

EXTENDED ABSTRACT

Calibration and Validation of Daisy Model for Sunflower under Partial Root-Zone Drying

H. Pouryazdankhah¹, A. Shahnazari^{2*}, M. Ziatabar Ahmadi³, M. R. Khaledian⁴ and M. N. Andersen⁵

1- Ph.D. Graduate, Department of Water Sciences, Faculty of Engineering Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Km 9 Farah Abad Road, Sari, 48181-68984 Mazandaran, Iran.

2* - Corresponding Author, Professor, Department of Water Sciences, Faculty of Engineering Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Km 9 Farah Abad Road, Sari, 48181-68984 Mazandaran, Iran (a.shahnazari@sanru.ac.ir).

3- Professor, Department of Water Sciences, Faculty of Engineering Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Km 9 Farah Abad Road, Sari, 48181-68984 Mazandaran, Iran.

4- Associate professor, Water Engineering Dept., Faculty of Agriculture Sciences, University of Guilan, and Department of Water Engineering and Environment, Caspian Sea Basin Research Center, Rasht, 41889-58643 Iran.

5- Professor, Department of Agroecology, Aarhus University, Blichers Allé 20, 8830 Tjele, Denmark.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 24 May 2021

Revised: 23 September 2021

Accepted: 25 September 2021

Keywords:

Function of Specific Leaf Weight Modifier, Leaf Area Index, Stomatal Slop Factor, PRD Submodel.

TO CITE THIS ARTICLE:

Pouryazdankhah, H., Shahnazari, A., Ziatabar Ahmadi, M., Khaledian, M., N. Andersen, M. (2022). 'Calibration and Validation of Daisy Model for Sunflower under Partial Root-Zone Drying', *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(3), pp. 15-30.

Introduction

Due to the increased water consumption and the depletion of water resources, deficit irrigation is an optimal strategy for cultivation, which is usually applied by utilizing the methods of Deficit Irrigation (DI), Regulated Deficit Irrigation (PRD), and Partial Root-zone Drying Irrigation (PRD). In the PRD method, just one side of the plant is irrigated in each irrigation interval. Under these conditions, in the part of the irrigated plant, the roots absorb enough water and grow, so that there is no change in the amount of the plant's photosynthesis. There are some models, including WOFOST (Van Diepen et al., 1989; Boogaard et al., 1998), EPIC (Jones et al., 1991), AquoCrop (Steduto et al., 2009), and STICS (Brisson et al., 2003), that can simulate crop yield under different soil conditions, climates, irrigation schedule, and agricultural managements (Hashemi et al., 2018). These models simulate PRD irrigation, such as the DI method. Daisy is the first model, differentiating the gained results between the two methods (Hansen et al., 1990; Hansen et al., 1991); a semi-experimental model that considers the Richards equation (Richards, 1931) to simulate the soil water content and the experimental equations to simulate crop yield parameters. The PRD sub-model in the Daisy was developed and upgraded based on the data gained from potato cultivation under PRD irrigation (Liu et al., 2008; Plauborg et al., 2010). Since this sub-model was developed only for the potato, the aim of the present study was calibration and validation of two parameters; stomatal slop factor (m) and specific leaf weight modifier (LeafAIMod) in the PRD sub-model, to run the Daisy model to simulate sunflower under the PRD irrigation.

Methodology

To calibrate and validate m and LeafAIMod in the PRD sub-model of Daisy, the data gained from the field experiments for cultivating Sunflower under PRD irrigation in 2013 (Ghadami Firouzabadi, 2015) and 2016 (Cheraghizadeh, 2018) was utilized, respectively. Two treatments of PRD75-2013 and PRD55-2013 for calibration and six treatments of PRD20-75, PRD75-35, PRD75-50, PRD55-20, PRD55-35, and PRD75-50 for validation were considered. The numbers of 20, 35, and 50 at the end of naming the treatments of 2016, were indicated the different irrigation intervals. It means that the following irrigation schedule was applied after 20, 35, and 50 mm evaporation from the class A evaporation pan. According to the result of the field experiments of 2013 and 2016, the physiological indicators, including Dry Matter (DM), plant height (H), and Leaf Area Index (LAI) was measured in six stages at the end of the growth period, which was considered as the measured data in the study. For trial and error of m and LeafAIMod, each time, after running the Daisy model, the simulated and measured values of DM, H, and LAI were compared by the statistical indices including, R², RMSE, NRMSE, EF and efficiency of the model was evaluated. In order to evaluate the differences between the simulated and measured values statistically in both calibration and validation conditions, the paired-sample t-test was run by SPSS.

Results and Discussion

To simulate PRD conditions, the required parameters in the PRD sub-model were defined according to the measured values of sunflower and the default values presented in Daisy Program Reference Manual (Abrahamsen, 2014). Due to this, the only meter parameters, m (which is an experimental value), and the LeafAIMod were calibrated manually for sunflower under PRD irrigation. The value of m was defined as 8.84 ± 3.77 based on the investigation of Miner and Bauerle (2017), the final value of m in this study was obtained 12, and the function of LeafAIMod parameters was modified as follows:

$$(\text{LeafAIMod } (0.0 \ 2.5) (0.4 \ 2.1) (1.5 \ 1.7) (2.0 \ 0.8)) \quad (1)$$

The results of statistical indices in calibration indicated that the values of RMSE and NRMSE were located in the acceptable limits and the high correlation between the simulated and measured parameters according to R² was observed (0.890-989). The paired samples t-test showed that no significant difference was observed between the simulated and measured parameters according to the final value of m and LeafAIMod, which needs validation. To validate and evaluate the two calibrated parameters, m and LeafAIMod, two levels of 75 and 55 percent of six PRD irrigation treatments applied in 2016, were considered. The result of validation showed that two calibrated parameters were acceptable based on the average RMSE, NRMSE, and EF for LAI being equal to 0.465 cm²/cm², 0.090 and 93.5%, for H being equal to 5.437 cm, 0.032, and 92%, and for DM being equal to 0.286 Ton/ha, 0.078, and 93%, respectively and there was no significant difference between simulated and observed data. The distribution of simulated and observed points according to one to one line showed that the Daisy model simulated the physiological indices of PRD condition more acceptable under less water stress. Based on the average of the statistical indices obtained from treatments; PRD75s and PRD55s, it can be concluded that although the result of both groups was in the acceptable range, the accuracy of results obtained from PRD75 treatments are more. The result of field experiments utilized in the present study and other investigations (Sepaskhah & Ahmadi, 2010) stated that reducing of water requirement in the PRD irrigation can partially the yield, so that there is no significant difference with full irrigation. But in some investigations presented that if the lack of irrigation is applied less than a specific limit, even in PRD irrigation, the plant will face a severe reduction in yield (Shahnazari *et al.*, 2008). The optimal amount of water reduction for different plants under the PRD method varies according to the sensitivity of plants to water stress (Sepaskhah & Ahmadi, 2010). Totally, the results showed that the Daisy model was able to simulate the yield reduction proportional to the decrease of

water applied in both PRD75 and PRD55 treatments, and considering that the Daisy model is the only model that can simulate the PRD conditions, it can be utilized for simulating the cultivation of sunflower under PRD irrigation according to the two calibrated parameters in PRD sub-model; m and LeafAIMod.

Conclusions

Simulating physiological indices in PRD indicated that both factors of irrigation interval and the level of water stress are effective in simulating by Daisy model. Charts related to the water content in the PRD condition represented that the correlation of points in PRD75s was more than PRD55s. Generally, the results related to the charts related to the water contents of PRDs showed that the model overestimated the water content values in more interval irrigation. It is suggested that the two calibrated parameters in the PRD sub-model be evaluated for the other varieties of sunflower and under different climatic conditions. This method can also be utilized to define the PRD sub-models for simulating the yields of other plants

Acknowledge

Thanks to Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU) for paying the grant of student projects to do the investigation, learn the model, and do the soil experiments. According to utilize the final result of two Ph.D. theses in SANRU, the authors would like to appreciate the researchers; Mojtaba Cheraghizadeh and Ali Ghadami Firouzabadi, who allowed to access the initial data of their theses.

References

- 1- Abrahamsen, p. 2014. *Daisy Program Reference Manual*. University of Copenhagen, Department of Basic Sciences and environment, Environmental Chemistry and Physics.
- 2- Boogaard, H.L., C.A. van Diepen, R.P. Rötter, J.M.C.A. Cabrera, and H.H. van Laar. 1998. *User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5. Tech. Doc. 52*. DLOWinand Staring Centre, Wageningen, the Netherlands.
- 3- Brisson, N., C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, D. Zimmer, J. Sierra, P. Bertuzzi, P. Burger, F. Bussiere, Y.M. Cabidoche, P. Cellier, P. Debaeke, J.P. Gaudillere, C. Henault, F. Maraux, B. Seguin, and H. Sinoquet. 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*. 18. pp. 309–332.
- 4- Cheraghizadeh, M. 2018. *Evaluation of the effect of irrigation interval by conducting partial rootzone drying (PRD) deficit irrigation and full irrigation (FI) on sunflower plant (Hysun25) and its simulation by using HYDRUS-2D model*. Ph.D. dissertation, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari. (In Persian).
- 5- Ghadami Firouzabadi, A., Shahnazari, A., Raeini, M. and Zareabyaneh, H. 2015. Effect of the deficit irrigation and partial root-zone irrigation on Yield, chlorophyll fluorescence and the growing parameters of sunflower. *Journal of Water Research in Agriculture*. 29(2). pp. 167-157. (In Persian).
- 6- Hashemi, S.F., Shahnazari, A., Raeini, M., Ghadami Firouzabadi, A. and Amiri, A. 2018. Evaluation of plant input coefficient of WOFOST in partial root-zone drying condition for sunflower. *Journal of Water and Soil*. 32(4). pp. 647-660. (In Persian).
- 7- Hansen, S., Jensen, H.E., Nielsen, N.E. and Svendsen, H. 1990. *DAISY: Soil Plant Atmosphere System Model. NPO Report No. A 10*. The National Agency for Environmental Protection, Copenhagen. (<http://daisy.ku.dk/publications/A10.pdf>).

