

Research Paper

Technical Evaluation of Crop Growth Model Using O-Source Approach for Crops in Tajan Plain Watershed

S. Fatemeh Hashemi¹, Ali Shahnazari²¹Postdoc Researcher, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran²Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran¹ Corresponding Author: Ali Shahnazari
Address Sari 4816118771 P.O. Box 578 IranEmail: aliponh@yahoo.com
Tel: +98 1133687892 Fax: +98 113 3687892[10.22125/IWE.2022.351954.1652](https://doi.org/10.22125/IWE.2022.351954.1652)Received:
July 15, 2022
Accepted:
November 15, 2022
Available online:
October 3, 2023**Keywords:**
Python programming
language, Plant
performance, PCSE,
Statistical analysis

Abstract

In the current situation of the country, which is facing numerous droughts, simulation of the performance of different crops in water shortage conditions has attracted the attention of modelers. Among these models, WOFOST has been used in predicting crop yield in numerous researches. In this research, the development of the WOFOST model under the Python language along with how to simulate the performance of major crops in the Tajan plain watershed including rice, wheat, oilseeds, grain corn and tomato during the years 2014-18 was examined. Based on this, at first, the annual crop yield was received from the Mazandran Agricultural Jihad Organization and the simulation results were compared with these data. The crop yield simulation results of the PCSE Python version showed very little difference with the reported values, so that the RMSE and nRMSE results were reported in the range of less than 10%, which puts it in the good to excellent range. which proves the strenght of PCSE model in simulation. On the other hand, the results of the T test at the 5% probability level showed that in most of the products, no significant difference was observed between the simulation and observation values, which shows the advantages of the Python version in the field of development or integration compared to the web version. Also, the results of determining the crops yield in the studied area in the statistical years showed that the highest yield in 2016 was predicted for the wheat, which is a value equal to 3.45 tons per hectare. The outputs of both WOFOST and PCSE models are completely consistent. Comparing the results also shows that there is a small difference between the simulated and observed values. Therefore, it can be concluded that the PCSE model has the ability to simulate the performance of products

1. Introduction

In the current situation of the country, which is facing numerous droughts, the simulation of the performance of different crops in water shortage conditions has attracted the attention of modelers (Holzworth et al., 2015, Combe et al., 2017). Among these models, WOFOST has been used in predicting crop yield in numerous researches (Ewert et al., 2015, Asseng et al., 2013).

2. Materials and Methods

In this research, the development of the WOFOST model under the Python language (de Wit et al., 2012a, Supit et al., 2010) along with how to simulate the crop yield in the Tajen Plain watershed including rice, wheat, oilseeds, seed corn and tomato during the years 2014-2018 was examined. Based on this, first, the annual performance of these crop was received from the Agricultural Jihad Organization and the simulation results were compared with these data.

3. Results

The results of crop yield simulation under PCSE python version showed a very small difference with the reported values, so that the RMSE and nRMSE values were calculated in the range of less than 10%, which is in the good to excellent range and indicates the power of the PCSE model in simulation. On the other hand, the results of the T test at the 5% probability level showed that in most products there was no significant difference between the simulation and observation values, which shows the superiority of the version under Python in the field of development or integration compared to the web version. Also, the results of determining crop yields in studied area in the statistical years showed that the highest yield was occurred in 2016 and for wheat crop, which is a figure by 3.45 tons per hectare.

4. Discussion and Conclusion

The outputs of both WOFOST and PCSE models are completely consistent. Comparing the results also shows that there is a small difference between the simulated and observed values. Therefore, it can be concluded that the PCSE model has the ability to simulate the performance of products

5. Six important references

- 1) Asseng, S., Ewert, F., Rosenzweig, C., Jones, J., Hatfield, J., Ruane, A., Boote, K.J., Thorburn, P.J., Rotter, R.P., Cammarano, D., 2013. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nat. Clim. Chang.* 3, 827–832.
- 2). Combe, M., Wit, A.J.W., Vila-Guerau de Arellano, J., Mole, M.K., van der Molen Magliulo, V., 2017. Grain yield observations constrain cropland CO₂ fluxes over Europe. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. <https://doi.org/10.1002/2017JG003937>.
- 3). de Wit, A., d'Andrimont, R., Bartalev, S., Defourny, P., Kleshchenko, A., Roerink, G., Virchenko, O., 2012a. MOCCASIN (Monitoring crops in continental climates through assimilation of satellite information), *Let's Embrace Space Volume II*. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg, Larnaca, Cyprus, pp. 70–78. <https://doi.org/10.2769/31208>.
- 4). Ewert, F., Rotter, R.P., Bindi, M., Webber, H., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Olesen, J.E., van Ittersum, M.K., Janssen, S., Rivington, M., 2015. Crop modelling for integrated assessment of risk to food production from climate change. *Environ. Model Softw.* 72, 287–303.
- 5). Holzworth, D.P., Snow, V., Janssen, S., Athanasiadis, I.N., Donatelli, M., Hoogenboom, G., White, J.W., Thorburn, P., 2015. Agricultural production systems modelling and software: current status and future prospects. *Environ. Model Softw.* 72, 276–286.
- 6). Supit, I., Van Diepen, C.A., De Wit, A.J.W., Kabat, P., Baruth, B., Ludwig, F., 2010. Recent changes in the climatic yield potential of various crops in Europe. *Agric. Syst.* 103, 683–694.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University (SANRU) for financial support of this research under contract number 02-1399-06.

ارزیابی تکنیکی مدل رشد گیاهی با استفاده از رویکرد متن – باز برای محصولات زراعی در دشت تجن

سیده فاطمه هاشمی^۱، علی شاهنظری^{۲*}

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۴/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۹

مقاله پژوهشی

چکیده

در شرایط کنونی که کشور و به‌ویژه استان مازندران با خشکسالی‌های متعدد روبه‌رو است، شبیه‌سازی عملکرد محصولات مورد توجه مدل‌سازان قرار گرفته است. از بین این مدل‌ها، WOFOST در پیش‌بینی عملکرد محصول در تحقیقات متعدد استفاده می‌شود. لذا در این پژوهش، توسعه مدل WOFOST تحت زبان پایتون همراه با چگونگی شبیه‌سازی عملکرد محصولات عمده در حوزه آبریز دشت تجن مشتمل بر شالی، گندم، دانه‌های روغنی، ذرت دانه‌ای و جالیز در طی سال‌های ۹۷-۱۳۹۳ مبنای مطالعات قرار گرفت. بر همین اساس ابتدا عملکرد سالانه این محصولات از سازمان جهاد کشاورزی دریافت شد که مبنای مقایسات قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی عملکرد محصولات تحت نسخه پایتون PCSE اختلاف بسیار کمی با مقادیر گزارش شده را نشان داد به‌طوری‌که نتایج RMSE و nRMSE در محدوده کمتر از ۱۰٪ و حتی نزدیک به ۱٪ هم گزارش شده که آن را در محدوده خوب تا عالی قرار می‌دهد. که در واقع قدرت مدل PCSE را در شبیه‌سازی اثبات می‌کند. از سویی دیگر نتایج آزمون T در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان داد که در اکثر محصولات تفاوت معناداری بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای مشاهده نشده است که برتری‌های نسخه تحت Python را در زمینه توسعه یا تلفیق نسبت به نسخه تحت وب نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل آماری، پایتون، زبان برنامه‌نویسی، عملکرد گیاهی، PCSE

^۱ - پژوهشگر پسادکتری گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری (sfhashemi85@yahoo.com)

^۲ - استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری (نویسنده مسئول: Alipoh@yahoo.com)

مقدمه

مدل سازی سامانه های رشد گیاهی که به عنوان یک تکنولوژی بلوغ یافته شناخته می شود، مبنای پژوهش های علمی متعددی قرار گرفته است (Holzworth et al., 2015). در اکثر این پژوهش ها، کاربرد این مدل ها را در زمینه های مختلفی نظیر پیش بینی عملکرد گیاه (de Wit et al., 2018)، تغییر اقلیم (Ewert et al., 2015)، واکنش گیاه در شرایط مرزه ای و آزمایشگاهی (Asseng et al., 2013) مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

بسیاری از این مدل ها که در دهه های گذشته توسعه یافته اند (Holzworth et al., 2015) شامل DSSAT (Jones et al., 2003)، EPIC (Wang et al., 2014)، STICS (Brisson et al., 2003) و APSIM (Holzworth et al., 2014) می باشد.

پژوهش های متعددی برای افزایش کاربرد دوستی این مدل ها انجام شده است تا موانع کاربرد این مدل ها در مناطق جغرافیایی و محصولات مختلف کاهش یابد. به عنوان مثال، Kersebaum و همکاران (2015) استانداردهای جدیدی را برای بهبود مدل در زمینه داده های ورودی مورد استفاده ارائه داده است. Porter و همکاران (2014) مکانیسم های تبادل داده ها را در بین مدل ها توصیف می کند، به طوری که می توان آن ها را به صورت موازی در یک مجموعه داده اجرا کرد.

