

Original Article



Remote Sensing Data Assimilation by Forcing Method in Simulation of Silage Maize Yield Using AquaCrop Model

Elahe Akbari*

Affiliation

Dep. of Remote Sensing and
Geographic Information
System, Faculty of Geography
and Environmental Sciences,
Hakim Sabzevari University,
Sabzevar, Iran

ABSTRACT

Introduction: An essential part of agricultural plans for maintaining and developing performance at the regional scale is the timely and accurate estimation and prediction of crop yield prior to harvesting using crop growth models. Modeling dynamic changes during crop growth helps researchers to plan crop management strategies to improve its yield. These models contain several parameters that should be calibrated according to the characteristics of the study area. Lack of spatial/geographic components in these models and parameter uncertainties lead to errors in the estimated outputs. Remote sensing data assimilation can be useful for solving this problem and evaluating the spatial variability in the lands, especially at the regional scale. Remote sensing can estimate the values of input variables of crop growth models such as the Leaf Area Index (LAI), canopy cover, biomass, and soil characteristics.

Materials and Methods: To achieve accurate crop yield, it is possible to use crop growth models. To this end, the AquaCrop model parameters were estimated and the model was calibrated with measuring and sampling different required information of model in the crop growing stages and prior to cultivation over agricultural silage maize fields at the regional scale. To calibrate the Aquacrop simulation model through assimilation of remote sensing (RS) data, fCover biophysical variable was extracted from pixel-based RS data by developing GPR-PSO algorithm. Besides, to simplify the Aquacrop model, and to identify more sensitive parameters, the combined sensitivity analysis Morris and EFAST algorithms were employed. Finally, by assimilating the biophysical variable extracted by RS into the Aquacrop model, these more effective parameters were estimated through the forcing method, and compared the results with the results of no application of RS data. In order to calibrate the Aquacrop model, field sampling of soil (before planting) and crop during the growing season of silage maize, digital hemispherical photography (DHP) as well as measurement by destructive method for comparison, was performed in the fields of Qhale-Nou county located in the south of Tehran, in the summer of 2019.

Results and Discussion: The results of assimilation of RS data in Aquacrop model compared to no application of RS data in this model showed that considering data assimilation of RS data leads to the increase in model calibration accuracy. As the results suggest, the output yield for the model with data assimilation was estimated with R^2 values of 0.89 and 0.88 for calibration and evaluation, respectively. The superiority of RS data assimilation into the model as opposed to not its incorporating was also verified by improving the accuracy with increases in R^2 values by 0.14 and 0.15 and decrease in Relative RMSE (RRMSE) values of 4.12 and 5.17 percent and RMSE of 2.5 and 2.4 ton/ha for calibration and evaluation, respectively. So, compared to RS data assimilation and without assimilation is associated with improving the model calibration process with RS data assimilation.

Conclusion: The present study employed estimated fCover values obtained via RS data as observed state variables fed as input to the AquaCrop model for means of estimating the most effective parameters identified (via sensitivity analysis). The findings of this procedure indicate that RS data assimilation as a forcing method for model parameters estimating can increase the overall accuracy of the model. Moreover, the correlation between simulated and observed values was higher for the case of RS data assimilation as opposed to not incorporating such data. As these results suggest, RS data assimilation into the AquaCrop model can prove more successful and attain higher accuracies as opposed to not incorporating such data. Furthermore, this process of data assimilation can be used for estimating biophysical variables and calibrating crop growth models at the regional scale, with less time complexity and lower costs and more updated information.

Keywords: AquaCrop, Crop growth simulation model, Forcing method, fCover, Remote sensing.

Citation:

Akbari, E., Remote Sensing
Data Assimilation by Forcing
Method in Simulation of
Silage Maize Yield Using
AquaCrop Model, Iran J
Remote Sens GIS. 17(1):109-
128.

* Corresponding Author: e.akbari@hsu.ac.ir
DOI <https://doi.org/10.48308/gisj.2024.233912.1190>

Received: 2023.11.25
Accepted: 2024.01.14





داده‌گذاری سنجش از دور به‌روش جایگزینی در شبیه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای با استفاده از مدل AquaCrop

الهه اکبری *

سمت

گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

چکیده

مقدمه: برآورد به‌موقع و دقیق عملکرد محصول قبل از برداشت و پیش‌بینی آن از طریق مدل‌های رشد محصول، برای دستیابی به برنامه‌ریزی عملیات زراعی و حفظ و توسعه عملکرد در مقیاس منطقه‌ای، از اهمیت بسیاری برخوردار است. مدل‌سازی تغییرات پویا، در هنگام رشد محصول، کمک شایان توجهی به محققان می‌کند تا استراتژی‌های مدیریت محصول را به‌منظور افزایش عملکرد آن، برنامه‌ریزی کنند. این مدل‌ها حاوی پارامترهای متعددی است که باید، با توجه به ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه، کالیبره شوند؛ از طرفی، وجود نداشتن مؤلفه مکان در این مدل‌ها و نیز عدم قطعیت در مورد مقادیر پارامترهای آنها منجر به بروز خطا در خروجی‌های برآورد شده می‌شود. اسیملیت داده‌های سنجش از دور می‌تواند برای حل این مشکل و ارزیابی تغییرپذیری مکانی در اراضی، به‌ویژه در مقیاس منطقه‌ای، مفید باشد. سنجش از دور را می‌توان برای تخمین و برآورد مقادیر پارامترهای ورودی مدل‌های رشد محصول، مانند شاخص سطح برگ، سطح پوشش، بیومس، ویژگی‌های خاک به کار برد.

مواد و روشها: برای دستیابی به عملکرد دقیق محصول می‌توان از مدل‌های رشد گیاه استفاده کرد. برای تخمین پارامترهای مدل شبیه‌سازی گیاه زراعی AquaCrop و تنظیم مدل در سطح منطقه، اطلاعات مورد نیاز مدل در مراحل متفاوت رشد گیاه و قبل از کشت، در مزارع ذرت علوفه‌ای و در مقیاس منطقه‌ای، اندازه‌گیری و نمونه‌برداری شد. به‌منظور کالیبره کردن مدل شبیه‌سازی AquaCrop از طریق داده‌گذاری سنجش از دور (RS)، متغیر بیوفیزیکی fCover از داده‌های RS مبتنی بر پیکسل، با توسعه الگوریتم GPR-PSO، استخراج شد. علاوه بر این، با هدف ساده‌سازی مدل AquaCrop و شناسایی پارامترهای تأثیرگذارتر، الگوریتم‌های تحلیل حساسیت ترکیبی Morris و EFAST به کار رفت. در نهایت، از طریق داده‌گذاری متغیر بیوفیزیکی استخراج شده با RS در مدل AquaCrop، این پارامترهای مؤثرتر با استفاده از روش جایگزینی تخمین زده شد و نتایج با نتایج حاصل از شرایط استفاده نکردن از داده‌های RS مقایسه شد. به‌منظور کالیبره کردن مدل AquaCrop، نمونه‌برداری مزرعه‌ای از خاک (قبل از کاشت) و محصول در فصل رشد ذرت علوفه‌ای، عکس‌برداری رقومی نیم‌کروی (DHP) و همچنین اندازه‌گیری به‌روش تخریبی LAI برای مقایسه، در مزارع شهرستان قلعه‌نو واقع در جنوب تهران، در تابستان ۱۳۹۸ انجام شد.

نتایج و بحث: نتایج داده‌گذاری RS در مدل AquaCrop در مقایسه با به کار نبردن داده‌های RS در این مدل نشان داد که در نظر گرفتن داده‌گذاری RS منجر به افزایش دقت تنظیم کردن مدل می‌شود. نتایج نشان داد که داده‌گذاری سنجش از دور در مدل به برآورد دقت متغیر خروجی عملکرد در آماره R^2 به‌میزان ۰/۸۹ و ۰/۸۸، در واسنجی و صحت‌سنجی منجر شده است. داده‌گذاری سنجش از دور، در قیاس با اعمال نشدن آن، به بهبود دقت و افزایش R^2 به‌میزان ۰/۱۴ و ۰/۱۵ و نیز کاهش در آماره RRMSE به‌میزان ۴/۱۲ و ۱۷/۱۷٪، در آماره RMSE به‌میزان ۲/۵ و ۲/۴ ton/ha، به‌ترتیب در واسنجی و صحت‌سنجی، انجامیده است. بنابراین، در مقایسه داده‌گذاری RS و بدون داده‌گذاری، بهبود فرایند تنظیم مدل با داده‌گذاری RS همراه است.

نتیجه‌گیری: در این تحقیق، مقادیر برآورد شده پارامتر بیوفیزیکی fCover، به‌دست‌آمده از طریق سنجش از دور به‌منزله متغیر کنترل مشاهداتی ورودی برای مدل AquaCrop استفاده شد تا پارامترهای تأثیرگذار شناسایی شده آن (از طریق تحلیل حساسیت) تنظیم شود. نتایج نشان می‌دهد که داده‌گذاری سنجش از دور، با استفاده از روش جایگزینی برای تنظیم مدل مدنظر، توانسته است بر میزان دقت برآورد شده بیفزاید. علاوه بر این، توافقی بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده بیشتر از زمانی است که سنجش از دور اعمال نمی‌شود. بنابراین نتایج تحقیق نشان می‌دهد که داده‌گذاری سنجش از دور در مدل AquaCrop می‌تواند عملکردی موفق‌تر از شرایط اعمال نشدن سنجش از دور داشته باشد و نتایج با دقت بیشتری به دست دهد. همچنین، در مقیاس منطقه‌ای، می‌توان با استفاده از سنجش از دور و قابلیت آن در برآورد پارامتر بیوفیزیکی در مقیاس وسیع، با صرف وقت و هزینه کمتر و به‌روزرز، مدل‌های رشد محصول را برای منطقه مورد نظر کالیبره کرد.

واژه‌های کلیدی: روش جایگزینی، سنجش از دور، مدل شبیه‌سازی رشد گیاه، کسر پوشش گیاهی، AquaCrop.

استناد: اکبری، ا.، داده‌گذاری سنجش از دور به‌روش جایگزینی در شبیه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای با استفاده از مدل AquaCrop، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۷، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴. ۱۲۸-۱۰۹



۱- مقدمه

افزایش جمعیت جهان و بحران خشکسالی در سال‌های اخیر سبب می‌شود اهمیت بهبود بهره‌وری و بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی و مدل‌سازی رفتار و پایش محصولات کشاورزی، در راستای دستیابی به حفظ و گسترش عملکرد محصول و صرفه‌جویی منابع آبی محدود جهان، دوچندان شود (Alexandratos & Bruinsma, 2012; Razzaghi et al., 2017). بنابراین مطرح کردن راهکاری به‌منظور پایش محصولات کشاورزی، طراحی الگوی کشت پایدار، برای برنامه‌ریزی کشت در سال‌های آینده، افزایش تولید با صرف آب کمتر و کاهش هزینه‌ها، ضروری به نظر می‌رسد (Busetto et al., 2017). در این راستا برآورد عملکرد محصول و پیش‌بینی آن، از طریق مدل‌های گیاهی فرایندبنیان^۱، کشاورزان را قادر می‌سازد تا عملیات زراعی خود، همچون زمان و نوع کاشت، زمان و میزان کوددهی و آبیاری را براساس عملکرد مورد انتظار برنامه‌ریزی کنند (Silvestro et al., 2017). بنابراین، با توجه به دغدغه کشور درمورد برآورد عملکرد محصول در شرایط اقلیمی و استراتژی‌های متفاوت کشت و نیز برای ارزیابی نحوه عملکرد مدیریت‌های کشت متفاوت و تصمیم‌گیری درباره کشت پایدارتر با صرف هزینه‌ای کمتر، ایجاد مدل رشد منسجم در هر گیاه زراعی الزامی است.