- 8- Hansen S., Jensen H.E., Nielsen N.E. and Svendsen H. 1991. Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model Daisy. *Fertilizer Research*. 27. pp. 245-259.
- 9- Jones, C.A., Dyke, P.T., Williams, J.R., Kiniry, J.R., Benson, C.A. and Griggs, R.H. 1991. EPIC: An operational model for evaluation of agricultural sustainability. *Agricultural Systems*. 37. pp. 341–350.
- 10-Liu, F., Song, R., Zhang, X., Shahnazari, A., Andersen, M.N., Plauborg, F., Jacobsen, S.-E. and Jensen, C.R. 2008. Measurement and modeling of ABA signaling in potato (*Solanum tuberosum* L.) during partial root-zone drying. *Environmental and Experimental Botany*. 63. pp. 385–391.
- 11-Miner, G.I., and Bauerle, W. 2017. Seasonal variability of the parameters of the Ball-Berry model of stomatal conductance in maize (*Zra mays* L.) and sunflower (*Helianthus annuus* L.) under well-watered and water stressed conditions. *Plant, Cell and Environment*. 40(9). pp.1874-1886.
- 12-Plauborg, F., Abrahamsen, P., Gjettermann, B., Mollerup, M., Iversen, B.V., Liu, F., Andersen, M.N. and Hansen, S. 2010. Modeling of root ABA synthesis, stomatal conductance, transpiration and potato production under water saving irrigation regimes. *Agricultural Water Management*. 98. pp. 425-439.
- 13-Richards, L.A. 1931. Capillary conductivity of liquids in porous mediums. *Physics*. 1. pp. 318-333.
- 14-Sepaskhah, A.R. and Ahmadi, S.H. 2010. A review on partial root-zone drying irrigation. *International Journal of Plant Production*. 4(4). pp. 241-258.
- 15-Shahnazari, A., Ahmadi, S.H., Lærke, P.E., Liu, F., Plauborg, F., Jacobsen, S.E., Jensen, C.R. and Andersen, M.N. 2008. Nitrogen dynamics in the soil-plant system under deficit and partial root-zone drying irrigation strategies in potatoes. *European Journal of Agronomy*. 28. pp. 65-73.
- 16-Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop—The FAO crop model for predicting yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*. 101. pp. 426–437.
- 17-Van Diepen, C.A., Wolf, J., Van Keulen, H., and C. Rappoldt. 1989. WOFOST: A simulation model of crop production. *Soil Use and Management*. 5. pp. 16–24.





واسنجی و اعتبارسنجی مدل Daisy برای گیاه آفتاب‌گردان تحت شرایط کم آبیاری بخشی ریشه

هدیه پوریزدان‌خواه^۱، علی شاهنظری^{۲*}، میرخالق ضیاء تبار احمدی^۳، محمدرضا خالدیان^۴ و ماتیاس نیومان آندرسن^۵

- ۱- دانش آموخته مقطع دکترای مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، دانشکده مهندسی زراعی، گروه مهندسی آب.
- ۲- نویسنده مسئول، استاد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، دانشکده مهندسی زراعی، گروه مهندسی آب a.shahnazari@sanru.ac.ir
- ۳- استاد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، دانشکده مهندسی زراعی، گروه مهندسی آب.
- ۴- دانشیار، دانشگاه گیلان، دانشکده علوم کشاورزی، گروه مهندسی آب و وابسته پژوهشی گروه مهندسی آب و محیط زیست پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر.
- ۵- استاد، دانشگاه آرهوس، دانشکده کشاورزی و بوم‌شناسی، دانمارک.

پذیرش: ۱۴۰۰/۷/۳

بازنگری: ۱۴۰۰/۷/۱

دریافت: ۱۴۰۰/۳/۳

چکیده

تحقیقات زیادی نشان داده‌است که عملکرد محصول در کم آبیاری معمولی (DI) کمتر از کم آبیاری بخشی ریشه (PRD) است، به طوری که میزان کاهش عملکرد در PRD نسبت به آبیاری کامل معنی‌دار نیست. نیاز است در مدل‌های شبیه‌ساز عملکرد محصول، این موضوع لحاظ شود. با توجه به اینکه مدل Daisy تنها مدلی است که قادر است شرایط PRD را شبیه‌سازی نماید، هدف از این تحقیق واسنجی دو پارامتر عامل شیب روزنه‌ای (m) و تابع اصلاح‌کننده وزن مخصوص برگ طی مرحله رشد (LeafAIMod) برای گیاه آفتاب‌گردان تحت آبیاری PRD در مدل Daisy بود. برای این منظور مدل براساس اطلاعات دو تیمار PRD در دو سطح ۷۵ درصد (PRD75) و ۵۵ درصد (PRD55) در سال ۱۳۹۲ تحت کشت آفتاب‌گردان واسنجی و سپس براساس اطلاعات شش تیمار PRD75 و PRD55 با دوره‌های مختلف آبیاری در سال ۱۳۹۵ اعتبارسنجی شد. مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده پارامترهای خروجی شاخص سطح برگ (LAI)، ارتفاع گیاه (H) و مقدار ماده خشک (DM) براساس شاخص‌های آماری RMSE، NRMSE، R² و EF با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج حاصل از اعتبارسنجی نشان داد که دو پارامتر واسنجی شده مذکور، با میانگین RMSE برابر با ۰/۴۶۵ cm²/cm² و ۰/۴۲۸۶ Ton/ha به ترتیب برای پارامترهای LAI، H و DM در محدوده‌ی قابل قبول بوده است و اختلاف معنی‌داری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده وجود ندارد. پراکندگی نقاط شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده نسبت به خط یک‌به‌یک نشان داد که مدل Daisy، شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاه را در روش PRD تحت تنش آبی کمتر، بهتر برآورد نموده‌است. همچنین هر دو عامل دور آبیاری و میزان تنش آبی در شبیه‌سازی با مدل Daisy تأثیرگذار هستند. پیشنهاد می‌شود از این روش، برای شبیه‌سازی گیاهان تحت آبیاری PRD استفاده شود.

کلید واژه‌ها: تابع اصلاح‌کننده وزن مخصوص برگ، شاخص سطح برگ، عامل شیب روزنه‌ای، زیرمدل PRD.

مقدمه

سطح Sepaskhah et al (2006) و افزایش تولید یا درآمد در مجموع سطح زیرکشت گزارش می‌شود. کم آبیاری معمولاً به صورت یکی از روش‌های کم آبیاری معمولی (DI)، کم آبیاری تنظیم‌شده (RDI) و کم آبیاری بخشی ریشه (PRD) اعمال می‌شود. هدف اصلی کم آبیاری، افزایش راندمان مصرف آب به وسیله افزایش کفایت آبیاری است (English et al., 1990). تحقیقات نشان داده است که در روش PRD، در دوره‌های غیرحساس به خشکی، با اعمال کم آبیاری به میزان ۷۰ تا ۹۰ درصد نیاز آبی، کاهش معنی‌داری در عملکرد محصول رخ نمی‌دهد (Shahnazari et al., 2005). روش PRD، یک استراتژی آبیاری مورد قبول در زمینه صرفه‌جویی در آب است که

پیش‌بینی شده افزایش جمعیت تا هشت میلیارد نفر تا سال ۲۰۲۵ و نگرانی برای تولید غذای کافی، برنامه‌ریزان را بر آن داشته است تا با افزایش ۲۰ درصدی سطح مزارع تحت آبیاری، انتظار افزایش ۴۰ درصدی تولید محصولات را داشته باشند (Lascano and Sojka, 2007). این در حالی است که کمبود آب و کاهش سریع منابع آب مهم‌ترین معضل در بسیاری از نقاط جهان به‌ویژه نواحی خشک و نیمه‌خشک دنیا است (Sepaskhah and Akbari, 2005). کم آبیاری یک راهکار بهینه برای کشت و برداشت محصولات تحت شرایط کمبود آب است که معمولاً به‌صورت کاهش محصول در واحد

ریشه را تفکیک نماید، مدل Daisy است (Hansen et al., 1990)؛
(Hansen et al., 1991).