مدل مطالعات جهانی غذا (WOFOST) که به مدت ۲۵ سال به عنوان بخشی از سامانه های پیش بینی عملکرد محصول استفاده می شود، یکی از قدیمی ترین مدل های عملیاتی است که با توجه به پیشرفت های استاندارد سازی مدل مذکور و سایر پیشرفت های حاصل شده در قابلیت های مدل سازی برای محصولات بیشتری استفاده می شود. همچنین از دیگر قابلیت هایی که تاکنون به آن اضافه شده است، توسعه مدل با استفاده از متن باز^۱ است.

متن باز بخشی از نرم افزار است که برای اکثر کاربران قابل مشاهده نبوده اما در واقع از منبع کد^۲ آن می توان روابط اساسی و دستورات شبیه سازی نرم افزار را مشاهده، ویرایش و یا توسعه داد. در واقع با نوشتن منبع کد نحوه عمل بخش های مختلف یک نرم افزار تعیین می شود و این امکان را می دهد تا با دسترسی به آن، قابلیت هایی خاص به آن افزوده و عملکرد برنامه را بهبود بخشیده و یا مشکلات آن را برطرف نماید.

همچنین علاوه بر امکان تلفیق با مدل های مختلف از طریق متن باز (Inam et al., 2017)، از بروز مشکلات در تصمیم گیری راهبردهای طولانی مدت جلوگیری می نماید (Malard et al., 2017). تاکنون مدل های یکپارچه مختلفی در زمینه کد نویسی توسعه یافته است. در اکثر این پژوهش ها چگونگی استفاده از این مدل های توسعه یافته در تلفیق با مدل های سامانه پویا اشاره شده است (هاشمی و همکاران ۱۳۹۷، Peck et al., 2014، Malard et al., 2017، Inam et al., 2017، Shrestha et al., 2013، Liao et al., 2012، Bulatewicz et al., 2010). برای نمونه Malard و همکاران (۲۰۱۷) و Inam و همکاران (۲۰۱۷) مدل حرکت آب زیرزمینی SAHYSMOD را برای منطقه پنجاب پاکستان با استفاده از زبان کد نویسی پایتون^۴ توسعه دادند.

کدهای مدل PCSE به صورت متن باز بوده و با توجه به اینکه مستندات آن از طریق لایه ذخیره^۵ عمومی تحت مجوز مجاز^۶ (EUPL) ارائه می شود، امکان دسترسی به آن برای عموم رایگان است. علت این که برای توسعه مدل مذکور از پایتون استفاده می شود این است که علاوه بر پویایی این زبان برنامه نویسی، PCSE/WOFOST به خوبی با ابزارهای موجود در بسته نرم افزارهای علمی دیگر ادغام شده و امکان تلفیق با سایر مدل های ریاضی نظیر VENSIM را ممکن می سازد (Inam et al., 2017). با این ها، به نظر می رسد PCSE/WOFOST در اجرای شبیه سازی مدل نسبتاً کند است. زیرا مدل های تحت زبان فورترن^۷ هر فاکتور را ۱۰۰ بار تندتر از زبان پایتون اجرا و پیاده سازی می کند. (Muller et al., 2017). علاوه بر این درک و فهم آن برای کاربران ساده تر از مدل تحت وب WOFOST است (Zhuo et al., 2022).

مطالعات شبیه سازی گسترده ای با PCSE/WOFOST در حال انجام است (Boogard et al., 2013، Dewenam et al., 2022، Wu et al., 2021، Quintro and Diaz, 2020). بخش زیادی از این روش های محاسباتی پارامترهای گیاهی مدل WOFOST با استفاده از ابزار کد نویسی مورد بررسی قرار داده و آن ها را تا حدود زیادی بهبود می بخشد. بدین ترتیب کارایی مدل در شبیه سازی عملکرد محصولات زراعی مختلف افزایش می یابد. برای نمونه (Zhuo et al., 2022)، Wu و

5 Repository

6 Repositories under a permissive license

7 Fortran

1 World Food Studies

2 Open Source

3 Source Code

4 Python



به پژوهش‌ها Peck و همکاران (۲۰۱۴)، Rosenzweig و Hodges (۲۰۱۱) و Prodanovic و Simonovic (۲۰۱۰) اشاره نمود. رویکرد بعدی در توسعه مدل، ترجمه مدل است که مشتمل بر برگرداندن اجزای مدل (چه پارامتر ورودی و چه خروجی) به یک زبان کدنویسی در غالب دیکشنری است که در پژوهش Cai و همکاران (۲۰۰۳) به آن اشاره شده است. آخرین گزینه برای توسعه مدل‌ها، ایجاد بسته^۴ مدل است که در واقع هسته مرکزی و موتور شبیه‌سازی مدل بشمار می‌رود (Gregersen et al., 2007). تلفیق مدل SWAT و مدل خاک فاضلاب برای ارزیابی رواناب شهری (Shrestha et al., 2013)، ترکیب رواناب شهری و مدل فاضلاب (Liao et al., 2012)، مدل‌های یکپارچه آب زیرزمینی، کشاورزی، اقتصادی در پژوهشی که اثرات راهبردهای استفاده از آب را در آبخوان Ogallala ایالت متحده مورد بررسی قرار داده است (Bulatewicz et al., 2010) مثال‌هایی از بسته مدل‌ها می‌باشد که چگونگی کاربرد بسته مدل‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین لازم به ذکر است لزوم استفاده از صفحه گسترده (به‌طور خاص Excel) نیز در کنترل استخراج و تبادل داده بین مدل‌های فیزیکی و مدل پویایی سامانه‌ها اجتناب‌ناپذیر است. در جدول ۱ خلاصه‌ای از رویکردهای تلفیقی مدل‌های مختلف بین مدل پویایی سامانه و مدل بیوفیزیکی توسط Halb و همکاران (۲۰۱۴) آورده شده است.

همکاران (۲۰۲۱)، Dewenam و همکاران (۲۰۲۱)، پارامتر جذب و ترکیب غذایی شاخص سطح برگ گندم زمستانه را در مدل WOFOST با استفاده از PCSE مورد ارزیابی قرار دادند. همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی به تلفیق مدل سنجش‌ازدور و مدل رشد گیاهی WOFOST پرداخته است. همچنین Quintro و Diaz (۲۰۲۰) به مقایسه دو مدل WOFOST و AquaCrop با رویکرد متن باز تحت زبان پایتون پرداختند. نتایج نشان داد به‌کارگیری تکنیک متن باز تحت زبان پایتون نسبت به مدل‌های تحت وب دارای برتری نسبی از لحاظ سادگی اجرا و قابلیت توسعه می‌باشد.

بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در دشت تجن نشان می‌دهد جنبه‌های مدیریت مشارکت مدار (زحمت‌کش و منتظر (Hosseinpour et al., 1390) و Hosseinpour et al., 2016، 2017) و Horelman and Jafari Berenji (2017) عملکرد آن‌ها در فرآیند انتقال مدیریت آبیاری مورد بررسی قرار گرفته است (Madani, 2014). همچنین پاره‌ای دیگر از این پژوهش‌ها اثرات احداث مخازن را از لحاظ کمی و کیفی بر منابع آبی موجود در منطقه مورد بررسی قرار می‌دهند (خوش‌روش و ولی‌زاده، ۱۳۹۶). اما از آنجایی که تعیین عملکرد محصولات حداقل بر اساس بررسی سوابق پژوهش که برای این پژوهش در این منطقه به عمل آمد با استفاده از مدل PCSE، یافت نشد، لذا در این پژوهش توسعه مدل رشد گیاهی با زبان کدنویسی پایتون در شبیه‌سازی عملکرد محصولات شبکه آبیاری و زهکشی تجن، مورد استفاده قرار گرفته تا بتواند عملکرد محصولات غالب منطقه مشتمل بر شالی، گندم، دانه‌های روغنی، ذرت دانه‌ای و گوجه‌فرنگی را تعیین نماید.

مواد و روش‌ها

روش‌های رایج توسعه مدل

رویکردهای رایج برای توسعه مدل‌ها غالباً شامل: (۱) کدنویسی^۱ (Peck et al., 2014)، (۲) ایجاد پایگاه داده صفحه گسترده^۲ (Inam et al., 2017a) و (۳) ترجمه مدل^۳ (Prodanovic and Simonovic, 2010) است. کدنویسی، نوشتن کدهای کامپیوتری به زبان پایتون یا ویژوال بیسیک است که داده‌ها ورودی و خروجی را مدیریت می‌نماید. استفاده از رویکرد کدنویسی، مبنای پژوهش‌ها متعددی بوده که می‌توان

جدول (۱): خلاصه‌ای از رویکردهای مختلف توسعه مدل (Halb et al., 2014).