با توجه به ضرورت بهبود بهره‌وری استفاده از آب در تولید محصول طی شرایط بحران مواد غذایی در کشورهای درحال توسعه، فائو مدل شبیه‌سازی محصول AquaCrop را توسعه داده است (Hsiao et al., 2009). این مدل، به‌منظور بهینه‌سازی استراتژی‌های مدیریت آب در کشاورزی و بهبود عملکرد محصول در مناطق تحت آبیاری، استفاده می‌شود (Jin et al., 2016). از آنجاکه کشور در سال‌های اخیر، به‌دلیل کاهش بارندگی و وقوع خشکسالی، با بحران آب مواجه است، کاربرد این مدل می‌تواند در زمینه مدیریت آبیاری بهینه، مفید باشد. هرچند مقادیر پیش‌فرض برای پارامترهای مدل‌های گیاهی مطرح شده، بسیاری از این

پارامترها تحت تأثیر نوع رقم کشت، اقلیم، نحوه مدیریت اراضی، تراکم کشت و تنش‌های متفاوت منطقه مورد نظر قرار می‌گیرند. تنظیم مدل، برای محل خاص و شرایط کشاورزی منطقه، می‌تواند آن را به ابزاری توانمند در توسعه استراتژی‌های مدیریت آب به‌منظور بهبود تولید و صرفه‌جویی در مصرف آب، تبدیل کند (Hsiao et al., 2009).

وجود نداشتن مؤلفه مکان در مدل‌های فرایندبنیان و در نظر نگرفتن تغییرپذیری مکانی در مزارع چالش بزرگ این مدل‌های شبیه‌سازی یک‌بعدی محسوب می‌شود (Clevers et al., 2002) و تعیین ورودی‌های مدل، برای ابعاد مکانی- زمانی مورد نیاز، دشوار و هزینه‌بر و زمان‌بر است. در نتیجه، فرض همگنی مکانی در اراضی اغلب به بروز خطا در خروجی‌های برآورد شده در این مدل‌ها منجر می‌شود (Launay & Guerif, 2005). برای حل این مشکل، می‌توان به داده‌گواری^۲ سنجش از دور اقدام کرد. رویکرد داده‌گواری عبارت از استفاده داده‌های مشاهده‌شده، برای به‌روزرسانی متغیرهای حالت^۳ شبیه‌سازی‌شده مدل و یا برآورد پارامترهای مدل است (Hoefsloot et al., 2012). داده سنجش از دور با پیوسته فراهم کردن داده واقعی زمینی در مناطق وسیع، به‌صورت به‌موقع و نزدیک به زمان واقعی در مراحل گوناگون رشد محصول، با صرف هزینه و زمان کمتر از برداشت زمینی، می‌تواند داده‌های مورد نیاز این مدل‌ها را برای برآورد منسجم‌تر و دقیق‌تر عملکرد محصول فراهم کند (Quaife et al., 2008). این داده‌ها در استخراج متغیرهای بیوفیزیکی مانند زیست‌توده یا بیومس^۴، کسر پوشش گیاهی (FVC)^۵ یا fCover و شاخص سطح برگ (LAI)^۶ به کار می‌روند

1. Process Based Model

2. Data assimilation

3. State variable: (متغیری که معرف وضعیت و حالت پویایی یک سیستم یا مدل است و بر روی خروجی مدل تأثیرگذار می‌باشد)

4. Biomass

5. Fraction Vegetation Cover

6. Leaf Area Index

مدل را تنظیم و عملکرد برنج را برآورد کرد. در این پژوهش نیز به کارآیی روش جایگزینی، در بهبود برآورد عملکرد برنج، اشاره شده است. برای آگاهی از تمامی تحقیقات در زمینه داده‌گواری سنجش از دور به‌روش جایگزینی، می‌توان به تحقیق مروری اکبری^۳ (۲۰۲۳) مراجعه کرد. از آنجاکه هدف تحقیق حاضر مطالعه مدل AquaCrop است، به تحقیقات انجام‌شده در مورد این مدل با جزئیات بیشتری توجه شده و مدل‌های دیگر بررسی نشده‌اند. اما به‌طور کلی، در مطالعاتی که تا کنون انجام شده، بر تنظیم پارامترهای مدل به‌جای استفاده از مقادیر پیش‌فرض آنها تأکید شده است. اغلب این تحقیقات در سطح مزرعه انجام شده؛ حال آنکه شبیه‌سازی و اعتبارسنجی مدل AquaCrop، روی مزارع شهرستانی در وسعت منطقه‌ای، چالش تحقیقات پیشین محسوب می‌شود که در تحقیق حاضر بررسی شده است. در مقیاس منطقه‌ای، زمان کشت، نوع خاک، برنامه آبیاری و مدیریت زراعی اعمال‌شده در مزارع بسیار متغیر و متفاوت است.

در این تحقیق، به‌منظور شبیه‌سازی مدل گیاه زراعی AquaCrop و تخمین پارامترهای آن، طی دوره رشد گیاه ذرت علوفه‌ای در تابستان ۱۳۹۸ در شهرستان قلعه‌نو تهران، برداشت میدانی انجام شده است. برای این منظور، از خاک و گیاه نمونه‌برداری شد و پرسشنامه مدیریتی، درمورد سی مزرعه، تکمیل شد. براساس دو رویکرد داده‌گواری سنجش از دور از طریق روش جایگزینی و نیز بدون اعمال داده سنجش از دور، پارامترهای مدل AquaCrop تخمین زده و برای شرایط منطقه تنظیم شد؛ نتایج نیز، از طریق واسنجی^۴ و صحت‌سنجی^۵، با یکدیگر مقایسه شدند.

و می‌توان آنها را به‌منزله متغیر مشاهداتی از طریق داده‌گواری در مدل رشد محصول برای تنظیم آن، وارد کرد (Jin et al., 2018). رویکرد داده‌گواری سنجش از دور مشتمل بر سه روش اصلی، شامل جایگزینی و به‌روزرسانی متوالی و کالیبراسیون است. در این تحقیق، از روش جایگزینی استفاده شده که دلیل آن سادگی محاسباتی و وجود اثر جابه‌جایی فنولوژی در مزارع است. اثر جابه‌جایی فنولوژی مزارع عبارت است از اختلاف بین زمان کشت، در مزارع گوناگون در سطح شهرستان و وجود تفاوت بین زمان‌های کشت با زمان‌های تصویربرداری ماهواره‌ای در کل سطح شهرستان (Curnel et al., 2011; Liang et al., 2013). روش‌های کالیبراسیون و به‌روزرسانی دارای پیچیدگی محاسباتی‌اند و علاوه بر آن، جابه‌جایی فنولوژی در مزارع ممکن است در کارآیی آنها اثر بگذارد (Akbari, 2023). رویکرد داده‌گواری سنجش از دور، در تحقیقات متعددی، به‌روش جایگزینی و به‌منظور تخمین پارامترهای مدل‌های متفاوت رشد گیاه و تنظیم مدل‌ها، به کار رفته است (از جمله، Abi Saab et al., 2021; Badiheshin et al., 2014; Hadria et al., 2006; Ma et al., 2022; Morel et al., 2012; 2014; Sadooghi et al., 2017; Tripathy et al., 2013; Vazifedoust et al., 2009; Yao et al., 2015). از میان این تحقیقات، دو مورد (Abi Saab et al., 2021; Ma et al., 2022) روی مدل AquaCrop انجام شده است. در این دو پژوهش، کارآیی داده‌گواری سنجش از دور به‌روش جایگزینی در تنظیم مدل AquaCrop و کاهش خطای RMSE، به‌ترتیب در گیاهان گندم و پنبه بررسی و بیان شده است که پیش از توسعه دادن این روش به مناطق دارای وسعت بیشتر از محدوده محلی مزرعه، مطالعات و تحقیقات بیشتری باید انجام شود. این محققان، به‌ترتیب، متغیرهای حالت fCover و بهره‌وری استفاده از آب^۱ را برای تنظیم مدل در نظر گرفته‌اند. جعفری صیادی^۲ (۲۰۲۱) در رساله دکتری خود، با ادغام داده ماهواره‌ای و مدل AquaCrop، این

1. Water Use Efficiency
2. Jafari Sayadi
3. Akbari
4. Calibration
5. Validation

۲- مواد و روش‌ها

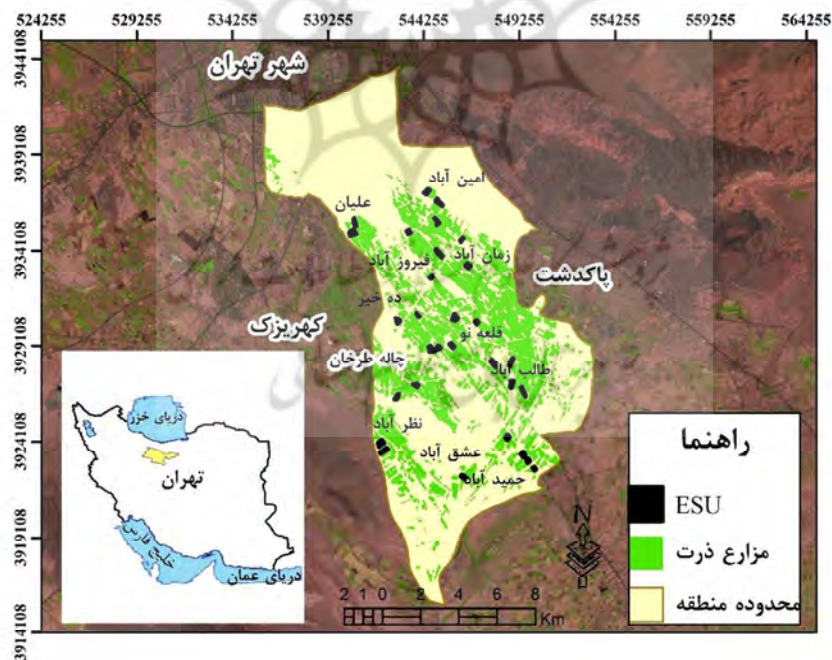
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

مزارع مطالعاتی، در مطالعه حاضر، شامل مزارع ذرت علوفه‌ای طی فصل رشد در سال ۱۳۹۸، واقع در شهرستان قلعه‌نو در استان تهران است ($35^{\circ} 36' N$ - $51^{\circ} 23' E$) (شکل ۱). این منطقه دارای مورفولوژی دشت و اغلب دارای مزارع کشاورزی ذرت علوفه‌ای (۷۵۰۰ هکتار) است. دو گونه محلی ذرت علوفه‌ای (سینگل کراس ۷۰۴ و ۷۰۶)، از میانه‌های خرداد تا اواسط تیر ۱۳۹۸، کاشته و از میانه شهریور تا میانه مهر همان سال برداشت شد. منبع آبیاری مزارع شامل آب قنات، چاه و فاضلاب تصفیه‌نشده شهری بود و از روش آبیاری بارانی و سطحی استفاده شد. در این مطالعه، مزارع مطالعاتی شامل سی مزرعه زیرکشت ذرت علوفه‌ای می‌شد که نمونه‌برداری و اندازه‌گیری‌های مورد نظر، در هر واحد

نمونه‌برداری اولیه (ESU)^۱، انجام شد (شکل ۱). ESU هم‌اندازه با پیکسل تصویر ماهواره‌ای سنتینل-۲، به‌ابعاد ۲۰ متر، در فاصله حداقل سی‌متری از مرز مزارع (برای رفع اثر مرز)، به‌طور فرضی روی زمین ایجاد می‌شود و نمونه‌برداری در سه ردیف سه‌تایی یا بین این ردیف‌ها، در داخل این مربع، انجام می‌شود (برای کسب اطلاعات بیشتر، نگاه کنید به Akbari et al., 2020b).