مدل Daisy، یکی از مدل‌های موفق در زمینه بررسی مدیریتی گیاه در سیستم بوم‌سازگاری زراعی (Agro-ecosystem) است (Manevski et al., 2016). مدل Daisy، یک مدل انعطاف‌پذیر در سیستم خاک-گیاه-اتمسفر است که برای شبیه‌سازی یک بعدی و دو بعدی بیلان آب، بیلان گرما، بیلان املاح و تولید محصول بوم‌سازگاری زراعی با اعمال راهکارهای مختلف مدیریتی، به صورت یک بعدی و دو بعدی به کار می‌رود. مدل، تولید محصول، رشد و توسعه گیاهان را شبیه‌سازی می‌کند و همچنین در زمینه مدیریت کشاورزی، امکان تعریف سناریوهای مدیریتی پیچیده را فراهم می‌کند. زیرمدل بیلان آب شامل بیلان آب سطحی و بیلان آب خاک است. زیرمدل بیلان گرما، دمای خاک، انجماد و ذوب شدن در خاک را شبیه‌سازی می‌کند. زیرمدل بیلان املاح نیز، فرایندهای انتقال، جذب سطحی و فرایندهای تبدیل را شبیه‌سازی می‌کند. این مدل همچنین بر حرکت نیتروژن در بوم‌سازگاری زراعی تأکید ویژه دارد و قابلیت شبیه‌سازی جذب و انتقال مواد شیمیایی زراعی مانند آفت‌کش‌ها را نیز داراست. همچنین مدل تولید محصول، رشد و توسعه گیاهان شامل تجمع ماده خشک و نیتروژن را در قسمت‌های مختلف گیاهی شبیه‌سازی می‌کند (Hansen, 2002). مدل Daisy، مدل نیمه‌تجربی است که برای شبیه‌سازی آب خاک از معادله ریچاردز (Richards 1931) و برای شبیه‌سازی پارامترهای محصول از معادله‌های تجربی استفاده می‌کند. با توجه به فرضیه‌های مختلفی که در فرآیندهای گیاهی تحت کم‌آبایی بخشی ریشه وجود دارد، تحقیقاتی در زمینه شبیه‌سازی با استفاده از مدل Daisy انجام شد که منجر به ارائه زیرمدل‌هایی شد که بتواند شبیه‌سازی میزان عملکرد را در روش PRD بهبود بخشد. در اولین گام، تحقیقی با هدف توسعه یک مدل مبتنی بر فرآیندهای مکانیکی برای پیش‌بینی اثر ترشح آبسسیک اسید (ABA) در گیاه سیب‌زمینی تحت روش آبیاری PRD و تخمین زمان بهینه برای نوبتی کردن آبیاری انجام شد که با در نظر گرفتن سه تیمار آبیاری کامل، کم‌آبایی و بدون آبیاری، سه رابطه استخراج شد و بر اساس این سه رابطه یک مدل ساده‌ی پیش‌بینی‌کننده‌ی اثر غلظت هورمون ABA در میزان عملکرد و رشد گیاهان تحت آبیاری PRD توسعه یافت (Liu et al., 2008). بعدها، مدل دیگری با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در یک محیط نیمه-مزرعه‌ای (Semi-field) با کاشت گیاه سیب‌زمینی و تحت آبیاری PRD، با اندازه‌گیری تبادلات گازی برگ و حرکت آب در خاک در مدل Daisy، توسعه داده شد و داده‌های تجربی با نتایج شبیه‌سازی با در نظر گرفتن جریان آب خاک به صورت دو بعدی و ترشح ABA و اثر آن بر هدایت روزنه‌ای، تعرق، جذب و در نهایت عملکرد محصول با یکدیگر مقایسه شدند (Plauborg et al., 2010). همچنین Huber et al. (2015) نشان دادند که گیاهان در

بیش از چندین دهه ارائه یافته و اخیراً در بسیاری از کشورها تحت مطالعه و سپس توسعه قرار گرفته است (Liu et al., 2008; Karandish and Simunek, 2018; Yousefian et al., 2018; Cheraighzadeh et al., 2018; Khaleghi et al., 2016). در روش PRD، در هر دور آبیاری یک سمت از گیاه آبیاری می‌شود. در این شرایط، در سمتی از گیاه که آبیاری اعمال می‌شود، ریشه گیاه آب کافی را جذب کرده و به رشد و نمو خود ادامه می‌دهد، به صورتی که تغییری در میزان فتوسنتز آن رخ نمی‌دهد (Jones, 1992). بخش دیگر از ریشه‌ی گیاه که در خاک خشک قرار دارد، تحت تنش خشکی، با ترشح آبسسیک اسید (ABA) در ریشه از ریشه به روزه‌ها می‌فرستد و میزان بازشدگی آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد که باعث کاهش میزان تلفات آب، اصلاح رشد گیاه و متعاقباً افزایش بهره‌وری مصرف آب در گیاه می‌شود (Liu et al., 2008; Liu et al., 2006). از طرفی، طی تحقیق عنوان شد که آب دادن مجدد خاک خشک شده تحت آبیاری PRD باعث تغییر در فرآیندهای مختلفی می‌شود که روی نیتروژن (N) و فسفر (P) خاک و جذب آنها توسط گیاهان تأثیرگذارند (Jovanovic and Stikic, 2018).

در بسیاری موارد، محدودیت‌های موجود در تحقیقات آزمایشگاهی و مزرعه‌ای، منجر به عدم اجرای دقیق پژوهش‌ها می‌شود، به همین دلیل مدل‌های شبیه‌ساز تا حد زیادی در پشتیبانی از تحقیقات انجام شده مزرعه‌ای و یا آزمایشاتی استفاده می‌شوند (Plauborg et al., 2010).

مدل‌های گیاهی مختلفی از جمله مدل (WOFOST) (Wofost) (Van Diepen et al., 1989; Boogaard et al., 1998; Jones et al., 1991) (EPIC) (Steduto et al., 2009) (STICS) (Brisson et al., 2003) ارائه شده‌اند که قادر به شبیه‌سازی عملکرد محصول تحت شرایط مختلف خاک، آب و هوا، آبیاری و مدیریت مزرعه هستند (Hashemi et al., 2018). در این مدل‌ها، تفاوت خاصی در شبیه‌سازی بین دو روش کم‌آبایی معمولی و آبیاری بخشی ریشه وجود ندارد. در صورتی که در روش آبیاری PRD که تنها بخشی از ریشه در معرض خشک شدن قرار می‌گیرد، با ترشح هورمون آبسسیک اسید و انتقال آن بر اساس پتانسیل آبی گیاه، باعث کاهش هدایت روزنه‌ای، کاهش شاخص سطح برگ و افزایش محصول نسبت به کم‌آبایی معمولی می‌شود، به طوری که کاهش محصول آن نسبت به آبیاری کامل در بسیاری موارد معنی‌دار نیست (Karandish et al., 2013; Shahnazari et al., 2007). در حالی که مدل‌ها، با تعریف کاهش مقدار آب آبیاری، شبیه‌سازی حالت PRD را همانند کم‌آبایی معمولی در نظر می‌گیرند. اولین مدلی که قادر است نتایج حاصل از دو روش کم‌آبایی معمولی و آبیاری بخشی

داده‌های هواشناسی برای مدل Daisy تعریف شد و بر اساس داده‌های ورودی، مدل از روش پنمن مونتیث برای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل استفاده نمود. برای تعریف اطلاعات گیاهی، از مدل محصول برای گیاه آفتاب‌گردان در مدل استفاده شد.

برای انجام پژوهش‌های مزرعه‌ای از طرح بلوک‌های کاملا تصادفی استفاده شد. برای آبیاری قطره‌ای سطحی، نوارهای تیپ دو طرفه با فواصل قطره‌چکان ۲۰ سانتی‌متر و دبی دو لیتر بر ساعت به کار گرفته شد. نوارهای تیپ به فاصله ۲۰ سانتی‌متری از ردیف‌های کشت قرار داده شد.

کوددهی بر اساس نیاز گیاه انجام شد. در سال ۱۳۹۲، کودهای اوره (۲۲۰ kg/ha)، سولفات پتاسیم (۱۵۰ kg/ha) و فسفات تریپل (۲۰۰ kg/ha) براساس توصیه کودی از طرف آزمایشگاه، به زمین داده شد (Ghadami Firouzabadi, 2015). در سال ۱۳۹۵، کودهای اوره (۱۵۰ kg/ha)، کود سولفات پتاسیم (۱۰۰ kg/ha) و فسفات تریپل (۱۰۰ kg/ha) به خاک محل طرح افزوده شد (Cheraghizadeh, 2018). فاصله ردیف‌های کاشت ۷۵ سانتی-متر، فاصله بوته روی ردیف ۲۰ سانتی‌متر و طول ردیف‌های کشت ۱۰ متر بود. عمق کاشت سه تا پنج سانتی‌متر بود. عمق مورد نیاز آبیاری (D_n) در آبیاری کامل بر اساس رابطه (۱) محاسبه شد.

$$D_n = \sum_{i=1}^m [(\theta_{Fci} - \theta_{Ii}) \times \rho_{bi} \times D_i] \quad (1)$$

که در این رابطه، θ_{Fci} رطوبت وزنی در حد ظرفیت زراعی (اعشار)، θ_{Ii} رطوبت خاک پیش از آبیاری (اعشار)، D_i اندازه عمقی که رطوبت در آن اندازه‌گیری شده (در محدوده توسعه ریشه به cm)، ρ_{bi} جرم مخصوص ظاهری خاک (gr/cm^3)، i لایه خاک بررسی شده و m تعداد لایه خاک بررسی شده است. در این تحقیق پس از گذشت ۴۰ روز از کاشت گیاه، کم‌آبیاری بخشی ریشه در دو سطح ۷۵ درصد (PRD75) و ۵۵ درصد (PRD55) از تیمار آبیاری کامل به این تیمارها آب داده شد و تا قبل از اعمال تیمارهای آبیاری بخشی ریشه، تمام کرت‌ها به میزان حجم آب مورد نیاز در تیمار آبیاری کامل آب دریافت می‌کردند. نحوه اعمال تیمارهای آبیاری بخشی ریشه به این شکل بود که در هر دور آبیاری، کل حجم آب برآورد شده در دو سطح ۷۵ درصد و یا ۵۵ درصد، از یک سمت به گیاه داده شد و در دور آبیاری بعد، آبیاری از سمت دیگر گیاه اعمال شد و این چرخه تا پایان دوره کشت ادامه یافت. در سال ۱۳۹۲ و ۱۳۹۵ به ترتیب زمان شروع کشت، ۲۵ اردیبهشت و ۹ خرداد و زمان برداشت ۲۶ مرداد و ۱۰ شهریور بود. برای واسنجی m و LeafAIMod، از دو تیمارهای آبیاری PRD75-2013 و PRD55-2013 مربوط به سال زراعی ۱۳۹۲ و برای اعتبارسنجی از شش تیمار PRD75-20، PRD75-35، PRD75-50، PRD55-20، PRD55-35 و PRD75-50 استفاده شد.