³ Translation

⁴ wrapper

¹ Scripting

² Spreadsheets

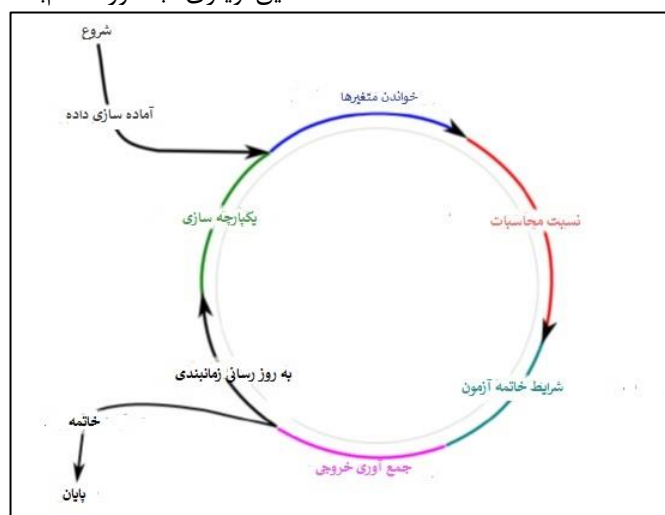
روش تلفیقی	قابلیت تکرار	سرعت آماده‌سازی	قابلیت انعطاف‌پذیری	وضوح
کدنویسی	+	-	+	•
پایگاه داده صفحه گسترده	+	•	+	++
ترجمه مدل	++	-	-	•

علامت +، صفر و - به ترتیب نشان‌دهنده عملکرد خوب، نرمال و ضعیف است.

پیکربندی و آماده‌سازی مؤلفه‌های مدل، شبیه‌سازی را موازی با زمان انجام داده و داده‌ها آب‌وهوای مورد نیاز تهیه و متغیرهای مدل را در حین شبیه‌سازی برای خروجی بعدی ذخیره می‌کند. موتور PCSE عمومی بوده و می‌تواند برای هر مدلی که در این موسسه تعریف شده است، مورد استفاده قرار گیرد (de Wit, 2018). برای شبیه‌سازی با PCSE به سه نوع داده مختلف نیاز است: ۱. پارامترهای مدل که در اجزای مختلف دسته‌بندی می‌شود که مشتمل بر پارامترهای خاک، مکان و گیاه است. ۲. آماده‌سازی داده‌های مربوط به داده‌های آب‌وهوا که بایستی مشخص شود از کجا برداشت می‌شود. ۳. آماده‌سازی داده‌های مربوط به فعالیت‌های کشاورزی نظیر تاریخ کاشت، برداشت، نحوه محاسبه دوره کشت و بیان‌کننده دوره فنولوژی گیاه است. در شکل ۱ اصول کلی شبیه‌سازی مداوم را تحت تلفیق اوپلری به صورت گام‌به‌گام نشان می‌دهد

ایجاد بسته تحت پایتون مدل بیوفیزیکی رشد گیاهی توسط PCSE

PCSE¹ یک بسته پایتون برای ساخت مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه و عملکرد محصول، به‌ویژه مدل‌های محصول توسعه‌یافته در Wageningen هلند است که محیطی را برای پیاده‌سازی مدل‌های شبیه‌سازی محصول، ابزارهای خواندن داده‌های ورودی (آب‌وهوا، خاک، زراعت) و مؤلفه‌های شبیه‌سازی فرآیندهای بیوفیزیکی مانند فنولوژی، تنفس و تبخیر و تعرق فراهم می‌کند. مدل‌های توسعه‌یافته در Wageningen اغلب با استفاده از FORTRAN نوشته می‌شدند که امکان تلفیق آن‌ها با سایر ابزارها نظیر XML، پایگاه داده، وب و غیره در به‌سختی ممکن می‌گردد. در چنین شرایطی موتور PCSE محیطی شبیه‌سازی شده‌ای را ایجاد می‌نماید که با خواندن،



شکل (۱): ترتیب محاسبات برای شبیه‌سازی مداوم با استفاده از تلفیق اوپلری

² Eulerian

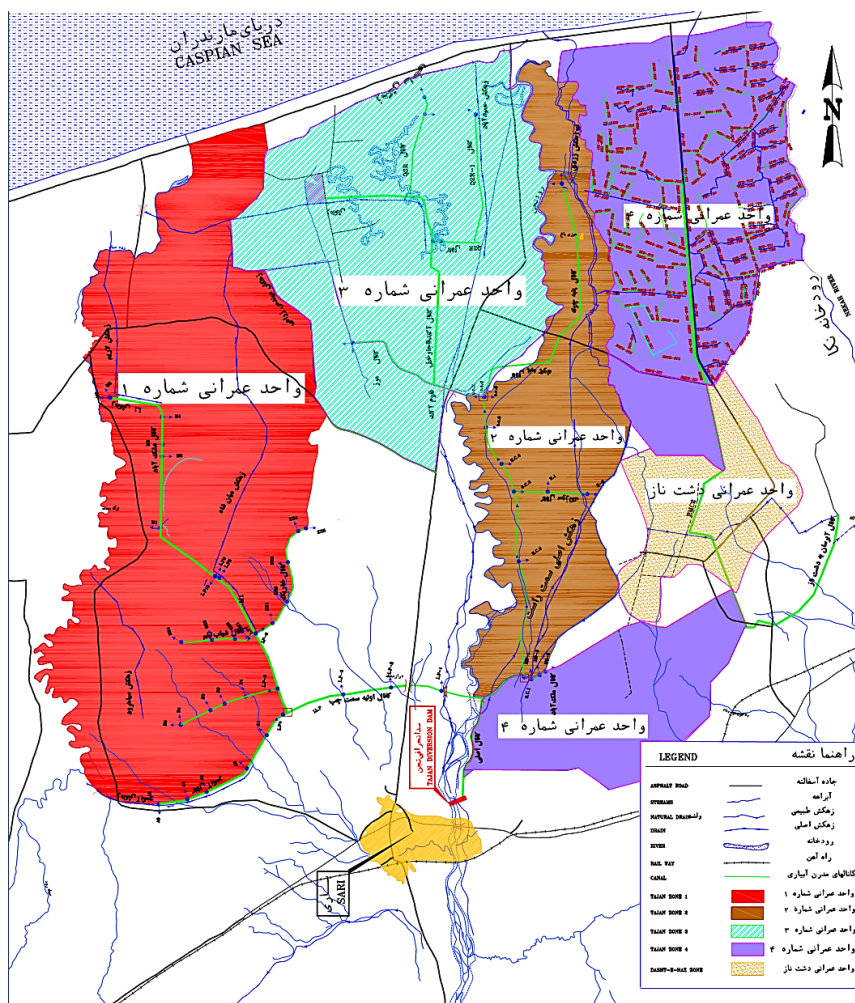
¹ Python Crop Simulation Environment



حاشیه دریای خزر گسترده شده است. همچنین وسعت اراضی خارج شبکه معادل ۱۵۳۰۰ هکتار است که شامل مناطق آبخور پایین دست سدهای فینسک، سد شهید رجایی و زارم است. در شکل ۲ موقعیت جغرافیایی منطقه آورده شده است. چندضلعی‌های رنگی واحدهای عمرانی توسعه شبکه آبیاری و خطوط آبی، مسیر آبراهه‌های اصلی است. منابع آبی موجود دشت نیز شامل منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌باشند از سویی دیگر مصارف شبکه‌ی آبیاری و زهکشی تجن شامل شرب و بهداشت، نیاز محیط زیست، صنعت و کشاورزی می‌باشند. مهم‌ترین نیازهای آبی شامل نیاز کشاورزی و زیست محیطی می‌باشد که بیش‌ترین حجم مصارف آبی را تشکیل می‌دهند.

کاربرد PCSE: برآورد عملکرد محصولات تحت الگوی کشت در حوزه آبریز دشت تجن محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز تجن در حوضه آبریز رودخانه هراز- قره‌سو واقع در شمال و شمال - شرق ایران و در مختصات جغرافیایی ۵۲ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۴۵ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۸ درجه و صفر دقیقه عرض شمالی بوده که از شمال به دریای خزر، از جنوب به رشته‌کوه‌های البرز، از شرق به حوضه‌های آبریز رودخانه‌های شمال خراسان و از غرب به حوضه آبریز بین رودخانه‌های چالوس و هراز محدود می‌گردد. این حوضه بالغ بر ۴۳۰۰۰ هکتار است که دربرگیرنده واحدهای عمرانی یک، دو، سه و چهار می‌باشد که در محدوده پایین دست بند انحرافی تجن تا



شکل (۲): جانمایی از حوضه آبریز مورد مطالعه (حوضه آبریز دشت تجن) (لسکوکلایه و همکاران، ۱۳۹۸)

ظرفیت آبگذری ۱۶ مترمکعب در ثانیه از کانال اصلی منشعب شده که آب را به واحدهای عمرانی می‌رساند. آماده‌سازی داده‌های ورودی در مدل PCSE داده‌ها مورد نیاز این پژوهش در حوضه آبریز تجن در طی یک فصل زراعی، در طی سال‌های ۹۷-۱۳۹۳ (۲۰۱۸-۲۰۱۴) بر اساس الگوی کشت منطقه و به تفکیک محصولات منطقه از سازمان جهاد کشاورزی مازندران به دست آمدند. داده‌ها هواشناسی شامل بارندگی، ساعات آفتابی روزانه، سرعت باد، دما و رطوبت نسبی از ایستگاه هواشناسی دشت ناز ساری می‌باشند. طبق آمار هواشناسی موجود، متوسط بارندگی منطقه ۶۷۳ میلی‌متر و متوسط، حداقل و حداکثر دمای هوا به ترتیب ۱۳/۰۶، ۶- و ۲۳/۱۵ درجه سانتی‌گراد است.

