



Evaluation of Yield and Water Use Efficiency of Greenhouse Cucumber in Drip and Capillary Wick Irrigation Systems in Different Soil Textures Using Aquacrop Model

Jalal Jalili¹ | Hamid Zareabyaneh^{2✉}

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran. E-mail: j.jalili@acecr.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran. E-mail: zare@basu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 26 April 2023

Received in revised form

22 June 2023

Accepted 30 August 2023

Published online 17 January 2024

Keywords:

Cultivation substrate

Evaluation

Growth simulation

Irrigation method

Subsurface

ABSTRACT

This study was performed to evaluate the AquaCrop model in the crop yield, biomass, crop, and biomass water use efficiency of greenhouse cucumber with two methods of the capillary wick and drip irrigation and three soil textures including Clay-Loam marked with (S₁), Sandy-Clay-Loam (S₂) and Sandy-Loam (S₃) in three replications and two cultivation periods in spring 2018 period (1) and autumn 2018 period (2). Data analysis was done based on compound analysis of variance and mean comparison was done based on Duncan's multi-range test. The data of the first period was used for calibration and sensitivity analysis, and the data of the second period was used to validate the model. The root-mean-square error (nRMSE) and coefficient of determination (R²) were used to validate the model. Based on results in the drip irrigation system, the maximum yield, and water use productivity were observed with 79.64 ton/ha and 46.54 kg/m³ in T2S₁ treatment, and in the capillary wick irrigation system, the highest yield, and water use efficiency were observed with 62.05 ton/ha and 44.76 kg/m³ in W2S₃. The model investigation results revealed that the highest simulation accuracy was observed in W2S₃ treatment so that the nRMSE index in crop yield, biomass yield, crop water use efficiency and biomass water use efficiency were respectively 2.80, 1.70, 1.10, and 1.70 percent were calculated. Due to the optimality of all conditions in the model, most of the estimated parameters were higher than the observational data, still, the increasing and decreasing trend of model simulation in estimating product performance values was completely consistent with the observed data.

Cite this article: Jalili, J., & Zareabyaneh, H. (2024). Evaluation of Yield and Water Use Efficiency of Greenhouse Cucumber in Drip and Capillary Wick Irrigation Systems in Different Soil Textures Using Aquacrop Model. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (4), 909-928. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.358372.1068>





بررسی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب خیار گلخانه‌ای در دو سیستم آبیاری قطره‌ای و فیتله‌ای مویینگی در بافت‌های مختلف خاک با استفاده از مدل AquaCrop

جلال جلیلی^۱ | حمید زارع‌ایبانه^۲ ✉

۱. آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران. رایانامه: j.jalili@acecr.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران. رایانامه: zare@basu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

این پژوهش به منظور ارزیابی مدل AquaCrop در برآورد عملکرد محصول و زیست‌توده و بهره‌وری مصرف آب نسبت به محصول و زیست‌توده، گیاه خیار گلخانه‌ای با دو تیمار آبیاری قطره‌ای (TI) و فیتله‌ای مویینگی (CWI) و سه نوع خاک با بافت‌های مختلف؛ لومرسی با نشان (S1)، لومرسی شنی (S2) و لوم‌شنی (S3) در سه تکرار و دو دوره کشت در بهار ۹۷ دوره (۱) و پاییز ۹۷ دوره (۲) انجام شد. تحلیل داده‌ها براساس تجزیه واریانس مرکب و مقایسه میانگین‌ها براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن انجام گرفت. برای ارزیابی نتایج از داده‌های دوره اول برای واسنجی و آنالیز حساسیت و از داده‌های دوره دوم جهت اعتبارسنجی مدل استفاده شد. برای اعتبارسنجی مدل از ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده حداکثر میزان عملکرد محصول و بهره‌وری مصرف آب نسبت به محصول در سیستم آبیاری قطره‌ای به‌ترتیب با میزان ۷۹/۶۴ تن در هکتار و ۴۶/۵۳ کیلوگرم بر مترمکعب در تیمار T2S1 و در سیستم آبیاری فیتله‌ای با میزان ۶۲/۰۵ تن در هکتار و ۴۴/۷۷ کیلوگرم بر متر مکعب در تیمار W2S3 مشاهده شد. بیش‌ترین دقت شبیه‌سازی در تیمار W2S3 مشاهده شد، به‌طوری‌که میزان شاخص nRMSE در صفات عملکرد محصول، عملکرد زیست‌توده و بهره‌وری مصرف آب نسبت به محصول و نسبت به زیست‌توده به‌ترتیب با میزان ۲/۸۰، ۱/۷۰ و ۱/۱۰ درصد محاسبه شد. به‌دلیل بهینه‌بودن شرایط شبیه‌سازی مدل، مقادیر اکثر پارامترهای برآوردشده نسبت به داده‌های مشاهداتی بالاتر بود، اما روند افزایشی و کاهش‌ی شبیه‌سازی مدل در برآورد مقادیر عملکرد محصول کاملاً مطابق با داده‌های مشاهداتی بود.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷

کلیدواژه‌ها:

بستر کشت

روش‌های آبیاری

زیرسطحی

شبیه‌سازی رشد

استناد: جلیلی، جلال و زارع‌ایبانه، حمید (۱۴۰۲). بررسی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب خیار گلخانه‌ای در دو سیستم آبیاری قطره‌ای و فیتله‌ای مویینگی در بافت‌های مختلف خاک با استفاده از مدل AquaCrop. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۳ (۴)، ۹۰۹-۹۲۸.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.358372.1068>



۱. مقدمه

خیار (*Cucumis sativus* L.) یکی از محصولات جالیزی از خانواده کدوییان (Cucurbitaceae) است که در اکثر مناطق ایران، به‌ویژه مناطق گرم و نیمه‌گرم (طبق آمار ۲۰۱۸) در سطحی معادل ۷۹۴۶۹ هکتار با عملکردی معادل ۲۲۸۳۷۵۰ تن در فضای باز و گلخانه کشت می‌گردد (Karimi et al., 2021). براساس گزارش سازمان خواروبار جهانی (فائو)، ایران رتبه سوم جهانی تولید محصولات خانواده کدوییان را در اختیار دارد (FAO, 2019). اهمیت این محصول در تازه‌خوری آن در قالب سبزی و سالاد و فرآوری شده آن به‌صورت شوری‌جات و ترشی‌جات است (Pilling et al., 2020). مدل‌سازی عملکرد محصول، بهره‌وری آب در محصولات گلخانه‌ای و توسعه روش‌های نوین آبیاری در گلخانه‌ها، از جمله راه‌های اطمینان بخش تولید و عملکرد بیش‌تر است. لذا استفاده از سامانه با راهبری ساده، داشتن برنامه آبیاری مناسب، آگاهی از میزان عملکرد و بهره‌وری آب مصرفی در محیط گلخانه از الزامات کارایی کشت در گلخانه‌هاست. یکی از عوامل مهم برای افزایش تولیدات کشاورزی، استفاده بهینه از منابع آب و خاک، اعمال مدیریت صحیح در روابط منظم آب، خاک و گیاه و ایجاد یک کشاورزی پایدار است (Xu et al., 2019; Fadul et al., 2020). به‌کارگیری روش‌های نوین آبیاری، اهمیت ویژه‌ای در بهبود کارایی مصرف آب مبتنی بر تولید بیش‌تر دارند (Hoogenboom et al., 2004). سامانه آبیاری فتیله‌ای ۲ نوعی روش آبیاری زیرسطحی است که شامل یک فتیله برای انتقال آب براساس خاصیت موینگی از یک مخزن به گیاه است. سامانه‌های آبیاری زیرسطحی در مقایسه با سامانه‌های آبیاری معمولی از نظر صرفه‌جویی در نیروی کارگری، مقدار آب مصرفی، وقت و هزینه‌های آب، انرژی و مواد مغذی مصرفی کارآمدتر هستند (Son et al., 2006). از دیگر ویژگی‌های آبیاری فتیله‌ای عدم سخت‌شدن خاک و توانمندی در بالابردن آب، تا ارتفاع ۱۰ الی ۲۰ سانتی‌متر است (Lee et al., 2010; Wesonga et al., 2014). پژوهش‌گران عنوان کرده‌اند که بهره‌گیری از روش آبیاری فتیله‌ای می‌تواند منجر به حذف تلفات تبخیر و نفوذ عمقی و افزایش عملکرد تر و خشک ۱/۴ و ۱/۷ برابری در گیاه ذرت و کارایی ۲/۵ برابری مصرف آب نسبت به آبیاری سطحی شود (Jodeyri Heydari and Liaghat, 2020).