هنگام مواجه با تنش آبی، روزنه‌های خود را می‌بندند که این امر هم می‌تواند ناشی از اثر هیدرولیکی (H) و اثر ترشح مواد شیمیایی به همراه انتقال هیدرولیکی در گیاه (C+H) باشد. در این تحقیق با ترکیب روابط هیدرولیکی گیاه با مدلی برای هدایت روزنه‌ای که شامل ترشح مواد شیمیایی بود، روابط مستقیمی بین رطوبت خاک در دسترس با میزان کاهش تعرق بدست آمد.

زیرمدل PRD موجود در مدل Daisy بر اساس اطلاعات برگرفته شده از گیاه سیب‌زمینی تحت آبیاری بخشی ریشه ساخته و ارتقاء داده شد (Liu et al., 2008; Plauborg et al., 2010). با توجه به این امر که این زیرمدل تنها برای گیاه سیب‌زمینی نوشته شده بود، در تحقیق حاضر، هدف توسعه زیرمدل PRD برای گیاه آفتاب‌گردان است. برای این منظور، واسنجی و اعتبارسنجی دو پارمتر عامل شیب روزنه‌ای (Stomatal slop factor) با علامت اختصاری (m) و تابع اصلاح کننده وزن مخصوص برگ نسبت به مرحله رشد گیاه (Specific leaf weight modifier) با علامت اختصاری (LeafAIMod) در زیر مدل PRD به منظور استفاده از مدل Daisy برای شبیه‌سازی گیاه آفتاب‌گردان تحت آبیاری PRD، انجام شد.

مواد و روش‌ها

به منظور واسنجی m و LeafAIMod در مدل Daisy، از نتایج آزمایش مزرعه‌ای طی سال زراعی ۱۳۹۲ Ghadami Firouzabadi (2015) و برای اعتبارسنجی آن، از نتایج آزمایش مزرعه‌ای طی سال زراعی ۱۳۹۵، Cheraghizadeh (2018) استفاده شد. پژوهش‌های انجام شده، در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، استان مازندران، واقع در طول جغرافیایی ۵۳/۰۴ درجه، عرض جغرافیایی ۳۹/۳۶ درجه و با ارتفاع ۱۵- متر نسبت به سطح دریای آزاد برای گیاه آفتاب‌گردان رقم آذرگل برای واسنجی و رقم هایسان برای اعتبارسنجی، تحت تیمار آبیاری بخشی (PRD) انجام شد. خصوصیات فیزیکی خاک در جدول (۱) ارائه شده است. مدل Daisy برای اجرا و شبیه‌سازی شرایط دوره رشد گیاه، مقادیر روزانه میانه دمای هوا، بارندگی، تابش جهانی، فشار بخار هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد را برای یک بازه زمانی چند ساله (حداقل ۴ ساله) متشکل از کل دوره‌ی رشد نیاز دارد. مدل Daisy قادر است تبخیر-تعرق پتانسیل را به‌عنوان یک ورودی از کاربر دریافت کند و یا آن را از معادله پنمن-مونتیث (Smith et al. 1990) و یا از معادله ماکینک (Makkink 1957) محاسبه نماید.

در این تحقیق اطلاعات هواشناسی به‌صورت روزانه از ایستگاه هواشناسی دشت‌ناز ساری که نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به محل مورد بود، دریافت شد. میزان تابش جهانی روزانه بر اساس ساعت آفتابی روزانه و طبق رابطه و جداول ارائه شده توسط Allen et al. (1998) برای سال‌های ۹۶-۹۱ محاسبه شد و به‌عنوان ورودی

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک در منطقه مورد مطالعه

Table 1- Physical properties of the soil in study area

Soil Layers	Soil Texture	Bulk density (ρ_b)	Mineral Carbon	PWP	FC	*K _s
cm		gr/cm ³	%	%	%	cm/day
0-20	Sandy Loam	1.35	0.65	9.5	22	120
20-40	Sandy Clay	1.66	0.6	9	27	18.75
40-80	Sandy Clay	1.66	0.58	8.8	27	18.75

* Soil hydraulic conductivity (Ks) estimated by RETC.

شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده با شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2) در نرم‌افزار Excel، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) Honari et al. (2017) و ضریب کارایی مدل (EF) Nash و Sutcliffe (1970) مقایسه شدند و عملکرد مدل Daisy مورد ارزیابی قرار گرفت، به طوری که هر چه مقدار RMSE و NRMSE به عدد صفر نزدیک‌تر و EF به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر باشد، عملکرد مدل در شبیه‌سازی شرایط PRD بهتر ارزیابی شد.

پس از واسنجی پارامترها بر اساس تیمارهای سال ۱۳۹۲، مدل بر اساس اجرای شش تیمار PRD در سال ۱۳۹۵ اعتبارسنجی شد. بدین صورت که پس از اجرای مدل Daisy برای هر تیمار، شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاه (DM، H و LAI) شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده با یکدیگر بر اساس شاخص‌های آماری مذکور مقایسه شدند. همچنین برای بررسی آماری اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در هر دو وضعیت واسنجی و اعتبارسنجی دو پارامتر m و LeafAIMod، از آزمون t-test جفت شده توسط نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ استفاده شد.

نتایج و بحث

مقدار m بر اساس تحقیق Miner و Bauerle (2017) برای گیاه آفتاب‌گردان برابر با $3/77 \pm 8/84$ برآورد شد که در این تحقیق ۱۲ به‌دست آمد و LeafAIMod در مدل براساس رابطه (۲) اصلاح شد:

$$(2.0 \quad 1.7) \quad (1.5 \quad 1.1) \quad (0.4 \quad 2.1) \quad (0.0 \quad 2.5) \quad \text{LeafAIMod} \quad (0.8)$$

(۲)

نتایج حاصل از واسنجی پارامترهای شاخص فیزیولوژیکی گیاه بر اساس شاخص‌های آماری RMSE و NRMSE، EF و R^2 در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج حاصل از شاخص‌های آماری در جدول (۲) نشان می‌دهد که مقادیر RMSE و NRMSE برای همه پارامترهای مربوط به شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاه در محدوده‌ی قابل قبول بوده است و همبستگی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بر اساس شاخص ضریب تبیین برابر با ۰/۸۹۰-۰/۸۹۰ برآورد شد که هرچه

با توجه به مطالعه‌های انجام شده توسط Cheraghizadeh (2018) اعداد ۲۰، ۳۵ و ۵۰ در انتهای نام‌گذاری تیمارهای آبیاری بخشی ریشه سال ۱۳۹۵، نشان‌دهنده‌ی تفاوت در دور آبیاری است، به طوری که در تیمارهای فوق به ترتیب، دور بعدی آبیاری، پس از ۲۰، ۳۵ و ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشت تبخیر کلاس A در نظر گرفته شد. به عبارتی دور آبیاری بعدی تیمارها براساس میزان تابش و دمای هوای روزانه و متعاقباً تبخیر انجام شده از تشت تبخیر تعیین شد و در نتیجه میزان تبخیر بیشتر، نیازمند روزهای بیشتر و متعاقباً در نظر گرفتن دور آبیاری بیشتر است. قابل ذکر است که این اعداد از بررسی شرایط هواشناسی منطقه به‌دست آمده است و به ترتیب سه، شش و نه برابر متوسط تبخیر-تعرق گیاه در مرحله میانی رشد در نظر گرفته شد (Cheraghizadeh et al., 2018). در سال ۱۳۹۲، دور آبیاری یک روز در میان در نظر گرفته شد (Ghadami, 2015). زمان و عمق خاک‌ورزی قبل از کاشت، زمان و عمق کاشت، مقدار و زمان آبیاری و کوددهی، برای مدل Daisy تعریف شد. در کل، تنش آبی در دو سطح ۷۵ درصد و ۵۵ درصد و دوره‌های آبیاری مختلف براساس تبخیر ۲۰، ۳۵ و ۵۰ میلی-متر از تشت تبخیر کلاس A در نظر گرفته شد.