۲-۲- داده میدانی

به‌منظور پوشش دادن هرچه بیشتر تغییرپذیری منطقه مورد مطالعه، براساس نقشه نوع کشت منطقه، بافت خاک و اطلاعات داده‌شده ازسوی کشاورزان در آغاز فصل رشد ذرت علوفه‌ای، نمونه‌برداری طبقه‌بندی‌شده^۲ برای انتخاب ESU (تعداد ۳۰ محل نمونه‌برداری) با احتساب گونه‌های متفاوت ذرت علوفه‌ای و تاریخ کاشت متفاوت آنها، در نظر گرفته شد. نمونه‌برداری در فصل رشد ذرت علوفه‌ای در سال ۱۳۹۸ انجام شد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و مزارع ذرت علوفه‌ای مورد پایش

1. Elementary Sampling Unit
2. Stratified Sampling

در پنج نقطه از سطح مزرعه، از عمق ۰ تا ۶۰ سانتی‌متری خاک، به‌شکل M یا W نمونه‌برداری مرکب شد و اندازه‌گیری آزمایشگاهی، شامل بافت خاک (رس، سیلت و شن)، مواد آلی و مقدار رطوبت حجمی خاک در نقطه اشباع (SAT)، ظرفیت مزرعه^۱ (FC) و پژمردگی دائم^۲ (PWP) به‌روش گلدانی، انجام شد. هدایت هیدرولیکی اشباع (Ksat) از طریق توابع انتقالی خاک^۳ (Wosten et al., 2001) و مقادیر رطوبت حجمی در اشباع، ظرفیت مزرعه و پژمردگی به دست آمد. با توجه به پایین بودن سطح آب زیرزمینی، نیاز نبود عمق آب زیرزمینی در نظر گرفته شود. این داده‌ها در بخش خاک مدل AquaCrop، به‌منزله ورودی برای هر مزرعه، در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، نمونه‌برداری خاک قبل از کشت انجام شد و در جدول ۲، حداقل و حداکثر و میانگین پارامترهای خاک آمده است. این موارد در سی ESU نمونه‌برداری و آزمایش شده و شامل بافت خاک، چگالی حجمی، محتوای آب و شیمی خاک است.

در مدل AquaCrop، در بخش اقلیم، داده‌های بارش، تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ET_o)، دمای حداقل و حداکثر و CO₂ به‌صورت مستقیم به‌منزله داده‌های ورودی لحاظ می‌شود. داده‌های هواشناسی روزانه برای بازه زمانی رشد گیاه ذرت (اوایل خرداد تا اواخر آذر ۱۳۹۸) برای موقعیت ایستگاه امین‌آباد، دمای حداکثر و حداقل روزانه، میانگین دما، میانگین بارش روزانه، رطوبت نسبی حداکثر، حداقل و میانگین، میانگین سرعت باد و ساعات آفتابی از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد (IRIMO, 2019). تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ET_o) از طریق روش فائو پـنـمن مانتیثـت (<https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/eto-calculator/en/>) و تشعشع خورشیدی در سطح زمین، از طریق روش انگستروم- پریسکات (Prescott, 1940) برآورد شد. جدول ۱ ویژگی‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه در فصل رشد گیاه ذرت علوفه‌ای را ارائه می‌دهد.

جدول ۱. ویژگی‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه طی فصل رشد گیاه ذرت علوفه‌ای

ماه	دما (°C)	بارش (mm)	تشعشع خورشید (MJ/m ² /day)	تبخیر (mm/day)
	حداقل	حداکثر		
می	۱۶/۶	۳۱/۴	۰	۱۷/۸
ژوئن	۱۹/۹	۳۵/۱	۰	۱۹/۵
جولای	۲۴/۵	۴۰/۹	۰	۱۹/۵
اوت	۲۲/۱	۳۸/۵	۰	۱۷/۹
سپتامبر	۱۷/۶	۳۳/۸	۰	۱۴/۶
اکتبر	۱۲/۵	۲۵/۹	۰	۱۰/۳
نوامبر	۶/۷	۱۶/۵	۲۸/۷	۶/۵
دسامبر	۴/۵	۱۵/۲	۵/۰	۶/۵

1. Field Capacity
2. Permanent Wilting Point
3. Pedo – Transfer

جدول ۲. آماره‌های توصیفی ویژگی‌های خاک در ESUهای مزارع مطالعاتی

پارامترهای خاک	ش. (%)	سیلت (%)	رس (%)	چگالی حجمی (g/cm ³)	FC (%)	PWP (%)	Sat (%)	کربن آلی (%)	PH	EC (dS m ⁻¹)	نیترژن معدنی (mg Kg ⁻¹)	Total volatile nitrogen (TVN) (%)	نیترژن (%)	فسفات (P) (mg Kg ⁻¹)	پتاسیم (K) (mg Kg ⁻¹)
لوم	۴۷/۴	۳۳/۱	۱۹/۵	۱/۷	۲۸/۱	۱۳/۶	۵۴/۷	۱/۰۵	۷/۴	۲/۸	۵۱/۵	۲۳/۳	۰/۱۱	۳۲/۷	۳۲۵/۶
میانگین	۵۸/۲	۲۸/۲	۱۳/۷	۱/۷۱	۲۸/۵	۱۴/۹	۵۶	۰/۸۱	۷/۵	۳/۲	۴۶/۶	۱۸/۳	۰/۰۹	۲۷/۱	۳۱۶/۱
لوم	۴۵/۰	۳۰/۰	۱۱/۰	۱/۴	۱۸/۹	۸/۲	۳۲/۷	۰/۴۱	۷/۱	۱/۲	۲۹/۲	۱۹/۵	۰/۰۵	۴/۹	۲۹۵/۰
حداقل	۵۳/۰	۱۶/۰	۱۱/۰	۱/۶	۲۲/۳	۱۱/۵	۴۶/۱	۰/۴۹	۷/۴	۱/۴	۳۱/۹	۱۰/۳	۰/۰۵	۱/۲	۲۸۶/۰
لوم	۵۲/۰	۴۰/۰	۲۳/۰	۱/۸۵	۳۵/۸	۱۶/۲	۶۳/۷	۱/۶۴	۷/۷	۷/۹	۶۷/۲	۲۷/۳	۰/۱۵	۹۰/۷	۳۶۴/۰
حداکثر	۷۲/۰	۳۳/۰	۱۷/۰	۱/۸۹	۳۹/۷	۲۴/۴	۸۱/۴	۱/۰۹	۷/۷	۹/۲	۶۴/۳	۲۱/۵	۰/۱۲	۵۴/۸	۳۶۵/۰

مشاهده می‌شد. داده‌های گردآوری‌شده در بخش گیاه نیز، به‌منزله ورودی در مدل AquaCrop، در هر مزرعه نمونه‌برداری‌شده در نظر گرفته شد.

۲-۲-۱- اندازه‌گیری LAI و fCover

با استفاده از دو پروتکل، داده LAI جمع‌آوری شد و سپس میانگین نتایج دو پروتکل به دست آمد. تعداد دفعات نمونه‌برداری با فاصله زمانی ده تا پانزده‌روزه (شش بار در هر ESU)، با در نظر گرفتن فنولوژی ذرت علوفه‌ای در کل دوره رشد و پوشش دادن زمان‌های مهم فنولوژی گیاه، شامل سه تا چهاربرگی (۲۱ و ۲۶ تیر)، هشت تا نه‌برگی (۵ و ۱۰ مرداد)، دوازده‌برگی (۲۰ و ۲۵ مرداد)، گل‌دهی (۴ و ۹ شهریور)، شکل‌گیری دانه (۱۴ و ۱۹ شهریور) و شروع پر شدن دانه (۲۴ و ۲۹ شهریور، ۸ و ۱۸ مهر) لحاظ شده است. ذرت علوفه‌ای در شهرستان قلعه‌نو از اواسط خرداد تا میانه تیر ۱۳۹۸ کاشته و از اواسط شهریور تا اواسط مهر همان سال برداشت شد. با توجه به اختلاف زمانی کاشت در مزارع سطح شهرستان، تعدادی از مزارع نمونه مورد مطالعه در این تحقیق، تا اواسط تیر، هنوز اقدام به کاشت نکرده بودند و برخی مزارع در مرحله رشد اولیه قرار داشتند. به همین ترتیب، این مزارع

از کشاورزان پرسشنامه‌ای تهیه شد که هدف آن ایجاد لایه مدیریتی، شامل این موارد بود: برنامه‌ریزی آبیاری (تاریخ و مدت زمان آبیاری)، نوع سیستم آبیاری، رقم ذرت، نوع (روش) کشت، عمق کشت، تاریخ کاشت و برداشت، فاصله بین ردیف‌های کاشت و نیز کاشت روی ردیف‌ها (آرایش کشت)، مقدار بذر مصرفی در هر هکتار (تراکم کشت)، عملکرد محصول (سال جاری). البته در هنگام نمونه‌برداری زمینی، علاوه‌بر پرسش از کشاورزان، فاصله دقیق بین ردیف‌های کاشت و فاصله کاشت روی ردیف‌ها نیز اندازه‌گیری شد تا بتوان از آن برای محاسبه مساحت منطقه پروتکل تخریبی و تراکم کشت دقیق‌تر استفاده کرد. برای برآورد حجم آبیاری، روش محاسباتی و ریاضی براساس عرض جوی یا لوله آب و ارتفاع آب عبورکرده از آنها به کار رفت و نیز در برخی مزارع نمونه، از دبی‌سنج استفاده شد. علاوه‌بر اندازه‌گیری LAI و fCover (در بخش بعد، توضیح داده شده است) در مزارع مطالعاتی، چنین اطلاعاتی جمع‌آوری شد: تعداد برگ‌ها، تاریخ‌های فنولوژی شامل زمان شروع جوانه زدن، زمان شروع طول دوره گل‌دهی، زمان آغاز شکل‌گیری بلال و طول دوره آن، زمان شیرگی شدن، کاکل‌دهی، و زمان آغاز زرد شدن برگ‌ها که در مزارع، با هر بار مراجعه،

مزارع) است. مرکز ESU با استفاده از GPS اندازه‌گیری شد. به‌منظور محاسبه و در نظر گرفتن تغییرپذیری مکانی در هر ESU، بین ۱ تا دوازده عکس DHP برداشته شد؛ این کار براساس برنامه عکاسی پیشنهادی برای کانوپی همگن (مشابه ذرت) (ESA, 2005) انجام شد. در این منطقه، ۱۸۰ گروه عکس DHP (که عبارت است از ۱ تا دوازده عکس در هر ESU)، در کل دوره رشد گیاه ذرت علوفه‌ای، با دوربین Canon 5d mark ii مجهز به لنز فیش آی FC-E8 برداشته شده است. براساس پژوهش کلاوری^۳ و همکاران (۲۰۱۲)، برای کاهش خطاها در برآورد کسر شکاف جهتی^۴، دوربین روی سه پایه تلسکوپی قرار گرفت؛ بدین ترتیب جهت مشاهده به سمت پایین و فاصله کانوپی تا سنسور (۱/۵ متر) ثابت بود. برای محاسبه fCover، از پردازشگر CAN-EYE (<http://www4.paca.inra.fr/can-eye>) استفاده شد. این پردازشگر امکان به دست آوردن متغیرهای بیوفیزیکی کانوپی، مانند fCover، FAPAR^۵ و ALIA^۶ را براساس برآورد کسری شکاف^۷ و با استفاده از معکوس مدل Poisson، فراهم می‌کند. در این روش با استفاده از جدول مراجعه‌ای^۸، با محدوده زاویه زینت متفاوت، مقادیر مورد نظر برآورد می‌شود (ESA, 2005). برای محاسبه LAI، از مدل Ritchie بهره گرفته شد: $fCover = 1 - \exp(-K \cdot LAI)$ (Jin et al., 2017) که در آن K ضریب میرایی، به میزان ۰/۵۰۷۶۴۳ برای ذرت مطابق با اندازه‌گیری و محاسبات میدانی و قانون Beer-Lambert (Liu et al., 2013) در نظر گرفته شده است (Akbari et al., 2020a; 2020b).