در مطالعات شبکه‌های آبیاری و زهکشی مذکور، اراضی بین سیاهرود و رودخانه تجن به نام ساحل سمت چپ مشتمل بر واحدهای عمرانی شماره یک و سه و اراضی بین رودخانه نکا و رودخانه تجن مشتمل بر واحدهای عمرانی شماره دو و چهار به نام ساحل سمت راست نامیده شده است که به صورت خطوط آبی در شکل ۲ قابل مشاهده است (شاهنظری، ۱۳۹۳). به‌منظور انحراف آب به‌نگام رودخانه تجن و همچنین آب رها شده از سد مخزنی سلیمان تنگه، سد انحرافی با ظرفیت آبگیری ۳۸ مترمکعب بر ثانیه احداث شد. دو کانال آبیاری وابسته به سد انحرافی تجن احداث شده به نام کانال سمت راست به ظرفیت آبگذری ۱۲ مترمکعب در ثانیه و کانال سمت چپ با



همچنین میانگین رطوبت نسبی نیز ۷۵ درصد است. پارامترهای هواشناسی در طول فصل رشد در منطقه مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است

جدول (۲): پارامترهای هواشناسی ایستگاه دشت ناز ساری

سال	پارامترهای هواشناسی در طول فصل رشد، واحد					
مجموع	۲۰۱۸	۲۰۱۷	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۱۴	
۶/۱۷	۵/۵۸	۶/۵۸	۵/۸۸	۶/۳۷	۶/۴۵	میانگین تابش سالانه با طول موج کوتاه، $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$
۱۳/۰۶	۱۴/۶	۱۲/۶۶	۱۲/۸۲	۱۲/۷۵	۱۲/۴۷	میانگین کمینه دمای روزانه، $^{\circ}\text{C}$
۲۳/۱۵	۲۴/۳۶	۲۳/۳۳	۲۲/۵	۲۲/۶۷	۲۲/۹	میانگین حداکثر دمای روزانه، $^{\circ}\text{C}$
۷۵	۷۵/۲۳	۷۴/۱۸	۷۶/۶۲	۷۵/۰۶	۷۳/۸۸	میانگین رطوبت نسبی (درصد)
۵/۶	۵/۶۶	۵/۵۷	۵/۷۱	۵/۵۱	۵/۶۴	سرعت باد (km/hr)

است، داده‌ها رطوبت در نقطه پژمردگی دائم، ظرفیت زراعی و وزن مخصوص ظاهری در عمق ریشه‌دوانی است که در پژوهش حاضر به‌طور متوسط در محاسبات لحاظ گردید و به‌عنوان داده‌های ورودی بخش خاک مدل PCSE در جدول ۳ ارائه شده است.

همچنین با توجه به اینکه مدل PCSE تنها یک لایه عمق ریشه‌دوانی در خاک را در نظر می‌گیرد، عمق ۰-۲۰ و ۲۰-۴۰ مبنای شبیه‌سازی قرار گرفته است. از جمله خصوصیات خاک که در شبیه‌سازی لازم

جدول (۳): خصوصیات خاک منطقه مطالعاتی در عمق ریشه‌دوانی (نودهی و حافظی مقدس، ۱۳۸۶)

جرم مخصوص ظاهری (gr/cm^3)	نقطه پژمردگی (%)	ظرفیت زراعی (%)	بافت	محدوده عمقی (cm)
۱/۴۶	۱۵/۴	۳۲/۵	لوم شنی	۰-۲۰
۱/۳۶	۱۵/۶	۳۰/۳	لوم رسی	۲۰-۴۰

دقیق پارامترهای گیاهی در مدل مذکور، زمان وقوع مراحل فنولوژیکی گیاهان محدوده مورد مطالعه مطابق جدول ۴ به مدل وارد شده است.

نیاز آبی گیاهان نیز در محدوده حوضه آبریز تجن براساس نتایج مدل 8 CROPWAT در طی سال‌های ۹۷-۱۳۹۳ به‌دست آمد. همچنین به‌منظور برآورد

جدول (۴): تاریخ رشد فنولوژیکی محصولات عمده حوزه آبریز دشت تجن

گیاه	شالی	گندم	دانه‌های روغنی	ذرت دانه‌ای	گوجه‌فرنگی
تاریخ کاشت	۱۷ مارچ	۱۰ ژوئن	اول می	۲۰ ژوئن	۲۰ ژوئن
شماره روز ژولیوسی	۱۱۱	۱۹۵	۱۵۴	۲۰۴	۲۰۴
رسیدگی کامل فیزیولوژیکی	۲۰ آگوست	۱۰ سپتامبر	۱۰ سپتامبر	۱۰ اکتبر	۱ سپتامبر
شماره روز ژولیوسی	۲۶۰	۲۸۵	۲۸۵	۳۱۴	۲۷۶

شبیه‌سازی عملکرد محصولات تحت الگوی کشت در حوضه آبریز دشت تجن با استفاده از PCSE

مدل بیوفیزیکی WOFOST

اگرچه مدل WOFOST مبتنی بر فرآیندهای بیوفیزیکی پیچیده بنا نهاده شده است، اما نیاز به پارامترهای ورودی کمی دارد. عمده‌ترین داده‌های ورودی شامل: موقعیت مکانی، پارامترهای هواشناسی، گیاهی، خاک، مواد غذایی موجود در خاک است که در طی چند مرحله در مدل ویرایش می‌شود. در مرحله اول شبیه‌سازی، از بخش داده‌ها کلی، کاربر نوع شبیه‌سازی پتانسیل یا با محدودیت آبی را انتخاب می‌نماید. در صورتی که شرایط محدودیت آبی در شبیه‌سازی لحاظ شود، نیازی به وارد کردن داده‌های مواد غذایی خاک نیست. در مرحله بعدی، بایستی داده‌های گیاهی اصلاح شود که یکی از حساس‌ترین بخش‌ها در مدل بوده و مبنای محاسبات و ارزیابی‌ها قرار می‌گیرد. فایل گیاهی از تعداد پارامتر تشکیل می‌شود که برخی از آن‌ها در طول دوره رشد، تغییر می‌نمایند. هدف از این پژوهش در مرحله اول، به‌دست آوردن پارامترهای گیاهی محصولات الگوی کشت در شبکه آبیاری و زهکشی تجن برای هر یک از محصولات زراعی است که در فایل‌های موجود در مدل

پارامترهایی نظیر مجموع درجه حرارت روزانه از جوانه‌زنی تا گلدهی ($TSUM1^1$)، مجموع درجه حرارت روزانه از گلدهی تا رسیدن ($TSUM22$)، مرحله توسعه رشد اولیه و برداشت ($DVSI^3$)، طول عمر برگ‌های در حال رشد در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد ($SPAN^5$)، سطح ویژه برگ به‌صورت تابعی از مراحل رشد ($SLATB6$)، ضریب روشنایی نور ($KDIF7$)، راندمان مصرف نور ($EFF8$)، حداکثر شدت جذب CO_2 ($AMAX9$)، کسر ماده خشک بالای سطح زمین به اندام‌های ذخیره به‌صورت تابعی از DVS ($FOTB10$)، کسر ماده خشک بالای سطح زمین به ساقه به‌صورت تابعی از DVS ($FSTB11$) که مدل نسبت به آن‌ها حساسیت بیشتری دارد، با استفاده از عملکرد محصول مشاهده‌ای مطالعه کنونی، برای هر منطقه و هر محصول مورد واسنجی قرار گرفته‌اند. بر همین اساس مقادیر پارامترهای مورد واسنجی در محدوده‌ای که برای آن‌ها به‌طور پیش‌فرض در مدل تعریف شده، به‌گونه‌ای تغییر می‌کند که تفاوت بین عملکرد کل واقعی با مقادیر شبیه‌سازی شده حداقل باشد. در مرحله سوم،

⁸Initial light-use efficiency of CO_2 assimilation of single leaves as function of daily temperature

⁹Maximum leaf CO_2 assimilation as function of DVS

¹⁰Fraction of above-gr. DM to stororg.as a function of DVS

¹¹Fraction of above-gr. DM to stems as a function of DVS

¹Temperature sum from emergence to anthesis

²Temperature sum from anthesis to maturity

³Development stage

⁴Development stage at harvest

⁵life span of leaves growing at 35 Celsius

⁶Specific leaf area

⁷Extinction coefficient for diffuse visible light [-] as function of DVS



در مرحله بعدی، داده‌های ورودی به مدل بایستی آماده شود. این مرحله دقیقاً شبیه به مدل WOFOST است بدین ترتیب که هر دسته از داده‌های ورودی در پوشه مورد نظر خود ذخیره و در روند اجرای شبیه‌سازی فراخوانی می‌شود. ۴- برای واسنجی مدل نیز دستور خاصی نوشته شده است که می‌توان با استفاده از همان دیکشنری نوشته شده در گام، متغیر مربوطه را فراخوانی و هرگونه تغییری را بر آن اعمال نموده و چگونگی تغییرات آن را بر خروجی ارزیابی نمود. در جدول ۵ عمده‌ترین دستورات در مدل PCSE آورده شده است.