علاوه بر سامانه آبیاری استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاه و در نتیجه پیش‌بینی عملکرد محصول، می‌تواند موجب برنامه‌ریزی بهتر و مدیریت مناسب در روند تولید محصول گردد. در دهه‌های اخیر مدل‌های زیادی برای شبیه‌سازی رشد محصولات زراعی و مدیریت آب و خاک در شرایط محیطی، تغذیه‌ای و رطوبتی متفاوت ارائه شده است (Khalili et al., 2015). مدل شبیه‌ساز AquaCrop که در سال ۲۰۰۹، از اصلاح و بازنگری نشریه شماره ۳۳ فائو و براساس معادله دورنباس و کاسام در گام محاسباتی روزانه برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات کشاورزی ارائه شده است (Steduto et al., 2009) در دسته مدل‌های ساده، با داده‌های ورودی کم، کاربرپسند و دارای دقت قابل‌قبول در شبیه‌سازی عملکرد، محدوده وسیعی از محصولات زراعی در رژیم‌های مختلف آبیاری دیم، تکمیلی، کم‌آبیاری و آبیاری کامل را شبیه‌سازی می‌نماید (Heng et al., 2009; Raes et al., 2012).

Hashem et al. (2011) بهره‌وری مصرف آب در خیار گلخانه‌ای طی دو سال ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ در گلخانه‌ای واقع در مصر را ۲۶/۵ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش کردند. Aly et al. (2015) نیز میزان بهره‌وری مصرف آب خیار گلخانه‌ای در عربستان را ۲۷/۹ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش نمودند. Semananda et al. (2016) در تحقیقی در آدلاید استرالیا نشان دادند که روش آبیاری فتیله‌ای در مقایسه با سیستم آبیاری سطحی با عمق بستر خاک ۳۰ سانتی‌متر برای گیاه گوجه‌فرنگی منجر به کاهش ۵۰ درصدی میزان آبیاری نسبت به روش آبیاری سطحی شد. نتایج مقایسه عملکرد سیستم آبیاری قطره‌ای و فتیله‌ای در کشت گیاه طالبی حاکی از برتری سیستم آبیاری فتیله‌ای در صرفه‌جویی آب مصرفی و کیفیت بهتر محصول عمل آمده در سیستم آبیاری فتیله‌ای دارد (Abioye et al., 2020).

نتایج پژوهش *Khafajeh et al.* (2020) بیان‌گر توانایی مدل AquaCrop در تخمین تبخیر و ترق گیاه خیار گلخانه‌ای با کم‌ترین خطا و داشتن دقت قابل‌قبولی از برآورد میزان عملکرد خیار و زیست‌توده محصول خیار گلخانه‌ای در صورت مدیریت مناسب محصول و کنترل شرایط محیطی گلخانه است.

Darko et al. (2016) توانایی مدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی عملکرد و نیاز آبی گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط آبیاری کامل و کم‌آبیاری گزارش نمودند. نتایج پژوهش *Takács et al.* (2021) با عنوان ارزیابی عملکرد مدل AquaCrop در برآورد عملکرد محصول و زیست‌توده گیاه گوجه‌فرنگی نشان داد که مدل از دقت بالایی در برآورد صفات مذکور برخوردار است. *Rahimikhoob et al.* (2020) با کشت گلدانی گیاه ریحان در محیط گلخانه تحت تیمارهای مختلف کود اوره، توانایی شبیه‌سازی متغیرهای زیست‌توده گیاه در مدل AquaCrop را در قالب آماره‌های R^2 و MBE و nRMSE به ترتیب در دامنه ۰/۹۵-۰/۹۸، ۱/۷۲-۲۱/۵۶ گرم بر مترمربع و ۱۷/۴۲-۱۹/۰۷ درصد گزارش نمودند. در مطالعه *Najafipour et al.* (2020) نیز میزان بهره‌وری آب در گلخانه‌های فعال در کشت خیار استان قزوین را بین ۹/۲۳ تا ۲۲/۴۴ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش نمودند.

بنابراین، امروزه مدل‌های گیاهی ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی پارامترهای مهم کشاورزی می‌باشند. مدل AquaCrop که بر مبنای آبیاری و شبیه‌سازی عملکرد محصول تولیدی است با به‌وجود آمدن روش‌های نوین آبیاری، بایستی مورد ارزیابی و تأیید قرار گیرد. خیار نیز جزو محصولات عمده جالیزی و گلخانه‌ای در ایران است که دستیابی به محصول بیش‌تر و بهره‌وری بالاتر مدنظر است و در زمره گیاهان پیش‌فرض مدل AquaCrop نیز قرار ندارد. بررسی منابع نشان داد پژوهش‌هایی در خصوص مقایسه عملکرد و بهره‌وری مصرف آب محصول و زیست‌توده گیاه خیار گلخانه‌ای تولیدی در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای و فنیله‌ای و در قالب مدل AquaCrop صورت نگرفته است. لذا پژوهش حاضر به‌منظور بررسی عملکرد محصول و زیست‌توده گیاه خیار گلخانه‌ای و بهره‌وری مصارف آب این صفات متأثر از دو روش آبیاری قطره‌ای و روش جدید فنیله‌ای موبینگی در بافت‌های مختلف خاک لومرسی، لومرسی‌شنی و لوم‌شنی طی دو دوره کشت در محیط گلخانه انجام گرفته است و برای تصمیم‌گیری در استفاده از روش آبیاری فنیله‌ای برای سایر محصولات گلخانه‌ای و استفاده از مدل AquaCrop در مدیریت بهتر این نوع مزارع نتایج نیز با مدل ارزیابی شده است.