سایر مراحل رشد را زودتر طی کردند و در میانه شهریور درو شدند؛ در صورتی که سایر مزارع که دیر کشت کرده بودند، در مراحل میانی رشد قرار داشتند. بنابراین، در دفعات نخست مراجعه، مزارع اندکی نیز در زمان‌های فنولوژی اولیه وجود داشتند.

۵ پروتکل تخریبی (محاسبه LAI از طریق چیدن گیاه): نمونه‌های گیاهی ذرت علوفه‌ای، طی فصل رشد آن در زمان‌های اشاره‌شده، جمع‌آوری شد. در هر ESU چهار بوته چیده و طول و عرض هر برگ به صورت دستی اندازه‌گیری شد. مساحت هر برگ به‌طور جداگانه، براساس طول × عرض حداکثر هر برگ × ۰/۷۵، به دست آمد. LAI با تقسیم سطح برگ کل برگ‌های چهار بوته بر مساحت منطقه پروتکل تخریبی محاسبه شد (مساحت منطقه پروتکل تخریبی: تعداد نمونه‌های تخریبی × فاصله ردیف × فاصله بین بوته‌ها در هر ردیف) (Gao et al., 2010; Münz et al., 2014; Xia et al., 2016).

۶ پروتکل عکس‌برداری رقومی نیم‌کروی (DHP): اندازه‌گیری متغیرهای بیوفیزیکی گیاه به‌صورت غیرتخریبی، با استفاده از روش‌های اپتیکی غیرمستقیم مانند AccuPAR LU80 ceptometer (Decagon, Pullman, WA) (LI-LAI-2000 تحلیل‌گر کانوپی (COR, Lincoln, NE) و عکس‌برداری رقومی نیم‌کروی انجام می‌شود (Akbari et al., 2020b). در این تحقیق، طی فصل رشد گیاه، عکس‌برداری نیم‌کروی در هر ESU به‌منظور جمع‌آوری و محاسبه داده‌های fCover، به‌صورت سری زمانی و منطبق بر زمان‌های مهم فنولوژی گیاه (ذکرشده در ابتدای این بخش) انجام شد (شکل ۲). طرح نمونه‌برداری در هر ESU در شش نوبت، منطبق بر دستورالعمل‌ها و توصیه‌های پروتکل اعتبارسنجی، از طریق ابزارهای سنجش از دور در اروپا (VALERI)^۲ انجام شد (<http://w3.avignon.inra.fr/>) (valeri/; Baret et al., 2005). ابعاد هر ESU در حدود ۲۰ × ۲۰ متر است و برای رفع اثر مرز، موقعیت آنها دور از مرز زمین کشاورزی (حداقل سی متر به سمت داخل

1. Digital Hemispherical Model
2. Validation of Land European Remote Sensing Instruments
3. Claverie
4. Directional Gap Fraction
5. Fraction of Absorbed Photo-Synthetically Active Radiation
6. Average Leaf Inclination Angle
۷. gap fraction: سهمی از آسمان قابل مشاهده از طریق کانوپی است.
۸. Look Up Table: جدولی که در آن مقادیر ورودی و خروجی گوناگون، براساس روش‌های انتقال تابش قرار دارد.



شکل ۲. نمونه‌ای از عکس‌های DHP دریافت‌شده از مزارع ذرت علوفه‌ای در مراحل ۴-۵ برگی، ۸-۹ برگی، دوازده‌برگی و گل‌دهی

۲-۲-۲- اندازه‌گیری بیومس

برای نیمه دوم منحنی CC در مدل، تا قبل از رسیدن به مرحله حداکثر CC:

$$CC = CC_x - (CC_x - CC_0) * e^{-CGC*t} \quad (2)$$

برای پس از رسیدن به مرحله حداکثر و مرحله کاهش رشد گیاه:

$$CC = CC_x \left[1 - 0.05 \left(e^{\frac{CDC}{CC_x}t} - 1 \right) \right] \quad (3)$$

CC₀ مقدار اولیه CC، CC_x مقدار حداکثر CC، CGC ضریب رشد گیاه، CDC ضریب کاهنده رشد گیاه، و t زمان است (Steduto et al., 2009).

(۲) تعرق گیاه (Tr): در شرایط وجود آب کافی، Tr با ضرب تبخیر- تعرق مرجع در ضرایب گیاه (K_{Tr}) محاسبه می‌شود K_s شامل تنش آبی — تنش بسته شدن روزنه‌ها و قطع شدن آب — و تنش شوری خاک، K_{sTr} تنش سردی، K_{C_{Tr,x}} ضریب تعرق گیاه در قیاس با گیاه مرجع علفی است).

(۳) بیومس بالای سطح زمین (B): مطابق رابطه (۴)، این مقدار متناسب با مقدار تجمعی تعرق گیاه (ΣTr) است که فاکتور تناسب و بهره‌وری آب (WP)

وزن تر و خشک برای محاسبه شاخص برداشت^۱ و بیومس گیاه در دوره‌های متفاوت رشد و زمان‌های نمونه‌برداری (چهار بوته در هریک از ۱۸۰ نمونه گیاهی) اندازه گرفته شد. این نمونه‌ها در آون، با درجه حرارت ۷۰، به مدت چند روز در آزمایشگاه و تا زمانی که به وزن ثابت برسد، قرار گرفت و در نهایت، وزن خشک هر نمونه با ترازوی دارای دقت یک گرم اندازه‌گیری شد. وزن‌های اندازه‌گیری‌شده به مساحت منطقه پروتکل تخریبی (مساحت منطقه پروتکل تخریبی: تعداد نمونه‌های تخریبی × فاصله ردیف × فاصله بین بوته‌ها در هر ردیف) تقسیم شد تا بیومس در واحد سطح به دست آید.

۲-۳- مدل AquaCrop

چهار مرحله کلی برای شبیه‌سازی عملکرد محصول در مدل AquaCrop عبارت است از:

- (۱) توسعه کسر پوشش گیاهی (CC): در AquaCrop، سطح پوشش گیاهی از طریق CC و نه از طریق LAI، توسعه می‌یابد (Raes, 2017).
- برای نیمه اول منحنی CC در مدل:

$$CC = CC_0 e^{CGC*t} \quad (1)$$

1. Harvest Index

f_{HI} تابعی است که تنش‌های آبی و دمایی متفاوت قبل از گل‌دهی، در زمان گرده‌افشانی و شکل‌گیری محصول را دربرمی‌گیرد (شکل ۳) (Raes, 2017; Raes et al., 2017). در مدل AquaCrop، پارامترهایی برای این موارد تنظیم می‌شود: تنش‌های آبی گوناگون، شوری، محدودیت حاصل‌خیزی خاک، ضریب انحنای نمودار تنش‌های گوناگون در دوره‌های متفاوت رشد (پیری زودرس، بسته شدن روزنه‌ها)، ضریب انحنای نمودار رشد ریشه، حد بالا و حد پایین شوری قابل تحمل گیاه، بهره‌وری آب نرمال‌شده، ضریب رشد (CGC) CC، ضریب کاهش (CDC) CC، C_{co} ، C_{cx} ، دمای بهینه و دمای حداکثر مجاز برای رشد گیاه، زمان رسیدن به مراحل گوناگون رشد گیاه (برای نمونه، زمان رسیدن از مرحله کشت تا رسیدگی)، حداکثر و حداقل عمق ریشه، شاخص برداشت مرجع (H_{io}) (Raes et al., 2017) و بسیاری پارامترهای دیگر مطابق پیوست ۱ (که به دلیل اختصار، از بیان همه آنها صرف‌نظر می‌کنیم).

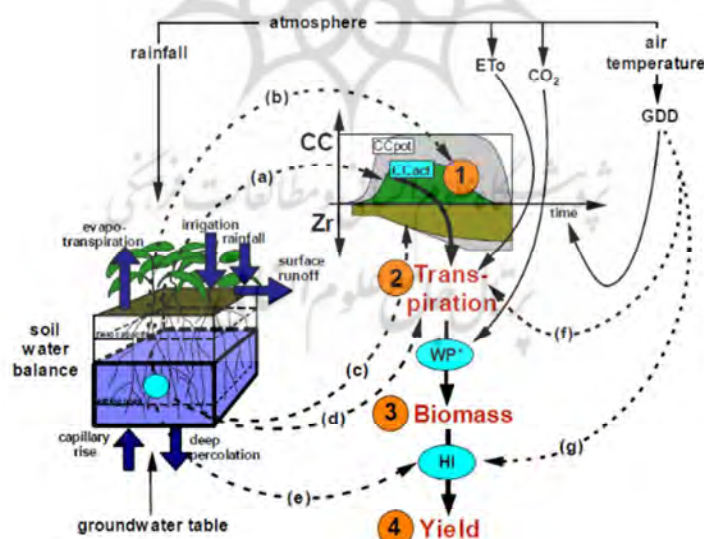
درمورد بیومس است. در AquaCrop، WP برای اثر شرایط اقلیمی متفاوت، نرمال می‌شود که بهره‌وری آب نرمال (WP^*) معتبر را درمورد بیومس، برای مکان‌ها، فصل‌ها و غلظت‌های متفاوت CO_2 ایجاد می‌کند.

$$B = Ks_{WP} WP^* \sum \frac{Tr_i}{ETO_i} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این معادله، i بیانگر شمارنده هر روز خاص و Ks_{WP} تنش حاصل‌خیزی خاک و $\sum \frac{Tr_i}{ETO_i}$ به معنی مجموع حاصل این عبارت، برای روزهای شبیه‌سازی رشد گیاه است.