موقعیت جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا و داده‌ها هواشناسی (تابش خورشیدی، حداقل و حداکثر دما، فشار بخار، میانگین سرعت باد در ارتفاع دو متری و بارش)، در طول دوره رشد و به‌صورت روزانه از ایستگاه هواشناسی دشت‌ناز ساری دریافت و در قالب فایل هواشناسی مدل مرتب شدند. بایستی در نظر داشت که مدل، میزان آب آبیاری را مستقیماً در نظر نمی‌گیرد، بر همین اساس مقدار آب مورد نیاز آبیاری، بر حسب نوع محصول با استفاده از نرم‌افزار Cropwat 8 محاسبه شده و در مدل اعمال شد و به بارندگی روزانه اضافه شدند. در مرحله چهارم، پارامترهای فیزیکی خاک (رطوبت خاک در حد ظرفیت مزرعه و پژمردگی دائم، رطوبت اشباع، آب قلیل‌دسترس و هدایت هیدرولیکی اشباع) که از آزمایش‌های خاکشناسی در مزرعه به‌دست آمده، وارد فایل مربوطه در مدل می‌شود. بعد از اجرای مدل، در قسمت نتایج، نتایج رشد گیاه تحت شرایط پتانسیل و یا محدودیت غذایی همراه با شبیه‌سازی بیلان آب و بهره‌وری آب در کل سامانه و در منطقه ریشه تعیین شد.

اساس کار PCSE بر تمایل انعطاف‌پذیری بیشتر به‌ویژه برای پژوهش‌ها است که نتایج شبیه‌سازی آن مبتنی بر مشاهدات بوده و پارامترهای ورودی مدل از طریق تکنیک‌های همسان‌سازی داده‌ها اندازه‌گیری به مدل وارد می‌شوند (Supit, de Wit et al., 2012a). که در این زمینه (Combe et al., 2017, et al., 2010) پژوهش به ترتیب زیر محقق شد: ۱- ایجاد دیکشنری به‌این ترتیب که تمامی پارامترهای موجود در مدل بایستی در قالب دیکشنری نوشته شود تا در صورت لزوم، از طریق همین کتابخانه ایجاد شده فراخوانی شود. ۲- در مرحله دوم، بایستی مدل رشد گیاهی عیناً از نسخه تحت ویندوز به پایتون ترجمه شود که این بخش مهم‌ترین بخش کار است و نیاز دارد تمامی کتابخانه‌ها و کلاس‌های آن به‌درستی شناخته شده و فراخوانی شود. از طرفی دیگر، ارتباط بین آن‌ها نیز بایستی به‌درستی تشخیص داده شود. لذا این مرحله نیاز به تسلط کافی بر مدل رشد گیاهی و آشنایی با قوانین و رویکردهای اصلی آن دارد. کدهای اولیه توسط de Wit در سال ۲۰۱۸ در سایت www.Github.com قرار داده شد که می‌توان برای شبیه‌سازی اولیه از آن استفاده نمود. همچنین می‌توان به‌تناسب شبیه‌سازی مدل و فرضیاتی که در آن دنبال می‌شود، تغییرات را اعمال و نتایج را بررسی نمود. ۳-

جدول (۵): توضیحات کلاس‌ها و کتابخانه‌های مدل PCSE و موارد کاربرد آن‌ها در شبیه‌سازی مدل رشد گیاهی

<p>بسته‌های پیش‌نیاز شبیه‌سازی با PCSE</p> <p>Crop Parameter: پارامترهای گیاهی مشتمل بر اسامی پارامتر و مقادیرشان است نیاز است در بخشی از فرآیند شبیه‌سازی محصول، در نظر گرفته شود که این مقادیر با توجه به فنولوژی، جذب، تنفس، پیکربندی بیومس در نظر گرفته می‌شود.</p> <p>Soil Parameter: چنین روندی کم‌وبیش در مورد پارامترهای مربوط به خاک نیز صادق است. دیکشنری مبتنی بر نام / مقدار به نوع خاک و خصوصیات فیزیکی خاک تهیه می‌شود.</p> <p>مشتمل بر پارامترهای فرعی است که مربوط به خاک یا گیاه نمی‌باشد ولی در جریان شبیه‌سازی، معرفی آن‌ها اجتناب‌ناپذیر است نظیر درصد رطوبت خاک یا میزان ذخیره سطحی که براساس طول و عرض جغرافیایی در مدل پایتون تعیین می‌شود.</p> <p>تمامی پارامترها زیرمجموعه این متغیر است که در شبیه‌سازی شناسانده می‌شود.</p> <p>مشتمل بر تاریخ شروع، تاریخ تقریبی جوانه‌زنی و تاریخ تقریبی برداشت، نوع مدیریت آب در مزرعه و حداکثر طول دوره رشد است.</p> <p>براساس طول و عرض جغرافیایی، ساعت آفتابی، حداکثر دما، حداقل دما، تابش خورشیدی و است.</p> <p>پارامتری که می‌تواند مبنای محاسبات واسنجی قرار گیرد، با این دستور فراخوانی و هرگونه تغییری می‌توان اعمال نمود و نتایج را بررسی کرد.</p>	<p>Numpy, SQLAlchemy, PyYAML, pandas, matplotlib, opemr source, system</p> <p>تمامی پارامترهای مربوط به خاک و گیاه</p> <p>تمامی پارامترهای مربوط به موقعیت مکانی</p> <p>آماده‌سازی تمام پارامترهای مربوط به تمامی داده‌ها</p> <p>تمامی پارامترهای مربوط به مدیریت مزرعه</p> <p>تمامی پارامترهای مربوط به هواشناسی</p> <p>کالیبره مدل</p>	<p>CABOFileReader</p> <p>WOFOST71SiteDataProvider</p> <p>ParameterProvider</p> <p>YAMLAgroManagementReader</p> <p>CABOWeatherDataProvider</p> <p>-dict--</p>
---	--	--

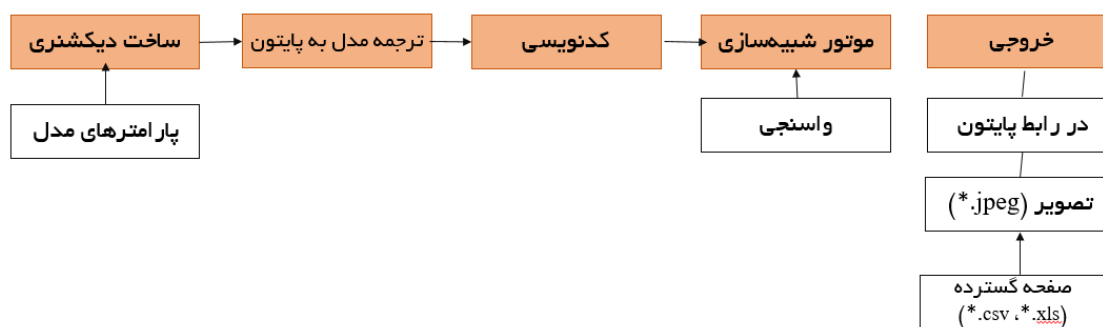
جدید دیگری داشته باشد. همچنین برای کالیبره مدل WOFOST غالباً از روش دستی آزمون و خطا استفاده می‌شد که بایستی به ورودی‌های اصلی مدل در هر بار مراجعه نمود در حالی که در نسخه PCSE نیاز نیست در نسخه اولیه تغییری اعمال نمود و تنها با فراخوانی پارامتر و دستور مربوطه، در فضای کدنویسی می‌توان

بایستی توجه نمود که خروجی‌های هر دو مدل WOFOST و PCSE کاملاً بر هم مطابقت داشته باشند با این تفاوت که مدل WOFOST تنها قادر است دو سال متوالی را شبیه‌سازی نماید در حالی که مدل PCSE این قابلیت را دارد که N تعداد سال را شبیه‌سازی نماید بدون آن که نیاز به پارامتر یا ورودی



واقع ایجاد رابطی^۱ است که می‌تواند با چند دستور پایتون به‌سادگی، حجم وسیعی از روابط و متغیرها را از یک مدل به دیگر ترجمه و انتقال داد. شکل ۳ دیگرام ساختار داخلی توسعه مدل PCSE نشان داده شده است. لازم به ذکر است این نسخه تحت زبان پایتون نیاز به نسخه تحت ویندوز نداشته و تنها کافی است داده‌ها ورودی در پوشه‌ای تحت اسامی دلخواه ذخیره شده و سپس از نسخه تحت پایتون، به آن ارجاع داده شود. در شکل ۱ پیوست، نمونه‌ی کدهای نوشته در زبان پایتون ارائه شده است

تغییرات را اعمال نمود و تمامی مراحل کالیبره، تماماً در محیط پایتون از طریق کدها قابل اجرا است. همچنین این مدل این قابلیت را دارد که هم نمودارها را به فرمت JPEG* و هم خروجی‌های دیگر را در بازه زمانی روزانه به فرمت اکسل یا CSV* ذخیره نماید. این موارد اگرچه برتری نسبی PCSE را به نسخه تحت ویندوز آن نشان می‌دهد، ولی یکی از مهم‌ترین برتری‌های نسخه تحت پایتون این است که می‌توان با آگاهی از زبان کدنویسی پایتون، انواع مختلفی از خروجی را دریافت نمود بدون آن‌که در داده‌های ورودی آن تغییرات خاصی اعمال کرد. این بخش، در



شکل (۳): ساختار کلی مدل توسعه یافته PCSE با زبان پایتون

از جمله پارامترهایی است که مستقیماً بر شاخص عملکرد متوسط مؤثر است به‌طوری‌که با افزایش این پارامتر، عملکرد نیز افزایش می‌یابد. البته این مسئله در مورد گیاهانی نظیر شالی و گوجه‌فرنگی صادق است و برای دانه‌های روغنی، ذرت دانه‌ای و گندم روند معکوس دارد. بررسی اجمالی این گیاهان نشان می‌دهد که عملکرد این محصولات کم بوده و می‌توان چنین نتیجه گرفت که برای گیاهان با عملکرد کم، این پارامتر نقش کاهنده دارد. اما در مورد پارامتر AMAXTB روندی کاملاً عکس وجود دارد و برای گیاهان با عملکرد بیشتر، این پارامتر تأثیر افزایش‌دهنده دارد البته باید توجه داشت این اعداد اثرات کلی بر هم داشته و لازم است که هم به‌صورت مجزا و هم به‌صورت کلی باهم سنجیده شود.

