Research Paper

# Evaluation of the Efficiency and Sensitivity Analysis of the Aquacrop Model in Simulating the Yield and Water Productivity of Bell Pepper under Salinity Stress and Deficit Irrigation

Sadegh Askari Dehno [1], Halimeh Piri [2*], Farzad Hassanpour[3]

[1] Phd student, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran
[2] Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran
[3] Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

10.22125/iwe.2025.505403.1861

Received:
**January 9, 2025**
Accepted:
**April 20, 2025**
Available online:
**April 25, 2025**

**Keywords:**
**Normalized water productivity, Maximum plant transpiration coefficient, Crop cover coefficient, Crop modeling**

## Abstract

The present study aimed to analyze the sensitivity of Aquacrop model in Sistar and Baluchestan province.In this study, bell pepper plants were cultivated unde drip irrigation in a split plot design with three replications. The treatments studie included the amount of irrigation water (I1: 60, I2: 80 and I3: 100% of the soil' agricultural capacity) and 3 levels of irrigation water salinity (S1, S2, S3 respectively equivalent to 1, 3 and 5 dS/m). Subsequently, the sensitivity of thi plant model to changes in plant growth parameters including normalized wate productivity (WP*), maximum plant transpiration coefficient (KCTrx), initia vegetation cover (CC0), vegetation growth coefficient (CGC), vegetatio reduction coefficient (CDC) and harvest index (HI) was evaluated using the Beve (1979) method. The results showed that the Aquacrop model had the highes sensitivity to changes in the vegetation reduction coefficient, vegetation growt coefficient, and normalized water productivity. It also had the lowest sensitivity t the harvest index parameter. The average sensitivity coefficient was obtained fo normalized water productivity (0.38), maximum plant transpiration coefficien (0.29), initial vegetation (0.31), vegetation growth coefficient (0.43), vegetatio reduction coefficient (-0.6), and harvest index (0.12). Changes in bell pepper yiel were inverse to the values of the vegetation reduction coefficient and direct to th values of other plant parameters. The results of model calibration and validatio indicated the appropriate accuracy and efficiency of the model in simulating th yield and water use efficiency of bell pepper under salinity stress and water defici conditions.

* **Corresponding Author:** Halimeh Piri
**Address:** Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran
**Email:** h_piri2880@uoz.ac.ir
**Tel:** 05431251266

# 1. Introduction

Today, plant models are considered a suitable tool for simulating agricultural parameters. Given the existence of environmental stresses in each region, plant models must be evaluated and validated. Sensitivity analysis is considered an essential step before evaluating the Aquacrop model, which has a great effect on improving the speed and accuracy of the calibration and validation stages. Therefore, finding sensitive and insensitive parameters at this stage is of great importance for crop plants.

# 2. Materials and Methods

The present study aimed to analyze the sensitivity of this plant model in a research farm located in Zahak city, in the north of Sistan and Baluchestan province in the 1402-1403 crop years. In this study, bell pepper plants were cultivated under drip irrigation in a split plot design with three replications. The treatments studied included the amount of irrigation water (I1: 60, I2: 80 and I3: 100% of the soil's agricultural capacity) and 3 levels of irrigation water salinity (S1, S2, S3, respectively equivalent to 1, 3 and 5 dS/m).

The irrigation system used consisted of drip irrigation pipes with dripper spacing of 20 cm on the pipe and an outlet flow rate of 2 liters per hour at a pressure of 100 kPa. The irrigation interval was every other day with the aim of providing soil moisture deficiency up to a depth of 60 cm in the full irrigation treatment and reaching the soil's agricultural capacity. The volume of irrigation water before each irrigation was determined using Equation 1 (Tourajzadeh et al., 2024).

$$\mathbf{d = \sum_{i=1}^{n} (\theta_{Fci} - \theta_i)\, \Delta z} \quad (1)$$

In this equation: d is the irrigation depth (meters), θFci and θi are the volumetric soil moisture at field capacity and before irrigation in layer i=1, Δz is the layer thickness (meters), and n is the soil layer number.The Aquacrop model uses evapotranspiration to determine crop yield as follows (Steduto et al., 2009):

$$B = WP^{*} \sum_{i=1}^{n} \frac{Tr_i}{ETo_i} \quad (2)$$

In this equation, B is the cumulative biomass yield (g/m2), WP* is the normalized water productivity (g/m2), Tri is the daily plant transpiration (mm/day), and ETOi is the reference evapotranspiration (mm/day), n is the number of days after planting, and i is the number of days.

For the sensitivity analysis, equation (3) was used (Beven, 1979).

$$S_{pi} = \lim_{\Delta Pi \to 0} \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\Delta P_i}{P_i}} = \frac{\partial y}{\partial P_i} \times \frac{P_i}{y} \quad (3)$$

In this equation, Spi is the sensitivity coefficient, Pi is the parameter under investigation, and y is the biomass value.

Subsequently, the sensitivity of this plant model to changes in plant growth parameters including normalized water productivity (WP*), maximum plant transpiration coefficient (KCTrx), initial crop cover (CC0), crop growth coefficient (CGC), crop reduction coefficient (CDC) and harvest index (HI) was evaluated using the Beven (1979) method. The Geerts classification table was used for classification (Geerts et al., 2009).

## Results

The results showed that the Aquacrop model had the highest sensitivity to changes in the vegetation reduction coefficient, vegetation growth coefficient, and normalized water productivity. It also had the lowest sensitivity to the harvest index parameter. The average sensitivity coefficient was obtained for

normalized water productivity (0.38), maximum plant transpiration coefficient (0.29), initial vegetation (0.31), vegetation growth coefficient (0.43), vegetation reduction coefficient (-0.6), and harvest index (0.12). Changes in bell pepper yield were inverse to the values of the vegetation reduction coefficient and direct to the values of other plant parameters. The results of model calibration and validation indicated the appropriate accuracy and efficiency of the model in simulating the yield and water use efficiency of bell pepper under salinity stress and water deficit conditions. Researchers have stated that the sensitivity of the Aquacrop model to changes in plant growth parameters can also depend on the type of plant (Karimi Avargani et al., 2019). Abedi et al. (2019) used the Aquacrop model to investigate the yield and water productivity of wheat under different evaluation conditions and concluded that the model was able to simulate the yield and water productivity of wheat well with a coefficient of determination of 0.99.

## 3. Discussion and Conclusion

Increasing salinity and water stress increased the sensitivity of the Aquacrop model simulation results. If the model is properly calibrated and evaluated, it can be used as a suitable tool for managing bell pepper irrigation under salinity and water deficit conditions in a region in a way that maximizes yield.

## 4. Six important references

1) Abedi, M., Eghderanjad, A., and Ebrahimipak, N.A. 2019. Evaluation of AquaCrop model in simulating grain yield and wheat water consumption efficiency under different irrigation conditions in the field. Iran Scientific Journal of Agriculture and Plant Breeding, 15(1):1-14.

2) Beven, K. 1979. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. Journal of Hydrology, 44(3-4), 169-190.

3) Geerts S., Raes D., Garcia M., Miranda R and Cusicanqui J A 2009. Simulating yield response to water of quinoa (Chenopodium quinoaWilld.) with FAO-AquaCrop. Agronomy. 101: 499-508.

4) Karimi Avargani H., Rahimikhoob A. and Nazari Fard M. 2019. Sensitivity Analysis of Aquacrop Model for Barley in Pakdasht Region. Journal of Water and Soil Science. 2019; 23 (3) :53-63. (In Persian)

5) Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop: The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agronomy Journal, 101(3): 426-437.

6) Tourajzadeh, O., Piri, H., Barati, M. 2024. Sensitivity analysis and evaluation of AquaCrop model in simulating water productivity and quinoa yield under different irrigation water amount and salinity management and Biochar and NanoBiochar application. Journal of Water and Soil Conservation, 31 (1), 1-25.

### Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

### Acknowledgments

This research was carried out with the cooperation and financial support of the university of zabol (IR-UOZ-GR-1837). We hereby express our gratitude and appreciation for the support and cooperation of these dignitaries.

# ارزیابی کارایی و تحلیل حساسیت مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب فلفل دلمه تحت تنش شوری و کم‌آبیاری

صادق عسکری دهنو[۱]، حلیمه پیری[2*]، فرزاد حسن‌پور[3]

تاریخ ارسال:۱۴۰۳/۱۰/۲۰
تاریخ پذیرش:۱۴۰۴/۰۱/۳۱

مقاله پژوهشی

## چکیده

پژوهش حاضر با هدف تحلیل حساسیت مدل گیاهی اکواکراپ در استان سیستان و بلوچستان انجام شد. در این پژوهش، فلفل دلمه تحت آبیاری قطره‌ای به‌صورت طرح کرت‌های خرد شده و با سه تکرار کشت گردید. تیمارهای پژوهش شامل مقدار آب آبیاری (I1: ۶۰، I2: ۸۰ و I3: ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک) و ۳ سطح شوری آب آبیاری ( S1، S2، S3 معادل ۱، ۳ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر) بود. میزان حساسیت این مدل گیاهی نسبت به تغییرات پارامترهای رشد گیاهی شامل بهره‌وری آب نرمال شده (*WP)، حداکثر ضریب تعرق گیاهی (KCTrx)، پوشش گیاهی اولیه (CC0)، ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)، ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC) و شاخص برداشت (HI) به روش Beven (1979) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل اکواکراپ بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات پارامتر ضریب کاهش پوشش گیاهی، ضریب رشد پوشش گیاهی و بهره‌وری آب نرمال شده داشت. کمترین حساسیت را نیز نسبت به پارامتر شاخص برداشت داشت. متوسط ضریب حساسیت برای بهره‌وری آب نرمال شده (۰/۳۸)، حداکثر ضریب تعرق گیاهی (۰/۲۹)، پوشش گیاهی اولیه (۰/۳۱)، ضریب رشد پوشش گیاهی (۰/۴۳)، ضریب کاهش پوشش گیاهی (۰/۶-) و شاخص برداشت (۰/۱۲) به‌دست آمد. تغییرات عملکرد نسبت به مقادیر ضریب کاهش پوشش گیاهی معکوس و نسبت به مقادیر سایر پارامترهای گیاهی مستقیم بود. نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل بیانگر دقت و کارایی مناسب مدل در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب فلفل دلمه در شرایط تنش شوری و کم‌آبی بود. افزایش تنش شوری و آبی سبب افزایش حساسیت نتایج شبیه‌سازی مدل اکواکراپ شد.

**واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب نرمال شده، حداکثر ضریب تعرق گیاهی، ضریب پوشش گیاهی، مدل‌سازی گیاهی.**

[۱] . دانشجوی دکترا، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. E-mail: askari_sami@yahoo.com

[2] . دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. (* نویسنده مسئول) E-mail:h_piri2880@uoz.ac.ir

[3] . دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.Email: hassanpourir@gmail.com

## مقدمه

استفاده از مدل‌های گیاهی یکی از روش‌هایی است که به پژوهشگران کمک می‌کند تا بدون انجام آزمایش‌های متعدد که نیازمند صرف وقت و هزینه بسیار است، بتوانند درک درستی از واکنش گیاهان به مدیریت‌های مختلف کشاورزی داشته باشند (Ahmade et al., 2021). کاربرد مدل‌های گیاهی برای شبیه‌سازی واکنش گیاهان به کم‌آبی سابقهٔ نسبتاً طولانی دارد.

مدل گیاهی اکواکراپ که از سال ۲۰۰۹ توسط سازمان خوار و بار کشاورزی بسط داده شد، یکی از مدل‌های گیاهی پرکاربرد است که به دلیل سادگی، نیاز به داده‌های کمتر، کاربردی بودن و دقت قابل قبول نسبت به سایر مدل‌های رشد گیاهی برتری دارد (اگدرنژاد و همکاران، ۲۰۱۳). این مدل به دلیل نزدیکی نتایج شبیه‌سازی با شرایط واقعی به صورت گسترده توسط محققان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ebrahimipak et al., 2019). این مدل گیاهی در ابتدا قادر به شبیه‌سازی واکنش گیاهان به مقدار آب مصرفی بود، ولی در نسخه‌های بعدی قابلیت‌های دیگری از جمله شبیه‌سازی شرایط تنش شوری نیز به آن اضافه شد (Ebrahimipak et al., 2019).

مدل‌های گیاهی شامل پارامترهایی هستند که تحت تأثیر عوامل متعدد محیطی و مدیریتی قرار دارند. این عوامل باعث عدم قطعیت در خروجی مدل‌ها می‌شود (Guo et al., 2019). در این راستا به منظور تحلیل عدم قطعیت مدل‌های شبیه‌سازی، اثر عوامل و فاکتورهای غیرقطعی بر خروجی مدل با تعیین ضریب حساسیت بررسی می‌شود (Vanuytrecht et al., 2014). نتایج حاصل از تحلیل حساسیت به کاربر این امکان را می‌دهد تا کم اهمیت‌ترین و مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار در فرآیند شبیه‌سازی رشد گیاه را بشناسد و طی مرحله واسنجی به آن‌ها توجه بیشتری نماید (Guo et al., 2019).

پارامترهای ورودی مدل اکواکراپ به دو دسته‌ی ثابت و غیرثابت تقسیم می‌شوند. پارامترهای ثابت وابسته به نوع گیاه است و عواملی مانند زمان، مکان و شرایط مدیریتی بر مقدار آنها اثر می‌گذارد (Raes et al., 2009). پارامترهای ثابت همان پارامترهای حساس در مدل اکواکراپ هستند که نیاز به واسنجی دارند. در شرایط مختلف محیطی و مدیریتی میزان حساسیت هر یک از این پارامترها و اثری که تغییرات هریک بر خروجی مدل می‌گذارد، متفاوت است. توسعه‌دهندگان مدل اکواکراپ پیشنهاد کرده‌اند که مقادیر پارامترهای ثابت برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان تغییر نکند اما پارمترهای غیرثابت بر اساس شرایط مزرعه و آزمایش در هر شبیه‌سازی باید تغییر کند. در سال‌های گذشته، محققان برای ارزیابی مدل اکواکراپ، فقط پارامترهای غیرثابت را تغییر می‌دادند. اما، تحقیقات اخیر نشان داده است که نقش پارامترهای ثابت در مرحله‌ی واسنجی می‌تواند مؤثرتر از پارامترهای غیرثابت باشد و به‌شدت به‌دقت این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان کمک کند (Rahimi Khob et al., 2019).

به منظور تعیین اثر پارامترهای ورودی مدل اکواکراپ، محققان یک مرحله پیش از ارزیابی مدل در نظر گرفتند تا در این مرحله، پارامترهای رشد گیاهان مورد تحلیل حساسیت قرار گیرد (Nasrolahi et al., 2024). تحلیل حساسیت به کاربران کمک می‌کند تا میزان اثرگذاری پارامترهای ورودی بر نتایج مدل گیاهی AquaCrop را بررسی کنند (Rahimi Khob et al., 2019). بر اساس نتایج این مرحله، ارزیابی مدل اکواکراپ با سهولت و سرعت بیشتری انجام می‌شود و نتایج شبیه‌سازی با دقت بیشتری تعیین گردد.