مرحله آخر، عملکرد محصول (Y): با استفاده از شاخص برداشت (HI) که سهمی از B (حاصل رابطه (۴)) درمورد محصول قابل برداشت است، عملکرد محصول از B به دست می‌آید. HI واقعی طی فرایند شبیه‌سازی، با تنظیم شاخص برداشت مرجع (HI_0) با فاکتور تعدیل برای تأثیرات تنشی، حاصل می‌شود.

$$Y = f_{HI} * HI_0 * B \quad \text{رابطه (۵)}$$



شکل ۳. طرح محاسبه AquaCrop با نشان دادن چهار مرحله اجرایی آن و فرایندهای (فلش‌های خط‌چین) تحت تأثیر تنش آبی (a تا e) و تنش دمایی (f تا g). CC تاج‌پوشش سبز؛ Ccpot و Ccact بیانگر CC پتانسیل و واقعی؛ Zr عمق ریشه؛ Eto تأخیر-تغرق مرجع؛ WP^* بهره‌وری آب بیومس نرمال‌شده؛ HI شاخص برداشت؛ GDD شاخص درجه-روز رشد است. تنش آبی (a): گسترش تاج‌پوشش را کند می‌کند؛ (b) تسریع پیری تاج‌پوشش؛ (c) کاهش به عمق رفتن ریشه، اگر شدید باشد؛ (d) کاهش باز بودن روزنه‌ها و تعرق، و ϵ تأثیرگذار در شاخص برداشت؛ تنش دمای سرد (f) کاهش تعرق گیاه. تنش دمای سرد یا گرم (g) مانع از گرده‌افشانی و کاهش HI می‌شود (Raes, 2017).

تمامی این موارد به‌صورت روابط ریاضی در مدل طراحی شده و برای کالیبره کردن مدل، براساس شرایط منطقه مورد مطالعه، قرار داده شده‌اند که به‌دلیل اختصار، از بیان تمامی روابط ریاضی و معادلات مورد نظر خودداری کردیم.

۲-۴- داده‌گواری سنجش از دور به‌روش جایگزینی

میزان رشد گیاه، در نقاط متفاوت اراضی زراعی، بسیار متغیر است و اگر فقط به برداشت پلات یا ESU در چند نقطه از مزرعه‌ای وسیع اکتفا شود، متغیر بیوفیزیکی برآوردشده معرف رفتار گیاه در پهنه‌ای وسیع نخواهد بود و با خطا همراه است. ازاین‌رو در این تحقیق، از میانگین مقادیر حاصل از عکس‌برداری رقومی نیم‌کروی و تخریبی به‌منزله مقادیر زمینی fCover استفاده شد و با ایجاد رابطه بین این مقدار زمینی و میزان انعکاس در باندهای چندطیفی در تصویر ماهواره‌ای سنتینل-۲، متغیر بیوفیزیکی fCover در مزارع وسیع به دست آمد. بنابراین fCover به‌صورت سطح پیوسته (نه به‌صورت مربعی کوچک) در مزارع منطقه مورد مطالعه، ازطریق داده سنجش از دور سنتینل-۲ و با استفاده از الگوریتم GPR-PSO^۱ در تصاویر، منطبق با زمان‌های فنولوژی گیاه ذرت علوفه‌ای (در بخش اندازه‌گیری LAI و fCover به آن اشاره شد) تولید شده است. پارامترهای مجهول الگوریتم رگرسیون فرایند گوسی (GPR) که باید با توجه به منطقه و داده‌های مورد مطالعه بهینه‌سازی شوند، با استفاده از این الگوریتم ترکیبی به دست آمده‌اند. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با ایجاد حلقه تکرار، تا دستیابی به حداقل مقدار در تابع هزینه^۲ برای بهینه‌سازی این پارامترها، استفاده شد. نحوه اجرای این الگوریتم در تحقیق اکبری و همکاران (۲۰۲۳) بیان شده است. این مقدار fCover برآوردشده ازطریق تصویر ماهواره‌ای برای جایگذاری به‌جای متغیر CC در مدل AquaCrop به کار رفت. ازطرفی، پارامترهای تأثیرگذار مدل AquaCrop در این منطقه، به‌منظور ساده‌سازی

مدل و امکان برآورد دقیق‌تر خروجی مدل، با تحلیل حساسیت ترکیبی Morris و EFAST^۳ شناسایی شدند. برای مطالعه بیشتر، می‌توان به پژوهش‌هایی در این زمینه (Akbari et al., 2024; Akbari, 2020; Vanuytrecht et al., 2014) مراجعه کرد.

طبق نتایج تحلیل حساسیت در منطقه مورد مطالعه، با استفاده از تحلیل حساسیت ترکیبی Morris و EFAST مشخص شد که پارامترهای ^{4}cgc ، ^{5}ccx ، $^{6}anaer$ ، $^{7}stbio$ ، $^{8}rtmin$ ، ^{9}rtx ، ^{10}kc و ^{11}wp تأثیرگذاری بیشتری در مدل AquaCrop دارند (Akbari et al., 2024). برای شبیه‌سازی مدل AquaCrop لازم است پارامترهای مدل، درمورد گیاه مزارع مطالعاتی، تخمین بخورد و مدل برای منطقه تنظیم شود؛ بدین‌منظور طبق جدول پیوست ۱، به‌جز این هشت پارامتر، سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده و میزان میانگین حدود تعریف‌شده در این جدول به آنها نسبت داده شده است. البته شایان ذکر است که پارامترهای مربوط به فنولوژی، تراکم و سایر پارامترهایی که در جدول پیوست به‌صورت نتایج تجربی نوشته شده است، طبق آنچه در کار میدانی و آزمایشگاه اندازه‌گیری شده، در مدل AquaCrop قرار داده شده است.

برای تنظیم مدل و درنتیجه، تخمین پارامترهای تأثیرگذار شناسایی‌شده آن (هشت پارامتر نام‌برده)، از داده‌گواری سنجش از دور به‌روش جایگزینی استفاده شده است. در روش جایگزینی، مقدار مشاهداتی متغیر

1. Gaussian Process Regression-Particle Swarm Optimization
2. Cost Function
3. Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test
4. Canopy Growth Coefficient
5. Maximum Canopy Cover
6. Anaerobic Point below Saturation Limiting Aeration
7. Minimum GDD Required for Full Biomass Production
8. Minimum Effective Rooting Depth
9. Maximum Effective Rooting Depth
10. Crop Coefficient When Canopy Is Complete but Prior to Senescence
11. Water Productivity

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$RRMSE = \frac{RMSE}{\mu} * 100 \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad \text{رابطه (۸)}$$

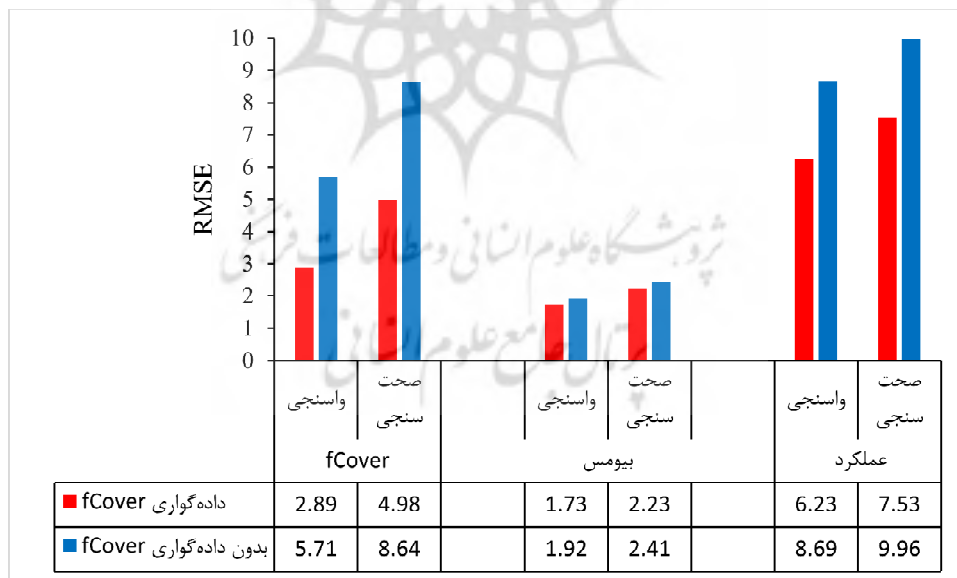
در این معادلات، Y_i مقدار مشاهداتی، $\hat{Y}_i$ مقدار پیش‌بینی، μ مقدار میانگین مشاهدات و n تعداد نمونه‌هاست (Richter et al., 2012).

۳- نتایج و بحث

به‌منظور کمی کردن مقایسه و ارزیابی نتایج برآورد عملکرد محصول در داده‌گواری متغیر fCover حاصل از سنجش از دور و بدون اعمال آن در مدل شبیه‌سازی AquaCrop، مقادیر آماره‌های RMSE و RRMSE، با در نظر گرفتن سی مزرعه تحت مطالعه، به‌دست آمده است (شکل‌های ۴ و ۵).

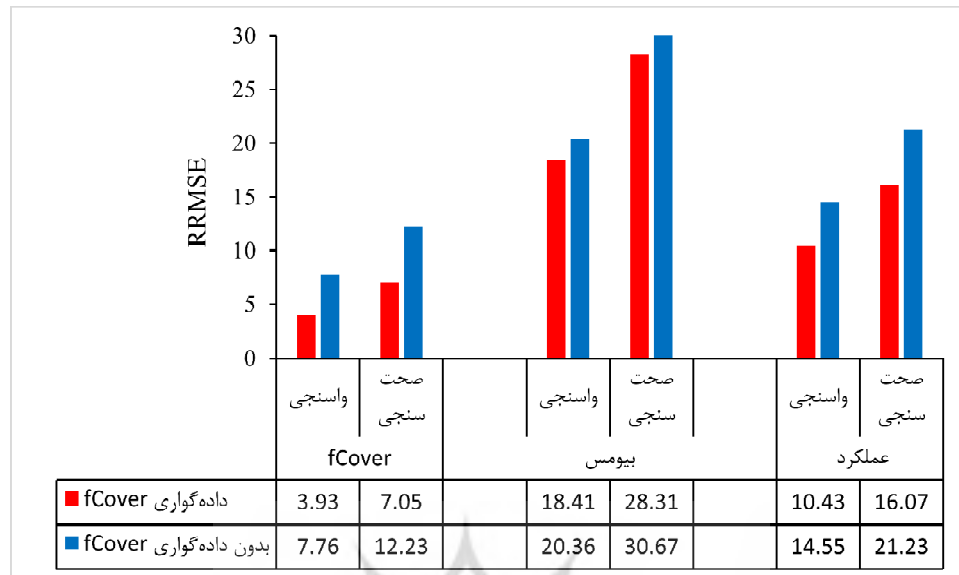
۲-۵- نحوه ارزیابی مدل

به‌منظور کمی کردن مقایسه و ارزیابی نتایج برآورد عملکرد محصول از طریق داده‌گواری سنجش از دور و بدون اعمال آن در مدل شبیه‌سازی AquaCrop، سی مزرعه تحت مطالعه به‌طور تصادفی به دو بخش واسنجی (ده مزرعه) و صحت‌سنجی (بیست مزرعه) تقسیم شدند و مقادیر آماره‌های RMSE، RRMSE^۱ و R^2 به دست آمد.