طی داده‌برداری‌های پژوهش‌های سال ۱۳۹۲ و ۱۳۹۵، مقدار ماده خشک (DM)، ارتفاع گیاه (H) و شاخص سطح برگ (LAI) در شش مرحله در اواخر دوره رشد گیاه، سه هفته پس از اعمال تیمارها، هر هفته یک‌بار اندازه‌گیری شد (Ghadami Firouzabadi, 2015) و Cheraghizadeh (2018) که به‌عنوان مقادیر اندازه‌گیری شده برای مقایسه در پژوهش حاضر استفاده شد. با توجه به این امر که، برای

شبیه‌سازی شرایط PRD به زیرمدل PRD نیاز بود، پارامترهای موجود در آن، بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌فرض ارائه شده در کتاب مرجع دستورالعمل Daisy (Abrahamsen, 2014) تغییر یافت. تنها پارامتر m، که یک مقدار تجربی گیاهی است و پارامتر LeafAIMod برای حالت آبیاری بخشی ریشه با سعی و خطای دستی برای گیاه آفتاب‌گردان در حالت آبیاری PRD واسنجی شدند. بدین صورت که در هر بار اجرای مدل، تیمارهای PRD75-2013 و PRD55-2013 شبیه‌سازی شدند، پارامترهای DM، H و LAI

درصد طی سال زراعی ۱۳۹۵ در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از مقایسه با شاخص‌های آماری R^2 ، EF، NRMSE، RMSE و برای آبیاری بخشی ریشه در سطح ۷۵ درصد و ۵۵ درصد و میانگین تیمارهای PRD55 و PRD75 در جدول (۴) ارائه شده است.

بر اساس میانگین شاخص‌های آماری به‌دست آمده برای دو گروه از تیمارهای PRD55 و PRD75، می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه در هر دو گروه نتایج به‌دست آمده در محدوده قابل قبول بوده است، اما نتایج به‌دست آمده برای تیمار PRD75 از دقت بیشتری برخوردار است، زیرا مقدار RMSE و NRMSE به‌دست آمده در هر یک از پارامترهای عملکرد محصول در حالت PRD75 کوچک‌تر و نزدیک‌تر به صفر است که نشان دهنده این است اختلاف مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در حالت PRD75 کمتر است. از طرفی، ضریب کارایی مدل در تیمارهای PRD75 بیشتر از تیمارهای PRD55 برآورد شده است که می‌توان نتیجه گرفت که هر چه تنش آبی بیشتر باشد، اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده بیشتر است. نتایج حاصل از NRMSE محاسبه شده برای پارامترهای عملکرد محصول، نشان داد که بزرگترین NRMSE محاسبه شده به‌ترتیب مربوط به پارامتر شاخص سطح برگ در تیمارهای PRD55-50 و PRD75-50 است که بر این اساس می‌توان گفت که بیشترین خطا در پارامتر شاخص سطح برگ در دور آبیاری بالاتر رخ داده است. مقادیر به‌دست آمده در جدول (۴) نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در همه تیمارها از همبستگی خوبی برخوردار هستند به‌طوری‌که مقدار R^2 در همه تیمارها در محدوده ۰/۹۹۷-۰/۹۰۸ برآورد شده است. پراکندگی مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای تیمارهای PRD75-50، PRD55-35 و PRD55-50، به‌عنوان نمونه‌هایی از تیمارهای مورد ارزیابی برای واسنجی مدل، در شکل (۲) نسبت به خط یک به یک ارائه شده است.

مقدار R^2 به عدد یک نزدیک‌تر باشد نشان دهنده همبستگی بالاتر مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده است (Lee et al., 2019). بیشترین اختلاف مقدار شبیه‌سازی شده با مقدار اندازه‌گیری شده بر اساس شاخص NRMSE در جدول (۲) مربوط به پارامتر شاخص سطح برگ در تیمار PRD55-2013 است. مقدار خطا در هر سه پارامتر LAI، DM و H در سطح آبیاری ۷۵ درصد کمتر از سطح آبیاری ۵۵ درصد برآورد شد و همچنین مقدار EF نزدیک به ۱۰۰ درصد است که نشان‌دهنده عملکرد دقیق‌تر مدل در شبیه‌سازی تیمار PRD75 بود. شکل (۱) پراکندگی مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده هر یک از پارامترهای مربوط به شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاه را نسبت به خط یک به یک برای تیمارهای PRD55-2013 و PRD75-2013 نشان می‌دهد. نمودارهای شکل (۱) نشان می‌دهند که توزیع نقاط نسبت به خط یک به یک برای تمام پارامترهای شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاه قابل قبول بوده است. اگرچه نمودارهای یک به یک نشان دهنده عملکرد بالای مدل در شبیه‌سازی هستند به‌طوری‌که بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی مشهودی مشاهده نشده است اما عدم انطباق کامل نقاط شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده را می‌توان ناشی از خطای اندازه‌گیری و یا وجود شرایط غیرقابل پیش‌بینی در مدل دانست. معنی‌دار بودن اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده با استفاده از t-test جفت شده توسط نرم‌افزار SPSS سنجیده شد که نتایج در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج جدول (۳) نشان داد که در هیچ یک از تیمارهای مورد بررسی، اختلاف معنی‌داری مشاهده نشده است و همچنین شکل (۱) نیز نشان دهنده صحت قابل قبول اطلاعات اعمال شده برای واسنجی دو پارامتر m و LeafAIMod برای گیاه آفتاب‌گردان تحت آبیاری PRD است که نیاز به اعتبارسنجی دارد.

برای اعتبارسنجی و ارزیابی دو پارامتر m و LeafAIMod واسنجی شده، شش تیمار آبیاری بخشی ریشه در دو سطح ۷۵ و ۵۵

جدول ۲- مقایسه شاخص‌های فیزیولوژیکی (شاخص سطح برگ LAI، ارتفاع گیاه H و مقدار ماده خشک DM) شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده سال ۱۳۹۲ با شاخص‌های آماری

Table 2- Comparison of the simulated and measured physiological indices (leaf area index (LAI), plant height (H) and dry matter (DM)) by the statistical indices in 2013

Treatment	R^2			EF (%)			NRMSE			RMSE		
	DM	H	LAI	DM	H	LAI	DM	H	LAI	DM (Ton/ha)	H (cm)	LAI (cm ² /cm ²)
PRD75-2013	0.989	0.979	0.966	94	98	96	0.008	0.019	0.039	0.046	3.641	0.236
PRD55-2013	0.890	0.959	0.917	87	92	90	0.021	0.032	0.060	0.120	6.055	0.320
Average	0.939	0.969	0.941	90	95	93	0.014	0.025	0.049	0.083	4.848	0.278

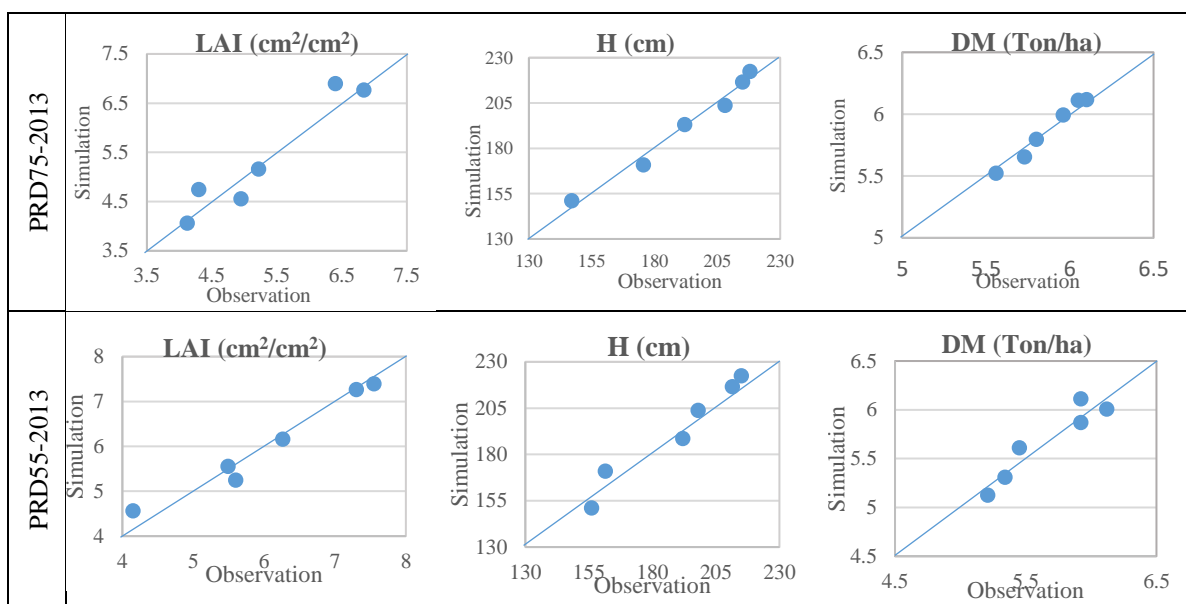


Fig. 1- Simulated and measured value of the physiological parameters including leaf area index (LAI), plant height (H) and dry matter (DM) in 2012 according to the one-to-one line.

شکل ۱- مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاه شامل سطح برگ (LAI)، ارتفاع گیاه (H) و مقدار ماده خشک گیاه (DM) در سال ۱۳۹۲ نسبت به خط یک به یک.