۲. مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه پژوهشی جهاد دانشگاهی کرمانشاه واقع در طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۶ دقیقه و ۲۳ ثانیه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۳ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و با ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا اجرا شد. ابعاد سالن گلخانه ۱۵×۴/۴ با ارتفاع سه متر، از نوع چند تونلی با روکش نایلونی مقاوم به اشعه UV، مجهز به سیستم شوفاژ، لوله‌های گرمایش کف و جدار، سیستم خنک‌کننده کولر آبی و فن‌های تهویه هوا و سیرکولاتور بود. به‌منظور ارزیابی تأثیر دو سیستم آبیاری فنیله‌ای و قطره‌ای بر خصوصیات گیاهی خیار گلخانه‌ای و مقایسه نتایج با مدل AquaCrop، طرحی گلدانی در قالب بلوک‌های کامل تصادفی و آزمایش فاکتوریل در سه تکرار با دو دوره کشت اجرا شد. گلدان‌ها از جنس پلاستیک با حجم ۱۶ لیتر با قطر کف ۲۴، قطر دهانه ۲۸ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر بودند. در کف هر گلدان یک لوله زهکش منفذدار نصب، ۵ سانتی‌متر اطراف آن ماسه معمولی ریخته شد و در نهایت با خاک پر شد. در هر گلدان یک بوته خیار رقم ناگین ۱۴ روزه نشا و بلافاصله به مقدار یکسان آبیاری دستی انجام شد. این آزمایش طی دو دوره کشت و دو روش آبیاری قطره‌ای و فنیله‌ای در سه بافت خاک رسی‌لومی، شنی‌رسی‌لومی و شنی‌لومی با نشان‌های اختصاری و تیمارهای معرفی شده مطابق جدول (۱) اجرا شد.

Table 1. Introduction of the applied treatments on the cucumber plant

Irrigation System	Cultivation Period	Soil	Treatment	Treatments applied to cucumber plants
Drip Irr. (T)	First 1	Clay-Loam S ₁	T1S ₁	The first cultivation period in Clay-Loam soil texture and drip irrigation system
			T1S ₂	The first cultivation period in Sandy-Clay-Loam soil texture and drip irrigation system
			T1S ₃	The first cultivation period in Sandy-Loam soil texture and drip irrigation system
		Sandy-Clay Loam S ₂	W1S ₁	The first cultivation period in Clay-Loam soil texture and wick irrigation system
			W1S ₂	The first cultivation period in Sandy-Clay-Loam soil texture and wick irrigation system
			W1S ₃	The first cultivation period in Sandy-Loam soil texture and wick irrigation system
Wick Irr. (W)	Secend 2	Clay-Loam S ₁	T2S ₁	The second cultivation period in Clay-Loam soil texture and drip irrigation system
			T2S ₂	The second cultivation period in Sandy-Clay-Loam soil texture and drip irrigation system
			T2S ₃	The second cultivation period in Sandy-Loam soil texture and drip irrigation system
		Sandy-Loam S ₃	W2S ₁	The second cultivation period in Clay-Loam soil texture and wick irrigation system
			W2S ₂	The second cultivation period in Sandy-Clay-Loam soil texture and wick irrigation system
			W2S ₃	The second cultivation period in Sandy-Loam soil texture and wick irrigation system

فتیله مورد استفاده ترکیبی از الیاف پشم، پنبه، ریون و پلی‌استر تعبیه شده در لوله پلی‌اتیلن ۱۶ میلی‌متری به طول ۴۵ سانتی‌متر بود که وظیفه انتقال آب به ریشه گیاه را داشت. نقش لوله ۱۶ میلی‌متر ممانعت از تبخیر آب در مسیر انتقال بیرون گلدان و ممانعت از انتشار آب در مسیر داخل خاک تا محل انتشار آب در کنار ریشه است. تغذیه گیاهان به صورت یکسان و به صورت محلول کودآبیاری انجام شد و عملیات آبیاری در سیستم آبیاری فتیله‌ای به صورت پیوسته به اندازه نیاز آبی گیاه (تبخیر و تعرق) با مکش فتیله‌ها و در سیستم قطره‌ای با کنترل درصد رطوبت حجمی خاک در محدوده بالاتر از ضریب تخلیه مجاز رطوبتی برای گیاه به کمک رطوبت‌سنج دیجیتال مدل PMS-714 و بررسی خصوصیات ظاهری برگ‌های گیاه انجام شد. حجم مصرف آب روزانه در سیستم فتیله‌ای با اندازه‌گیری آب داخل مخزن اصلی تغذیه، کنترل و ثبت شد و در سیستم آبیاری قطره‌ای نیز میزان خروجی آب از نازل‌ها اندازه‌گیری شد. مقادیر آب آبیاری برحسب میلی‌متر ارتفاع آب بر متوسط سطح گلدان ۵۳۱ (سانتی‌مترمربع) در دو دوره کشت در روش‌های آبیاری قطره‌ای و فتیله‌ای موبینگی طی دوره رشد محصول (دوره اول کشت ۱۲۰ و در دوره دوم کشت ۱۲۳ روز) اندازه‌گیری و به صورت تجمعی در شکل (۱) ارائه شده است. در دوره اول کشت حداکثر میزان آبیاری صورت گرفته تا انتهای دوره رشد گیاه خیار به ترتیب در روش‌های آبیاری قطره‌ای و فتیله‌ای ۶۸۱ و ۵۹۶ میلی‌متر می‌باشد. در دوره دوم کشت نیز در روش آبیاری قطره‌ای ۷۰۳ میلی‌متر و در روش فتیله‌ای ۶۰۹ میلی‌متر آب در اختیار گیاه قرار گرفته است.

شروع کشت در دو زمان اول اسفندماه ۹۶ و شهریورماه ۹۷ به روش گلدانی با بستر کشت خاکی انجام شد. قبل از کشت یک نمونه مرکب از خاک آماده شده برداشت و به آزمایشگاه ارسال گردید برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد استفاده و آب آبیاری در جدول‌های (۲) و (۳) ارائه شده است.

داده‌های هواشناسی شامل حداکثر و حداقل دمای روزانه، حداکثر و حداقل رطوبت نسبی و تابش کوتاه رسیده به داخل گلخانه با استفاده از تجهیزات نصب شده در گلخانه از قبیل دماسنج، رطوبت‌سنج نسبی هوا مدل TESTO-174H ساخت کشور آلمان و لوکس‌متر قابل حمل مدل TES 1339 ساخت کشور تایوان داده‌ها به صورت روزانه برداشت گردید.

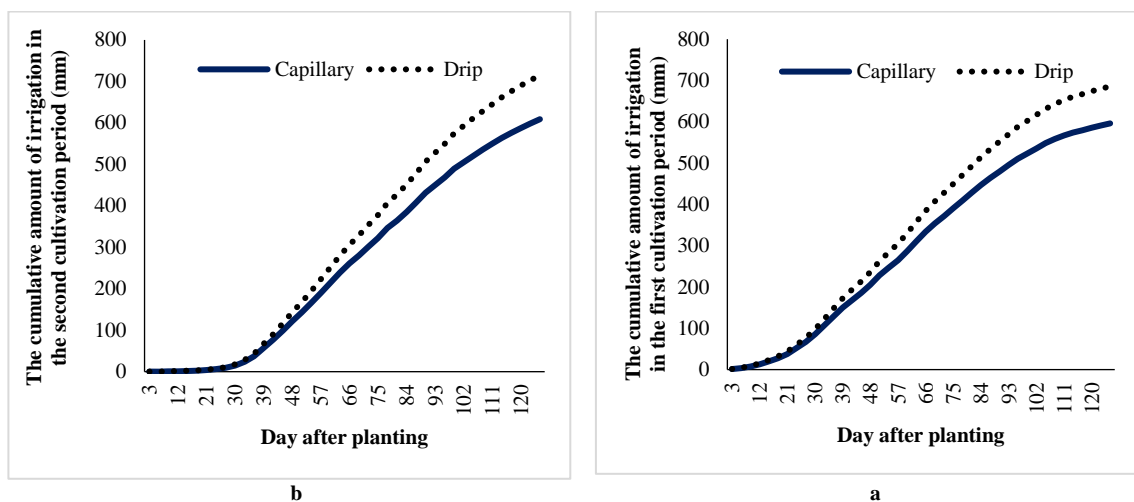


Figure 1. Amounts of irrigation in the first period (a) and the second period (b) of cultivation in two drip and capillary irrigation methods