شکل ۴. ارزیابی نتایج مدل AquaCrop. RMSE در متغیرهای خروجی fCover، بیومس و عملکرد علوفه‌ای، به‌ترتیب برحسب درصد، ton/ha و ton/ha است. (fCover و بیومس (در کل دوره رشد گیاه با ۶۰ نمونه واسنجی، ۱۲۰ نمونه صحت‌سنجی)، عملکرد (علوفه‌ای) (در انتهای دوره رشد گیاه با ده نمونه واسنجی و بیست نمونه صحت‌سنجی))

1. Relative RMSE



شکل ۵. ارزیابی نتایج مدل AquaCrop. RRMSE در متغیرهای خروجی fCover، بیومس و عملکرد علوفه‌ای برحسب درصد است. (fCover و بیومس (در کل دوره رشد گیاه با صحت نمونه و اسنجی، ۱۲۰ نمونه صحت سنجی)، عملکرد (علوفه‌ای) (در انتهای دوره رشد گیاه با ده نمونه و اسنجی، بیست نمونه صحت سنجی))

اگر با داده‌های سنجش از دور جایگزین شود، می‌تواند نتایج بهتری فراهم آورد. علاوه بر این، به دلیل اینکه هم‌افزایی هر دو متغیر خروجی fCover و بیومس در دقت عملکرد تأثیر می‌گذارد، تأثیرگذاری بیومس باعث شده است میزان خطای آماره RRMSE عملکرد در داده‌گواری سنجش از دور به میزان ده و شانزده درصد، به ترتیب در واسنجی و صحت‌سنجی، به دست آید. چه‌بسا اگر داده‌گواری سنجش از دور در هر دو متغیر fCover و بیومس انجام شود، میزان خطای عملکرد نیز کاهش یابد.

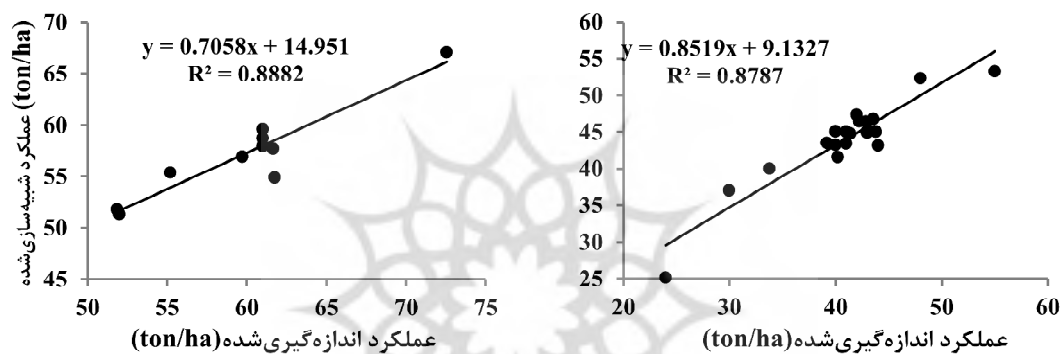
در شکل ۶، عملکرد پیش‌بینی و مشاهده‌شده در سی مزرعه مورد مطالعه، مقایسه شده است. در بررسی این نتایج نیز افزایش دقت نتایج، در اعمال داده‌گواری سنجش از دور، در قیاس با وقتی اعمال نمی‌شود، به میزان ۰/۱۴ و ۰/۱۵ در آماره R^2 طی عملکرد محصول، به ترتیب در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، مشهود است. میزان دقت آماره R^2 در

بررسی نتایج نشان می‌دهد داده‌گواری سنجش از دور به بهبود دقت تخمین پارامترهای مدل، در منطقه مورد مطالعه، منجر شده است؛ بدین ترتیب در آماره RRMSE به میزان ۴/۱۲ و ۵/۱۷٪ و در آماره RMSE به میزان ۲/۵ و ۲/۴ ton/ha، به ترتیب، در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی در متغیر خروجی عملکرد، بهبود دیده می‌شود (شکل‌های ۴ و ۵). با بررسی متغیر خروجی fCover، مشخص می‌شود که داده‌گواری سنجش از دور توانسته است در آماره RMSE به میزان ۲/۸ و ۳/۷٪ و در آماره RRMSE به میزان ۳/۸ و ۵/۲٪، به ترتیب در واسنجی و صحت‌سنجی، کاهش ایجاد کند. اما در مورد بیومس، در حالت داده‌گواری سنجش از دور و بدون اعمال آن، تفاوت چندانی مشهود نیست که این نکته دلیل بر انجام نشدن داده‌گواری سنجش از دور در متغیر بیومس و صرفاً استفاده از تک‌متغیر fCover در داده‌گواری سنجش از دور است. مقدار بالای آماره RRMSE در بیومس نشان می‌دهد که این متغیر نیز،

در مدل MOSICAS در چغندر قند و نیشکر (Morel et al., 2012; 2014) و در مدل RS-P-YEC در گیاه ذرت (Yao et al., 2015)، نشان می‌دهد که این بهره‌مندی از داده سنجش از دور به افزایش دقت برآورد عملکرد محصول و شبیه‌سازی مدل و نیز صرفه‌جویی در زمان و هزینه نمونه‌برداری منجر شد. همچنان‌که در تحقیق حاضر نیز، با ارزیابی داده‌گواری سنجش از دور در مدل AquaCrop، نتیجه‌ای مشابه تحقیقات پیشین به دست آمد.

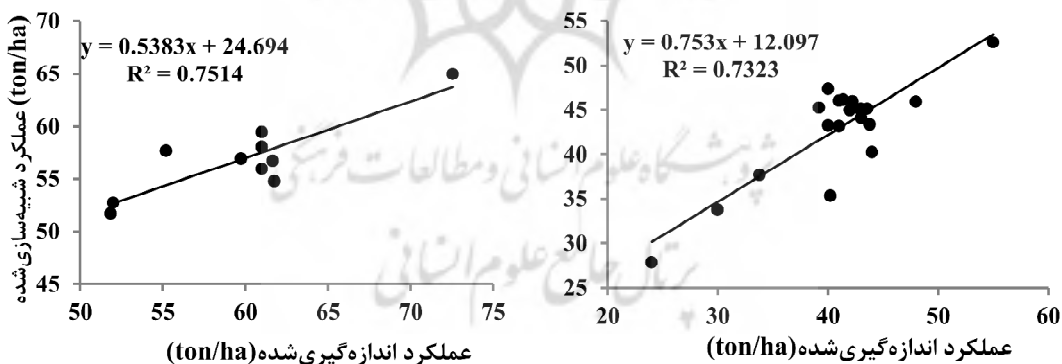
عملکرد محصول، در داده‌گواری سنجش از دور به‌روش جایگزینی، به‌ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۸۸ در واسنجی و صحت‌سنجی به دست آمده است. جدول ۳ نتایج نهایی پارامترهای تخمین‌زده‌شده در مدل AquaCrop در منطقه مورد مطالعه را ارائه می‌دهد.

برپایه پژوهش‌ها، نتایج داده‌گواری سنجش از دور با استفاده از روش جایگزینی در مدل AquaCrop در گیاه گندم و پنبه (Abi Saab et al., 20210; Ma et al., 2022)،



اعمال سنجش از دور-واسنجی

اعمال سنجش از دور-صحت‌سنجی



بدون اعمال سنجش از دور-واسنجی

بدون اعمال سنجش از دور-صحت‌سنجی

شکل ۶. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده عملکرد محصول در شرایط داده‌گواری سنجش از دور و بدون اعمال آن در سی‌مزرعه مورد مطالعه

جدول ۳. نتایج نهایی تخمین پارامترهای مدل AquaCrop در منطقه مورد مطالعه

پارامترها	<i>cgc</i>	<i>ccx</i>	<i>anaer</i>	<i>stbio</i>	<i>rtmin</i>	<i>rtx</i>	<i>kc</i>	<i>wp</i>
رقم ۷۰۴	۰/۱۳۲۷۸	۰/۹۷	۸/۸	۱۲/۹	۰/۳۹	۲/۷	۱/۱	۳۴
رقم ۷۰۶	۰/۱۲۹۵۲	۰/۹۶	۹	۱۳	۰/۳۸	۲/۵	۱/۰۶	۳۳/۶

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، متغیر بیوفیزیکی fCover به‌دست‌آمده از طریق داده‌های سنجش از دور، به‌منزله متغیر حالت مشاهداتی ورودی برای مدل AquaCrop به‌منظور تخمین پارامترهای تأثیرگذار شناسایی شده آن، استفاده شد. نتایج نشان داد که داده‌گذاری سنجش از دور، با روش جایگزینی برای تخمین پارامترهای مدل مدنظر، توانسته است بر میزان دقت برآوردشده بیفزاید. علاوه‌براین مقدار انطباق بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده بیشتر از زمانی است که داده‌گذاری سنجش از دور اعمال نمی‌شود. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که داده‌گذاری سنجش از دور در مدل AquaCrop، در مقایسه با زمانی که سنجش از دور اعمال نمی‌شود، عملکرد موفق‌تری دارد و نتایج دقیق‌تری به دست می‌دهد. با در نظر گرفتن مقادیر پارامترهای تخمین‌زده‌شده در مدل AquaCrop مطابق جدول ۳ و مقادیر ثابت برای سایر پارامترهای این مدل براساس جدول پیوست، می‌توان طی سال‌های آتی در منطقه مورد مطالعه و نیز مناطق دارای خاک، رقم کشت، شرایط جغرافیایی و هواشناسی مشابه، به شبیه‌سازی رشد ذرت علوفه‌ای اقدام کرد و این کار را بدون نیاز به برداشت میدانی و صرف وقت و هزینه انجام داد. این نکته به کشاورزان، در زمینه مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری و کوددهی یا تهیه سایر مواد مغذی مورد نیاز مزارع برای دستیابی به عملکرد محصول بیشتر، کمک می‌کند.

نارسایی و ضعف داده‌گذاری به‌روش جایگزینی در بهره‌گیری صرف از داده‌های سنجش از دور، به‌جای متغیرهای حالت شبیه‌سازی‌شده مدل است که به ورود خطاهای این داده‌ها به مدل، بدون هیچ بهینه‌سازی‌ای، منجر می‌شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود برای تنظیم پارامترهای مدل رشد گیاه در مزارع مورد مطالعه در سطح شهرستان، به‌جای داده‌گذاری به‌روش جایگزینی، از دیگر روش‌های داده‌گذاری سنجش از دور استفاده شود. نکته شایان تأمل دیگر دقت برآورد متغیر

بیوفیزیکی از طریق سنجش از دور است که نتایج مدل را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ از این رو پیشنهاد می‌شود، با اعمال الگوریتم‌های دیگر و روش‌هایی مانند مدل‌های انتقال تابش، متغیر بیوفیزیکی نیز برآورد و با نتایج الگوریتم GPR-PSO مقایسه شود. علاوه‌براین پیشنهاد می‌شود در مناطق دارای شرایط محیطی متغیر، به‌جای استفاده از یک متغیر حالت fCover برای داده‌گذاری سنجش از دور، از دو متغیر fCover و بیومس استخراج‌شده از طریق سنجش از دور استفاده شود.