بررسی منابع نشان می‌دهد که تحلیل حساسیت پارامترهای ضریب پوشش گیاهی اولیه ($CC_0$)، بهره‌وری آب نرمال شده ($WP^*$) و ضریب حداکثر پوشش گیاهی ($CC_X$)، حداکثر ضریب تعرق گیاهی ($K_{CTrx}$)، ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)، ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC) و شاخص برداشت (HI) نسبت به سایر پارامترها بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفته است. به عنوان نمونه بنی‌فری و همکاران (۱۴۰۳) به تحلیل حساسیت پارامترهای رشد گیاه پنبه در مدل اکواکراپ تحت مدیریت‌های مختلف زراعی و کیفیت‌های مختلف آب آبیاری (آب رودخانه کارون و تلفیق با زهاب) نسبت به تغییر این پارامترها پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد بیشترین حساسیت مدل به دو پارامتر شاخص برداشت و بهره‌وری آب نرمال شده و کمترین حساسیت آن به ضریب

زوال پوشش گیاهی و ضریب پوشش گیاهی اولیه بود. بنابراین توجه به دو پارامتر شاخص برداشت و بهره‌وری آب نرمال شده می‌تواند سبب دقت نتایج در مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی شود. ادبی و همکاران (۱۳۹۸) به تحلیل حساسیت این مدل گیاهی برای دو گیاه گندم و ذرت در دو منطقه دشت قزوین و پارس‌آباد مغان پرداختند. نتایج این محققان نشان داد که ضریب رشد پو شش گیاهی بیشترین حساسیت را در نتایج شبیه‌سازی این مدل ایجاد کرد. همچنین این محققان گزارش کردند که تغییرات برخی پارامترهای ورودی اثری بر نتایج شبیه‌سازی نداشت و به همین دلیل پیشنهاد کردند که در مرحله ارزیابی مدل مورد توجه قرار نگیرند. بوعذار و همکاران (۱۴۰۱) به تحلیل حساسیت پارامترهای رشد سیب‌زمینی در مدل اکواکراپ تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری در شهر کرد پرداختند. نتیجه مطالعه آن‌ها نشان داد مدل نسبت به تغییر پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده بیشترین حساسیت و به دو پارامتر ضریب پوشش گیاهی اولیه و ضریب زوال پوشش گیاهی کمترین حساسیت را داشت. توراج‌زاده و همکاران (۲۰۲۴) به تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل اکواکراپ در شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب و عملکرد کینوا تحت مدیریت‌های مختلف مقدار و شوری آب آبیاری و کاربرد بیوچار و نانوبیوچار در منطقه سیستان پرداختند. نتایج تحلیل حساسیت بیانگر حساسیت متوسط مدل به پارامترهای رطوبت در ظرفیت زراعی، ضریب گیاهی برای تعرق، عمق مؤثر ریشه، حد بالا و پایین ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه، بیشینه رشد سایه‌انداز و ضریب رشد پوشش و حساسیت کم مدل به پارامترهای رطوبت در نقطه پژمردگی و رطوبت در حالت اشباع، ضریب کاهش پوشش و بهره‌وری آب نرمال شده بود. در تحقیقی با بررسی تحلیل حساسیت مدل اکواکراپ نسبت به پارامترهای رشد گیاه ذرت مشخص گردید که این مدل به پارامترهای شاخص برداشت و بهره‌وری آب نرمال شده بیشترین حساسیت و نسبت به پارامتر ضریب زوال پوشش گیاهی کمترین حساسیت را داشت (Pajohideh et al., 2023). گلابی و ناصری (۱۳۹۴) با استفاده از مدل اکواکراپ به پیش‌بینی عملکرد نیشکر و شوری خاک پرداختند. ایشان بیان داشتند مدل توانایی مناسبی در شبیه‌سازی میزان عملکرد تحت تنش شوری دارد. همچنین، مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل بیش از مقدار واقعی برآورد شده است.

فلفل دلمه‌ای با نام علمی *Capsicum annuum L.* گیاهی علفی و یکساله متعلق به خانواده Solanacae و یکی از سبزی‌های مهم میوه‌ای در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری جهان است، میوه فلفل به‌دلیل داشتن ترکیبات آنتی‌اکسیدانی شامل فنول‌ها، ویتامین ث و کارتنوییدها دارای ارزش بالایی بوده و برای تنظیم فشارخون، افزایش اشتها و هضم غذا استفاده می‌شود (فاتح و همکاران، ۱۳۹۸). در منطقه سیستان اراضی زیادی وجود دارد که قابل زرع می باشد اما به خاطر کمبود منابع آب به صورت بایر رها شده اند. بعضی از کشاورزان منطقه جهت آبیاری اراضی کشاورزی از چاهک های سطحی که در مزارع آن‌ها حفر شده است، استفاده می‌کنند. آب این چاهک ها معمولاً از نظر کیفی پایین و شور می‌باشد. استفاده از این آب‌ها باعث کاهش عملکرد گیاهان و درنهایت شوری خاک می‌شود. با توجه به این‌که مدل اکواکراپ می‌تواند در مطالعات مربوط به مدیریت مزرعه، مانند مدیریت آبیاری و کم آبیاری (در راستای افزایش عملکرد و ارتقاء بهره‌وری مصرف آب) و ارزیابی تأثیر تنش‌های محیطی غیرزنده مانند خشکی، ملندابی، گرما، سرما، شوری بر رشد و عملکرد گیاهان زارعی و همچنین طراحی الگوی کشت مورد استفاده قرار گیرد (Katerji et al., 2013)، لذا در تحقیق حاضر به‌منظور مدیریت بهتر استفاده از آب شور و کاهش مقدار آب آبیاری، از مدل اکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب برای گیاه فلفل دلمه در منطقه سیستان استفاده شد. همچنین با توجه به منابع مورد بررسی، مشخص شد تاکنون گزارشی در خصوص تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی به مدل برای شبیه‌سازی عمکلرد و بهره‌وری مصرف آب برای گیاه فلفل دلمه انجام نشده است. بنابراین در بخشی از تحقیق به این مهم نیز پرداخته شد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

تحقیق حاضر در دو فصل زراعی بهمن ماه ۱۴۰۳ و ۱۴۰۲، در قالب طرح کرت‌های خرد شده به صورت بلوک کامل تصادفی و در سه تکرار، در یک مزرعه تحقیقاتی به مساحت ۱۵۰۰ متر مربع واقع در شهرستان زهک انجام شد. شهرستان زهک در منطقه سیستان در استان سیستان و بلوچستان در ۶۱ درجه و ۶۷ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۸۹ دقیقه عرض شمالی و ارتفاع ۴۸۰ متر از سطح دریا می‌باشد. منطقه مطالعاتی دارای اقلیم گرم و خشک بوده، میزان بارندگی آن در سال کمتر از ۶۰ میلی متر است.

تیمارها شامل سه تیمار آب آبیاری ( (I3)۱۰۰، (I2) ۸۰ و ۶۰ (I1) درصد ظرفیت زراعی خاک) و سه سطح شوری آب آبیاری (S1، S2 و S3 به ترتیب معادل ۱، ۳ و ۵ دسی زیمنس بر متر) بود. برای انجام کار ابتدا نمونه های خاک از اعماق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی متری خاک مزرعه مورد مطالعه تهیه شد. سپس، با انتقال نمونه ها به آزمایشگاه و هواخشک نمودن آن ها، بافت خاک و درصد اجزای تشکیل دهنده‌ی آن و دیگر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک در هریک از نمونه‌ها تعیین شد. همچنین از آب مورد استفاده نیز جهت تعیین کیفیت آن نمونه‌برداری شد. نتایج تجزیه آب و خاک مورد استفاده در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.

**جدول (۱): برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده**

| عمق نمونه-گیری(cm) | بافت خاک | سیلت (%) | شن (%) | رس (%) | pH | EC ($dsm^{-1}$) | پتاسیم قابل جذب (ppm) | کربن آلی (ppm) | فسفر قابل جذب(ppm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۰-۳۰ | Loam sand | ۴۲ | ۴۹ | ۹ | ۷/۶ | ۲/۱ | ۲۸۰ | ۰/۷۲ | ۴/۶ |
| ۳۰-۶۰ | Loam sand | ۴۰ | ۴۸ | ۱۲ | ۷/۸ | ۲/۵ | ۲۳۱ | ۰/۶۸ | ۵/۷ |

**جدول (۲): برخی خصوصیات شیمیایی آب مورد استفاده**

| نمونه آب | pH | EC ($dsm^{-1}$) | SAR | کاتیون‌ها ($meqlit^{-1}$) | | | | آنیون‌ها ($meqlit^{-1}$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Ca | Mg | Na | K | $HCo3^-$ | Cl | $So4^-$ |
| S1 | ۷/۷ | ۱ | ۵/۴ | ۴/۸ | ۲/۵ | ۱۰/۵ | ۰/۴۶ | ۴/۱ | ۵/۶ | ۵/۷ |
| S2 | ۷/۸ | ۳ | ۸/۷ | ۴/۳ | ۳/۸ | ۱۷/۵ | ۰/۶۵ | ۴/۵ | ۹/۸ | ۶/۲ |
| S3 | ۷/۴ | ۵ | ۹/۹ | ۴/۶ | ۴/۷ | ۲۱/۳ | ۰/۷۴ | ۳/۸ | ۱۲/۶ | ۶/۵ |

سپس زمین مورد نظر شخم و دیسک‌زده و کرت بندی شد. طول هر کرت ۴ متر و عرض آن ۳ متر بود. همچنین فاصله بین کرت‌های فرعی یک متر و فاصله بین کرت‌های اصلی ۲ متر درنظر گرفته شد. در هر کرت پنج ردیف کشت فلفل دلمه رقم Jupiter بود که دو ردیف کناری به‌عنوان حاشیه در نظر گرفته شد و داده‌های مورد نیاز از ردیف‌های میانی برداشت شد. فواصل ردیف های کشت از هم ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی ردیف ۳۰ سانتی‌متر بود. در هر دو سال کشت اواسط بهمن و برداشت اواسط اردیبهشت انجام شد.

بر اساس نتایج آزمون اولیه خاک، نیاز کودی خاک شامل کمبود عناصر غذایی مهم نظیر پتاسیم، فسفر و ازت به ترتیب با مصرف ۷۵ کیلوگرم در هکتار کود سولفات پتاسیم، ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل در ابتدای فصل کشت و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره به صورت سرک در دو مرحله ابتدای کشت و چهار هفته پس از کشت به گیاه داده شد.

تعیین نیاز آبی گیاه و روش آبیاری

سیستم آبیاری مورد استفاده شامل لوله های آبیاری قطره ای تیپ با فواصل قطره‌چکان ۲۰ سانتی‌متر روی لوله و دبی خروجی ۲ لیتر بر ساعت با فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال بود. دور آبیاری به صورت دو روز در میان و با هدف تأمین کمبود رطوبت خاک تا عمق ۶۰ سانتی متری در تیمار آبیاری کامل و رساندن به حد ظرفیت زراعی خاک در نظر

گرفته شـــد. حجم آب آبیاری قبل از هر نوبت آبیاری با استفاده از رابطه ۱ تعیین شد (Liue et al., 2006).

$$d = \sum_{i=1}^{n}(\theta_{Fci} - \theta_i)\,\Delta z \qquad (۱)$$

در این معـادلـه: d عمق آبیـاری (متر)، $\theta_{Fci}$ و $\theta_i$ به‌ترتیب رطوبت حجمی خاک در حالت ظرفیت زراعی و قبل از آبیاری در لایه i=1 ، $\Delta z$ ضـــخامت لایه (متر) و n شماره لایه خاک می‌باشد.

با به‌دســـت آوردن عمق آب آبیاری در هر نوبت با اسـتفاده از رابطه (۱)، حجم آب مورد نیاز برای هر کرت از ضرب کردن عمق به‌دست آمده در مساحت کرت محاسبه شـد (با توجه به این‌که آبیاری مزرعه از طریق سـیسـتم آبیاری قطره‌ای انجام شـد، راندمان سـیسـتم ۹۵ درصـد درنظر گرفته شد) و با اسـتفاده از کنتورهای نصب شده بر روی هر یک از لوله‌های آبرســـان اندازه‌گیری و در اختیار گیاه قرار گرفت. حجم آب سایر تیمارها بر اساس این حجم تعیین و اعمال گردید.

برای آبیاری از تانکرهایی که در کنار مزرعه قرار داشت، اسـتفاده شـد. این تانکرها با آب‌هایی با سـطوح کیفی ذکر شـده که از چاهک‌های منطقه جمع‌آوری شـده بودند، پر گردید. سـپس با اسـتفاده از پمپ، آب از درون مخازن به لوله‌های اصـــلی و پس از آن بـه نوارهـای تیـپ منتقـل می‌گردیـد. مقـدار آب آبیـاری تمـامی تیمـارهـا تـا زمـان سـبزشـدن کامل مزرعه (مرحله شـش‌برگی) یکسـان بود. همچنین تیمار شوری تا این مرحله اعمال نگردید.

اولین برداشـت میوه اواسـط اردیبهشـت ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ انجام شـد. برداشـت میوه هر هفته تا زمانی انجام گرفت که میوه از حالت بازارپسـندی خارج شـد. در مجموع هشـت مرحله برداشـــت انجام گردید. برای اندازه گیری عملکرد کـل، پس از برداشـــت میوه‌هـا، بـه کمـک یـک ترازوی دیجیتالی، وزن میوه‌ها در برداشـــت‌های متوالی (هفته‌ای یک بار) ثبت و در پایان پس از جمع‌بندی عملکرد محاسبه شد.

## مدل اکواکراپ

مدل اکواکراپ برای تعیین عملکرد محصـول از تبخیر-تعرق به‌صـورت زیر اسـتفاده می‌کند (Steduto et al., 2009):

$$B = WP^{*}\sum_{i=1}^{n}\frac{Tr_i}{ETo_i} \qquad (۲)$$

در این معادله، B عملکرد زیسـت‌توده تجمعی (گرم بر مترمربع)، $WP^{*}$ بهره‌وری آب نرمـال شـــده (گرم بر مترمربع)، $Tr_i$ تعرق روزانه گیاه (میلی‌متر در روز) و $ETo_i$ تبخیر-تعرق مرجع (میلی‌متر در روز)، n تعـداد روزهـای پس از کشـت و i شـماره روز اسـت. زمانی که تنش شـوری برای این مدل در نظر گرفته شـــود؛ حدود بالا و پایین اثر تنش شـــوری در این مدل به صـــورت پیش‌فرض تعیین می‌شـود. در مقادیر بیشـتر از حدود بالا، تنش شـوری اثر معنی‌داری بر کاهش زیست‌توده نخواهد داشت. در مقادیر پایین‌تر از حدود پایین نیز اثر تنش شـــوری برابر با صـــفر خواهد بود. در مقادیر بین حدود بالا و پایین، تنش شـوری به صـورت خطی بر کاهش زیسـت‌توده اثر می‌گذارد. تعرق روزانه در مدل AquaCrop با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_{ri} = K_s \times CC \times K_{CTrx} \times ET_{0i} \qquad (۳)$$

در این رابطـه، $K_s$ ضـــریـب تنش آبی، $K_{CTrx}$ حـداکثر ضـریب گیاهی برای تعرق و CC ضـریب پوشـش گیاهی است. در مدل اکواکراپ تعیین میزان پوشش گیاهی بسیار با اهمیت اسـت. به همین دلیل در این مدل گیاهی از سـه رابطه (رابطه‌های ۴ تا ۶) به شـــرح زیر برای تعیین این پارامتر استفاده می‌شود (Steduto et al., 2009).

$$CC = CC_0 \times e^{tCGC} \qquad (۴)$$

$$CC = CC_x - 0.25\frac{CC_x^{\,2}}{CC_0} \times e^{-tCGC} \qquad (۵)$$

$$CC = CC_x\left[1 - 0.05\left(e^{\frac{CDC}{CCx}\times t} - 1\right)\right] \qquad (۶)$$

در این روابط، $CC_0$ پوشـــش گیاهی اولیه (سـانتی‌متر مربع برای هر گیاه)، CGC ضـریب رشـد پوشـش گیاهی (درصـد روز)، CDC ضریب کاهش پوشش گیاهی (درصد روز) و t زمان است. از رابطه‌های (۴) تا (۶) به ترتیب برای تعیین پوشـش گیاهی از ابتدای دوره رشـد تا نیمه مرحله

توسعه، از نیمه تا آخر مرحله توسعه و از ابتدای مرحله پیری تا انتهای دوره رشد استفاده می‌شود.

**تحلیل حساسیت مدل**

همان‌طور که گفته شد، پارامترهای رشد گیاهی شامل بهره‌وری آب نرمال شده ($WP^*$)، حداکثر ضریب تعرق گیاهی ($K_{CTrx}$)، پوشش گیاهی اولیه ($CC_0$)، ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)، ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC) و شاخص برداشت (HI) در شبیه‌سازی زیست توده و در نهایت شبیه‌سازی عملکرد از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. لذا در تحقیق حاضر حساسیت مدل اکواکراپ نسبت به تغییرات این پارامترها بررسی شد. مقادیر اولیه و دامنه تغییرات این پارامترها در جدول (۳) داده شده است. میزان نمو هر پارامتر نیز بر اساس ماهیت آن و اثرگذاری مقادیر پارامتر بر نتایج خروجی تعیین شد.