Table 2. Soil physical and chemical characteristics

Soil	Soil Texture	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	OC (%)	P (ppm)	K (ppm)	ρ_b (g.cm ⁻³)	Volumetric humidity (%)		
									Saturation Moisture	Field Capacity	Wilting Point
S ₁	Clay-Loam	33	31	36	1.15	15.18	211	1.3	50	39	22
S ₂	Sandy-Clay -Loam	55.5	20.7	23.8	0.63	10.21	120	1.43	47	32	17
S ₃	Sandy-Loam	65.2	16.3	18.5	0.35	9.17	70	1.5	41	22	11

Table 3. Chemical characteristics of irrigation water

EC	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ³⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ²⁻	SAR
(μ s/cm)	-	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(mg/L)0.5
260	7.1	200	150	22	4.2	48	100	80	300	0.118	0.137	1.66

شدت نور در محدوده صفر تا ۱۵۰۰۰ لوکس در دو دوره کشت در طول شبانه روز نوسان داشت و شدت نور با سایه بان توری مخصوص گلخانه تنظیم شد. دمای روزانه و شبانه در طول دوره رشد گیاه در هر دو دوره کشت به ترتیب ۱۸±۳ و ۲۸±۳ درجه سانتی گراد بود. فایل اقلیمی مورد نیاز مدل AquaCrop براساس داده های روزانه هواشناسی ثبت شده، تهیه شد. پارامترهای گیاهی اندازه گیری شده در این پژوهش وزن کل میوه و وزن کل بوته گیاه و میزان آب مصرفی در دو دوره کشت است. برداشت میوه ها در دوره اول کشت از اواسط فروردین ماه و در دوره دوم نیز از اوایل آبان ماه آغاز گردید و در این مدت در هر برداشت تمامی میوه های روی بوته با اندازه های مناسب مصرف برداشت گردید. در هر برداشت وزن هر میوه در هر بوته به کمک ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه گیری شد. در هر دوره کشت در انتهای دوره، زیست توده هر بوته خیار که شامل وزن کل اندام گیاه خیار کف بر شده است که با استفاده از ترازوی دیجیتالی اندازه گیری شد. همچنین جهت بررسی اثر تیمارهای اعمال شده بر گیاه خیار پارامترهای مدنظر شامل عملکرد محصول و عملکرد زیست توده برحسب (تن بر هکتار) اندازه گیری شد.

برای تحلیل آب به کاررفته در سطوح مختلف زراعی با استفاده از تعریف بهره‌وری آب (میزان ماده تولید شده به ازای مقدار مصرف آب) برحسب کیلوگرم محصول بر مترمکعب آب محاسبه شد و مقادیر کمی بهره‌وری آب آبیاری نیز براساس روابط (۱) و (۲) برای عملکردهای محصول و زیست توده جداگانه محاسبه گردید (Kiyani, 2015).

$$WP_{yield} = \frac{Y_{yield}}{W} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$WP_{biomass} = \frac{Y_{biomass}}{W} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن‌ها، WP_{yield} : بهره‌وری مصرف آب نسبت به محصول (kg/m^3)، $WP_{biomass}$: بهره‌وری مصرف آب نسبت به زیست‌توده (kg/m^3)، Y_{yield} : عملکرد محصول (kg/ha)، $Y_{biomass}$: عملکرد زیست‌توده (kg/ha)، W : مقدار آب آبیاری (m^3/ha) می‌باشند.

جهت تحلیل‌های آماری در این پژوهش از نرم‌افزار SAS استفاده شد و ترسیم شکل‌ها نیز در محیط Excel انجام شد. به‌منظور بررسی مقایسه میانگین‌ها نیز آزمون چنددامنه‌ای دانکن مورداستفاده قرار گرفت. سپس مقادیر مشاهداتی و اندازه‌گیری‌شده در محیط گلخانه با مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط نرم‌افزار AquaCrop مورد قیاس و ارزیابی قرار گرفت.

۲.۱. تئوری مدل AquaCrop

مدل AquaCrop که تکامل و توسعه‌یافته مدل Budget است، دارای ساختار پیوسته خاک، گیاه و اتمسفر بوده و با چهار جزء اساسی سروکار دارد؛ خاک، محصول (رشد، توسعه و عملکرد)، اتمسفر (رژیم حرارتی، بارش، نیاز تبخیر و غلظت دی‌اکسید کربن) و روابط بین بخشی شرایط محیطی، تنش‌ها و واکنش گیاه (Raes *et al.*, 2012). این مدل به سه دسته داده برای اجرا نیاز دارد که عبارتند از ۱- داده‌های اتمسفری مانند بارندگی، تعداد روزهای آفتابی، دمای حداکثر و حداقل و تبخیر، ۲- داده‌های مربوط به گیاه مانند فنولوژی، عمق ریشه و میزان ماده خشک، ۳- داده‌های خاک مانند میزان رطوبت اولیه و بافت خاک. مدل AquaCrop میزان تولید عملکرد در اندام‌های مختلف گیاه را در شرایط دیم، آبی و یا کم‌آبی شبیه‌سازی می‌نماید (Steduto *et al.*, 2009). ابزار محاسبه رشد در مدل چرخه آب است. میزان تولید زیست‌توده در ارتباط با مصرف آب معیاری برای استفاده از CO_2 و بخار آب موجود در اتمسفر می‌باشد. این معیار کمک می‌کند که مدل برای فصول و مکان‌های مختلف قابل کاربرد باشد. شبیه‌سازی رشد گیاه در مدل مذکور به‌صورت روزانه می‌باشد (Steduto *et al.*, 2009).

۲.۲. واسنجی مدل

در این مطالعه از داده‌های دوره اول کشت برای واسنجی مدل و به‌دست‌آوردن پارامترهای گیاهی استفاده شد. در واسنجی مدل با واردکردن پارامترهای گیاهی به‌گونه‌ای صورت گرفت که خطای نسبی بین عملکرد محصول، عملکرد بیولوژیکی و کارایی مصرف آب شبیه‌سازی‌شده با مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش حداقل باشد (Mohammadi *et al.*, 2015). نخستین مرحله در استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز، واسنجی مدل برای شرایط موردآزمایش و گیاه زراعی مورداستفاده است ابتدا داده‌های پیش‌فرض در محدوده قابل قبول به مدل داده شد و سپس با سعی و خطا، فایل گیاهی مدل واسنجی گردید.