۵- منابع

- Abi Saab, M.T., El Alam, R., Jomaa, I., Skaf, S., Fahed, S., Albrizio, R. & Todorovic, M., 2021, **Coupling Remote Sensing Data and AquaCrop Model for Simulation of Winter Wheat Growth under Rainfed and Irrigated Conditions in a Mediterranean Environment**, *Agronomy*, 11(11), P. 2265, DOI: 10.3390/agronomy11112265.
- Ahmadi, S.H., Mosallaeepour, E., Kamgar-Haghighi, A.A. & Sepaskhah, A.R., 2015, **Modeling Maize Yield and Soil Water Content with AquaCrop under Full and Deficit Irrigation Managements**, *Water Resources Management*, 29(8), PP. 2837-2853, DOI: 10.1007/s11269-015-0973-3.
- Akbari, E., 2020, **Remotely Sensed Data Assimilation into Crop Simulation Model for Crop Yield Estimation**, PhD. thesis. Tehran university. (in persian).
- Akbari, E., 2023, **A Review of Remotely Sensed Data Assimilation into Crop Simulation Models**, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(5), PP. 753-770, DOI: 10.22059/ijswr.2023.357472.669478. (in persian).
- Akbari, E., Darvishi Boloorani, A., Neysani Samany, N., Hamzeh, S., Soufizadeh, S. & Pignatti, S., 2020a, **Estimating the Spatial-Temporal Distribution of Leaf Area Index Using Sentinel-2 Satellite Images (Case Study: Silage Maize Farms of South of Tehran)**, *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(3), PP. 967-980, DOI: 20.1001.1.20087942.1399.14.3.20.7. (in persian).

- Guarneri, T., Holecz, F., Katsantonis, D., Minakou, C., Miralles, I., Movedi, E., Nutini, F., Pagani, V., Palombo, A., Di Paola, F., Pascucci, S., Pignatti, S., Stroppiana, D., Rampini, A., Ranghetti, L., Ricciardelli, E., Romano, F., Stavrakoudis, D.G., Viggiano M. & Boschetti, M., 2017, **Downstream Services for Rice Crop Monitoring in Europe: From Regional to Local Scale**, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 10(12), PP. 5423-5441, DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2679159.
- Claverie, M., Demarez, V., Duchemin, B., Hagolle, O., Ducrot, D., Marais-Sicre, C., Dejoux, J.F., Huc, M., Keravec, P., Béziat, P. & Fieuzal, R., 2012, **Maize and Sunflower Biomass Estimation in Southwest France Using High Spatial and Temporal Resolution Remote Sensing Data**, Remote Sensing of Environment, 124, PP. 844-857, DOI: 10.1016/j.rse.2012.04.005.
- Clevers, J., Vonder, O.W., Jongschaap, R. E.E., Desprats, J. F., King, C., Prevot, L. & Bruguier, N., 2002, **Using SPOT Data for Calibrating a Wheat Growth Model under Mediterranean Conditions**, Agronomie, 22(6), PP. 687-694, DOI: 10.1051/agro:2002038.
- Curnel, Y., de Wit, A.J., Duveiller, G. & Defourny, P., 2011, **Potential Performances of Remotely Sensed LAI Assimilation in WOFOST Model Based on an OSS Experiment**, Agricultural and Forest Meteorology, 151(12), PP. 1843-1855, DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.08.002.
- Dorigo, W.A., Zurita-Milla, R., de Wit, A.J., Brazile, J., Singh, R. & Schaepman, M.E., 2007, **A Review on Reflective Remote Sensing and Data Assimilation Techniques for Enhanced Agroecosystem Modeling**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 9(2), PP. 165-193, DOI:10.1016/j.jag.2006.05.003.
- ESA, 2005, SPARC 2004, Contract No. 18307/04/NL/FF, SPARC Data Acquisition Report.
- Akbari, E., Darvishi Boloorani, A., Neysani Samany, N., Hamzeh, S., Soufizadeh, S. & Pignatti, S., 2020b, **Deriving the Leaf Area Index of Silage Maize Using Digital Hemispherical Photography Method (Case Study: Qaleh-Now Farms, South of Tehran)**, Iranian Journal of Soil and Water Research, 51(6), PP. 1331-1340, DOI: 10.22059/ijswr.2020.296569.668483. (in persian).
- Akbari, E., Boloorani, A.D., Verrelst, J., Pignatti, S., Neysani Samany, N., Soufizadeh, S. & Hamzeh, S., 2023, **Biophysical Variable Retrieval of Silage Maize with Gaussian Process Regression and Hyperparameter Optimization Algorithms**, Remote Sensing, 15(14), P. 3690, <https://doi.org/10.3390/rs15143690>.
- Akbari, E., Darvishi Boloorani, A., Verrelst, J., Pignatti, S., Neysani Samany, N., Soufizadeh, S. & Hamzeh, S., 2024, **How Global Sensitive is the AquaCrop Model to Input Parameters? A Case Study of Silage Maize Yield on a Regional Scale**, Frontiers of. Agronomy, 6, P. 1304611, DOI: 10.3389/fagro.2024.1304611.
- Alexandratos, N. & Bruinsma, J., 2012, **World Agriculture Towards 2030 /2050: The 2012 Revision**.
- Badiehneshin, A., Noory, H. & Vazifedoust, M., 2014, **Improving Crop Yield Estimation through SWAP Model Using Satellite Data**, Iranian Journal of Soil and Water Research, 45(4), PP. 379-388, DOI: 10.22059/ijswr.2014.52590. (in persian).
- Baret, F., Weiss, M., Allard, D., Garrigues, S., Leroy, M., Jeanjean, H., Fernandes, R., Myneni, R., Privette, J., Morisette, J. & Bohbot, H., 2005, **VALERI: A Network of Sites and a Methodology for the Validation of Medium Spatial Resolution Land Satellite Products**, Remote Sensing of Environment, 76(3), PP. 36-39, <https://hal.inrae.fr/hal-03221068>.
- Busetto, L., Casteleyn, S., Granell, C., Pepe, M., Barbieri, M., Campos-Taberner, M., Casa, R., Collivignarelli, F., Confalonieri, R., Crema, A., García-Haro, F.J., Gatti, L., Gitas, I. Z., González-Pérez, A., Grau-Muedra, G.,

- the AquaCrop Model and Field Hyperspectral Data**, Remote Sensing, 8(12), P. 972, 1-15, DOI:10.3390/rs8120972.
- Jin, X., Li, Z., Yang, G., Yang, H., Feng, H., Xu, X., Wang, J., Li, X. & Luo, J., 2017, **Winter Wheat Yield Estimation Based on Multi-Source Medium Resolution Optical and Radar Imaging Data and the AquaCrop Model Using the Particle Swarm Optimization Algorithm**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 126, PP. 24-37, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.02.001.
- Jin, X., Kumar, L., Li, Z., Feng, H., Xu, X., Yang, G. & Wang, J., 2018, **A Review of Data Assimilation of Remote Sensing and Crop Models**, European Journal of Agronomy, 92, PP. 141-152, DOI: 10.1016/j.eja.2017.11.002.
- Launay, M. & Guerif, M., 2005, **Assimilating Remote Sensing Data into a Crop Model to Improve Predictive Performance for Spatial Applications**, Agriculture, Ecosystems & Environment, 111(1-4), PP. 321-339, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2005.06.005>.
- Liang, S., Li, X. & Xie, X., 2013, **Land Surface Observation, Modeling and Data Assimilation** World Scientific, World Scientific Publishing Company, 1st edition.
- Liu, J., Pattey, E. & Admiral, S., 2013, **Assessment of in Situ Crop LAI Measurement Using Unidirectional View Digital Photography**, Agricultural and Forest Meteorology, 169, PP. 25-34, DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.10.009.
- Ma, B., Wang, Q., Xue, B., Hou, Z., Jiang, Y. & Cai, W., 2022, **Application of UAV Remote Sensing in Monitoring Water Use Efficiency and Biomass of Cotton Plants Adjacent to Shelterbelt**, Frontiers in Plant Science, 13, DOI: 10.3389/fpls.2022.894172.
- Morel, J., Martiné, J.-F., Bégué, A., Todoroff, P. & Petit, M., 2012, **A Comparison of Two Coupling Methods for Improving a Sugarcane Model Yield Estimation with a NDVI Derived Variable**, Remote Sensing
- Gao, Y., Duan, A., Qiu, X., Sun, J., Zhang, J., Liu, H. & Wang, H., 2010, **Distribution and Use Efficiency of Photosynthetically Active Radiation in Strip Intercropping of Maize and Soybean**, Agronomy Journal, 102(4), PP. 1149-1157, DOI:10.2134/agronj2009.0409.
- Hadria, R., Duchemin, B.I., Lahrouni, A., Khabba, S., Er Raki, S., Dedieu, G., Chehbouni, A. & Oliso, A., 2006, **Monitoring of Irrigated Wheat in a Semi-Arid Climate Using Crop Modelling and Remote Sensing Data: Impact of Satellite Revisit Time Frequency**, International Journal of Remote Sensing, 27(6), PP. 1093-1117, DOI:10.1080/01431160500382980.
- Hassanli, M., Ebrahimian, H., Mohammadi, E., Rahimi, A. & Shokouhi, A., 2016, **Simulating Maize Yields When Irrigating with Saline Water, Using the AquaCrop, SALTMed, and SWAP Models**, Agricultural Water Management, 176, PP. 91-99, DOI: 10.1016/j.agwat.2016.05.003.
- Hoefsloot, P., Ines, A.V., van Dam, J., Duveiller, G., Kayitakire, F. & Hansen, J., 2012, **Combining Crop Models and Remote Sensing for Yield Prediction: Concepts, Applications and Challenges for Heterogeneous Smallholder Environments**, Publications Office of the European Union, 2012, Luxembourg. DOI:10.2788/72447.
- Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D. & Fereres, E., 2009, **AquaCrop—the FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize**, Agronomy Journal, 101(3), PP. 448-459, DOI: 10.2134/agronj2008.0218s.
- IRIMO [WWW Document]**, 2019, URL www.irimo.ir (accessed 9.30.21).
- Jafari Sayadi, F., 2021, **Estimation of Rice Yield Using Satellite Image Integration Algorithms and AquaCrop Model**, Thesis of PhD. Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources (in persian).
- Jin, X., Kumar, L., Li, Z., Xu, X., Yang, G. & Wang, J., 2016, **Estimation of Winter Wheat Biomass and Yield by Combining**