**جدول (۳): مقادیر اولیه و دامنه تغییرات پارامترهای مورد مطالعه فلفل دلمه با استفاده از مدل اکوکراپ**

| پارامتر | علامت | واحد | مقدار اولیه | حد پایین | حد بالا | نمو تغییرات |
|---|---|---|---|---|---|---|
| بهره‌وری آب نرمال شده | $WP^*$ | $g.m^{-2}$ | ۱۸ | ۱۵ | ۲۱ | ۱ |
| حداکثر ضریب تعرق گیاهی | $K_{CTrx}$ | - | ۱/۱ | ۱/۰ | ۱/۲۰ | ۰/۰۵ |
| پوشش گیاهی اولیه | $CC_o$ | % | ۵ | ۴ | 6 | ۰/۵ |
| ضریب رشد پوشش گیاهی | CGC | $\%day^{-1}$ | ۰/۱۲ | ۰/۱ | ۰/۱۴ | ۱ |
| ضریب کاهش پوشش گیاهی | CDC | $\%day^{-1}$ | ۰/۰۷ | ۰/۰۶ | ۰/۰۹ | ۰/۰۱ |
| شاخص برداشت | HI | % | ۶۵ | ۶۰ | ۷۰ | ۲ |

به منظور تحلیل حساسیت از رابطه (۷) استفاده شد (Beven, 1979).

$$S_{pi} = \lim_{\Delta Pi \to 0} \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\Delta P_i}{P_i}} = \frac{\partial y}{\partial P_i} \times \frac{P_i}{y} \qquad (۷))$$

در این رابطه، $S_{pi}$ ضریب حساسیت، $P_i$ پارامتر مورد بررسی و $y$ مقدار زیست‌توده است. مقادیر $S_{pi}$ بر حسب نوع پارامتر می‌تولند مثبت یا منفی باشد. مقادیر مثبت نشان دهنده افزایش زیست‌توده با تغییر پارامتر مورد نظر است. مقادیر منفی نیز نشان دهنده کاهش زیست‌توده با تغییرات پارامتر مورد نظر است. در یک نگاه کلی، رابطه دیفرانسیل در این رابطه، حساسیت نسبت به هر پارامتر را مشخص می‌کند. این حساسیت به بزرگی مقادیر پارامترهای $Pi$ و $y$ نیز وابسته است. به‌عنوان مثال، اگر $S_{pi}$ برابر با ۰/۱ باشد، تغییرات ۱۰ درصدی $Pi$ موجب افزایش یک درصدی پارامتر $y$ می‌شود (Nasrolahi et al., 2024). برای تحلیل حساسیت مدل نسبت به هر پارامتر، در هر مرحله یکی از پارامترهای ورودی مدل را به مقدار ۲۵ درصد تغییر و بقیه پارامترها ثابت نگه داشته می‌شدند.

مقدار ضریب حساسیت با توجه به جدول (۴) در چهار گروه کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد قرار می‌گیرند (Lenhart et al., 2002).

جدول (۴): طبقه‌بندی ضریب حساسیت

| توضیحات | دامنه تغییرات ضریب حساسیت | گروه |
|---|---|---|
| کم | $0 \le \|Sp\| < 0.05$ | 1 |
| متوسط | $0.05 \le \|Sp\| < 0.2$ | 2 |
| زیاد | $0.2 \le \|Sp\| < 1$ | 3 |
| بسیار زیاد | $1 \le \|Sp\|$ | 4 |

**ارزیابی مدل اکواکراپ**

پس از تحلیل حساسیت، واسنجی مدل با استفاده از داده‌های سال اول انجام شد. در مرحله واسنجی، داده‌های با حساسیت متوسط و بالا آن‌قدر تغییر داده شدند تا نتایج شبیه‌سازی شده به نتایج مشاهده شده سال اول نزدیک شود. بعد از اتمام مرحله واسنجی، مقادیر همه داده‌های ورودی یادداشت شد و در مرحله صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. از داده‌های سال دوم برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد. برای آزمون دقت و بررسی کارایی مدل اکوکراپ از آماره‌های خطای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، ضریب تبیین ($R^2$) و درصد خطای نسبی (EF) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2} \quad (۸)$$

$$MBE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}|P_i - O_i| \quad (۹)$$

$$R^2 = 1 - \sum_{i=1}^{n}\frac{(P_i - O_i)}{(P_i - \bar{P})^2} \quad (۱۰)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad (۱۱)$$

در این روابط $P_i$ مقدار شبیه‌سازی شده، $O_i$ مقادیر اندازه‌گیری شده، $\overline{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و N تعداد نمونه می‌باشد.

مقدار RMSE نشان دهنده این است که مدل به چه میزان بیشتر یا کمتر از واقعیت، برآورد می‌کند و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقدار مثبت آماره MBE نشان دهنده این است که مدل مورد استفاده مقدار پارامتر مورد نظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل در برآورد پارامتر مورد نظر عدد کوچکتری به‌دست داده است. EF، مقادیر برآورد شده را با میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه می‌کند. در واقع کارایی مدل را نشان می‌دهد و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، بهتر است. مقدار $R^2$ نشان‌دهنده نسبت پراکندگی میان مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است و از صفر تا یک متغیر بوده و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان دهنده برازش بهتر داده‌ها می‌باشد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۵).

## نتایج و بحث

### نتایج تحلیل حساسیت

برای ارزیابی تغییرات پارمترهای رشد در مدل اکواکراپ بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب فلفل دلمه، مقادیر هر کدام از پارامترها بر اساس میزان نمو (جدول ۳) تغییر داده شد. نتایج شبیه‌سازی برای هر تیمار محاسبه و میزان حساسیت هر پارامتر تعیین شد (جدول ۵). با توجه به محدوده پیشنهاد شده توسط گیرتس و همکاران (۲۰۰۹) (جدول ۴)، نتایج بیانگر حساسیت کم تا زیاد مدل نسبت به تغییر پارامترها می‌باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده، بیشترین ضریب حساسیت به پارامتر CDC اختصاص داشت. پس از آن، پارامترهای CGC و WP* بیشترین ضریب حساسیت را داشتند. کمترین ضریب حساسیت در پارامتر HI دیده شد. با افزایش مقدار آب آبیاری (از تیمار I1 به تیمار I2 و I3) ضریب حساسیت تمامی پارامترها کاهش یافت. بنابراین می‌توان گفت با افزایش تنش آبی، حساسیت مدل اکواکراپ نسبت به تغییرات این پارامتر افزایش می‌یابد.

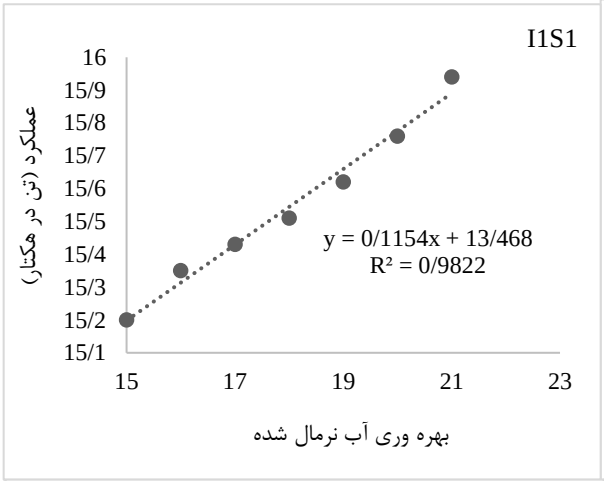
افزایش شوری آب آبیاری نیز سبب افزایش حساسیت مدل اکواکراپ نسبت به تغییرات پارامترهای WP*، KCTrx،

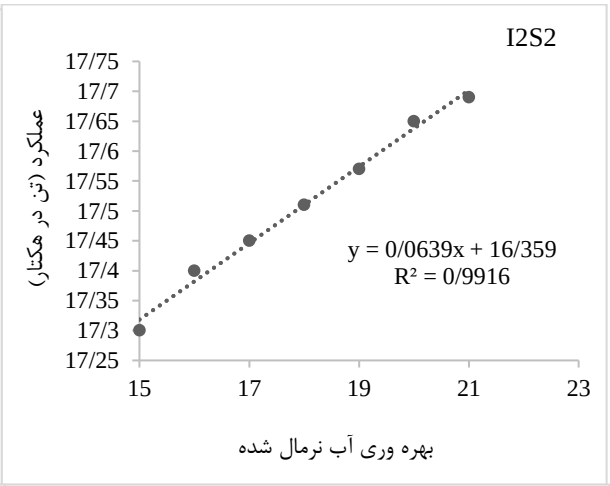
HI، CCo، CDC وCGC شد. با تغییر تنش شوری از S1 به S2 و S3، دامنه‌ی تغییرات ضریب حساسیت افزایش یافت؛ البته برخی محققان بیان کرده‌اند که حساسیت مدل اکواکراپ نسبت به تغییرات پارامترهای رشد گیاهی می‌تواند به نوع گیاه نیز وابسته باشد (Karimi Avargani et al., 2019).

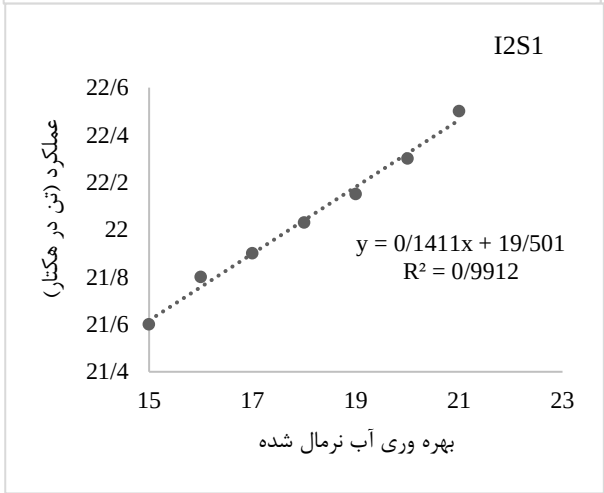
**جدول (۵): ضرایب حساسیت پارامترهای رشد گیاه فلفل دلمه**

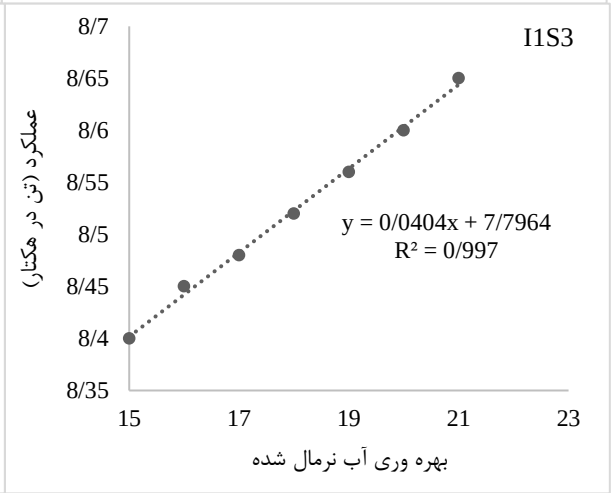
| تیمار | پارامترهای رشد گیاه | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $WP^*$ (g.m$^{-2}$) | $K_{CTrx}$ (-) | $CC_0$ (cm$^2$.plant$^{-1}$) | CGC (%day$^{-1}$) | CDC (%day$^{-1}$) | HI (%) |
| I1S1 | ۰/۳۷ | ۰/۲۸ | ۰/۱۸ | ۰/۴۲ | -۰/۵۵ | ۰/۱۲ |
| I1S2 | ۰/۳۹ | ۰/۳ | ۰/۲ | ۰/۴۲ | -۰/۶ | ۰/۱۴ |
| I1S3 | ۰/۴۵ | ۰/۳۵ | ۰/۲۵ | ۰/۵۱ | -۰/۷۲ | ۰/۱۵ |
| I2S1 | ۰/۳۲ | ۰/۲۵ | ۰/۱۵ | ۰/۳۸ | -۰/۵ | ۰/۱ |
| I2S2 | ۰/۳۶ | ۰/۲۸ | ۰/۱۸ | ۰/۴۲ | -۰/۵۵ | ۰/۱۲ |
| I2S3 | ۰/۴۵ | ۰/۳۵ | ۰/۲۵ | ۰/۵۱ | -۰/۷۲ | ۰/۱۵ |
| I3S1 | ۰/۳ | ۰/۲۲ | ۰/۱۴ | ۰/۳۵ | -۰/۴۸ | ۰/۰۹ |
| I3S2 | ۰/۳۸ | ۰/۳ | ۰/۲ | ۰/۴۵ | -۰/۶ | ۰/۱۳ |
| I3S3 | ۰/۴۳ | ۰/۳۳ | ۰/۲۳ | ۰/۵ | -۰/۷ | ۰/۱۴ |
| انحراف معیار | ۰/۰۵ | ۰/۰۴ | ۰/۰۴ | ۰/۰۵ | -۰/۰۹ | ۰/۰۲ |

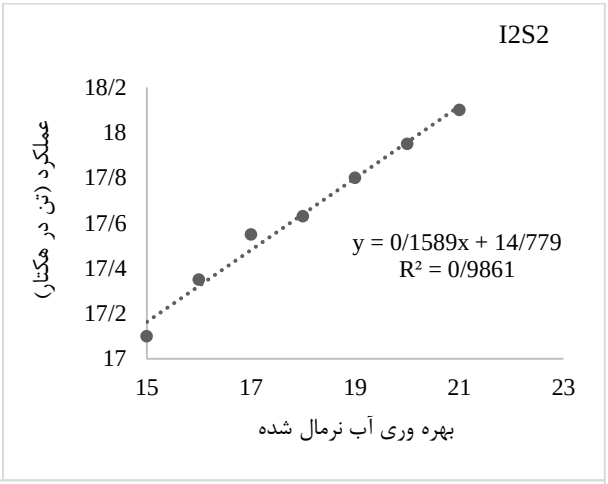
در شکل (۱)، تغییرات عملکرد فلفل دلمه نسبت به مقادیر مختلف پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) مشاهده می‌شود. مقدار پیش‌فرض برای پارامتر WP* در مدل اکواکراپ برابر با ۱۸ گرم بر مترمربع است که با در نظر گرفتن دامنه‌ی تغییرات در جدول (۳)، مقادیر ۱۵ و ۲۱ به‌عنوان حدود پایین و بالا تغییرات تعیین شدند. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود؛ افزایش مقدار WP* سبب افزایش عملکرد فلفل دلمه شد. با توجه به این که ضریب حساسیت WP* بین ۰/۴۵-۰/۳ متغیر بود (جدول ۵)؛ بنابراین مدل اکواکراپ نسبت به تغییرات این پارامتر حساسیت زیاد داشت (جدول ۴). این نتایج با مطالعات احمدی و همکاران (۱۴۰۰) و نصرالهی و همکاران (۲۰۲۴) مطابقت داشت. ایشان بیان داشتند در بین پارامترهای رشد گیاهی، به پارامتر WP* حساسیت زیادی دارد و ضریب حساسیت این پارامتر در دسته‌ی زیاد قرار گرفت. افزایش تنش آبی و شوری، سبب افزایش شیب خط در شکل (۱) گردیدند که این موضوع به دلیل افزایش حساسیت مدل اکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد فلفل دلمه است. مقادیر بالای ضریب تعیین (R2) در شکل نشان می‌دهد همبستگی بالایی بین پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده و عملکرد گیاه فلفل وجود دارد

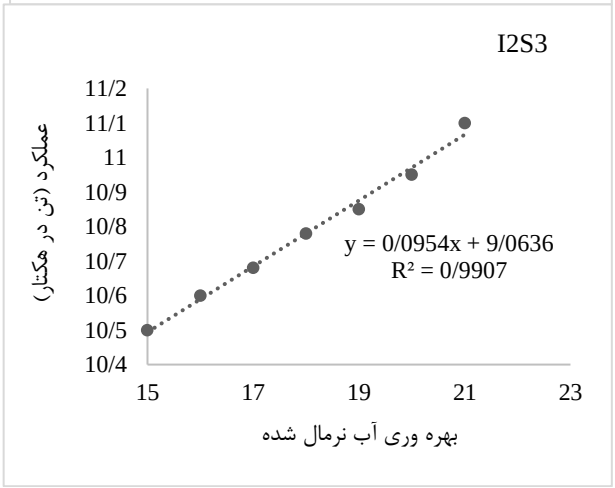

I1S1
عملکرد (تن در هکتار)
16
15/9
15/8
15/7
15/6
15/5
15/4
15/3
15/2
15/1
15
17
19
21
23
y = 0/1154x + 13/468
R² = 0/9822
بهره وری آب نرمال شده