جدول ۳ - نتایج بررسی آماری براساس آزمون t-test جفت شده (۶ جفت داده در هر تیمار) در اعتبارسنجی.

Table 3- Results of the statistical analysis based on the paired samples t-test (6 pairs of data per treatment) in calibration.

Treatment	Dry Matter (DM)	Height (H)	Leaf Area Index (LAI)
PRD75-2013	0.980 n.s	0.771 n.s	0.872 n.s
PRD55-2013	0.789 n.s	0.230 n.s	0.675 n.s

* and **: Significant at 1% and 5% probability level respectively and n.s.: not significant.

جدول ۴- مقایسه شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاه (شاخص سطح برگ LAI، ارتفاع گیاه H و مقدار ماده خشک DM) شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده برای تیمارهای PRD سال ۱۳۹۵ با شاخص‌های ارزیابی برای اعتبارسنجی.

Table 4- Comparison of the simulated and measured physiological indices (leaf area index (LAI), plant height (H) and dry matter (DM)) by the statistical indices in 2016.

Treatment	R ²			EF (%)			NRMSE			RMSE		
	DM	H	LAI	DM	H	LAI	DM	H	LAI	DM (Ton/ha)	H (cm)	LAI (cm ² /cm ²)
PRD75-20	0.929	0.989	0.962	92	98	94	0.047	0.016	0.083	0.276	2.890	0.448
PRD75-35	0.963	0.979	0.968	96	96	96	0.050	0.024	0.061	0.275	4.439	0.313
PRD75-50	0.967	0.908	0.918	92	91	91	0.065	0.041	0.098	0.351	7.113	0.541
Average PRD75	0.953	0.957	0.949	93	95	94	0.054	0.027	0.081	0.301	4.814	0.434
PRD55-20	0.973	0.981	0.947	94	98	95	0.043	0.022	0.092	0.236	3.911	0.446
PRD55-35	0.980	0.997	0.961	96	97	95	0.045	0.025	0.092	0.238	4.455	0.456
PRD55-50	0.966	0.985	0.927	90	71	90	0.065	0.065	0.116	0.342	9.816	0.587
Average PRD55	0.973	0.988	0.945	93	89	93	0.103	0.037	0.100	0.272	6.061	0.496
Total average	0.963	0.972	0.947	93	92	93.5	0.078	0.032	0.090	0.286	5.415	0.465

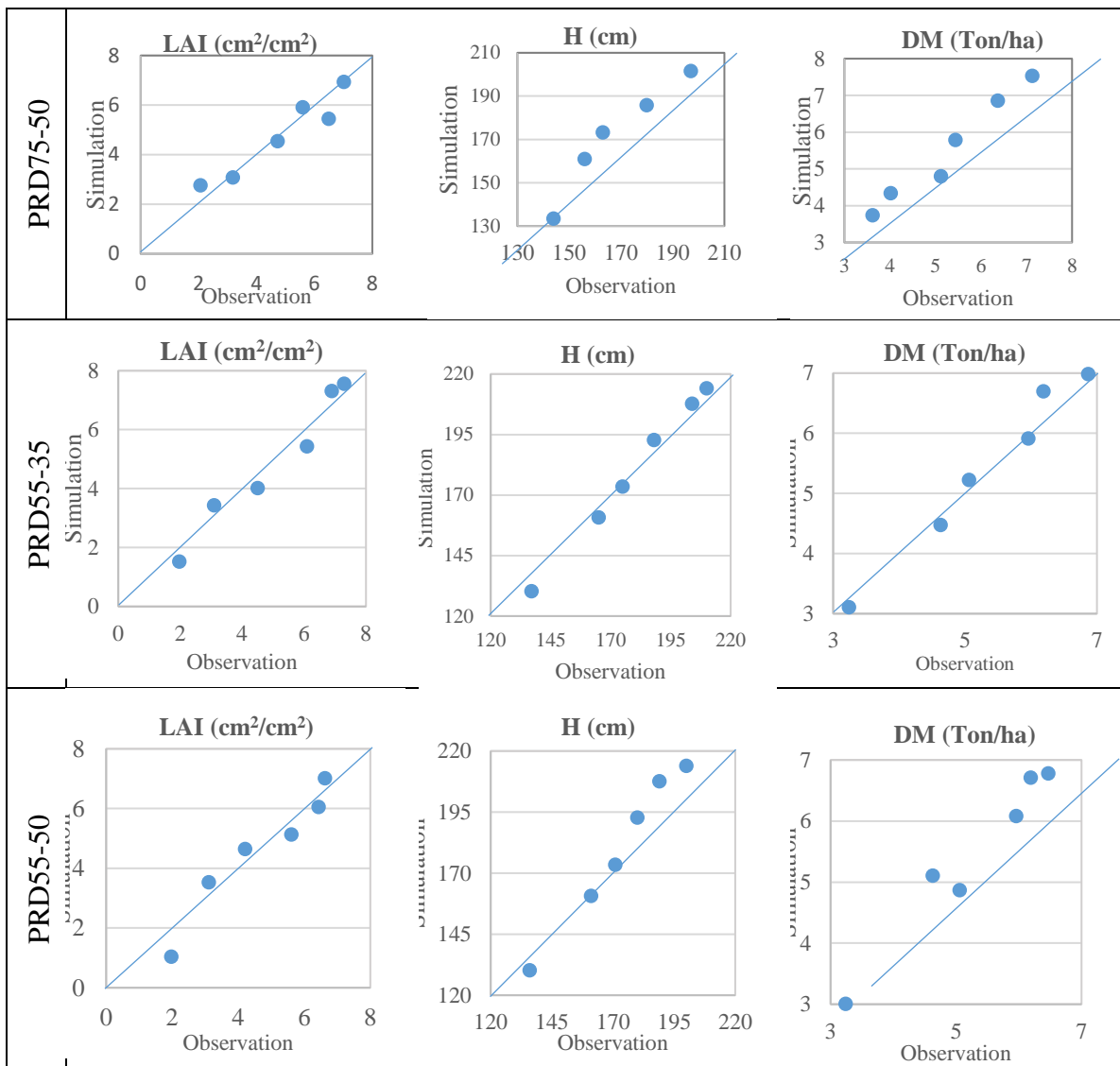


Fig. 2- - Simulated and measured value of the physiological parameters including leaf area index (LAI), plant height (H) and dry matter (DM) for the treatment of PRD75-50, PRD55-35 and PRD55-50 according to the one-to-one line.

شکل ۲- مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاه شامل شاخص سطح برگ (LAI)، ارتفاع گیاه (H) و مقدار ماده خشک گیاه (DM) برای تیمارهای PRD75-50، PRD55-35 و PRD55-50 نسبت به خط یک به یک.

نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهند که در تیمارهای PRD75 تراکم نقاط نسبت به خط یک به یک بیشتر از تیمارهای آبیاری PRD55 است که به دلیل تشابه نمودارها، نمونه‌هایی از آنها در شکل (۲) ارائه شد. با توجه به اینکه مدل Daisy، شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاه در روش آبیاری بخشی ریشه را در تنش آبی کمتر، بهتر برآورد کند، بهترین عملکرد مدل مربوط به تیمار PRD75-20 و کمترین شاخص‌های آماری متعلق به تیمار PRD55-50 است. نتایج حاصل از آزمون t-test جفت شده برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده

شکل (۲) نشان می‌دهد هرچه تنش آبی بیشتر باشد، مقدار پارامترهای ارتفاع گیاه و مقدار ماده خشک گیاه شبیه‌سازی شده، در انتهای دوره رشد گیاه (در ارتفاع بالاتر)، بیشتر از مقدار واقعی برآورد شده است، به طوری که در تیمارهای PRD55 این بیش‌برآوردی در پارامتر ارتفاع گیاه در انتهای دوره رشد گیاه کاملاً مشهود است. شکل (۲)، بیش‌برآوردی را در پارامترهای ارتفاع گیاه و ماده خشک را در تیمارهای PRD55-35 و PRD55-50 با افزایش مقادیر به‌خوبی نشان می‌دهند. همه نمودارهای مربوط به پراکندگی مقادیر شبیه‌سازی شده

در شرایط PRD55 نسبت به شرایط PRD75 در شبیه‌سازی‌ها به‌خوبی برآورد گردیده است.

Hashemi et al (2018)، شرایط آبیاری بخشی ریشه و کم‌آبیاری معمولی را طی دو سال با مدل WOFOST برای گیاه آفتاب‌گردان

شبیه‌سازی نمودند و با توجه به اینکه مدل WOFOST قادر به تفکیک نتایج حاصل از دو روش کم‌آبیاری معمولی و کم‌آبیاری بخشی ریشه نیست، آن‌ها با افزودن به میزان ۰/۰۲ درصد به مقدار آب آبیاری در روش PRD، توانستند تمایز مورد بحث را پوشش دهند. تحقیقات انجام شده برای شبیه‌سازی شرایط PRD بسیار محدود است، در مدل Daisy نیز با ارائه دو زیرمدل، شبیه‌سازی روش PRD تنها برای گیاه سیب‌زمینی اجرا شد (Liu et al., 2008; Plauborg et al., 2010). در این تحقیق، با واسنجی دو پارامتر m و LeafAIMod، شرایط شبیه‌سازی تحت شرایط PRD برای گیاه آفتاب‌گردان نیز امکان‌پذیر شده است که البته تحقیقات بیشتری به‌منظور بررسی و ارزیابی مدل برای ارقام مختلف گیاه آفتاب‌گردان و تحت شرایط آب و هوایی متفاوت پیشنهاد می‌شود. هم‌چنین می‌توان از این روش برای گیاهان دیگر تحت آبیاری بخشی ریشه استفاده نمود.