۲.۳. تحلیل حساسیت مدل

برای تحلیل حساسیت مدل از داده‌های دوره اول استفاده شد و میزان حساسیت مدل از رابطه (۳) محاسبه شد.

$$Sc = \left| \frac{Pm - Pb}{Pb} \right| \times 100 \quad \text{رابطه ۳}$$

که در این رابطه، Sc : ضریب حساسیت بدون بعد، Pm : مقدار برآوردشده پارامتر موردنظر تولید براساس داده‌های ورودی تعدیل‌شده و Pb : مقدار برآورد شده پارامتر موردنظر تولید براساس داده‌های ورودی پایه است.

در فرایند تحلیل حساسیت مدل به هر پارامتر، در هر مرحله یکی از عوامل ورودی مدل به مقدار ۲۵ درصد تغییر داده شد و بقیه پارامترها ثابت نگه داشته شدند. در هر مرحله مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس $Sc > 15$ حساسیت بالا، $2 < Sc < 15$ حساسیت متوسط و $Sc < 2$ حساسیت پایین طبقه‌بندی شد (Geerts *et al.*, 2009).

۴.۲. اعتبارسنجی مدل

جهت اعتبارسنجی مدل در این پژوهش از داده‌های دوره دوم کشت استفاده شد. دقت پیش‌بینی‌های مدل توسط ضریب تعیین (R^2)، شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (nRMSE) و درصد انحراف با استفاده از روابط زیر برآورد شد.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P)(O_i - O)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \tag{۴}$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \tag{۵}$$

$$nRMSE = \frac{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5}}{O} \tag{۶}$$

که در این روابط، P_i : مقادیر پیش‌بینی شده، P : میانگین مقادیر پیش‌بینی شده، O_i : مقادیر اندازه‌گیری شده، O : میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n : تعداد کل مشاهدات می‌باشد. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هرچه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است (Bannayan and Hoogenboom, 2009). Jamieson *et al.* (1991) در ارائه روش ساده استفاده از میانگین مربعات خطا nRMSE محدوده کم‌تر از ۱۰ درصد بیان‌کننده کارکرد عالی، محدوده ۱۰ تا ۲۰ درصد بیان‌کننده کارکرد بسیار خوب، محدوده ۲۰ تا ۳۰ درصد بیانگر کارکرد متوسط و در بیش‌تر از ۳۰ درصد نیز بیان‌کننده ضعیف بودن کارکرد مدل است که در بررسی‌های Bannayan and Hoogenboom (2009) نیز این محدوده‌ها تأیید شده‌اند. درصد انحراف ($D\%$) نیز طبق رابطه (۷) برای مقایسه پارامترهای اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده به کار رفت (Greaves and Wang, 2016).

$$Deviation (\%) = \frac{(\text{Simulated} - \text{observed}) \times 100}{\text{observed}} \tag{۷}$$

۳. نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌های عملکرد محصول، عملکرد زیست‌توده، بهره‌وری مصرف آب نسبت به محصول و بهره‌وری مصرف آب نسبت به زیست‌توده در جدول (۴) ارائه شده است.

Table 4. Combined variance analysis of greenhouse cucumber growth traits

Sources of variation	Degrees of freedom	Mean squares			
		Performance		Water use productivity	
		Yield	Biomass	Yield	Biomass
Cultivation Period	1	5799.83**	7972.70**	2167.98**	2992.45**
Replication	2	5.23 ns	10.35 ns	2.69 ns	5.03 ns
Irrigation system	1	841.38 **	627.66 **	37.39 **	0.22 ns
Soil	2	180.96**	344.77**	50.22**	104.73**
Irrigation system × C. Period	1	0.027ns	36.44ns	20.74*	87.04**
Irrigation system × Soil	2	1088.97**	1414.80**	418.15**	539.28**
Soil × C. Period	2	0.63ns	7.64ns	1.05ns	0.44ns
Irrigation × Soil × C. Period	2	700.63**	689.89**	279.60**	270.27**
Error	22	8.13	9.94	3.60	4.43
Coefficient of variations	-	6.64	5.87	6.93	6.13

ns, *, **: No significance and, significance at 5 percent and 1 percent probability levels, respectively.

نتایج جدول (۴) نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثرات ساده بافت خاک بر صفات عملکرد محصول، عملکرد زیست‌توده، بهره‌وری مصرف آب نسبت به محصول و هم‌چنین بهره‌وری مصرف آب نسبت به زیست‌توده است. در پژوهشی با عنوان مقایسه چند بستر کاشت در خواص کمی خیار گلخانه‌ای رقم ناگین در روش آبکشت نیز تأثیر بسترهای مختلف کشت بر میزان عملکرد خیار گلخانه‌ای معنی‌دار گزارش شده است (Ghaemi *et al.*, 2010). که با نتایج طرح حاضر هماهنگ می‌باشد. Akhavan *et al.* (2012) نیز تأثیر معنی‌داری بافت خاک در سطح یک درصد را بر وزن زیست‌توده گیاه گندم گزارش نموده‌اند. در بررسی اثرات ساده سیستم آبیاری نیز نتایج نشان داد به‌جز پارامتر بهره‌وری مصرف آب نسبت به زیست‌توده سایر صفات موردبررسی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. در مطالعه Zarei and Heidari (2017) معنی‌دار بودن تأثیر دو روش آبیاری فتیله‌ای و سطحی بر برخی صفات رشد گیاه آفتابگردان در سطح احتمال پنج درصد گزارش شده است. در پژوهش Karimi *et al.* (2017) نیز عملکرد زیست‌توده گیاه جو در سطح یک درصد تحت تأثیر عامل آبیاری قرار گرفت. اثر معنی‌داری سیستم آبیاری در دوره کشت در صفات عملکرد محصول و زیست‌توده مشاهده نشد، اما در صفات بهره‌وری مصرف آب نسبت به محصول و زیست‌توده این اثرات به‌ترتیب در سطح پنج درصد و یک درصد معنی‌دار بود. Razavi *et al.* (2009) در پژوهش خود مبنی بر بررسی اثر مدیریت کم‌آبیاری در عملکرد کمی و کیفی و کارایی مصرف آب کلزا گزارش کردند که اثرات متقابل دوره کشت در آبیاری بر میزان عملکرد محصول کلزا بی‌تأثیر است که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.

در بررسی نتایج اثر متقابل سیستم آبیاری در بافت خاک نتایج حاکی از معنی‌داری تمام صفات موردبررسی در سطح احتمال یک درصد بود. بررسی نتایج پژوهش Abedi Koupai and Mesforoush (2009) نیز نشان داد اثرات متقابل سیستم آبیاری در نوع خاک در عملکرد میوه خیار و کارایی مصرف آب محصول در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. اما در بررسی اثرات متقابل دوره کشت × بافت خاک نتایج حاکی از عدم معنی‌داری در تمام صفات موردبررسی بود. از جمله دلایل این نتیجه را می‌توان ثابت‌بودن بافت‌های خاک در دو دوره کشت محصول عنوان کرد. در بررسی اثر متقابل سه‌گانه سیستم آبیاری × دوره کشت × خاک نیز تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد در تمام صفات موردبررسی مشاهده شد. در جدول (۵) به بررسی مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری‌شده متأثر از تیمارهای روش آبیاری در محصول خیار پرداخته شده است.