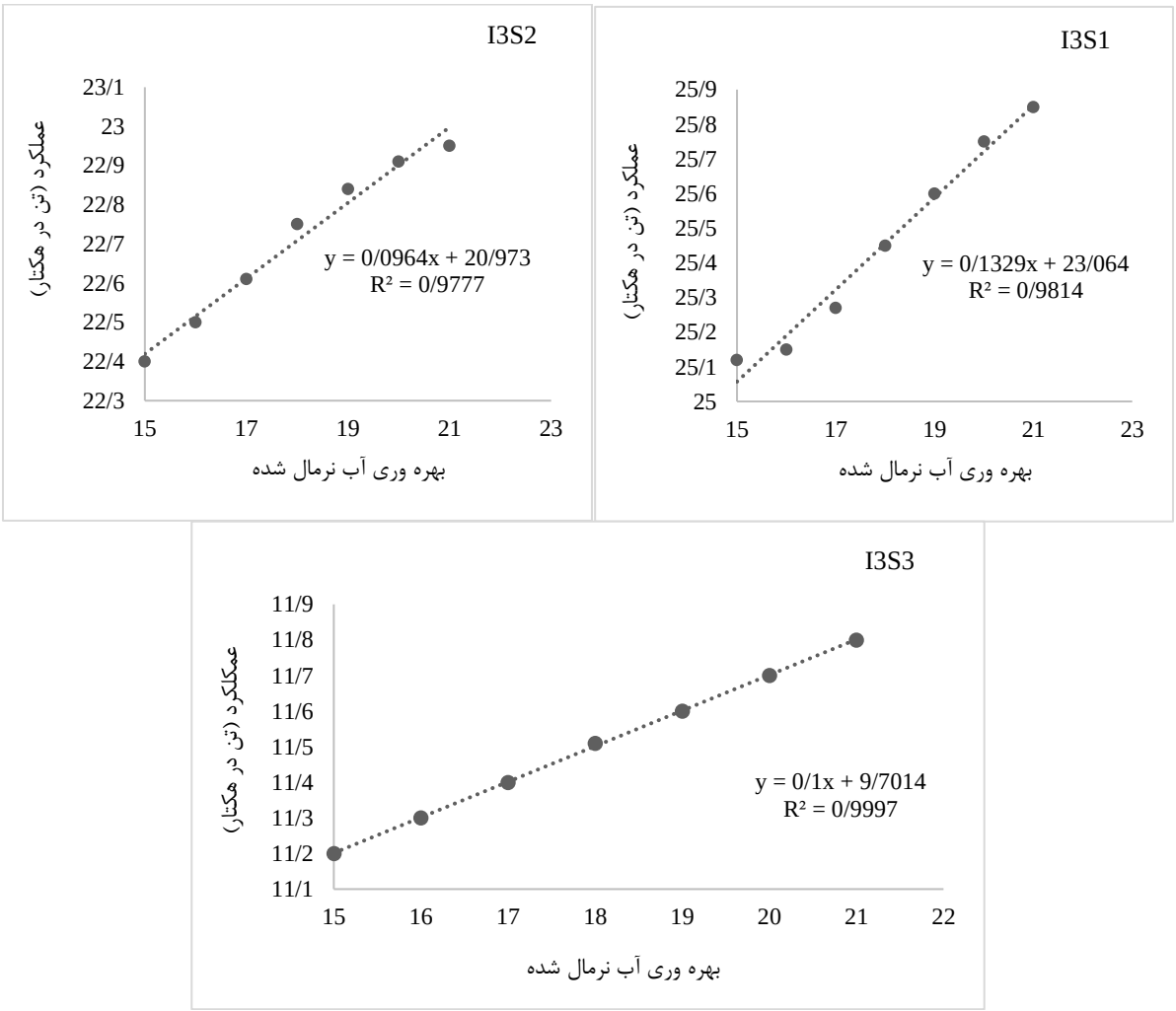

I2S2
عملکرد (تن در هکتار)
17/75
17/7
17/65
17/6
17/55
17/5
17/45
17/4
17/35
17/3
17/25
15
17
19
21
23
y = 0/0639x + 16/359
R² = 0/9916
بهره وری آب نرمال شده


I2S1
عملکرد (تن در هکتار)
22/6
22/4
22/2
22
21/8
21/6
21/4
15
17
19
21
23
y = 0/1411x + 19/501
R² = 0/9912
بهره وری آب نرمال شده


I1S3
عملکرد (تن در هکتار)
8/7
8/65
8/6
8/55
8/5
8/45
8/4
8/35
15
17
19
21
23
y = 0/0404x + 7/7964
R² = 0/997
بهره وری آب نرمال شده


I2S2
عملکرد (تن در هکتار)
18/2
18
17/8
17/6
17/4
17/2
17
15
17
19
21
23
y = 0/1589x + 14/779
R² = 0/9861
بهره وری آب نرمال شده

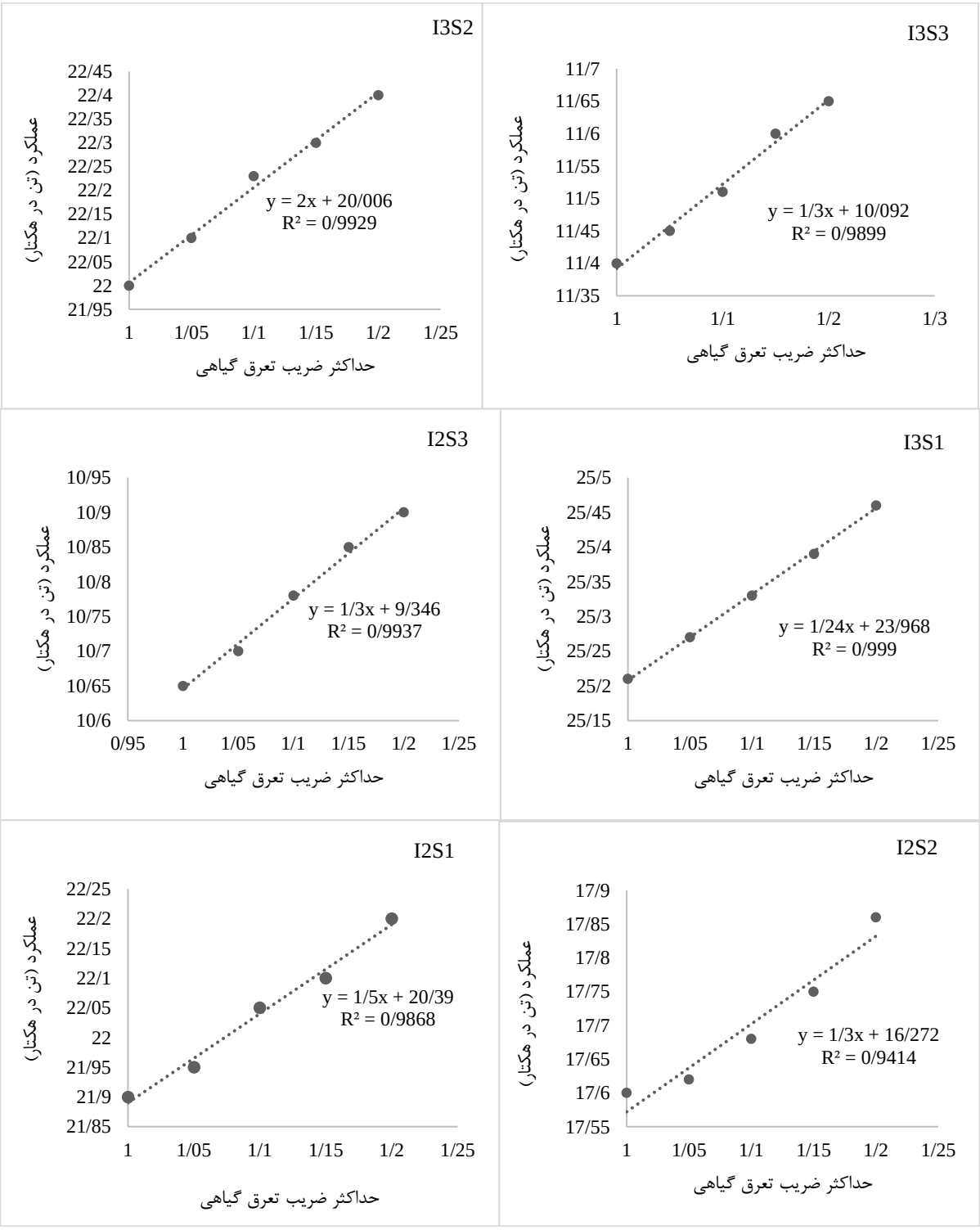

I2S3
عملکرد (تن در هکتار)
11/2
11/1
11
10/9
10/8
10/7
10/6
10/5
10/4
15
17
19
21
23
y = 0/0954x + 9/0636
R² = 0/9907
بهره وری آب نرمال شده

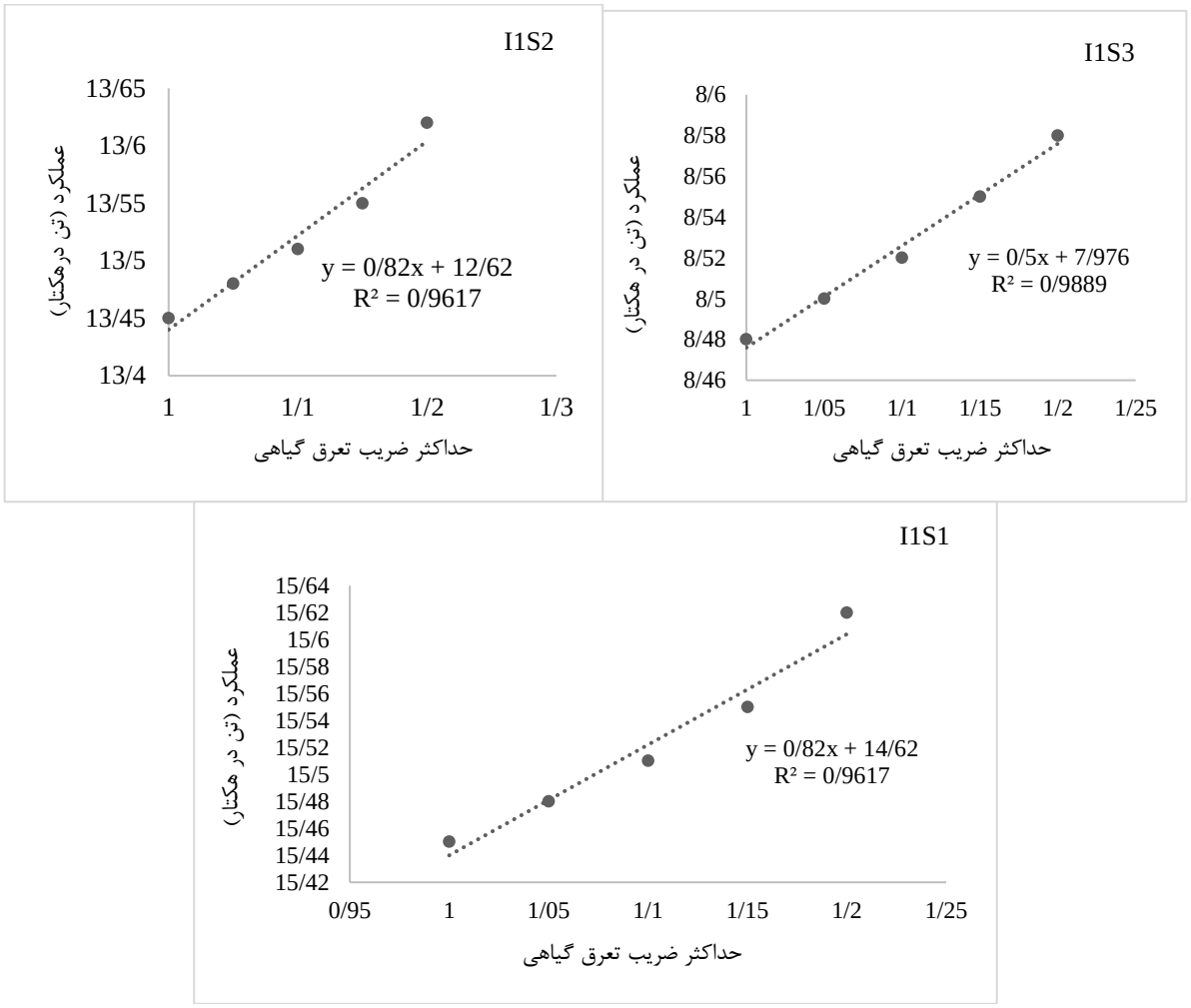



**شکل (۱): اثر تغییر پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده ($WP^*$) بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد گیاه فلفل دلمه در تیمارهای مختلف**

شکل ۲ تغییرات عملکرد فلفل دلمه را نسبت به مقادیر مختلف حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق ($K_{CTrx}$) را نشان می‌دهد. مقدار پیش‌فرض مدل برای این پارامتر ۱/۱ بود. دامنه‌ی تغییرات برای این پارامتر به ترتیب ۱/۱ و ۱/۲-۱/۰ بود که با در نظر گرفتن دامنه‌ی تغییرات در جدول (۳)، مقادیر ۱ و ۱/۲ به‌عنوان حدود پایین و بالا تغییرات تعیین شدند. مقادیر حداقل و حداکثر ضریب حساسیت $K_{CTrx}$ به ترتیب ۰/۲۲ و ۰/۳۵ بود که براساس طبقه‌بندی جدول (۴)، در دسته‌ی زیاد قرار داشت. افزایش حساسیت مدل اکواکراپ نسبت به تغییرات این پارامتر در تنش‌های آبی و شوری در شکل (۲) نیز قابل مشاهده است

.

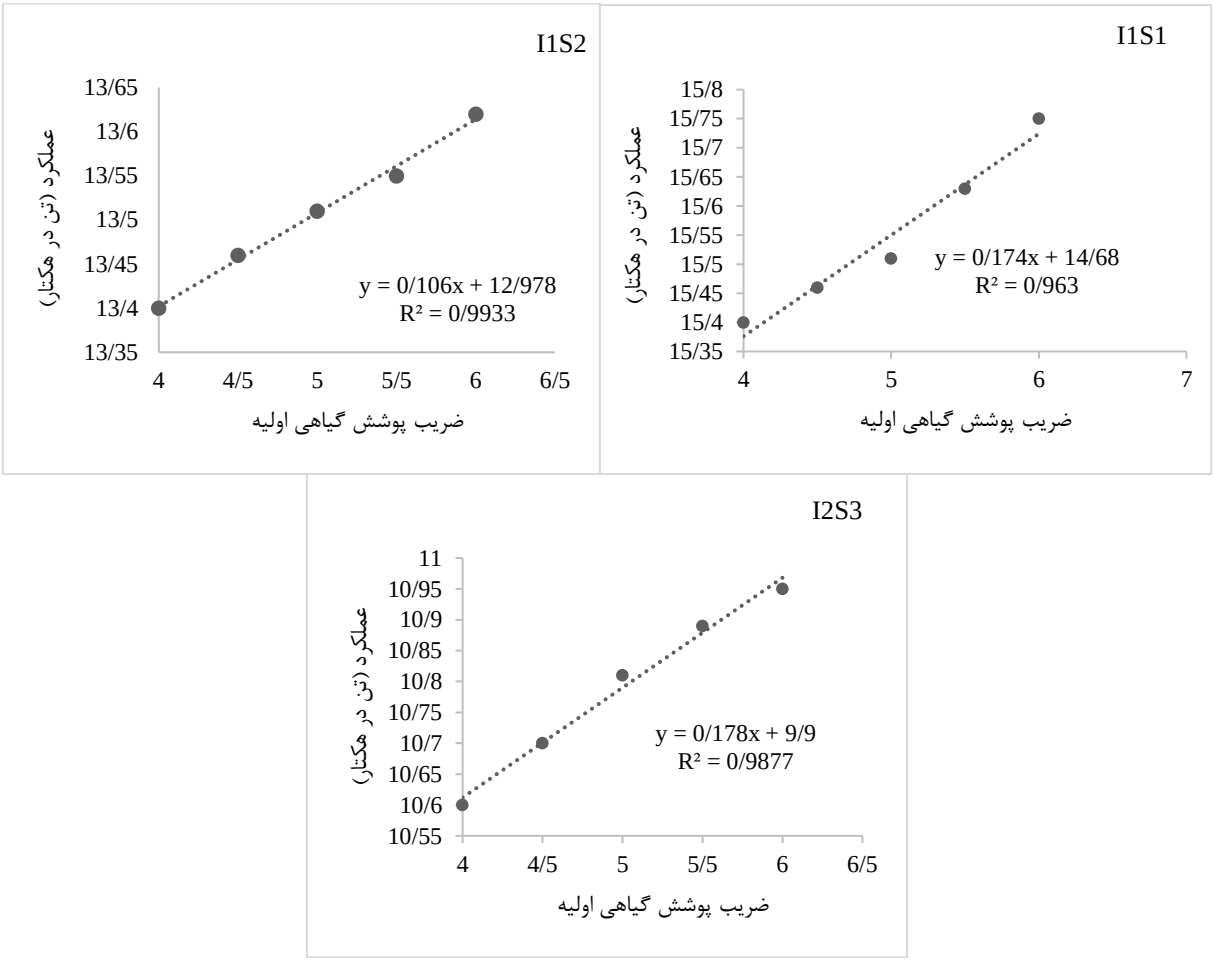

I3S2
عملکرد (تن در هکتار)
22/45
22/4
22/35
22/3
22/25
22/2
22/15
22/1
22/05
22
21/95
y = 2x + 20/006
R² = 0/9929
1
1/05
1/1
1/15
1/2
1/25
حداکثر ضریب تعرق گیاهی
I3S3
عملکرد (تن در هکتار)
11/7
11/65
11/6
11/55
11/5
11/45
11/4
11/35
y = 1/3x + 10/092
R² = 0/9899
1
1/1
1/2
1/3
حداکثر ضریب تعرق گیاهی
I2S3
عملکرد (تن در هکتار)
10/95
10/9
10/85
10/8
10/75
10/7
10/65
10/6
y = 1/3x + 9/346
R² = 0/9937
0/95
1
1/05
1/1
1/15
1/2
1/25
حداکثر ضریب تعرق گیاهی
I3S1
عملکرد (تن در هکتار)
25/5
25/45
25/4
25/35
25/3
25/25
25/2
25/15
y = 1/24x + 23/968
R² = 0/999
1
1/05
1/1
1/15
1/2
1/25
حداکثر ضریب تعرق گیاهی
I2S1
عملکرد (تن در هکتار)
22/25
22/2
22/15
22/1
22/05
22
21/95
21/9
21/85
y = 1/5x + 20/39
R² = 0/9868
1
1/05
1/1
1/15
1/2
1/25
حداکثر ضریب تعرق گیاهی
I2S2
عملکرد (تن در هکتار)
17/9
17/85
17/8
17/75
17/7
17/65
17/6
17/55
y = 1/3x + 16/272
R² = 0/9414
1
1/05
1/1
1/15
1/2
1/25
حداکثر ضریب تعرق گیاهی