نتایج و بحث

شرایط اقلیمی و گیاه در طی این پژوهش متغیر بوده و سایر پارامترها در طی رشد گیاه ثابت در نظر گرفته شد لذا پارامترهای گیاهی یا اقلیمی مبنای کالیبره مدل قرار گرفتند. بر همین اساس، از دستور - dict هر کدام از پارامترهای اقلیمی یا گیاهی فراخوانی شده و بعد از اعمال تغییرات، خروجی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج این پارامترها در جدول ۶ ارائه شده است. در ارزیابی پارامترهای گیاهی بایستی توجه نمود که پارامترهای تأثیرگذار بر میزان عملکرد غالباً مربوط به بخش جذب^۲ و تقسیم‌بندی^۳ است که عمده‌ترین آن‌ها KDIFTB و AMAXTB است (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۷). از سویی دیگر پارامتر KDIFTB نیز

3 Partitioning

¹ Interface

² Assimilation



جدول (۶): پارامترهای گیاهی اعتبارسنجی شده توسط مدل PCSE

پارامتر	مقدار				
	شالی	گوجه‌فرنگی	ذرت دانهای	دانه‌های روغنی	گندم
TSUM1 (°Cday)	۵۰۰	۱۱۰۰	۵۵۰	۶۹۱	۵۵۰
TSUM2 (°Cday)	۹۰۰	۱۳۰۰	۸۰۰	۷۱۴	۹۰۰
DVSI	۰	۰	۰	۰	۰
DVSEND	۲	۲	۲	۲	۲
SLATB (ha kg ⁻¹)	۰-۰/۰۰۲۲	۰-۰/۰۰۳	۰-۰/۰۰۲۶	۰	۰-۰/۰۰۲۱۲
	۶۰-۰/۰۰۲۲	۱-۰/۰۰۳	۰/۷-۰/۰۰۱۲	۲-۰	۰/۵-۰/۰۰۱۲۱
	۱-۰/۰۰۲۲	۲-۰/۰۰۱۵	۲-۰/۰۰۱۲	۲-۰/۰۰۱۲۱	۲-۰/۰۰۱۲۱
SPAN (day)	۹۰	۳۷	۳۳	۳۲	۳۱/۳
RDI (cm)	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
RRI (cm/day)	۱/۲	۱/۲	۲/۲	۱/۲	۱/۲



ادامه جدول (۶): پارامترهای گیاهی اعتبارسنجی شده توسط مدل PCSE

۱۲۵	۱۲۰	۱۰۰	۵۰	۱۵۰	حداکثر عمق ریشه در دوران بلوغ	RDMCR (cm)
	۰-۰					
۰/۹۵-۰	۱/۱۳-۰	۰/۹۵-۰	۱-۰	۰/۸۵-۰		
۱-۱	۱/۲-۰/۰۸	۱/۱-۰/۵	۱/۲۷-۰/۷۵	۰/۹۰-۰/۳۰	کسر ماده خشک بالای سطح زمین به اندامهای ذخیره	FOTB (kg kg ⁻¹)
۲-۱	۱/۲۷-۰/۱۶	۱/۲-۱	۱/۳۶-۱	۱-۰/۷۵		
	۱/۷۲-۰/۷۰	۲-۱	۲-۱	۰-۱/۸۵		
	۰-۰/۴					
۰-۰/۳۵	۱/۱۳-۰/۴	۰-۰/۳۸		۰/۸۵-۰		
۱-۰/۳۵	۱/۲۰-۰/۳۲	۰/۳۳-۰/۳۸	۰-۰/۲	۰/۹-۰/۳		
۰/۲۵-۰/۳	۱/۲۷-۰/۲۹	۰/۸۸-۰/۸۵	۱-۰/۲	۱-۰/۷۵		
۰/۵-۰/۵	۱/۷-۰/۱۸	۱/۱-۰/۴	۱/۲۷-۰/۲۵	۱/۱-۰/۸۵	کسر ماده خشک بالای سطح زمین به ساقه	FSTB (kg kg ⁻¹)
۰/۶۴۶-۰/۷	۱/۸-۰/۱۵	۱/۲-۰	۱/۳۶-۰	۱/۲-۱		
۱-۰	۱/۹۷-۰	۲-۰	۲-۰	۲-۱		
۲-۱	۲-۰					



ادامه جدول (۶): پارامترهای گیاهی اعتبارسنجی شده توسط مدل PCSE

۰/۱۳۶۵	۰/۰۲۸۸	۰/۰۴۸۳۶	۰/۰۵۸۹	۰/۰۸	شاخص سطح برگ در جوانه‌زنی	LAIEM (ha ha ⁻¹)
۰	۶۰	۱۱۰	۱۷۰	۱۰۰	زمان حرارتی از کاشت تا جوانه‌زنی	TSUMEM (°Cday ⁻¹)
۰ - ۰/۷	۰ - ۰/۶	۰ - ۱	۰ - ۲	-۰/۸۵	ضریب خاموشی برای انتشار نور مرئی به صورت تابعی از مراحل توسعه گیاه	KDIFTB
۲ - ۰/۶	۲ - ۰/۶	۲ - ۰/۶	۱ - ۲	۲۰ - ۰/۸۵		
۰ - ۱۰/۸۳	۰ - ۱۰	۰ - ۳	۰ - ۹	۰ - ۲		
۱ - ۳۵/۸۳	۱/۷۲ - ۴۰	۱/۲۵ - ۷۰	۱/۵۷ - ۳۰	۱ - ۴۰	حداکثر سرعت جذب دی‌اکسید کربن در برگ	AMAXTB (kg ha ⁻¹ hr ⁻¹)
۱/۳ - ۳۵/۸۳	۲ - ۰	۱/۲۵ - ۶۳	۲ - ۰	۱/۳۰ - ۴۰	به صورت تابعی از مراحل توسعه	
۲ - ۴/۴۸				۲ - ۴۰		



زراعی، بسیار متغیر بوده است که از ۰/۰۳ تا ۱۱ درصد متغیر است. به طوری که در اکثر محصولات کمتر از ۱۰٪ بوده که آن را در دامنه عالی قرار می‌دهد (کیانی، ۱۳۹۰). برای نمونه در سال ۱۳۹۳ برای همه محصولات همواره این آماره کمتر از ۱۰٪ و حتی نزدیک به ۱٪ بوده و از این میزان فراتر نرفته که آن را در محدوده خوب تا عالی قرار می‌دهد. البته در مورد گوجه‌فرنگی در طی سال‌های ۹۷-۱۳۹۴ این مسئله روند دیگری دارد و همواره در بازه ۲۶/۶ - ۱۳/۳۵ درصد است که بیشتر از ۱۰ درصد و در تعدادی بیشتر از ۲۰ درصد بوده که آن‌ها را در رده خوب جای می‌دهد. همچنین، نتایج آزمون T در سطح احتمال ۵ درصد نشان داد که در محصولات شالی، گوجه‌فرنگی، دانه‌های روغنی، ذرت علوفه‌ای و گندم تفاوت معناداری بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای وجود ندارد ($P\text{-value} > 0.05$).

