiration to changes in meteorological parameters in Spain (1961-2011). *Water Resources Research* 50(11): 8458-8480. <https://doi.org/10.1002/2014WR015427>.
 39. Wu, D., Fang, S., & Li, X. (2019). Spatial-temporal variation in irrigation water requirement for the winter wheat summer maize rotation system since the 1980s on the North China Plain. *Agricultural Water Management* 214: 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.004>.
 40. Zand-Parsa, S., Parvizi, S., Sepaskhah, A.R., & Mahbod, M. (2016). Evaluation of simulated soil water content, dry matter and grain yield of winter wheat (cv. Shiraz) using WSM and AquaCrop models. *Journal of Water and Soil*