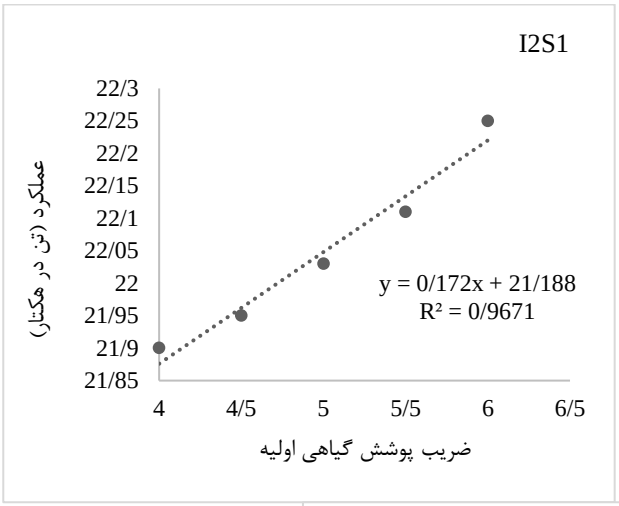


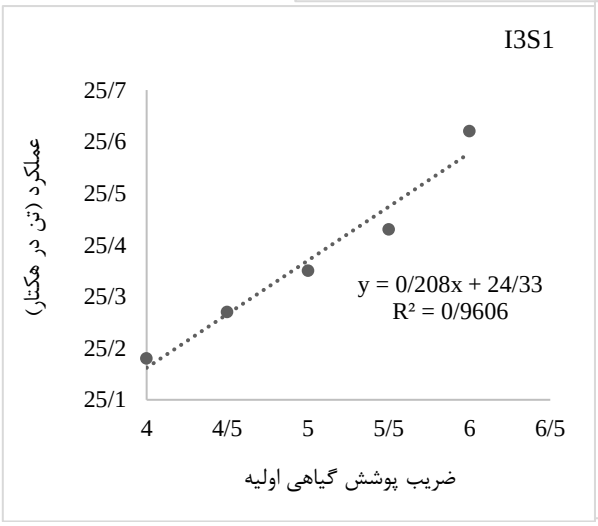

**شکل (۲): اثر تغییر پارامتر حداکثر ضریب تعرق گیاهی ($K_{CTrx}$) بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد گیاه فلفل دلمه در تیمارهای مختلف**

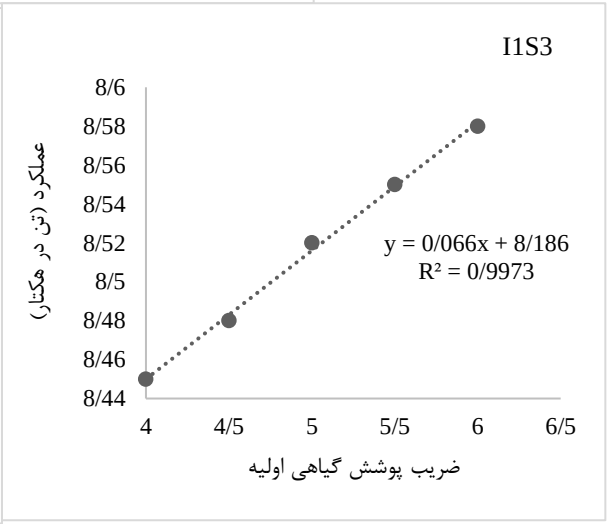
تغییرات عملکرد فلفل دلمه نسبت به تغییرات ضریب پوشش گیاهی اولیه (CCo) در مدل اکواکراپ در شکل (۳) مشاهده می‌شود. این تغییرات به‌صورت مستقیم بود و به همین دلیل با افزایش مقدار CCo، عملکرد گیاه افزایش یافت. با توجه به اینکه ضریب حساسیت CCo در محدوده‌ی ۰/۱۸-۰/۱۴ قرار داشت؛ بر اساس جدول (۴) حساسیت مدل نسبت به تغییرات این پارامتر در دسته‌ی متوسط قرار داشت. پایین بودن مقادیر شیب‌خط در شکل (۳) نیز به موید این مطلب است

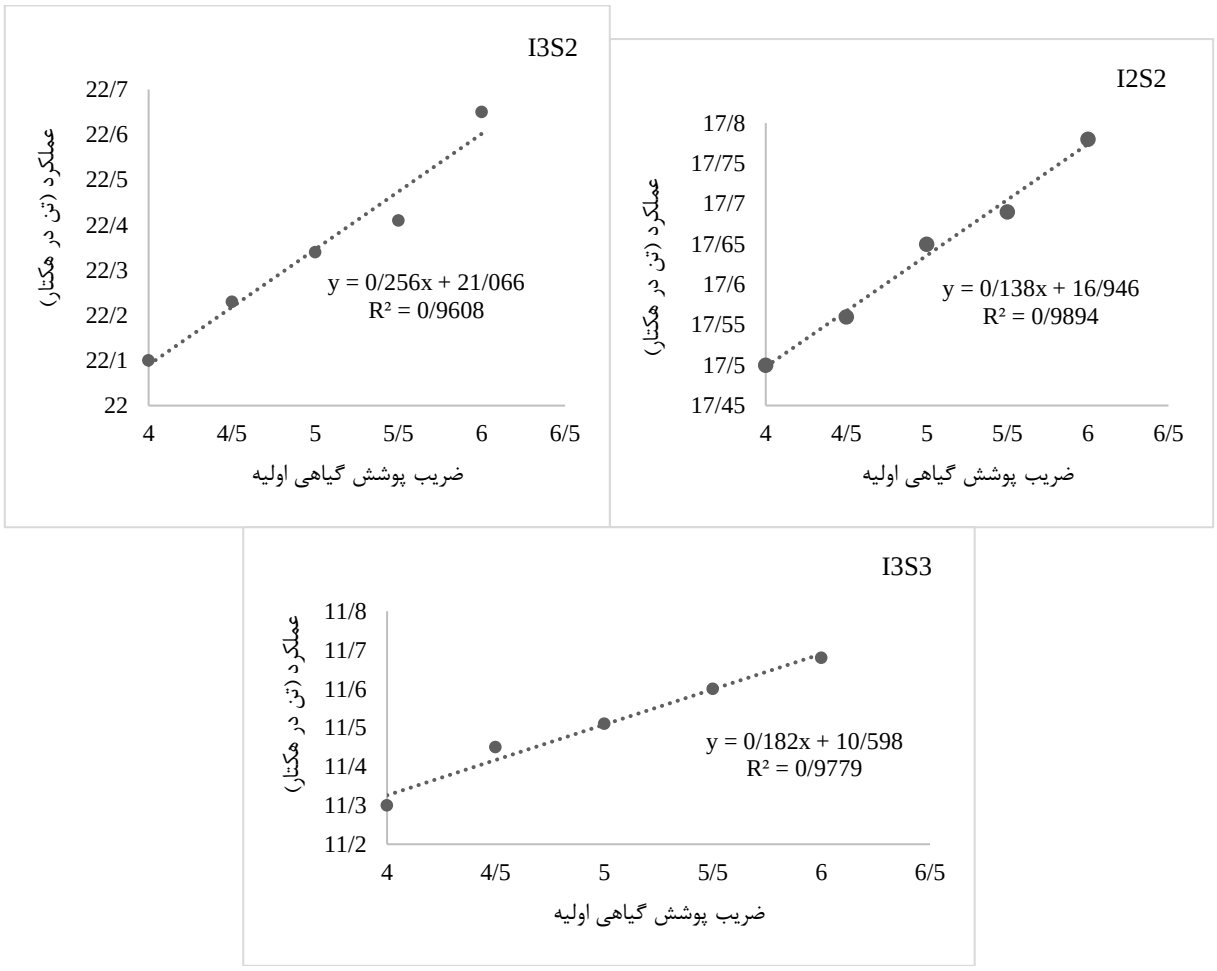
.


I1S2
عملکرد (تن در هکتار)
13/65
13/6
13/55
13/5
13/45
13/4
13/35
4
4/5
5
5/5
6
6/5
y = 0/106x + 12/978
R² = 0/9933
ضریب پوشش گیاهی اولیه
I1S1
عملکرد (تن در هکتار)
15/8
15/75
15/7
15/65
15/6
15/55
15/5
15/45
15/4
15/35
4
5
6
7
y = 0/174x + 14/68
R² = 0/963
ضریب پوشش گیاهی اولیه
I2S3
عملکرد (تن در هکتار)
11
10/95
10/9
10/85
10/8
10/75
10/7
10/65
10/6
10/55
4
4/5
5
5/5
6
6/5
y = 0/178x + 9/9
R² = 0/9877
ضریب پوشش گیاهی اولیه


I2S1
عملکرد (تن در هکتار)
22/3
22/25
22/2
22/15
22/1
22/05
22
21/95
21/9
21/85
y = 0/172x + 21/188
R² = 0/9671
4
4/5
5
5/5
6
6/5
ضریب پوشش گیاهی اولیه

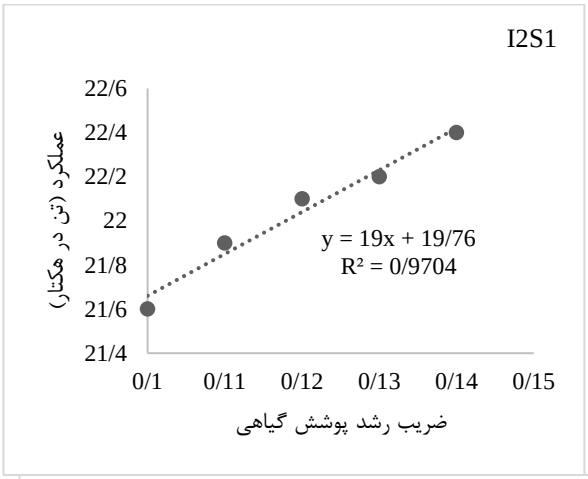

I3S1
عملکرد (تن در هکتار)
25/7
25/6
25/5
25/4
25/3
25/2
25/1
y = 0/208x + 24/33
R² = 0/9606
4
4/5
5
5/5
6
6/5
ضریب پوشش گیاهی اولیه

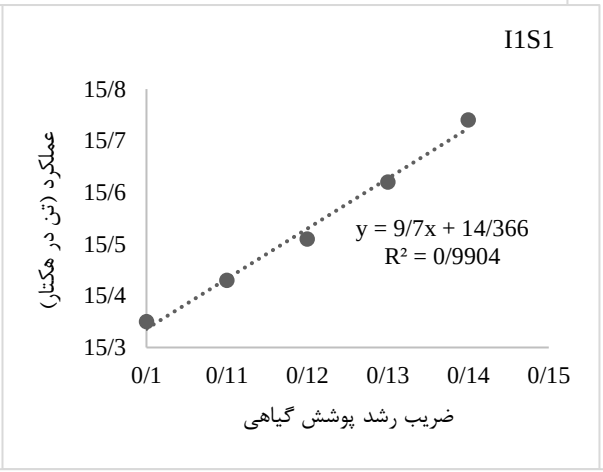

I1S3
عملکرد (تن در هکتار)
8/6
8/58
8/56
8/54
8/52
8/5
8/48
8/46
8/44
y = 0/066x + 8/186
R² = 0/9973
4
4/5
5
5/5
6
6/5
ضریب پوشش گیاهی اولیه

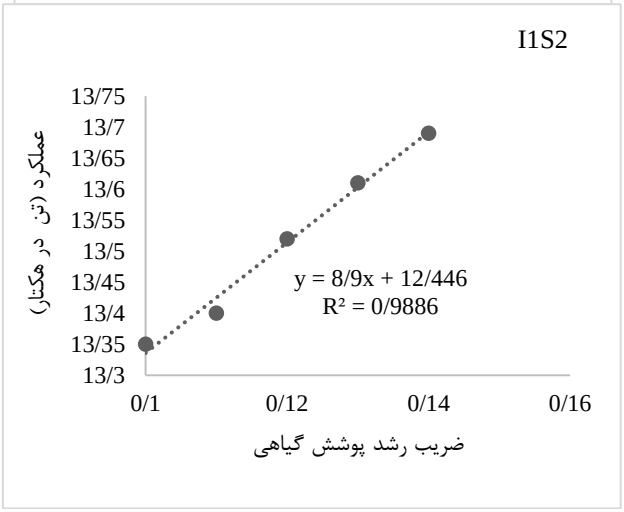


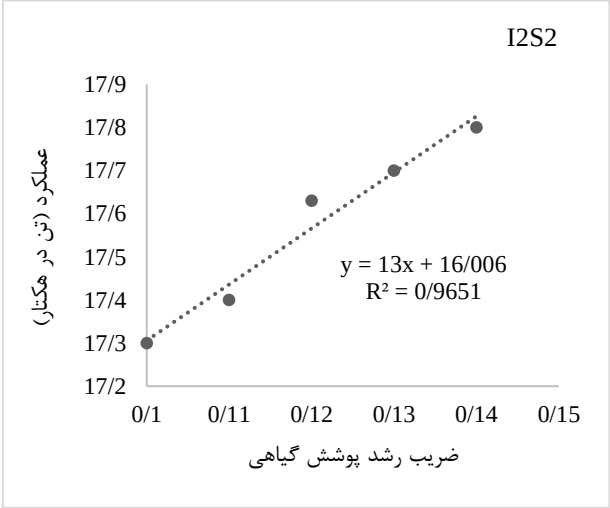

**شکل (۳): اثر تغییر پارامتر ضریب پوشش گیاهی اولیه ($CC_0$) بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد گیاه فلفل دلمه در تیمارهای مختلف**

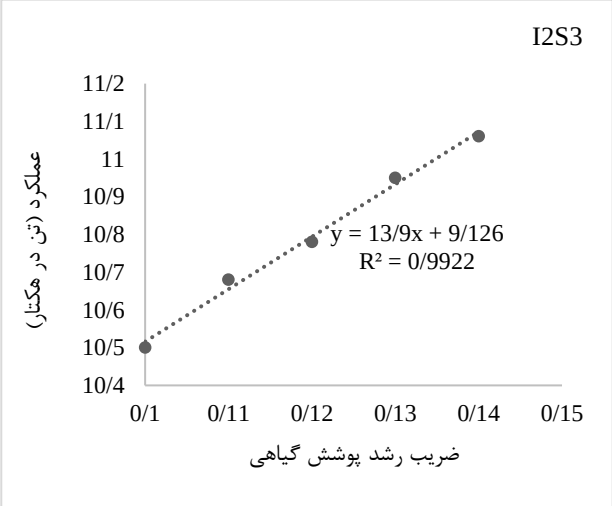
شکل (۴) تغییرات عملکرد فلفل دلمه را نسبت به مقادیر مختلف ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) نشان می‌دهد. مطابق جدول (۴)، ضریب حساسیت برای این پارامتر در محدوده‌ی ۰/۵۱-۰/۳۵ قرار داشت. بنابراین، حساسیت مدل اکواکراپ نسبت به تغییرات این پارامتر در دسته‌ی زیاد قرار داشت.