- PP. 113-123, DOI: 10.1016/j.agwat.2017.06.008.
- Richter, K., Atzberger, C., Hank, T.B. & Mauser, W., 2012, **Derivation of Biophysical Variables from Earth Observation Data: Validation and Statistical Measures**, Journal of Applied Remote Sensing, 6(1), PP. 063557-063557, DOI:10.1117/1.JRS.6.063557.
- Sadooghi, L., Homaei, M., Noroozi, A. & Asadi Kapourchal, S., 2017, **Estimating Rice Yield Using VSM Model and Satellite Images in Guilan Province**, Cereal Research, 6(3), PP. 397-410, DOI: 20.1001.1.22520163.1395.6.3.10.2. (in persian).
- Silvestro, P.C., Pignatti, S., Pascucci, S., Yang, H., Li, Zh., Yang, G., Huang, W. & Casa, R., 2017, **Estimating Wheat Yield in China at the Field and District Scale from the Assimilation of Satellite Data into the Aquacrop and Simple Algorithm for Yield (SAFY) Models**, Remote Sensing, 9(5), P. 509, DOI: 10.3390/rs9050509.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. & Fereres, E., 2009, **AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles**, Agronomy Journal, 101(3), PP. 426-437, DOI: 10.2134/agronj2008.0139s.
- Thorp, K.R., Hunsaker, D.J. & French, A.N., 2010, **Assimilating Leaf Area Index Estimates from Remote Sensing into the Simulations of a Cropping Systems Model**, Transactions of the ASABE, 53(1), PP. 251–262, DOI:10.13031/2013.29490.
- Tripathy, R., Chaudhari, K.N., Mukherjee, J., Ray, S.S., Patel, N., Panigrahy, S. & Parihar, J.S., 2013, **Forecasting Wheat Yield in Punjab State of India by Combining Crop Simulation Model WOFOST and Remotely Sensed Inputs**, Remote Sensing Letters, 4(1), PP. 19-28, DOI:10.1080/2150704X.2012.683117.
- Vanuytrecht, E., Raes, D. & Willems, P., 2014, **Global Sensitivity Analysis of Yield Output from the Water Productivity Model**, Environmental Modelling & Software, 51, PP. 323-332, DOI: 10.1016/j.envsoft.2013.10.017.
- for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIV, 8531, PP. 93-102, DOI: 10.1117/12.975688.
- Morel, J., Bégué, A., Todoroff, P., Martiné, J.F., Lebourgeois, V. & Petit, M., 2014, **Coupling a Sugarcane Crop Model with the Remotely Sensed Time Series of fIPAR to Optimise the Yield Estimation**, European Journal of Agronomy, 61, PP. 60-68, DOI: 10.1016/j.eja.2014.08.004.
- Munz, S., Feike, T., Chen, Q., Claupein, W. & Graeff-Hönniger, S., 2014, **Understanding Interactions between Cropping Pattern, Maize Cultivar and the Local Environment in Strip-Intercropping Systems**, Agricultural and Forest Meteorology, 195, PP. 152-164, DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.05.009.
- Prescott, J.A., 1940, **Evaporation from Water Surface in Relation to Solar Radiation**, Transactions of The Royal Society of South Australia, 40, PP. 114-118.
- Quaife, T., Lewis, P., De Kauwe, M., Williams, M., Law, B.E., Disney, M. & Bowyer, P., 2008, **Assimilating Canopy Reflectance into an Ecosystem Model with an Ensemble Kalman Filter**, Remote Sensing Environment, 112, PP. 1347-1364, DOI: 10.1016/j.rse.2007.05.020.
- Raes, D., 2017, **AquaCrop Training Handbook I. Understanding AquaCrop**, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. & Fereres, E., 2016, **AquaCrop Version 5.0 Reference Manual**, Annex I. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/AquaCrop/en/>.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. & Fereres, E., 2017, **AquaCrop. FAO Crop – Water Productivity Model to Simulate Yield Response to Water**, Reference Manual, Ver. 6, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.
- Razzaghi, F., Zhou, Z., Andersen, M.N. & Plauborg, F., 2017, **Simulation of Potato Yield in Temperate Condition by the AquaCrop Model**, Agricultural Water Management, 191,

- Xia, T., Miao, Y., Wu, D., Shao, H., Khosla, R. & Mi, G., 2016, **Active Optical Sensing of Spring Maize for in-Season Diagnosis of Nitrogen Status Based on Nitrogen Nutrition Index**, Remote Sensing, 8(7), P. 605, DOI: 10.3390/rs8070605.
- Yao, F., Tang, Y., Wang, P. & Zhang, J., 2015, **Estimation of Maize Yield by Using a Process Based Model and Remote Sensing Data in the Northeast China Plain**, Physics Chemistry Earth Parts A/B/C, 87, PP. 142-152, DOI: 10.1016/j.pce.2015.08.010.
- Vazifiedoust, M., Van Dam, J.C., Bastiaanssen, W.G.M. & Feddes, R.A., 2009, **Assimilation of Satellite Data into Agrohydrological Models to Improve Crop Yield Forecasts**, International Journal of Remote Sensing, 30(10), PP. 2523-2545, DOI: 10.1080/01431160802552769. (in persian).
- Wösten, J.H.M. , Pachepsky, Y.A. & Rawls, W.J., 2001, **Pedotransfer Functions: Bridging the Gap between Available Basic Soil Data and Missing Soil Hydraulic Characteristics**, Journal of Hydrology, 251(3-4), PP. 123-150. DOI :10.1016/S0022-1694(01)00464-4.

پیوست ۱- معرفی پارامترهای مدل AquaCrop و محدوده تغییرات آنها

Name of parameter or input variable	Min	Max	Unit	Description	Reference
<i>hipsflo</i>	0	0	%	Possible increase (%) of HI due to water stress before flowering	Raes et al., (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>rew</i>	7	9	mm	Readily evaporable water from top layer (mm)	Raes et al., (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>psen</i>	0.6	0.78	fraction TAW	Soil water depletion factor for canopy senescence: upper threshold (fraction TAW)	Raes et al., (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I/vanuytrecht et al., (2014)
<i>hinc</i>	10	20	%	Allowable maximum increase (%) of specified HI	Raes et al., (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>anaer</i>	0	10	%	Anaerobic point below saturation limiting aeration (vol %)	Vanuytrecht et al. (2014)
<i>To_crop</i>	7	9	°C	Base temperature below which crop development stops (°C)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I, Ahmadi et al. (2015)/ hsiao et al. (2009)/ hassanli et al. (2016)
<i>cdc4ggd</i>	0/006	0/0113	fraction GDD	CDC for GGD: decrease in canopy cover (in fraction per GDD)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I, vanuytrecht et al. (2014)
<i>cgc4ggd</i>	0/006	0/0113	fraction GDD	CGC for GGD: increase in canopy cover (in fraction soil cover per GDD)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>cn</i>	46	61	-	CN (Curve Number)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>hingsto</i>	2	4	-	Coefficient describing negative impact on HI of stomatal closure during yield formation	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>hipsveg</i>	4/7	9/3	-	Coefficient describing positive impact on HI of restricted vegetative growth during yield formation	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>kc</i>	1	1/1	-	Crop coefficient when canopy is complete but prior to senescence	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I, vanuytrecht et al. (2014)
<i>cpcO2</i>	40	60	%	Crop performance under elevated atmospheric CO ₂ concentration (%)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>dos</i>	163	203	JDAY	day of sowing (Julian Day)	experimental results
<i>kcdcl</i>	0/1	0/5	% d ⁻¹	Decline of crop coefficient (%/day) as a result of senescence, nitrogen deficiency, etc.	Vanuytrecht et al. (2014)
<i>evardc</i>	30	70	-	Effect of canopy cover in reducing soil evaporation in late season stage	Vanuytrecht et al. (2014)
<i>ecss</i>	7/5	12/5	dS m ⁻¹	Electrical Conductivity of soil saturation extract at which crop can no longer grow (dS/m)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>ecsss</i>	1/5	2/5	dS m ⁻¹	Electrical Conductivity of soil saturation extract at which crop starts to be affected by soil salinity (dS/m)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>fk</i>	2	6	-	Evaporation decline factor for stage II	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>exc</i>	34	66	%	Excess of potential fruits (%)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I

ادامهٔ پیوست ۱

Name of parameter or input variable	Min	Max	Unit	Description	Reference
<i>flo</i>	1047	1289	GDD	GDD from sowing to flowering	experiment results
<i>root</i>	1075	1305	GDD	GDD from sowing to maximum rooting depth	experiment results
<i>sen</i>	1748	2004	GDD	GDD from sowing to start senescence	experiment results
<i>eme</i>	72	116	GDD	Growing Degree Days (GDD) from sowing to emergence	experiment results
<i>mat</i>	1732	2095	GDD	Length of the crop cycle (GDD)	experiment results
<i>flolen</i>	168	325	GDD	Length of the flowering stage (GDD)	experiment results
<i>polmx</i>	35	45	°C	Maximum air temperature above which pollination starts to fail (°C)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I, Vanuytrecht et al. (2014)
<i>ccx</i>	0/7	0/99	%	Maximum canopy cover in fraction soil cover	experiment results
<i>rtx</i>	1/8	2/8	m	Maximum effective rooting depth (m)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>rtexup</i>	0/035	0/055	m ³ m ⁻³ soil d ⁻¹	Maximum root water extraction (m ³ water/m ³ soil. day) in top quarter of root zone	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>rtexlw</i>	0/008	0/014	m ³ m ⁻³ soil d ⁻¹	Maximum root water extraction (m ³ water/m ³ soil.day) in bottom quarter of root zone	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>polmn</i>	8	12	°C	Minimum air temperature below which pollination starts to fail (°C)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I, Vanuytrecht et al. (2014)
<i>rtmin</i>	0/2	0/4	m	Minimum effective rooting depth (m)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>stbio</i>	11	13	GDD	Minimum GDD required for full biomass production	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>den</i>	100/000	125/000	n ha ⁻¹	Number of plants per hectare	experiment results
<i>hilen</i>	533	931	GDD	Period of Harvest Index build up during yield formation starting at flowering (GDD)	experiment results
<i>hi</i>	50	54	%	Reference Harvest Index (HI ₀) (%)	experiment results
<i>Ksat</i>	500	1200	mm d ⁻¹	Saturated hydraulic conductivity	experiment results
<i>rtshp</i>	8/50	17/50	-	Shape factor describing root zone expansion	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>psenshp</i>	1/8	3/6	-	Shape factor for water stress inducing early senescence	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>pexshp</i>	1/9	3/9	-	Shape factor for water stress limiting canopy expansion	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>pstoshp</i>	4	8	-	Shape factor for water stress limiting stomatal conductance	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>Kex</i>	1	1/2	-	Soil evaporation coefficient for fully wet and non-shaded soil surface	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>Ssf</i>	0	50	-	Soil fertility/salinity stress coefficient (%)	expert knowledge
<i>ccs</i>	4/5	8/5	cm ²	Soil surface covered by an individual seedling at 90 % emergence	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I, Vanuytrecht et al. (2014)
<i>fc</i>	18/9	39/7	%	Soil Water Content at Field Capacity	expert knowledge
<i>pwp</i>	8/19	16/95	%	Soil Water content at Wilting Point	expert knowledge
<i>pexlw</i>	0/6	0/84	fraction TAW	Soil water depletion factor for canopy expansion: lower threshold (fraction TAW)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>pexup</i>	0/09	0/19	fraction TAW	Soil water depletion factor for canopy expansion: upper threshold, fraction of total available water (TAW)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>ppol</i>	0/7	0/9	fraction TAW	Soil water depletion factor for pollination (p - pol): upper threshold (fraction TAW)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I, Vanuytrecht et al. (2014)
<i>psto</i>	0/55	0/83	fraction TAW	Soil water depletion fraction for stomatal control: upper threshold (fraction TAW)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I, Vanuytrecht et al. (2014)
<i>Tmax_crop</i>	30	30	°C	Upper temperature above which crop development stops (°C)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I, Ahmadi et al. (2015); hsiao et al. (2009); hassanli et al. (2016)
<i>wp</i>	32/4	35	g m ⁻²	Water productivity normalized for ET ₀ and CO ₂ (g/m ²)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>wp_yfp</i>	75	125	%	Water Productivity normalized for ET ₀ and CO ₂ during yield formation (as % of wp)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>th</i>	0/6	0/6	m	Soil thickness of sampling	experiment results
<i>WC</i>	18/9	39/7	-	Water content	experiment results
<i>hilen_cd</i>	51	70	day	Building up of Harvest Index starting at flowering (days)	experiment results
<i>cdlf</i>	1	1	-	Crop determinancy linked with flowering	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>cgc</i>	0/11	0/142	-	Canopy growth coefficient (CGC): Increase in canopy cover (fraction soil cover per day)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I
<i>cdc</i>	0/06	0/16	-	Canopy decline coefficient (CDC): Decrease in canopy cover (in fraction per day)	Raes et al. (2016), Aquacrop manual chapt. 2 & Annex I