Table 5. Average comparison of measured parameters affected by irrigation methods and different soil textures

Cultivation period	Treatment	Performance (ton/ha)		Water use productivity (kg/m ³)	
		Yield	Biomass	Yield	Biomass
First	T1S ₁	38.96 fg	50.74 fg	23.82 f	31.02 e
	T1S ₂	37.58 fgh	45.58 gh	22.97 fg	27.86 f
	T1S ₃	28.56 i	35.59 j	17.46 ij	21.75 hi
	W1S ₁	28.77 i	37.12 ij	20.217 ghi	26.08 fg
	W1S ₂	22.99 j	29.72 k	16.15 j	20.88 i
	W1S ₃	24.50 ij	33.97 jk	17.21 ij	23.86 ghi
Second	T2S ₁	79.46 a	94.72 a	46.53 a	55.47 a
	T2S ₂	64.27 b	74.15 c	37.64 b	43.43 b
	T2S ₃	37.69 fgh	46.28 g	22.08 fgh	27.10 fg
	W2S ₁	39.71 f	54.94 ef	27.31 d	37.77 cd
	W2S ₂	47.44 de	62.05 d	32.62 cd	42.66 b
	W2S ₃	65.10 b	79.15 b	44.77 a	54.42 a
Two-period average	TS ₁	59.21 c	72.73 c	35.18 bc	43.25 b
	TS ₂	50.93 d	59.87 de	30.31 d	35.65 d
	TS ₃	33.13 h	40.94 hi	19.77 hi	24.43 gh
	WS ₁	34.24 gh	46.03 gh	23.76 f	31.93 e
	WS ₂	35.22 fgh	45.89 gh	24.39 f	31.77 e
	WS ₃	44.80 e	56.56 e	30.99 d	39.14 c

In each column, the treatments which mean is at least one letter in common are not significantly different from each other.

تفاوت مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده مندرج در جدول (۵) حاکی از برتری عملکرد سیستم آبیاری قطره‌ای در صفات عملکرد محصول و زیست‌توده و همچنین بهره‌وری مصرف آب نسبت به محصول و زیست‌توده در هر دو دوره کشت نسبت به سیستم آبیاری فیتله‌ای مویینگی در خاک S_1 می‌باشد و با سبک‌شدن خاک از بافت لومی‌رسی Cl تیمار S_1 به لومی‌شنی S_1 تیمار S_3 مقادیر اندازه‌گیری شده اثر کاهشی را نشان می‌دهند. در سیستم آبیاری فیتله‌ای در هر دو دوره کشت و میانگین آن در تمام صفات، خاک S_3 وضعیت مطلوب‌تری دارد و بر عکس در روش قطره‌ای از بافت خاک سبک‌تر SL تیمار S_3 به بافت سنگین‌تر CL تیمار S_1 عملکرد افزایش می‌یابد، به طوری که بیش‌ترین میزان عملکرد محصول در تیمار $T2S_1$ با مقدار $79/43$ تن در هکتار و سپس سیستم آبیاری فیتله‌ای تیمار $W2S_3$ با مقدار عملکرد $65/10$ تن در هکتار مشاهده شد. همچنین در سایر صفات بهره‌وری مصرف آب، بهره‌وری مصرف آب نسبت به محصول و بهره‌وری مصرف آب نسبت به زیست‌توده بیش‌ترین عملکرد در تیمار $T2S_1$ با مقادیر $46/53$ و $55/47$ کیلوگرم بر مترمکعب و در سیستم آبیاری فیتله‌ای نیز در تیمار $W2S_3$ با مقادیر $44/77$ و $54/42$ کیلوگرم بر مترمکعب مشاهده گردید و کم‌ترین مقادیر هم در سیستم آبیاری قطره‌ای با توجه به میانگین حاصل از دو دوره کشت در تیمار TS_3 و در سیستم آبیاری فیتله‌ای در تیمار WS_1 به دست آمد. از جمله دلایل این نتایج این است که در سیستم آبیاری قطره‌ای به دلیل نوسانات رطوبتی ناشی از آبیاری غیرممتد، هرچه بافت خاک سنگین‌تر باشد عملکرد محصول افزایش می‌یابد، زیرا میزان و مدت‌زمان نگهداشت آب و کود در خاک‌های سنگین بافت بیش‌تر می‌باشد و این عمل سبب کاهش احتمال تقابل گیاه با تنش رطوبتی خواهد شد که نتایج به دست آمده نیز این موضوع را تأیید می‌کنند. نتایج پژوهش *Lim et al.* (2015) نشان داد که به طور کلی، در صورت انجام آبیاری به صورت قطره‌ای زیرسطحی در گلخانه کاشت خیار در خاک لوم یا لوم‌رسی بهتر از خاک لومی‌شنی است که با نتایج این پژوهش یکسان است.

با توجه به جدول (۵) در بررسی مقایسه میانگین حاصل از دو دوره کشت در صفات مورد بررسی نتایج نشان داد که عملکرد تمام پارامترهای مدنظر در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای در خاک S_1 و در سیستم آبیاری مویینگی در خاک S_3 مناسب‌تر بوده است. سیستم آبیاری فیتله‌ای به دلیل انجام آبیاری ممتد، نیازمند شرایط مساعد تهویه‌ای می‌باشد. لذا، خاک‌هایی با بافت سبک به دلیل فراهم‌نمودن شرایط موردنظر جهت تهویه مناسب‌تر ریشه امکان افزایش رشد گیاه و در نهایت افزایش عملکرد محصول را فراهم می‌کنند و نتایج به دست آمده در این پژوهش هم موید همین موضوع می‌باشد. براساس نتایج به دست آمده از پژوهش *Abedi Koupai and Mesforoush* (2009) در بررسی اثر متقابل بافت خاک ترکیب‌شده با هیدروژل و میزان آبیاری در کشت خیار نتایج نشان داد که وجود رطوبت بیش‌تر در خاک موجب کاهش عملکرد شده و با متعادل‌شدن رطوبت، در خاک با بافت شنی به دلیل تهویه مناسب‌تر نسبت به خاک لومی‌رسی تولید افزایش می‌یابد. از دلایل برتری نسبی روش آبیاری قطره‌ای نسبت به فیتله‌ای در هر دو دوره کشت، نوسانات محدود رطوبتی در سیستم آبیاری قطره‌ای نسبت به فیتله‌ای است که این نوسانات محدود رطوبتی خاک در روش آبیاری قطره‌ای بر افزایش رشد زایشی (گل‌دهی) نقش دارد که این نتایج با نتایج *Thomas & Staub* (1992) انطباق دارد. *Moslehi et al.* (2011) نیز بالاترین میزان عملکرد خیار را در تنش خفیف ارزیابی نمودند، اما در تنش رطوبتی شدیدتر، رشد رویشی و زایشی خیار کاهش می‌یابد (*Odhiambo and Aguyoh, 2022*). همچنین از دلایل دیگر بالا رفتن نسبی EC خاک سیستم فیتله‌ای در دوره رشد گیاه نسبت به آبیاری قطره‌ای و ضعف در آیشویی در سیستم آبیاری فیتله‌ای می‌باشد کاهش عملکرد ناشی از شوری خاک در گیاه خیار با نتایج *Zamani et al.* (2020) که بیان کردند که افزایش EC خاک باعث کاهش میزان تولید می‌شود، تطابق دارد. برای رفع مشکل می‌توان با مدیریت سیستم آبیاری فیتله‌ای و افزایش آبدهی فیتله‌ها آیشویی را در حد نیاز افزایش داد. در صفات بهره‌وری مصرف آب نسبت به محصول و زیست‌توده مشاهده می‌شود که به دلیل اختلاف کم مصرف آب دو سیستم نسبت به هم مقادیر محاسبه‌شده بهره‌وری مصرف آب در سیستم آبیاری قطره‌ای در خاک S_1 و در سیستم آبیاری فیتله‌ای در خاک S_3 همانند صفات اندازه‌گیری شده عملکرد