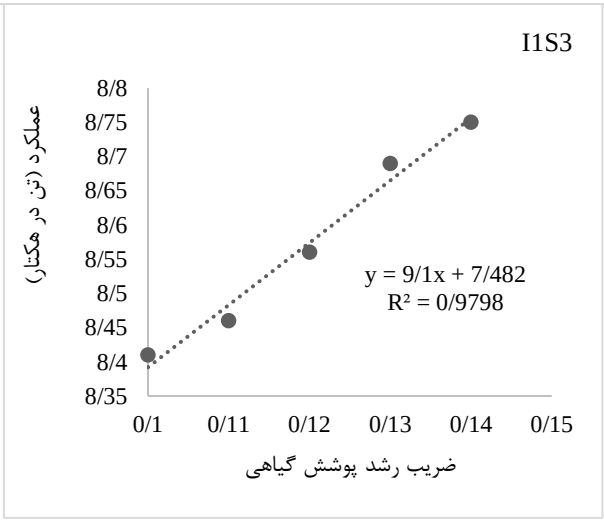

I2S1
22/6
22/4
22/2
22
21/8
21/6
21/4
عملکرد (تن در هکتار)
y = 19x + 19/76
R² = 0/9704
0/1
0/11
0/12
0/13
0/14
0/15
ضریب رشد پوشش گیاهی

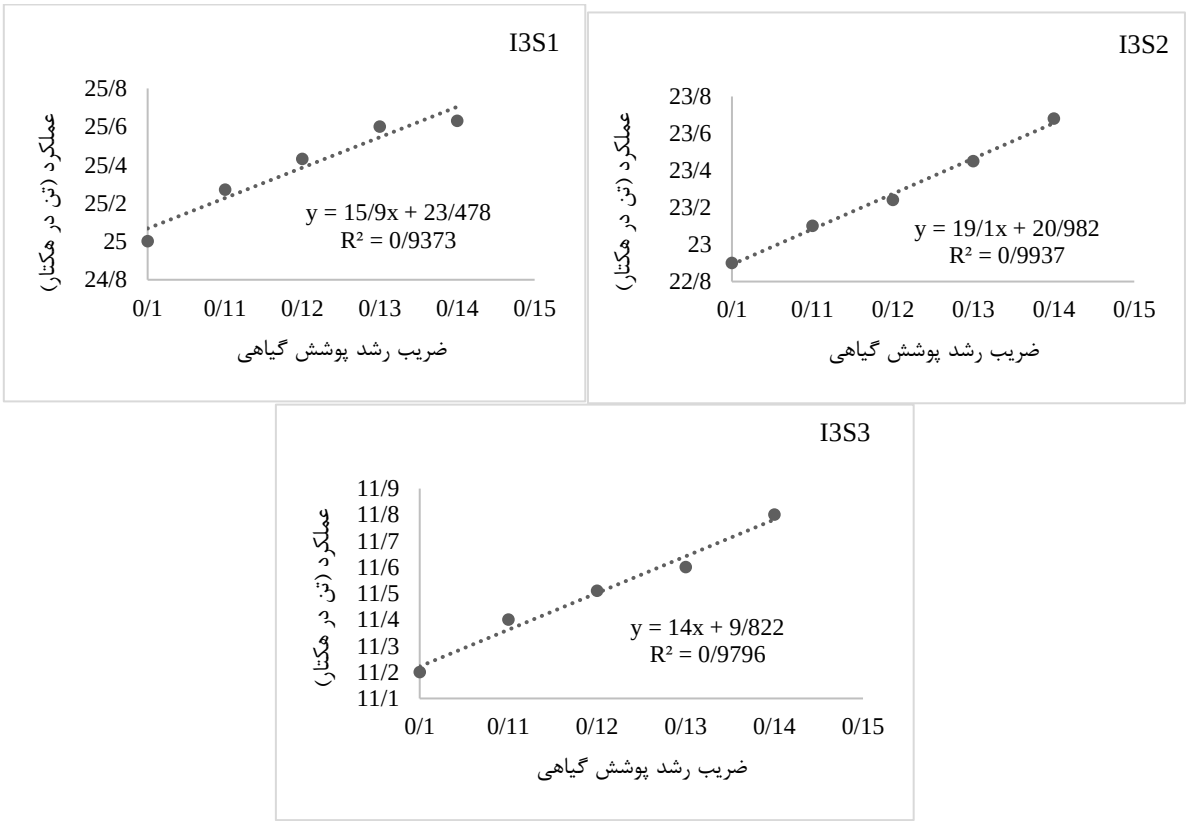

I1S1
15/8
15/7
15/6
15/5
15/4
15/3
عملکرد (تن در هکتار)
y = 9/7x + 14/366
R² = 0/9904
0/1
0/11
0/12
0/13
0/14
0/15
ضریب رشد پوشش گیاهی


I1S2
13/75
13/7
13/65
13/6
13/55
13/5
13/45
13/4
13/35
13/3
عملکرد (تن در هکتار)
y = 8/9x + 12/446
R² = 0/9886
0/1
0/12
0/14
0/16
ضریب رشد پوشش گیاهی


I2S2
عملکرد (تن در هکتار)
17/9
17/8
17/7
17/6
17/5
17/4
17/3
17/2
y = 13x + 16/006
R² = 0/9651
0/1
0/11
0/12
0/13
0/14
0/15
ضریب رشد پوشش گیاهی

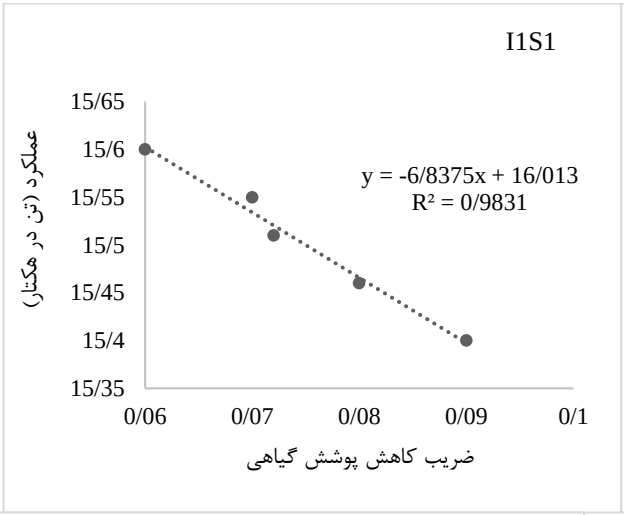

I2S3
عملکرد (تن در هکتار)
11/2
11/1
11
10/9
10/8
10/7
10/6
10/5
10/4
y = 13/9x + 9/126
R² = 0/9922
0/1
0/11
0/12
0/13
0/14
0/15
ضریب رشد پوشش گیاهی

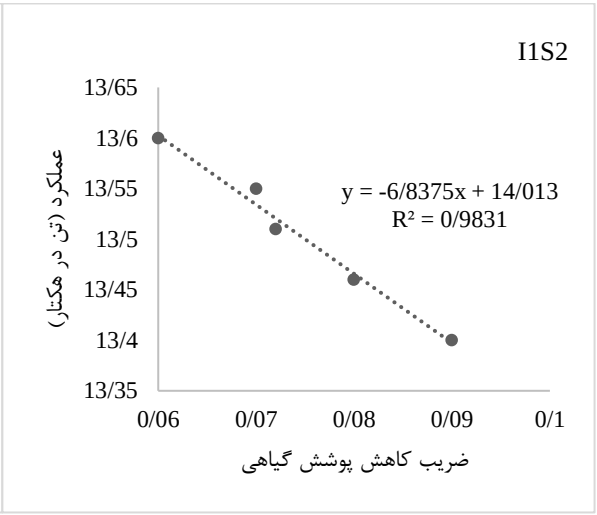

I1S3
عملکرد (تن در هکتار)
8/8
8/75
8/7
8/65
8/6
8/55
8/5
8/45
8/4
8/35
y = 9/1x + 7/482
R² = 0/9798
0/1
0/11
0/12
0/13
0/14
0/15
ضریب رشد پوشش گیاهی

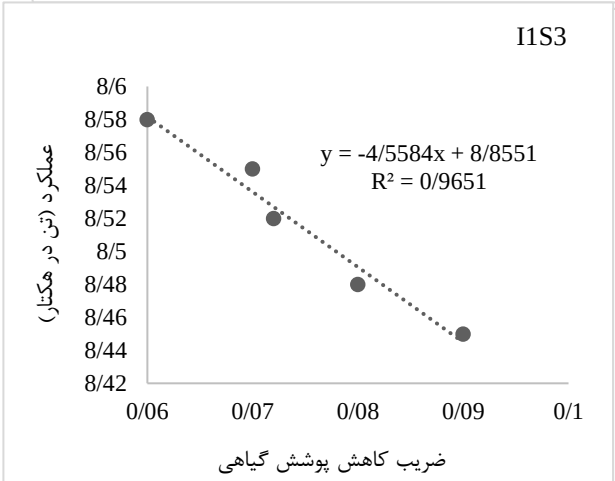


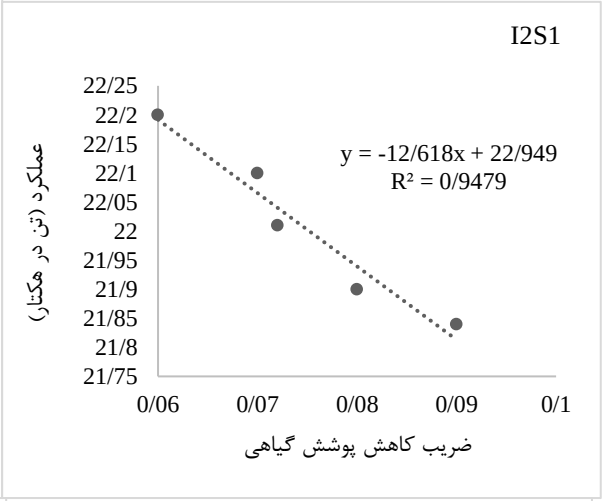

**شکل (۴): اثر تغییر پارامتر ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد گیاه فلفل دلمه در تیمارهای مختلف**

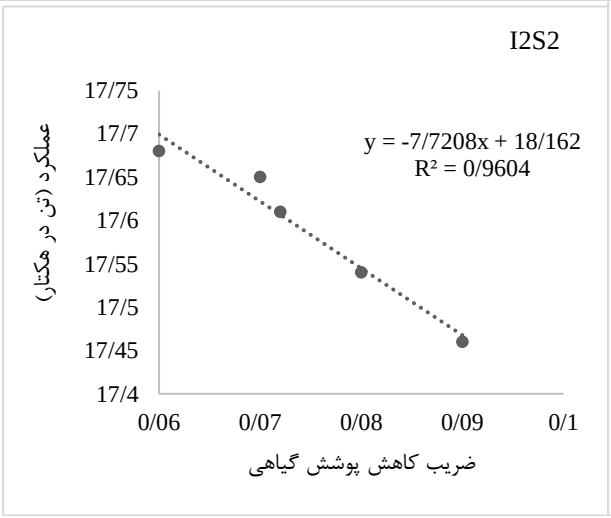
مقدار اولیه ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC) در مدل اکواکراپ برابر با ۰/۰۷ و حدود بالا و پایین آن به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۰۹ بود. تغییرات عملکرد نسبت به افزایش مقدار ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC) معکوس بود (شکل ۵). با افزایش مقدار CDC، عملکرد فلفل دلمه کاهش یافت. دامنه‌ی ضریب حساسیت این پارامتر بین ۰/۴۸-۰/۷۲ به دست آمد که بر اساس (۴). در دسته‌ی زیاد قرار داشت