نتیجه‌گیری

با توجه به این موضوع که عملکرد محصول در کم‌آبیاری معمولی (DI) متفاوت از کم‌آبیاری بخشی ریشه (PRD) است، نیاز است در مدل‌های شبیه‌ساز عملکرد محصول، این موضوع لحاظ شود. از آنجایی که مدل Daisy تنها مدلی است که قادر است شرایط آبیاری PRD را شبیه‌سازی نماید، در این تحقیق، هدف، واسنجی و اعتبارسنجی دو پارامتر m و LeafAIMod در زیرمدل PRD در Daisy بود که بر اساس اطلاعات گیاه سیب‌زمینی ساخته شد.

و اندازه‌گیری شده هر سه پارامتر شاخص سطح برگ، ارتفاع گیاه و مقدار ماده خشک در تیمارهای PRD75 و PRD55 در جدول (۵) ارائه شده است. نتایج جدول (۵) نشان داد که در هیچ‌کدام از تیمارها، بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

به‌طور کلی نتایج نشان داد که دو پارامتر m و LeafAIMod واسنجی شده برای گیاه آفتاب‌گردان قابل قبول بوده است و نتایج اعتبارسنجی نیز مورد تأیید است. در آزمایشات مزرعه‌ای مورد استفاده در تحقیق حاضر و تحقیقات دیگر مربوط به بررسی اعمال شرایط کم‌آبیاری بخشی ریشه Sepaskhah و Ahmadi (2010) عنوان شده است که اگرچه کاهش مقدار آب آبیاری در روش PRD می‌تواند عملکرد محصول را تا حدی کاهش دهد تا اختلاف معنی‌داری با آبیاری کامل ایجاد نشود اما در بسیاری از تحقیقات حد بهینه‌ای از مقدار کاهش آب آبیاری به گیاه ارائه شده است چنانچه کم‌آبیاری از یک حد مشخصی کمتر باشد، حتی در آبیاری PRD نیز گیاه با کاهش شدید محصول مواجه خواهد بود (Ahmadi et al., 2010)؛ (Shahnazari et al, 2008). میزان بهینه کاهش آب مصرفی برای گیاهان مختلف در روش PRD با توجه به حساسیت گیاهان نسبت به تنش آبی متفاوت است (Sepaskhah and Ahmadi, 2010).

بر این اساس، مقدار بهینه‌ی کاهش آب مصرفی برای دستیابی به محصول نزدیک به میزان محصول در آبیاری کامل، برای گیاه سیب‌زمینی و آفتاب‌گردان، ۲۵ درصد (Zegbe et al 2006)؛ Ghadami Firouzabadi et al. (2015)، برای درخت زیتون و گیاه پنبه، ۳۰ درصد (Wahbi et al 2005)؛ Tang et al (2005) عنوان شد. با توجه به این امر که هدف واسنجی مدل برای شرایط PRD بود، نتایج نشان داد که مدل Daisy توانست کاهش محصول به‌زای کاهش مقدار آب را در هر دو شرایط PRD75 و PRD55 به‌خوبی شبیه‌سازی نماید، به‌طوری که کاهش بیشتر میزان محصول

جدول ۵- نتایج بررسی آماری براساس آزمون t-test جفت شده (۶ جفت داده در هر تیمار) در اعتبارسنجی.

Table 5- Results of the statistical analysis based on the paired samples t-test (6 pairs of data per treatment) in validation.

Treatment	Leaf Area Index (LAI)	Height (H)	Dry Matter (DM)
PRD75-20	0.629 n.s	0.969 n.s	0.785 n.s
PRD75-35	0.372 n.s	0.249 n.s	0.784 n.s
PRD75-20	0.789 n.s	0.340 n.s	0.113 n.s
PRD55-20	0.911 n.s	0.880 n.s	0.411 n.s
PRD55-35	0.614 n.s	0.986 n.s	0.507 n.s
PRD55-20	0.717 n.s	0.134 n.s	0.260 n.s

* and **: Significant at 1% and 5% probability level respectively and n.s.: not significant.

عامل دور آبیاری و میزان تنش آبی در شبیه‌سازی با مدل Daisy تأثیرگذار هستند. با افزایش تنش آبی، میزان عملکرد محصول کاهش می‌یابد که مدل توانست میزان کاهش عملکرد را در سطوح مختلف آبیاری با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی نماید. پیشنهاد می‌شود که دو پارامتر واسنجی شده در زیرمدل PRD برای گیاه آفتاب‌گردان، طی شرایط آب و هوایی مختلف و ارقام گوناگون آفتاب‌گردان ارزیابی شود. همچنین می‌توان از روش مذکور برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان دیگر در اجرا با مدل Daisy، تحت آبیاری PRD استفاده شود.

تقدیر و تشکر

از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری (SANRU)، جهت پرداخت کمک هزینه‌ای در قالب طرح دانشجویی به‌عنوان هزینه مطالعات، یادگیری مدل، انجام آزمایشات مربوط به خاک، سیاست‌گذاری می‌شود. با توجه به اینکه از نتایج مزرعه‌ای در پایان‌نامه دانشجویان فارغ‌التحصیل مقطع دکتری در دانشگاه SANRU در انجام این پژوهش استفاده شد، از آقایان مجتبی چراغی‌زاده و علی قدمی فیروزآبادی که اجازه دسترسی به داده‌های اولیه پایان‌نامه خود را دادند، قدردانی می‌گردد.

ابتدا، پارامتر m ، که یک مقدار تجربی گیاهی است و پارامتر LeafAIMod برای حالت آبیاری بخشی ریشه با سعی و خطای دستی برای گیاه آفتاب‌گردان در حالت آبیاری PRD واسنجی شدند. مقدار نهایی پارامتر m برای گیاه آفتاب‌گردان در زیر مدل PRD برابر با ۱۲ بدست آمد و تابع LeafAIMod در مدل به‌صورت رابطه (۲) اصلاح شد.

اعتبارسنجی براساس اطلاعات شش تیمار PRD در دو سطح تنش آبی ۷۵ درصد (PRD75) و ۵۵ درصد (PRD55) با دوره‌های آبیاری مختلف براساس تبخیر ۲۰، ۳۵ و ۵۰ میلی‌متر از تشت تبخیر کلاس A صورت گرفت. نتایج t-test جفت شده نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاه (LAI، H و DM) وجود ندارد. پراکندگی مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده نسبت به خط یک به یک نشان داد که در تیمارهای PRD75 تراکم نقاط نسبت به خط یک به یک بیشتر از تیمارهای آبیاری PRD55 است. شاخص‌های آماری و نمودارها نشان دادند که مدل Daisy، شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاه را در PRD تحت تنش آبی کمتر، بهتر برآورد نموده است اما در دوره‌های آبیاری بیشتر و سطح تنش آبی بیشتر در پارامترهای H و DM در اواخر دوره رشد بیش‌برآوردی مشاهده است که نشان می‌دهد که دو

References

- 1- Abrahamsen, p. 2014. *Daisy Program Reference Manual*. University of Copenhagen, Department of Basic Sciences and Environment, Environmental Chemistry and Physics.
- 2- Ahmadi, S.H., Andersen, M.N., Plauborg, F., Poulsen, R.T., Jensen, C.R., Sepaskhah, A.R., Hansen, S. 2010. Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Yield and water productivity. *Agricultural Water Management*. 97(11). pp. 1923-1930.
- 3- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D and Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. Food and Agricultural Organization, Rome.
- 4- Boogaard, H.L., C.A. van Diepen, R.P. Rötter, J.M.C.A. Cabrera, and H.H. van Laar. 1998. *User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5*. Tech. Doc. 52. DLOWinand Staring Centre, Wageningen, the Netherlands.
- 5- Brisson, N., C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, D. Zimmer, J. Sierra, P. Bertuzzi, P. Burger, F. Bussiere, Y.M. Cabidoche, P. Cellier, P. Debaeke, J.P. Gaudillere, C. Henault, F. Maraux, B. Seguin, and H. Sinoquet. 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*. 18. pp. 309-332.
- 6- Cheraghizadeh, M. 2018. *Evaluation of the effect of irrigation interval by conducting partial rootzone drying (PRD) deficit irrigation and full irrigation (FI) on sunflower plant (Hysun25) and its simulation by using HYDRUS-2D model*. Ph.D. dissertation, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari. (In Persian).
- 7- Cheraghizadeh, M., Shahnazari, A. and Ziatabar Ahmadi, M. 2018. Evaluation of the effect of irrigation interval by conducting partial rootzone drying (PRD) deficit irrigation and full irrigation (FI) on sunflower plant. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(2). pp. 439-451. (In Persian)