محصول و زیست‌توده بالاترین مقادیر را دارند و روند تغییرات آن‌ها در خاک‌ها در سیستم آبیاری قطره‌ای از خاک سنگین‌تر به سبک‌تر کاهشی و برعکس در آبیاری فتیله‌ای روند تغییرات افزایشی است. تنها تفاوت ناچیز این روندها با مقایسه دو سیستم در میانگین به‌دست‌آمده از دو دوره کشت در سیستم آبیاری فتیله‌ای بین خاک‌های S₁ و S₂ است، اگرچه از نظر آماری نیز اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. با مقایسه میانگین‌های سالانه در دو دوره کشت نیز دلیل برتری نسبی دوره دوم را افزایش تجربه در مدیریت سیستم‌های آبیاری در دوره دوم به‌ویژه در سیستم آبیاری فتیله‌ای دانست.

۳.۱. نتایج واسنجی مدل AquaCrop

در مرحله واسنجی پس از وارد نمودن داده‌های پیش‌فرض در محدوده‌های قابل‌قبول به مدل و دستیابی به وضعیت بهینه فایل گیاهی مدل به شرح جدول (۶) واسنجی گردید.

Table 6. The calibrated crop parameters of the AquaCrop model

Parameters	Unit	Value		Calibration method*
		Default	Calibrated	
Initial crop canopy	%	0.35	0.13	3
Plant density	Plant/m ²	34000	45000	2
Maximum effective rooting depth	m	0.8	0.30	3
Canopy growth coefficient	%/day	12.3	15.9	3
Canopy decline coefficient	day	7.2	6.0	3
Maximum canopy cover	%	85	81	2
Germination time	Degree-days	49	30	2
Time to maximum canopy	Degree-days	924	588	2
Time to senescence	Degree-days	1371	972	2
Time to maturity	Degree-days	1652	1376	2
Time to flowering	Degree-days	503	543	2
Duration of flowering	Degree-days	629	222	2
The crop water productivity	g/m ²	17.0	15	3
Harvest Index	%	63	74	2
Upper limit of soil water discharge coefficient for plant development	-	0.15	0.25	3
Lower limit of soil water discharge coefficient for plant development	-	0.55	0.60	3
Shape factor describing root zone expansion	-	3.0	3	3
Shape factor for stomata stress coefficient curve	-	1.9	3	3
Shape factor for senescence stress coefficient curve	-	8.5	6	3
Upper temperature for GDD	°C	30	30	1
Base temperature for GDD	°C	8	12	3

* 1-Default, 2- Measured, 3-Calibrated

پس از واسنجی مدل، عملکردهای برآوردشده، با استفاده از مشاهده‌های میانگین عملکرد ارزیابی شد. نتایج داده‌های کالیبره‌شده در جدول (۷) شاخص‌های عملکرد محصول و زیست‌توده نتایج شبیه‌سازی مدل در مرحله واسنجی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

Table 7. Evaluation of the average observed and simulated by model in the calibration stage

Treatment	Yield					Biomass				
	Observed (ton/ha)	Simulated (ton/ha)	R ²	RMSE	nRMSE (%)	Observed (ton/ha)	Simulated (ton/ha)	R ²	RMSE	nRMSE (%)
T1S ₁	38.96	39.43	0.76	1.80	4.60	50.74	51.21	0.69	1.86	3.70
T1S ₂	37.58	38.99	0.94	2.90	7.70	45.58	47.32	0.99	1.97	4.30
T1S ₃	28.56	30.92	0.77	2.43	8.50	35.59	37.70	0.75	2.12	6.0
W1S ₁	28.77	29.71	0.83	2.02	7.0	37.12	37.94	0.98	1.18	3.2
W1S ₂	22.99	26.17	0.85	3.63	15.80	29.73	33.99	0.97	4.35	14.80
W1S ₃	24.50	27.77	0.92	3.47	14.20	33.97	38.55	0.97	4.62	13.60

نتایج واسنجی مدل در جدول (۷) نشان می‌دهد که انطباق خوبی بین داده‌های عملکرد محصول و زیست‌توده اندازه‌گیری شده در شرایط مزرعه‌ای مربوط به تیمارهای روش آبیاری با داده‌های حاصل از خروجی شبیه‌سازی شده مدل وجود دارد. در صفت عملکرد محصول کم‌ترین ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده nRMSE از واسنجی تیمار T1S₁ و بیش‌ترین ضریب تعیین R² در واسنجی تیمار T1S₂ به‌دست آمد. مقایسه داده‌های عملکرد بیولوژیکی خروجی مدل در تیمارهای موردبررسی نسبت به داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش مزرعه‌ای گویای واسنجی قابل‌قبول مدل در ارتباط با این صفت می‌باشد. در صفت عملکرد محصول ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده برای تیمارهای T1S₁، T1S₂، T1S₃، WIS₁، WIS₂ و WIS₃ به‌ترتیب ۴/۶۰، ۷/۷۰، ۸/۵۰، ۷، ۱۵/۸۰ و ۱۴/۲۰ بود و ضریب تعیین نیز برای این تیمارها به‌ترتیب ۷۶، ۹۴، ۷۷، ۸۳، ۸۵ و ۹۲ درصد محاسبه شد. در سیستم آبیاری قطره‌ای بیش‌ترین دقت شبیه‌سازی در صفت عملکرد مربوط به تیمار T1S₁ بود و در سیستم آبیاری فنیله‌ای مویبگی نیز بیش‌ترین دقت شبیه‌سازی در مرحله واسنجی در تیمار WIS₁ مشاهده شد.

نتایج مدل در مرحله واسنجی در مورد توصیه بهترین تیمار با نتایج مزرعه‌ای مشابه بود، به‌طوری‌که نتایج در هر دو حالت گویای پاسخ مثبت گیاه خیار گلخانه‌ای به‌روش آبیاری قطره‌ای در خاک با بافت رسی‌لومی بود. در روش آبیاری قطره‌ای نتایج حاکی از کاهش عملکرد محصول خیار از تیمار خاک S₁ به S₃ بود مدل نیز این روند را به‌خوبی شبیه‌سازی کرد، اما نتایج نشان داد میزان اختلاف برآورد مدل نسبت به داده‌های مشاهداتی کم‌تر بود که می‌تواند ناشی از برآورد بیش‌تر عملکرد محصول در مدل نسبت به شرایط واقعی به‌دلیل بهینه‌بودن شرایط مدل نسبت به شرایط حاکم بر گلخانه باشد.

۲.۳. نتایج تحلیل حساسیت مدل AquaCrop

نتایج تحلیل حساسیت مدل در برخی از پارامترهای اندازه‌گیری نشده و با سیستم آبیاری قطره‌ای در جدول (۸) ارائه شده است.