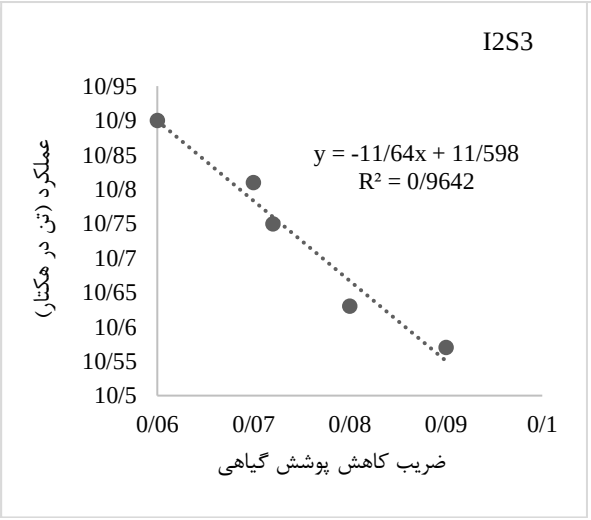

I1S1
y = -6/8375x + 16/013
R² = 0/9831
عملکرد (تن در هکتار)
ضریب کاهش پوشش گیاهی

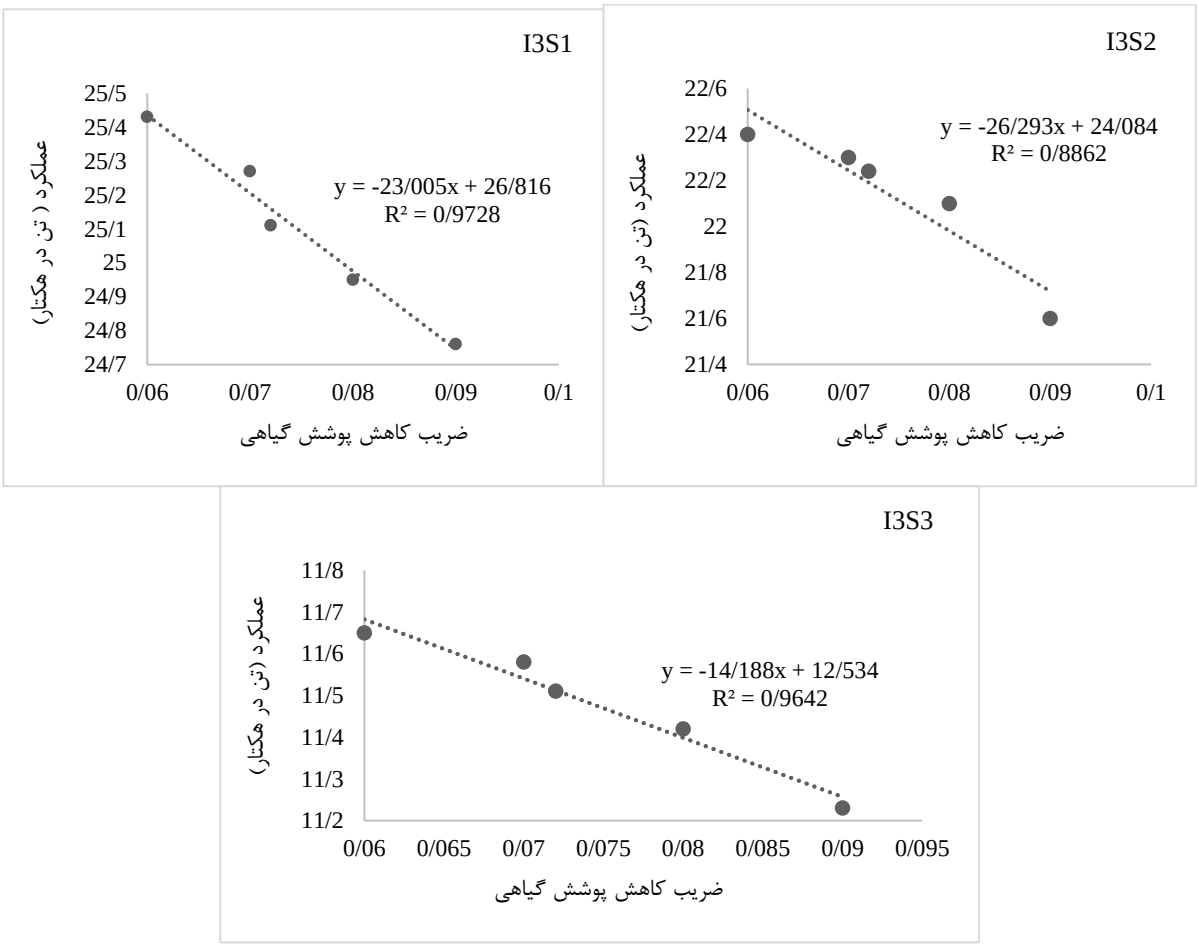

I1S2
y = -6/8375x + 14/013
R² = 0/9831
عملکرد (تن در هکتار)
ضریب کاهش پوشش گیاهی


I1S3
y = -4/5584x + 8/8551
R² = 0/9651
عملکرد (تن در هکتار)
ضریب کاهش پوشش گیاهی


I2S1
y = -12/618x + 22/949
R² = 0/9479
عملکرد (تن در هکتار)
ضریب کاهش پوشش گیاهی

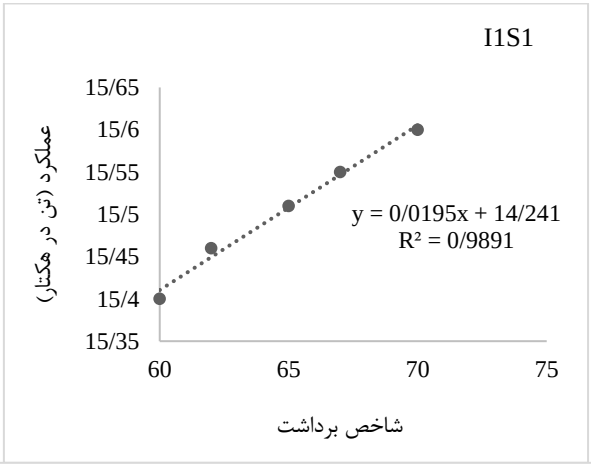

I2S2
y = -7/7208x + 18/162
R² = 0/9604
عملکرد (تن در هکتار)
ضریب کاهش پوشش گیاهی

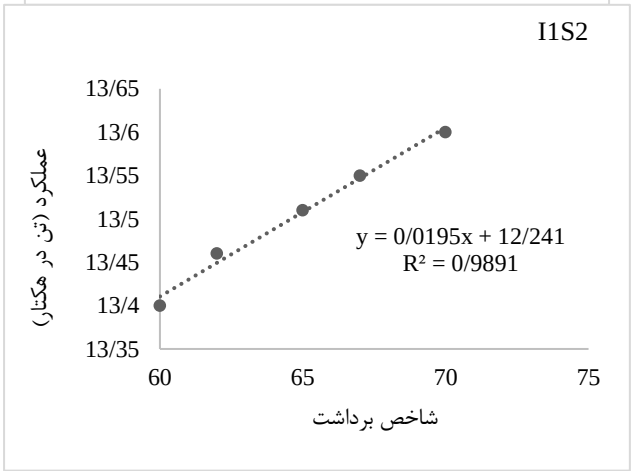

I2S3
y = -11/64x + 11/598
R² = 0/9642
عملکرد (تن در هکتار)
ضریب کاهش پوشش گیاهی

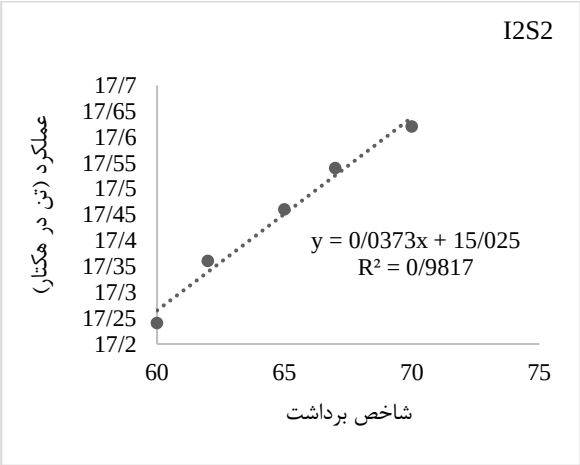


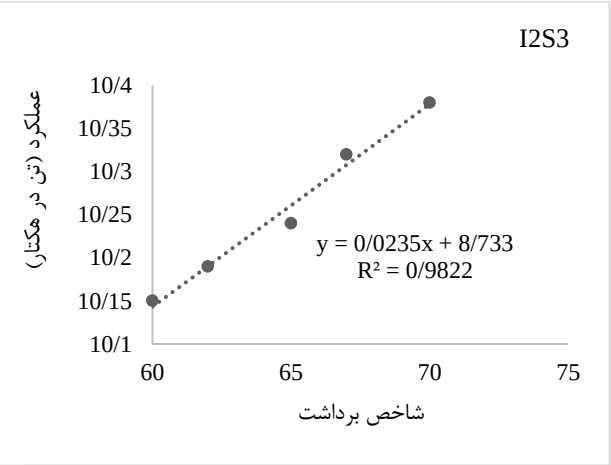

**شکل(۵): اثر تغییر پارامتر ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC) بر نتایج شبیه¬سازی عملکرد گیاه فلفل دلمه در تیمارهای مختلف**

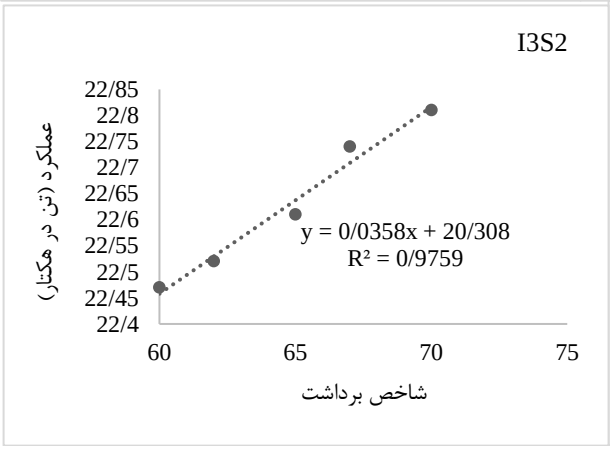
تغییرات عملکرد فلفل دلمه نسبت به مقادیر مختلف شاخص برداشت (HI) در شکل (۶) نشان داده شده است. تغییرات عملکرد نسبت به افزایش شاخص برداشت مستقیم بود. بنابراین با افزایش مقدار شاخص برداشت عملکرد فلفل دلمه افزایش یافت. ضریب حساسیت پارامتر شاخص برداشت در محدوده‌ی ۰/۱۵- ۰/۰۹ قرار داشت که بر اساس جدول (۴) حساسیت مدل نسبت به این پارامتر کم بود. شیب کم نمودارها نیز این مطلب را نشان می‌دهد.

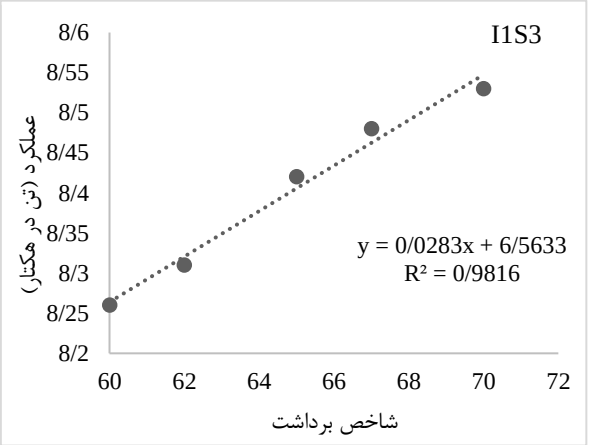

I1S1
15/65
15/6
15/55
15/5
15/45
15/4
15/35
عملکرد (تن در هکتار)
y = 0/0195x + 14/241
R² = 0/9891
60
65
70
75
شاخص برداشت

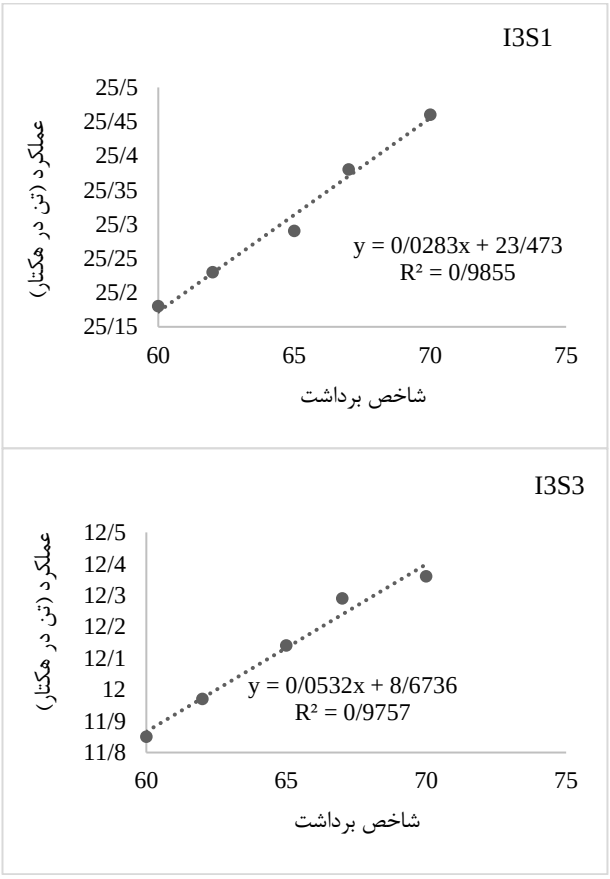

I1S2
13/65
13/6
13/55
13/5
13/45
13/4
13/35
عملکرد (تن در هکتار)
y = 0/0195x + 12/241
R² = 0/9891
60
65
70
75
شاخص برداشت


I2S2
عملکرد (تن در هکتار)
17/7
17/65
17/6
17/55
17/5
17/45
17/4
17/35
17/3
17/25
17/2
y = 0/0373x + 15/025
R² = 0/9817
60
65
70
75
شاخص برداشت


I2S3
عملکرد (تن در هکتار)
10/4
10/35
10/3
10/25
10/2
10/15
10/1
y = 0/0235x + 8/733
R² = 0/9822
60
65
70
75
شاخص برداشت


I3S2
عملکرد (تن در هکتار)
22/85
22/8
22/75
22/7
22/65
22/6
22/55
22/5
22/45
22/4
y = 0/0358x + 20/308
R² = 0/9759
60
65
70
75
شاخص برداشت


I1S3
عملکرد (تن در هکتار)
8/6
8/55
8/5
8/45
8/4
8/35
8/3
8/25
8/2
y = 0/0283x + 6/5633
R² = 0/9816
60
62
64
66
68
70
72
شاخص برداشت

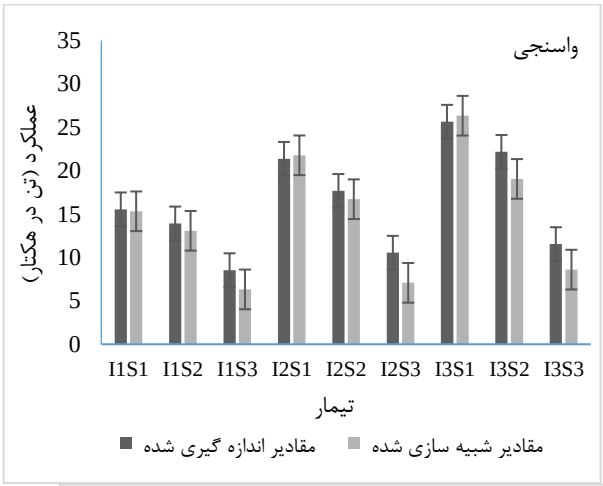


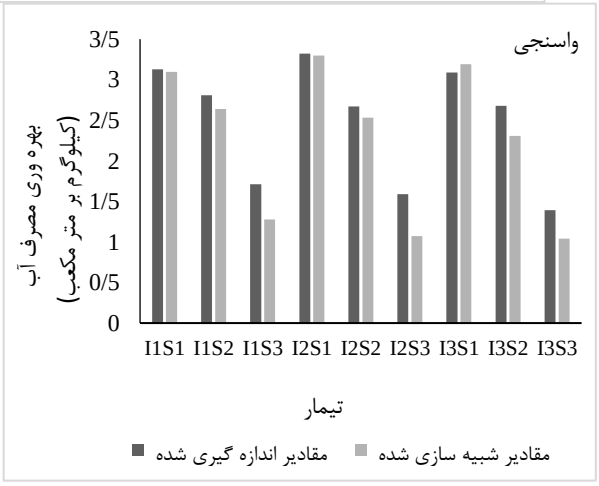

**شکل (۶): اثر تغییر پارامتر شاخص برداشت (HI) بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد گیاه فلفل دلمه در تیمارهای مختلف**

## نتایج واسنجی مدل

واسنجی مدل با توجه به نتایج تحلیل حساسیت، انجام شد. در این مرحله از داده‌های برداشت شده از مزرعه در سال اول برای واسنجی مدل استفاده شد. ابتدا پارامترهای ورودی به مدل مربوط به تیمار شوری ۱ دسی‌زیمنس بر متر وارد مدل شد و آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی انجام گردید. سپس مدل برای این تیمار با تغییر بعضی پارامترهای حساس که در مزرعه اندازه‌گیری نشده بودند شامل ماکزیمم سطح پوشش، بهره وری آب نرمال شده، ضریب رشد پوشش، حداکثر عمق ریشه و ضریب رشد پوشش واسنجی گردید. به‌طوری که خطای نسبی بین عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده حداقل شود. مقایسهٔ عملکرد و بهره‌وری مصرف آب اندازه-گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل اکواکراپ در مرحلهٔ واسنجی در شکل ۷ و مقایسهٔ آماری نتایج در جدول۶ نشان داده شده است

.



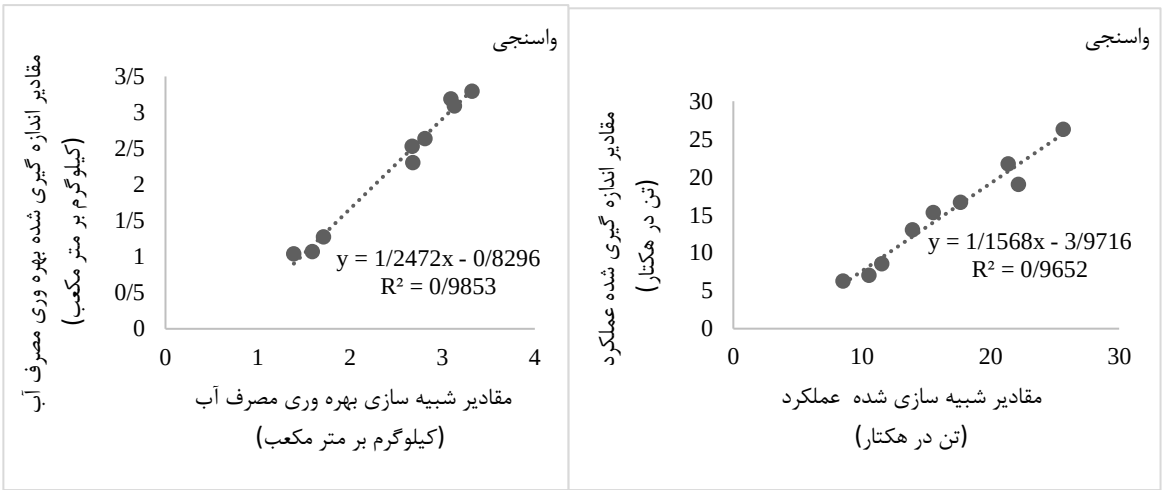

**شکل (۷): مقایسهٔ عملکرد و بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل اکواکراپ در مرحلهٔ واسنجی**

**جدول (۶): مقادیر شاخص‌های آماری برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب فلفل دلمه در مرحله واسنجی**

| پارامتر | EF | RMSE | MBE | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|
| عملکرد (تن در هکتار) | ۰/۸۶ | ۲/۱۴ | -۱/۴۱ | ۰/۹۶ |
| بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب) | ۰/۷۹ | ۰/۲۹ | -۰/۲۱ | ۰/۹۸ |

با توجه به مقادیر خطای مدل بر اساس آماره‌های EF ، RMSE و MBE و مقادیر بالای $R^2$ می‌توان گفت مدل توانسته است با دقت خوبی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب را شبیه‌سازی کند.شکل ۸ همبستگی مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده عملکرد و بهره‌وری مصرف آب فلفل دلمه را در مرحله واسنجی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود بالا بودن مقادیر $R^2$ (۰/۹۸ و ۰/۹۶) نشان‌دهنده نزدیک بودن مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده و پراکندگی ناچیز آن‌ها حول یک خط و برازش خوب مدل می‌باشد. برخی تحقیقات ضرایب تبیین کمتر و برخی بیشتری را برای شبیه‌سازی با مدل اکواکراپ گزارش کرده‌اند که این تفاوت احتمالامی‌تواند به دلیل تفاوت در نوع گیاه مورد بررسی، شرایط اقلیمی و مدیریت آبیاری باشد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴؛ رحیمی خوب و همکاران، ۱۳۹۹). عابدی و همکاران (۱۳۹۸) با مدل اکواکراپ عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گندم را تحت شرایط مختلف ارزیابی مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند مدل با ضریب تبیین ۰/۹۹ به خوبی توانسته است

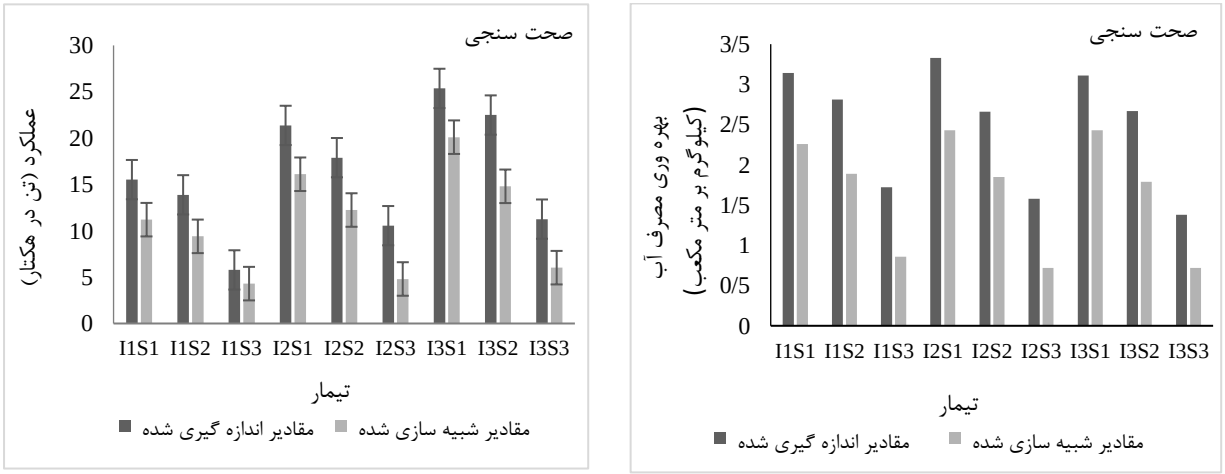
عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گندم را شبیه‌سازی کند. شعبانی و همکاران (2018) از مدل اکواکراپ برای شبیه-سازی عملکرد گیاه سویا در استان گلستان تحت شوری آب دریای خزر و سطوح مختلف آبیاری استفاده نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد مدل پس از واسنجی دقت خوبی در شبیه‌سازی عملکرد سویا در شرایط تنش شوری و آبی دارا بود. توراج‌زاده و همکاران (۱۴۰۳) از مدل اکواکراپ برای شبیه‌سازی کینوا در شرایط تنش شوری و آبی استفاده کردند. ایشان بیان داشتند مدل با ضریب تبیین بالا (۰/۹۷) توانسته است عملکرد را شبیه‌سازی کند.