مدل PCSE برای هر کدام از محصولات تحت الگوی کشت حوضه آبریز تجن برای سال زراعی ۱۳۹۳ مورد اعتبارسنجی قرار گرفت و برای سال‌های ۹۷-۱۳۹۳ ارزیابی شد که نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است. بررسی RMSE پارامترهای مورد بررسی، در تمام محصولات نشان می‌دهد که کمتر از یک بوده و همواره نزدیک به صفر می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی اختلاف کم بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای است. همچنین نتایج RMSE پارامتر متوسط عملکرد محصولات در این جدول ارقام قابل قبولی بوده که در بازه‌ی ۰/۰۳ تا ۰/۸ تن در هکتار متغیر است که بهترین تطابق بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای را نشان می‌دهد. در واقع این مسئله نشان‌دهنده این حقیقت است که مدل به‌خوبی می‌تواند این پارامتر را شبیه‌سازی نماید. بررسی nRMSE برای همه محصولات مورد بررسی در سال

جدول (۷): نتایج تحلیل آماری شبیه‌سازی عملکرد محصولاتی زراعی حوزه آبریز دشت تجن با

استفاده از مدل PCSE

سال	آزمون آماری	گندم	دانه‌های روغنی	ذرت دانه‌ای	شالی	گوجه‌فرنگی
۱۳۹۳	RMSE ($t\ ha^{-1}$)	۰/۳۸	۰/۵۲	۰/۱	۰/۳۳	۰/۲۱
	nRMSE (%)	۷/۲	۵/۸۲	۲/۲	۴	۵/۶۸
	P-value	۰/۰۵۷	۰/۴۷	۰/۷۵	۰/۲۴	۰/۰۵۲
۱۳۹۴	R	۰/۵۳	۰/۶۸	۰/۶۵	۰/۶۹	۰/۵۹
	RMSE ($t\ ha^{-1}$)	۰/۳۴	۰/۶۹	۰/۱۵	۰/۰۹	۰/۲۵
	nRMSE (%)	۲۱/۶	۲/۲۵	۴/۵۶	۴/۱۲	۱۳/۳۵
۱۳۹۵	P-value	۰/۰۳۳	۰/۰۹	۰/۵۰	۰/۰۸	۰/۰۷
	R	۰/۶۵	۰/۷۶	۰/۵۹	۰/۷۲	۰/۶۱
	RMSE ($t\ ha^{-1}$)	۰/۱۵	۰/۴۶	۰/۱۴	۰/۰۴	۰/۲
۱۳۹۶	nRMSE (%)	۳/۸	۱/۱۸	۵/۶	۱/۰۱	۱۵/۸۲
	P-value	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۵۷
	R	۰/۶۷	۰/۵۴	۰/۶۹	۰/۵۷۲	۰/۶۱
۱۳۹۶	RMSE ($t\ ha^{-1}$)	۰/۵۳	۰/۳۶	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۲۸
	nRMSE (%)	۲/۳	۱/۸۳	۳/۵۷	۱/۰۳	۲۶/۶
	P-value	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۳۲	۰/۰۳۲
۱۳۹۷	R	۰/۹۸	۰/۶۱	۰/۶۲	۰/۶۳	۰/۶۷
	RMSE ($t\ ha^{-1}$)	۰/۷۷	۰/۸	۰/۰۷	۰/۲	۰/۳۳
	nRMSE (%)	۳/۴۵	۳/۴۶	۶/۵	۱۱	۲۲/۹
	P-value	۰/۴۲	۰/۴۷	۰/۰۹	۰/۰۶۱	۰/۰۷
	R	۰/۸۴	۰/۶۴	۰/۷۲	۰/۶۹	۰/۵۸

روغنی ۲/۶ و گوجه‌فرنگی ۳۵ تن در هکتار برای سال ۱۳۹۳ گزارش شده است که مبنای مقایسات و ارزیابی‌ها را فراهم می‌آورد. مطابق با جدول زیر، کمترین میزان عملکرد گندم، برای سال ۱۳۹۴ گزارش شده است. چنین روندی در مورد گوجه‌فرنگی نیز مشاهده شده است و بیشترین میزان عملکرد در سال ۱۳۹۶

در جدول ۸ متوسط عملکرد گیاه شبیه‌سازی شده حوضه آبخیز دشت تجن در طی سال‌های ۹۷-۱۳۹۳ مشاهده می‌شود. همچنین مطابق با گزارش سازمان جهاد کشاورزی استان مازندران مقادیر مشاهده شده عملکرد گندم ۳، شالی ۵/۲۴، ذرت دانه‌ای ۷، دانه‌های



متوالی را دارد که بایستی توجه نمود این مزیت در نسخه پایتون موجب تسریع شبیه‌سازی و افزایش دقت می‌شود. از طرفی دیگر امکان لینک یا تلفیق این مدل با سایر مدل‌ها به راحتی فراهم شده که خود می‌تواند مطالعات پیچیده‌تری را تحت پوشش قرار دهد. در مطالعه حاضر، نسبت به نسخه اصلی مدل پایتون و همچنین نسخه FORTRAN تلاش شده است هم دستورات مربوط به پایتون برای کاربرانی که آشنایی کمی با اصول کدنویسی دارند، به سهولت در دسترس و قابل استفاده باشد و هم واسنجی مدل و روابط ارزیابی آن به‌طور جداگانه و در بخش مجزایی به کدهای نوشته شده اضافه گردد.

برای محصول گندم پیش‌بینی شد که رقمی معادل ۳/۴۵ تن در هکتار است. مقایسه این موارد همچنین نشان می‌دهد که بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده اختلاف کمی وجود دارد که نتایج جدول ۸ را تایید می‌کند. لذا می‌توان چنین استنباط نمود که مدل PCSE قابلیت شبیه‌سازی عملکرد محصولات را داراست. اما آنچه این مدل را نسبت به مدل WOFOST برتر می‌نماید، امکان شبیه‌سازی هم‌زمان چند محصول در هر سال آماري دلخواه است. این مسئله حتی می‌تواند سال‌های آماری متوالی را نیز شامل شود. چرا که مدل WOFOST تنها برای گیاهان یک‌ساله بوده و بر همین اساس قابلیت شبیه‌سازی تنها دو سال

جدول (۸): مقادیر شبیه‌سازی عملکرد محصولات (ton/ha) در حوزه آبریز دشت تجن با استفاده از مدل PCSE

محصولات سال زراعی	گندم	شالی	ذرت دانه‌ای	دانه‌های روغنی	گوجه‌فرنگی
۱۳۹۳	۳/۱	۵/۲۱	۷/۲	۲/۷۶	۳۵/۶۸
۱۳۹۴	۲/۹۸	۵/۲۳	۷/۱۵	۲/۶۵	۳۴/۰۱
۱۳۹۵	۳/۲۲	۵/۳۶	۷/۱۷	۲/۶۸	۳۴/۲۵
۱۳۹۶	۳/۴۵	۵/۲۸	۷/۲۵	۲/۷۱	۳۴/۸۲
۱۳۹۷	۳/۱۸	۵/۱۲	۷/۱۳	۲/۵۵	۳۴/۵۲

آزمون T محصولات در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان داد تفاوت معناداری بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای وجود ندارد. نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که خروجی‌های هر دو مدل WOFOST و PCSE کاملاً بر هم مطابقت دارد. به‌طوری‌که کمترین میزان عملکرد گندم، برای سال ۱۳۹۴ گزارش شده است. چنین روندی در مورد گوجه‌فرنگی نیز مشاهده شده است و بیشترین میزان عملکرد در سال ۱۳۹۶ برای محصول گندم پیش‌بینی شد که رقمی معادل ۳/۴۵ تن در هکتار است. مقایسه این موارد همچنین نشان می‌دهد که بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده اختلاف کمی وجود دارد که قابلیت مدل PCSE برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

مدل PCSE برای هر کدام از محصولات الگوی کشت حوزه آبریز تجن برای سال زراعی ۱۳۹۳ مورد اعتبارسنجی و برای سال‌های ۹۷-۱۳۹۳ ارزیابی شد. نتایج کلی حاصل از این پژوهش نشان داد مقادیر RMSE در همه محصولات مورد مطالعه همواره کمتر از یک و حتی نزدیک به صفر بوده که نشان‌دهنده اختلاف کم بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای است. مقادیر nRMSE برای همه محصولات مورد بررسی در سال زراعی، بسیار متغیر بوده است که بین ۰/۰۳ تا ۱۱ درصد به‌دست‌آمده است. از سویی دیگر، نتایج



سیاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری تحت قرارداد شماره ۰۶-۱۳۹۹-۰۲ انجام شد که به این وسیله سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- خوش روش، م. و ولی زاده، م. ۱۳۹۶. اثرات احداث شبکه آبیاری و زهکشی سد مخزنی شهید رجایی روی تغییرات زمانی و مکانی کمیت و کیفیت آب زیرزمینی دشت ساری - نکا. علوم آب و خاک - علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. جلد ۲۱، شماره ۲.
- زحمتکش، م.، منتظر، ع. ا. ۱۳۹۰. ارزیابی عملکرد تعدادی از شبکه های آبیاری جهان با استفاده از شیوه مقایسه ای و تحلیل داده کاوی. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) شماره ۵، دوره ۲۵.؛ از صفحه ۱۰۴۲ تا صفحه ۱۰۵۷.
- شاهنظری، ع. ۱۳۹۳. گزارش برنامه ریزی منابع آب- یکپارچه سازی و تهیه سیستم پشتیبان تصمیم گیری منابع و مصارف دشت تجن. جلد پنجم.
- هاشمی، س. ف.، شاهنظری، ع.، رایینی، م.، قدمی فیروز آبادی، ع.، امیری، ا. ۱۳۹۷. بررسی ضرایب ورودی گیاهی مدل WOFOST در شرایط کم آبیاری بخشی ریشه برای گیاه آفتابگردان. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). جلد ۳۲، شماره ۴، ص ۶۶۰ - ۶۴۷.
- Asseng, S., Ewert, F., Rosenzweig, C., Jones, J., Hatfield, J., Ruane, A., Boote, K.J., Thorburn, P.J., Rotter, R.P., Cammarano, D., 2013. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nat. Clim. Chang.* 3, 827–832.
- Beyene, A. N., Zeng, H., Wu, B., Zhu, L., Gebremicael, T. G., Zhang, M., & Bezabh, T. (2022). Coupling remote sensing and crop growth model to estimate national wheat yield in Ethiopia. *Big Earth Data*, 6(1), 18-35.
- Boogaard H., Wolf J., Supitc I., Niemeyer S., Ittersuma M. v. 2013. A regional implementation of WOFOST for calculating yield gaps of autumn-sown wheat across the European Union. *Field Crops Research*, 143: 130–142.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18, 309–332.
- Bulatawicz, T., Allen, A., Peterson, J.M., Staggenborg, S., Welch, S.M., Steward, D.R., 2013. The simple script wrapper for OpenMI: enabling interdisciplinary modeling studies. *Environ. Model. Softw.* 39, 283–294.
- Cai, X., McKinney, D.C., Lasdon, L.S., 2003. Integrated hydrologic-agronomic-economic model for river basin management. *J Water Resour. Plan. Manag.* 129 (1), 4e17.
- Combe, M., Wit, A.J.W., Vila-Guerau de Arellano, J., Mole, M.K., van der Molen Magliulo, V., 2017. Grain yield observations constrain cropland CO2 fluxes over Europe. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. <https://doi.org/10.1002/2017JG003937>.
- de Wit, A., d'Andrimont, R., Bartalev, S., Defourny, P., Kleshchenko, A., Roerink, G., Virchenko, O., 2012a. MOCCASIN (Monitoring crops in continental climates through assimilation of satellite information), Let's Embrace Space Volume II. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg, Larnaca, Cyprus, pp. 70–78. <https://doi.org/10.2769/31208>.
- de Wit, A.J.W.D., 2018. PCSE: The Python Crop Simulation Environment. Version 5.3.3. June 2018. Available at: <http://pcse.readthedocs.io> (web archive link, 16 June 2018), Accessed date: 16 June 2018. <http://pcse.readthedocs.io>.
- Ewert, F., Rotter, R.P., Bindi, M., Webber, H., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Olesen, J.E., van Ittersum, M.K., Janssen, S., Rivington, M., 2015. Crop modelling for integrated assessment of risk to food production from climate change. *Environ. Model Softw.* 72, 287–303.
- Gregersen, J.B., Gijsbers, P.J.A., Westen, S.J.P., 2007. OpenMI: open modelling interface. *J. Hydroinformatics* 9 (3), 175e191.



- Halbe J., Pahl-Wostl C., Adamowski J. 2018. A methodological framework to support the initiation, design and institutionalization of participatory modeling processes in water resources management. *Journal of Hydrology* 556: 701–716.
- Holzworth, D.P., Snow, V., Janssen, S., Athanasiadis, I.N., Donatelli, M., Hoogenboom, G., White, J.W., Thorburn, P., 2015. Agricultural production systems modelling and software: current status and future prospects. *Environ. Model Softw.* 72, 276–286.
- Horlemann L., Jafari Berenji P. 2017. Participation in Water Management in Iran. *Reviving the Dying Giant* pp 51-62.
- Hosseinpour, Z.; Menhaj, M.H.; Kavooosi-Kalashami, M. 2016. Assessment Improving and Organizing Mechanism of Water Users Cooperatives Using AHP Method in Esfarayen County, Iran. *International Journal of Agricultural Management and Development (IJAMAD)*, 06, 3.
- Inam A, Adamowski J, Halbe J, P Shiv. 2017. Using causal loop diagrams for the initialization of stakeholder engagement in soil salinity management in agricultural watersheds in developing countries: A case study in the Rechna Doab watershed, Pakistan. *Journal of Environmental Management* 152: 251;267.
- Inam, A., Adamowski, J., Halbe, J., Malard, J., Albano, R., Prasher, S., 2017a. Coupling of a distributed stakeholder-built system dynamics socio-economic model with SAHYSMOD for sustainable soil salinity management Part 2: model coupling and application. *J. Hydrol.* 551, 278e299.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T., 2003. DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18, 235e265.
- Kersebaum, K.C., Boote, K.J., Jorgenson, J., Nendel, C., Bindi, M., Fruhauf, C., Gaiser, T., Hoogenboom, G., Kollas, C., Olesen, J.E., 2015. Analysis and classification of data sets for calibration and validation of agro-ecosystem models. *Environ. Model Softw.* 72, 402–417.
- Liao, Y.-P., Lin, S.-S., Chou, H.-S., 2012. Integration of urban runoff and storm sewer models using the OpenMI framework. *J. Hydroinformatics* 14 (4), 884e901.
- Madani K. 2014. Water management in Iran: what is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences*. Volume 4, Issue 4, pp 315–328.
- Malard J.J., Inam A., Hassanzadeh E., Adamowski J., Tuy H.A., Melgar-Quiñonez H. 2017. Development of a software tool for rapid, reproducible, and stakeholder-friendly dynamic coupling of system dynamics and physically-based models. *Environmental Modelling & Software* 96; 410:420.
- Muller, C., Elliott, J., Chrysanthacopoulos, J., Arneith, A., Balkovic, J., Ciais, P., Deryng, D., Folberth, C., Glotter, M., Hoek, S., 2017. Global gridded crop model evaluation: benchmarking, skills, deficiencies and implications. *Geosci. Model Dev.* 10, 1403–1422.
- Peck, A., Neuwirth, C., Simonovic, S.P., 2014. Coupling System Dynamics with Geographic Information Systems: CCaR Project Report. University of Western Ontario Department of Civil and Environmental Engineering, report no. 086. ISBN 1913-3219.
- Porter, C.H., Villalobos, C., Holzworth, D., Nelson, R., White, J.W., Athanasiadis, I.N., Janssen, S., Ripoche, D., Cufi, J., Raes, D., 2014. Harmonization and translation of crop modeling data to ensure interoperability. *Environ. Model Softw.* 62, 495–508.
- Prodanovic, P., Simonovic, S.P., 2010. An operational model for support of integrated watershed management. *Water Resour. Manag.* 24, 1161–1194.
- Quintero, D., & Díaz, E. (2020). A comparison of two open-source crop simulation models for a potato crop. *Agronomía Colombiana*, 38(3), 382-387.
- Rosenzweig, I., Hodges, B.R., 2011. A Python Wrapper for Coupling Hydrodynamic and Oil Spill Models. *CRWR Online Report* 11-09.
- Shrestha, N.K., Leta, O.T., De Fraine, B., van Griensven, A., Bauwens, W., 2013. OpenMI-based integrated sediment transport modelling of the river Zenne, Belgium. *Environ. Model. Softw.* 47, 193:206.
- Supit, I., Van Diepen, C.A., De Wit, A.J.W., Kabat, P., Baruth, B., Ludwig, F., 2010. Recent changes in the climatic yield potential of various crops in Europe. *Agric. Syst.* 103, 683–694.
- Wang, J., Huang G., Zhan H., cMohanty B.P., Zheng J., Huang Q., Xu 2014. Evaluation of soil water dynamics and crop yield under furrow irrigation with a two-dimensional flow and crop growth coupled model. *Agricultural Water Management*, Volume 141, 31 July 2014, Pages 10-22.
- Wu, S., Yang, P., Ren, J., Chen, Z., & Li, H. (2021). Regional winter wheat yield estimation based on the WOFOST model and a novel VW-4DEnSRF assimilation algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 255, 112276.

Zhuo, W., Huang, J., Xiao, X., Huang, H., Bajgain, R., Wu, X., ... & Wagle, P. (2022). Assimilating remote sensing-based VPM GPP into the WOFOST model for improving regional winter wheat yield estimation. *European Journal of Agronomy*, 139, 126556.

پیوست

```
1 from pcse.base import ParameterProvider
2 from pcse.fileinput import CABOFileReader
3 from pcse.fileinput import YAMLAGroManagementReader
4 from pcse.util import WOFOST71SiteDataProvider
5 from pcse.fileinput import CABOWeatherDataProvider
6 from pcse.models import Wofost71_WLP_FD
7 import pysd
8 import pandas as pd
9 # for every year of simulation we could have folder
10 base_dir = "./data/22/"
11 out_dir = ".out"
12
13 agro = 'sugarbeet_calendar.agro'
14 soil = 'ec3.soil'
15 crop = 'sug0601.crop'
16 weather_filename = 'NL1'
17 day = 365
18
19 saved_name = 'output'
20
21
22 def wofost(new_weather_file_name: str):
23     # load argo from directory
24     agromanagement = YAMLAGroManagementReader(f"{base_dir}/{agro}")
25     sitedata = WOFOST71SiteDataProvider(WAV=100, CO2=360)
26     # load soil from directory
27     soildata = CABOFileReader(f"{base_dir}/{soil}")
28     # load crop from directory
29     cropdata = CABOFileReader(f"{base_dir}/{crop}")
30     # load weather data from directory
31     wdp = CABOWeatherDataProvider(fname=new_weather_file_name, fpath=base_dir)
```

شکل (۱): نمونه‌ای از یک فایل آزمون کدهای PCSE به فرمت پایتون در صفحه نمایش PyCharm