- 8- Davies, W.J. and Hartung, W. 2004. Has extrapolation from biochemistry to crop functioning worked to sustain plant production under water scarcity? In *New Directions for a Diverse Planet. Proceeding of the Fourth International Crop Science Congress*. September 26–October 1, Brisbane, Australia.
- 9- English, M.J., Musick, J.T. and Murty, V.V.N. 1990. Deficit irrigation. In *Management of farm irrigation systems. ASAE Monograph no. 9*. American Society of Agricultural Engineers publisher.
- 10-Ghadami Firouzabadi, A. 2015. *The water use management and soil changes by full irrigation and partial rootzone drying (PRD) in sunflower*. Ph.D. dissertation, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari. (In Persian).
- 11-Ghadami Firouzabadi, A., Shahnazari, A., Raeini, M. and Zareabyaneh, H. 2015. Effect of the deficit irrigation and partial root-zone irrigation on Yield, chlorophyll fluorescence and the growing parameters of sunflower. *Journal of Water Research in Agriculture*. 29(2). pp. 167-157. (In Persian).
- 12-Hansen, S., Jensen, H.E., Nielsen, N.E. and Svendsen, H. 1990. *DAISY: Soil Plant Atmosphere System Model. NPO Report No. A 10*. The National Agency for Environmental Protection, Copenhagen. (<http://daisy.ku.dk/publications/A10.pdf>).
- 13-Hansen S., Jensen H.E., Nielsen N.E. and Svendsen H. 1991. Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model Daisy. *Fertilizer Research*. 27. pp. 245-259.
- 14-Hansen, S. 2002. *Daisy, a flexible Soil-Plant-Atmosphere system Model*. The Royal Veterinary and agricultural University, Department of Agriculture Science, Laboratory for Agrohyrology and Bioclimatology.
- 15-Hashemi, S.F., Shahnazari, A., Raeini, M., Ghadami Firouzabadi, A. and Amiri, A. 2018. Evaluation of plant input coefficient of WOFOST in partial root-zone drying condition for sunflower. *Journal of Water and Soil*. 32(4). pp. 647-660. (In Persian).
- 16-Honari, M., Asharafzadeh, A., Khaledian, M., Vazifedoust, M. and Mailhol J. C. 2017. Comparison of HYDRUS-3D soil moisture simulations of Subsurface drip irrigation with experimental Observations in the south of France. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(7). pp. 04017014-1:8.
- 17-Huber, K., Vanderborcht, J., Javaux, M. and Vereeken, H. 2015. Simulating transpiration and leaf water relations in response to heterogeneous soil moisture and different stomatal control mechanisms. *Plant Soil*. 394 (1-2). pp. 109-1126.
- 18-Jones, C.A., Dyke, P.T., Williams, J.R., Kiniry, J.R., Benson, C.A. and Griggs, R.H. 1991. EPIC: An operational model for evaluation of agricultural sustainability. *Agricultural Systems*. 37. pp. 341–350.
- 19-Jones, H.G. 1992. *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*. (2nd edition). Cambridge. Cambridge university press.
- 20-Jovanovic, Z. and Stikic, R. 2018. Partial root-zone drying technique: from water saving to the improvement of a fruit quality. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 1 (3). doi: 10.3389/fsufs.2017.00003.
- 21-Karandish, F. and Simunek, J. 2018. An application of the water footprint assessment to optimize production of crops irrigated with saline water: A scenario assessment with HYDRUS. *Agriculture Water Management*. 208. pp. 67-82.
- 22-Karandish, F., Mirlatifi, M., Shanazari, A., Abbasi, F. and Gheisari, M. 2013. Effect of partial root-zone drying and deficit irrigation on yield and yield components of Miaze. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 44 (1). pp. 33-44 (In Persian).

- 23-Kirda, C., Cetin, M., Dasgan, Y., Topcu, S., Kaman, H., Ekici, B., Derici, M.R. and Ozguven, A.I. 2004. Yield response of greenhouse grown tomato to partial root drying and conventional deficit irrigation. *Agricultural Water Management*. 69. pp. 191–201.
- 24-Khaleghi, M., Hasanpour, F., Shahnazari, A. and Karandish, F. 2016. Influence of partial root-zone drying management with a combination of sea water on water productivity and sunflower yield. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 47(3). pp. 613-623. (In Persian).
- 25-Lascano R.J. and Sojka R.E. 2007. Irrigation of agricultural crops. Preface. In *Agronomy Monograph no. 30 (2nd edition)*. ASA-CSSA-SSSA publishing, Madison, WI, pp. ix.
- 26-Lee, H., Park, J. and Kim, J. 2019. Incremental capacity curve peak points-based regression analysis for the state-of-health prediction of a retired LiNiCoAlO₂ series/Parallel configured battery pack. *Electronics*. 8. pp. 1118. (doi:10.3390/electronics8101118).
- 27-Liu, F., Shahnazari, A., Andersen, M.N., Jacobsen, S.-E. and Jensen, C.R. 2006. Physiological responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) to partial root-zone drying: ABA signalling, leaf gas exchange, and water use efficiency. *Journal of Experimental Botany*. 57. pp. 3727–3735.
- 28-Liu, F., Song, R., Zhang, X., Shahnazari, A., Andersen, M.N., Plauborg, F., Jacobsen, S.-E. and Jensen, C.R. 2008. Measurement and modeling of ABA signaling in potato (*Solanum tuberosum* L.) during partial root-zone drying. *Environmental and Experimental Botany*. 63. pp. 385–391.
- 29-Makkink, G.F. 1957. Ekzameno de la formula de Penman. *Netherlands Journal of Agricultural Science*.5. pp. 290-305.
- 30-Manevski, K., Børgesen, C.D., Xiaoxin, L., Andersen, M.N., Abrahamsen, P., Chunsheng, H. and Hansen, S. 2016. Integrated modelling of crop production and nitrate leaching with the Daisy model. *MethodsX*. 3. pp. 350-363.
- 31-Miner, G.I., and Bauerle, W. 2017. Seasonal variability of the parameters of the Ball-Berry model of stomatal conductance in maize (*Zra mays* L.) and sunflower (*Helianthus annuus* L.) under well-watered and water stressed conditions. *Plant, Cell and Environment*. 40(9). pp.1874-1886.
- 32-Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10. pp. 282–290.
- 33-Plauborg, F., Abrahamsen, P., Gjettermann, B., Mollerup, M., Iversen, B.V., Liu, F., Andersen, M.N. and Hansen, S. 2010. Modeling of root ABA synthesis, stomatal conductance, transpiration and potato production under water saving irrigation regimes. *Agricultural Water Management*. 98. pp. 425-439.
- 34-Richards, L.A. 1931. Capillary conductivity of liquids in porous mediums. *Physics*. 1. pp. 318-333.
- 35-Sepaskhah, A.R. and Akbari, D. 2005. Deficit irrigation planning under variable seasonal rainfall. *Biosystems Engineering*. 92(1). pp. 97-106.
- 36-Sepaskhah, A.R. and Ahmadi, S.H. 2010. A review on partial root-zone drying irrigation. *International Journal of Plant Production*. 4(4). pp. 241-258.
- 37-Sepaskhah, A.R., Tavakoli, A.R. and Mosavi, F. 2006. *Principle and application of deficit irrigation*. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage. Issue No: 100.
- 38-Shahnazari, A., Jensen, C.R., Liu, F., Jacobsen, S.-E. and Andersen, M.N. 2005. Partial root zone drying for water saving. Organized by Kasetsart University and Swiss federal institute of technology (eds). In *Ikke angivet*. Kasetsart University. pp. 75-80.

- 39-Shahnazari, A., Liu, F., Andersen, M.N., Jacobsen, S.-E. and Jensen, C.R. 2007. Effects of partial root-zone drying on yield, tuber size and water use efficiency in potato under field conditions. *Field Crops Research*. 100. pp. 117-124.
- 40-Shahnazari, A., Ahmadi, S.H., Lærke, P.E., Liu, F., Plauborg, F., Jacobsen, S.E., Jensen, C.R. and Andersen, M.N. 2008. Nitrogen dynamics in the soil-plant system under deficit and partial root-zone drying irrigation strategies in potatoes. *European Journal of Agronomy*. 28. pp. 65-73.
- 41-Smith, M., Allen, R., Monteith, J.L., Pereira, L.A. and Segeren, A. 1990. *Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements*. Annex V. FAO Penman-Monteith Formula.
- 42-Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop—The FAO crop model for predicting yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronom Journal*. 101. pp. 426–437.
- 43-Tang, L.S., Li, Y. and Zhang, J. 2005. Physiological and yield responses of cotton under partial root-zone irrigation. *Field Crops Research*. 94. pp. 214-223.
- 44-Van Diepen, C.A., Wolf, J., Van Keulen, H., and C. Rappoldt. 1989. WOFOST: A simulation model of crop production. *Soil Use and Management*. 5. pp. 16–24.
- 45-Wahbi, S., Wakrim, R., Aganchich, B., Tahi, H. and Serraj, R. 2005. Effects of partial root-zone drying (PRD) on adult olive tree (*Olea europaea*) in field conditions under arid climate I. Physiological and agronomic responses. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 106, 289-301.
- 46-Yousefian, M., Shahnazari, A., Ziatabar Ahmadi, M., Raeini, M. and Arabzadeh, B. 2018. Effect of regulated deficit irrigation and partial root-zone irrigation on Yield, yield components and water efficiency of rice in furrow and basin irrigation methods. *Journal of Water Research in Agriculture*, 32(3), 341-483. (In Persian).
- 47-Zegbe, J.A., Behboudian, M.H. and Clothier, B.E., 2006. Responses of 'Petopride' processing tomato to partial rootzone drying at different phenological stages. *Irrigation Science*, 24, 203-210.