**شکل (۸): همبستگی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده فلفل دلمه با مدل اکواکراپ در مرحلهٔ واسنجی**

**نتایج صحت‌سنجی مدل**

مقایسهٔ عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در مرحلهٔ صحت‌سنجی در شکل ۹ نشان داده شده است. در این مرحله، مدل اکواکراپ با استفاده از داده‌های برداشت شده از مزرعه در سال دوم مورد ارزیابی قرار گرفت




**شکل (۹): مقایسهٔ عملکرد و بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل اکواکراپ در مرحلهٔ صحت‌سنجی**

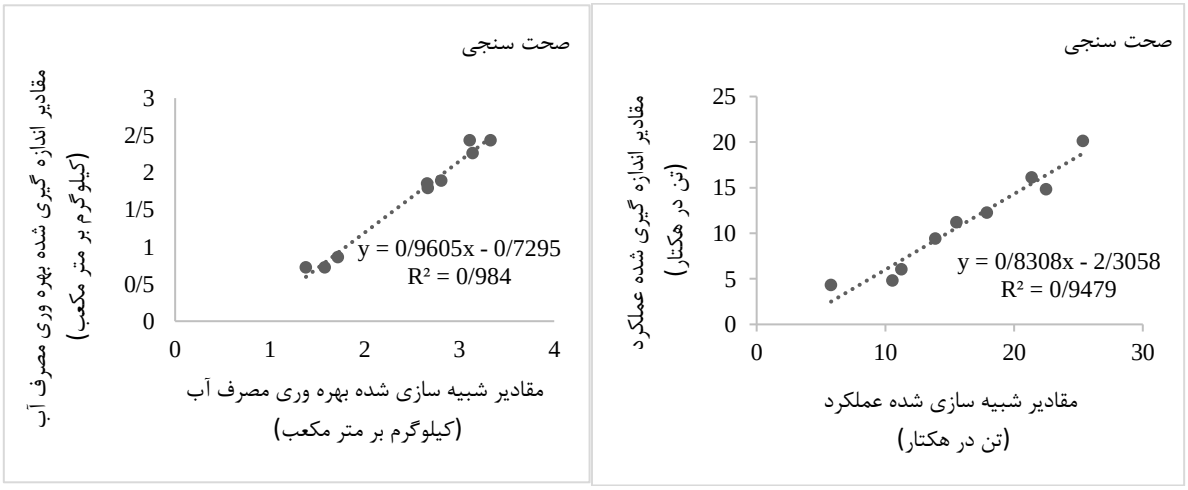
مقایسهٔ آماری نتایج عملکرد و بهره‌وری مصرف آب شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در مرحلهٔ صحت‌سنجی در جدول ۸ نشان داده شده است. با توجه به مقادیر خطای مدل بر اساس آماره‌های EF، RMSE و MBE و مقادیر بالای $R^2$ می‌توان گفت مدل توانسته است با دقت خوبی شبیه‌سازی را انجام دهد

**جدول (۷): مقادیر شاخص‌های آماری برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب فلفل دلمه در مرحله صحت‌سنجی**

| پارامتر | EF | RMSE | MBE | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|
| عملکرد (تن در هکتار) | ۰/۸۱ | ۵/۵۳ | -۵/۰۱ | ۰/۹۴ |
| بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب) | ۰/۷۶ | ۰/۸۳ | -۰/۸۲ | ۰/۹۸ |

شکل (۱۰) همبستگی مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده عملکرد و بهره‌وری مصرف آب فلفل دلمه را در مرحله صحت‌سنجی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود بالا بودن مقادیر $R^2$ (۰/۹۴ و ۰/۹۸) نشان‌دهنده نزدیک بودن مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده و پراکندگی ناچیز آن‌ها حول یک خط و برازش خوب مدل می‌باشد

.




**شکل (۱۰): همبستگی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده فلفل دلمه با مدل اکواکراپ در مرحلهٔ صحت-سنجی**

با توجه به نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در این تحقیق و سایر تحقیقات انجام شده می‌توان گفت در همه مدل‌های گیاهی انتظار رسیدن به مقادیر اندازه‌گیری شده غیرمنطقی است. علت آن نیز می‌تواند به دلیل ساده‌سازی‌هایی باشد که برای شرایط کشت انجام می‌شود. این فرضیات در شرایط تنش بیشتر تغییر می‌کند و باعث می‌شود که اختلاف بین مقادیر شبیه-سازی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده بیشتر شود. (Kale, 2016) نیز اختلاف مشاهده شده بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل اکوکراپ را ناشی از شیوه به‌کار برده شده توسط مدل برای شبیه‌سازی بیان می‌کند. نتایج تحقیق نشان داد خطای مدل اکواکراپ تقریبا در تیمارهایی که دچار تنش شوری و آبی بودند بیشتر بود. به

همین دلیل محققان پیشنهاد می‌کنند که تنش‌های شدید با این مدل گیاهی شبیه‌سازی نشود یا ضریب اطمینان برای تصحیح نتایج آن، با استفاده از تیمارهای بدون تنش یا تنش کم، برآورد گردد (اگدرنژاد و همکاران، ۱۳۹۷). ابراهیمی-پاک و همکاران (۱۳۹۷) و (Heng et al., 2009) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند همچنان نتیجه دیگری که از شبیه‌سازی مدل می‌توان گرفت، روند کاهش عملکرد تحت تاثیر تنش آبی و شوری بود که به خوبی توسط مدل شبیه-سازی شده بود. در تیمارهای تحت تنش شوری مقادیر بهره‌وری آب کمتری هم در مقادیر اندازه‌گیری شده و هم در مقادیر شبیه‌سازی شده بدست آمد. این امر به دلیل عملکرد کمتر در اثر تنش‌های وارده به گیاه و کاهش رشد گیاه و توان تولیدی در تیمارهای تحت تنش نسبت به دیگر تیمارها است که مدل به خوب آن را نشان داده است. در نهایت، می‌توان بیان داشت که مدل اکواکراپ با یک سطح اطمینان قابل قبول می‌تواند در شبیه‌سازی عملکرد و بهره-وری مصرف آب گیاه فلفل دلمه تحت تیمارهای مختلف کمی و کیفی آب آبیاری مورد استفاده قرار گیرد و به عنوان یک ابزار توانمند و کارامد در جهت انتخاب مدیریت بهینه آبیاری به کشاورزان، طراحان، متخصصان و مدیران کشاورزی کمک نماید.

## نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی حساسیت مدل اکواکراپ نسبت به تغییرات پارامترهای رشد گیاه فلفل دلمه تحت تنش‌های آبی و شوری انجام شد. نتایج نشان داد، بیشترین ضریب حساسیت (۰/۷۲) به پارامتر CDC اختصاص داشت. پس از آن، پارامترهای CGC (۰/۵۱) و WP* (۰/۴۵) بیشترین ضریب حساسیت را داشتند. بنابراین به دلیل حساسیت زیاد مدل نسبت به تغییرات این پارامترها، باید این پارامترها با دقت تعیین شوند. زیرا وجود خطا در تعیین این پارامترها تأثیر قابل توجهی بر دقت برآورد توسط مدل خواهد داشت. کمترین ضریب حساسیت (۰/۰۹) در پارامتر HI دیده شد که نشان می‌دهد، مدل نسبت به تغییرات این پارامتر حساسیت کمی داشت. ضرایب حساسیت به‌دست آمده برای تمامی پارامترها به جز پارامتر CDC مثبت بود. به عبارتی با افزایش پارامتر CDC زیست توده گیاه کمتر برآورد خواهد شد. نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل بیانگر دقت و کارایی مناسب مدل در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه فلفل دلمه بود. بنابراین میتوان گفت، اگر چه مدل اکواکراپ نسبت به سایر مدل‌های گیاهی به داده‌های ورودی کمتری نیاز دارد، با این وجود از دقت و توانمندی بالایی در شبیه‌سازی رشد گیاه برخوردار است و می-توان از آن به عنوان ابزاری کارآمد برای برآورد عکس‌العمل گیاه نسبت به مقدار کمیت و کیفیت آب مصرفی استفاده کرد

## سپاسگزاری

این مقاله با حمایت مالی دانشگاه زابل کد پژوهانه UOZ-GR-1837 انجام شده است.

## منابع

ادبی، و.، ا.، عزیزیان، ه.، رمضانی‌اعتدالی، ع.، کاویانی، و ب.، آبابایی. ۱۳۹۸. آنالیز حساسیت موضعی مدل AquaCrop برای دو محصول گندم و ذرت در دو منطقه دشت قزوین و پارس‌آباد مغان. آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳(۶):۱۵۷۹-۱۵۶۵.

احمدی، م.، خاشعی سیوکی، ع.، و م. ح سیاری. ۱۳۹۵. بررسی مدل مناسب تعیین نیاز آبی زعفران (Crocus sativus L) و تعیین میزان تنش‌های آبی وارده. بوم شناسی. ۸(۴-۴): ۵۲۰-۵۰۵.

بنی‌فری، ج.، ج.، اگدرنژاد، ع.، مختاران، م.، اسدی‌لور، و د، خدادادی‌دهکردی. ۱۴۰۳. تحلیل حساسیت پارامترهای رشد گیاه پنبه در مدل AquaCrop تحت مدیریتهای مختلف زراعی. آبیاری و زهکشی ایران، ۱۸(۳): ۵۲۹-۵۱۵.

گلابی، م و ع.ع. ناصری. ۱۳۹۴. ارزیابی مدل AquaCrop در پیشبینی عملکرد نیشکر و شوری پروفیل خاک تحت تنش شوری. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۶(۴): ۶۹۴-۶۸۵.

Abedi, M., A., Eghderanjad, and N.A, Ebrahimipak. 2019. Evaluation of AquaCrop model in simulating grain yield and wheat water consumption efficiency under different irrigation conditions in the field. Iran Scientific Journal of Agriculture and Plant Breeding, 15(1):1-14.

Ahmadee, M., M., Ghanbarpouri, and A., Egdernezhad. 2021. Applied irrigation water of wheat using sensitivity analysis and evaluation of AquaCrop. Water Management in Agriculture, 8(1), 15-30 (in Persian).

Ahmadi, S.H., E., Mosallaeepour, A.K., KamgarHaghighi and A.R., Sepaskhah. 2015. Modeling maize yield and soil water content with AquaCrop under full and deficit irrigation managements. Water Resources Management. 29, 2837-2853. (In Persian)

Beven, K. 1979. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. Journal of Hydrology, 44(3-4), 169-190.

Ebrahimipak, N.A., M., Ahmadee, A., Egdernezhad, and A., KhasheiSiuki. 2018. Evaluation of AquaCrop to simulate saffron (crocus sativus L.) yield under different water management scenarios and zeolite amount. Journal of Water and Soil Resources Conservation, 8(1), 117-132 (in Persian)

Ebrahimi-Pak, N.A., M., Ahmadi, A., Eghderanjad and A., Khashai-Siyuki, 2017. Evaluation of AquaCrop model in simulating saffron performance under different scenarios of low irrigation and zeolite consumption. Water and Soil Resources, 8(1):129-118. (In Persian)

Geerts, S., D., Raes, M., Garcia, R., Miranda, J., Cusicanqui, C., Taboada, J., Mendoza, R., Huanca, A., Mamani, O., Condori, J., Mamani, B., Morales, V., Osco, and P., Steduto. 2009.Simulating Yield Response of Quinoa to Water Availability with AquaCrop. Agronomy Journal, 101(3):499-508.

Guo, D., R., Zhao, X., Xing, and X., Ma. 2019. Global sensitivity and uncertainty analysis of the AquaCrop model for maize under different irrigation and fertilizer management conditions. Archives of Agronomy and Soil Science, 1-19.

Heng, L.k., T.C., Hsiao, S., T., Evett, Howell, and P., Steduto, 2009. Validating the FAO AquaCrop model for Irrigated and Water Deficient field maize, Agronomy Journal. 101(3):488-498.

Kale, S. 2016. Assessment of aquacrop model in the simulation of wheat growth under different water regimes. Scientific Papers. Series A. Agronomy, Vol. LIX.

Karimi Avargani H., A, .Rahimikhoob and M., Nazari Fard 2019. Sensitivity Analysis of Aquacrop Model for Barley in Pakdasht Region. Journal of Water and Soil Science. 2019; 23 (3) :53-63. (In Persian)

Lenhart, T., K., Eckhardt, N.Fohrer, and H. Frede. 2002. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 27(9-10), 645-654.

Mohammadi, M. b., Hero, K., Judgement, H., Ansari, and A., Shahidi. 2014. Validation of AquaCrop model in order to simulate the performance and efficiency of water consumption of winter wheat under simultaneous conditions of salinity and drought stress. Water and Soil Journal (Agricultural Sciences and Industries): 29(1):67-84. (In Persian)

Nasrolahi, Al. H., M., Ahmadee, and R., Rustum. 2024. Sensitivity Analysis of AquaCrop Model for Winter Wheat in Different Water Supply Conditions, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 150 (2), doi: https://doi.org/10.1061/JIDEDH.IRENG-10099.

Pajohideh, S. K., A., Eghderanjad, and F., Abbasi. 2023. Sensitivity analysis of corn plant growth parameters in the AquaCrop model under the interaction of water stress and nitrogen fertilizer. Water Management in Agriculture, 10(1):190-175. (In Persian)

Raes, D., P., Steduto, T. C., Hsiao, and E., Fereres, 2009. AquaCrop - the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. Agronomy Journal. 101(3): 438–447.

Rahimikhoob H., T., Sohrabi and M., Delshad. 2019. Performance evaluation of AquaCrop model in simulating Basil (Ocimum basilicum L.) growth under different soil fertility stress in controlled greenhouse conditions. Iranian journal of soil and water research. Accepted for publication. (In Farsi)

Shabani, A., M., Zakarinia, and M., Hossam. 2018. Evaluation of the effectiveness of the Aquacrop model in simulating the yield of Williams cultivar soybeans in Golestan province under salinity stress caused by Caspian Sea water and different irrigation levels. Irrigation Science and Engineering, 42(1):62-49. (In Persian)

Steduto, P., T. C., Hsiao, D., Raes, and E., Fereres. 2009. AquaCrop: The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agronomy Journal, 101(3): 426-437.

Tourajzadeh, O., H., Piri, M., and Barati. 2024. Sensitivity analysis and evaluation of AquaCrop model in simulating water productivity and quinoa yield under different irrigation water amount and salinity management and Biochar and NanoBiochar application. Journal of Water and Soil Conservation, 31 (1), 1-25.

Vanuytrecht, E., Raes, D., and Willems, P. 2014. Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model. Environmental Modelling & Software, 51, 323-332.