Table 8. The sensitivity coefficient of some input factors of the AquaCrop model for simulating greenhouse cucumber performance

Parameters *	Unit	% Sc		Sensitivity rate
		-0.25	0.25	
Canopy cover	%	0.96	0.74	Low
Plant density	Plant/m ²	1.06	0.67	Low
Maximum effective rooting depth	m	0.52	0.05	Low
Canopy growth coefficient	CGC	13.27	7.46	Medium
Decline of crop coefficient	(%/day)	2.18	2.98	Medium
Water Productivity normalized for ETo and CO2 (WP*)	(g/m ²)	25.023	24.892	high
Soil water depletion factor for canopy expansion (p-exp) - Upper threshold	-	0.35	0.09	Low
Soil water depletion factor for canopy expansion (p-exp) - Lower threshold	-	1.01	0.01	Low
Shape factor for water stress coefficient for canopy expansion (0.0 = straight line)	-	0.08	0.01	Low
Shape factor for water stress coefficient for stomatal control (0.0 = straight line)	-	0.02	0.02	Low
Soil water depletion factor for pollination (p - pol) - Upper threshold	degree day	0.02	0.02	Low
Upper temperature above which crop development no longer increases with an increase in temperature	°C	0.02	0.02	Low
Base temperature below which crop development does not progress	°C	0.04	0.09	Low
Reference Harvest Index (HIo)	%	25.02	24.97	high
GDDays: from sowing to emergence	degree day	0.006	0.419	Low
CGC for GDDays: Increase in canopy cover (in fraction soil cover per growing-)	degree day	9.721	11.166	Medium
GDDays: from sowing to start senescence	degree day	47.989	5.474	Medium-high
GDDays: from sowing to maturity (length of crop cycle)	degree day	18.025	26.837	high

* (Adabi et al., 2020)

نتایج تحلیل حساسیت جدول (۸) نشان می‌دهد که پارامترهایی از قبیل حد بالا و پایین ضرایب تخلیه آب، ضرایب شکل تنش آبی برای توسعه تاج‌پوشش و بسته‌شدن روزنه‌ها، ضریب تخلیه آب در مرحله پیری، مدت‌زمان کاشت تا جوانه‌زنی، تراکم کشت و عمق توسعه ریشه‌ها حساسیت مدل نسبت به تغییرات پارامترها در محدوده $+0/25$ و $-0/25$ پایین است. این نتایج حدود ۶۰ درصد پارامترها را با حساسیت پایین نشان می‌دهد که این نتایج در بسیاری از پارامترها با نتایج تحلیل حساسیت Ebrahimipak et al. (2018) در ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت تحت تیمارهای کم آبیاری مطابقت دارد. پارامترهای ضریب رشد تاج‌پوشش، ضریب کاهش تاج‌پوشش و مدت‌زمان کاشت تا بیشینه رشد تاج‌پوشش دارای حساسیت متوسط هستند و در پارامتر مدت‌زمان کاشت تا شروع رشد دوره پیری حساسیت در محدوده متوسط تا زیاد است. در پارامترهای بهره‌وری مصرف آب، شاخص برداشت و مدت‌زمان کاشت تا بلوغ محصول دارای حساسیت بالا هستند که با نتایج Ansari et al. (2019) در شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی تحت شرایط آبیاری مطابقت داشت. در حالت کلی نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل در شبیه‌سازی رشد خیار گلخانه‌ای نشان می‌دهد که در پارامترهایی که رابطه مستقیمی با تولید دارند مدل دارای حساسیت بالا و در پارامترهایی که با واسطه و به‌صورت غیرمستقیم تأثیرگذار هستند حساسیت پایین‌تری نسبت به تغییرات پارامترها نشان می‌دهد. همچنین پس از تحلیل حساسیت پارامترها با استفاده از داده‌های سیستم فیله‌ای نیز اگرچه در مقادیر عددی حساسیت‌ها تغییر ایجاد شد، اما از نظر تغییر دامنه حساسیت‌ها اختلافی با سیستم قطره‌ای در نتایج مشاهده نشد که این به‌دلیل مشابهت خصوصیات دو سیستم در مدل است.

۳.۳. ارزیابی و اعتبارسنجی مدل AquaCrop

در جدول (۹) نتایج ارزیابی شبیه‌سازی مدل AquaCrop در مرحله اعتبارسنجی ارائه شده است و صفات شبیه‌سازی شده و مشاهده‌شده در تیمارهای آبیاری و درصد متوسط خطای نسبی بررسی شده است.

Table 9. Evaluation of model simulation results in the validation stage

Treatment	Parameters	Average of observed data	Average of simulated data	Deviation (%)	R ²	RMSE *	nRMSE (%)
T2S ₁	Yield (ton/ha)	79.46	85.28	7.3	0.97	6.22	7.50
	Biomass (ton/ha)	94.72	101.52	7.2	0.97	6.82	7.20
	Yield water use productivity (kg/m ³)	46.54	49.95	7.26	0.96	3.64	7.80
	Biomass water use productivity (kg/m ³)	55.48	59.46	7.2	0.96	4.00	7.20
T2S ₂	Yield (ton/ha)	64.27	67.04	4.3	1.0	3.35	5.20
	Biomass (ton/ha)	74.16	77.06	3.9	0.99	3.03	4.10
	Yield water use productivity (kg/m ³)	37.64	39.26	4.35	1.0	1.96	5.20
	Biomass water use productivity (kg/m ³)	43.43	45.13	3.9	0.99	1.78	4.10
T2S ₃	Yield (ton/ha)	37.70	38.41	1.9	0.99	0.74	2.00
	Biomass (ton/ha)	46.28	47.42	2.4	0.98	1.20	2.60
	Yield water use productivity (kg/m ³)	22.08	22.49	1.87	0.99	0.43	2.00
	Biomass water use productivity (kg/m ³)	27.11	27.77	2.5	0.98	0.70	2.60
W2S ₁	Yield (ton/ha)	39.72	41.71	5	0.95	2.60	6.60
	Biomass (ton/ha)	54.94	57.34	4.4	0.97	3.45	6.30
	Yield water use productivity (kg/m ³)	27.31	28.68	5.62	0.95	1.8	6.60
	Biomass water use productivity (kg/m ³)	37.78	39.43	3.99	0.97	2.38	6.30
W2S ₂	Yield (ton/ha)	47.44	48.80	2.9	0.99	0.98	2.10
	Biomass (ton/ha)	62.05	63.68	2.6	0.95	1.73	2.80
	Yield water use productivity (kg/m ³)	32.62	33.28	2	0.99	0.68	2.10
	Biomass water use productivity (kg/m ³)	42.67	43.79	2.64	0.95	1.19	2.80
W2S ₃	Yield (ton/ha)	62.05	63.68	2.6	0.95	1.72	2.80
	Biomass (ton/ha)	79.15	79.52	0.04	0.95	1.38	1.70
	Yield water use productivity (kg/m ³)	44.76	44.84	0.14	0.99	0.48	1.10
	Biomass water use productivity (kg/m ³)	54.43	54.68	0.51	0.95	0.95	1.70

* Proportional to the parameters unit

با توجه به جدول (۹) مدل اکثر پارامترها را در صفات مدنظر در تیمارهای مورد استفاده در مرحله اعتبارسنجی، بیش تر از عملکرد مشاهداتی شبیه سازی کرده است، اما روند شبیه سازی محصول با روند افزایشی و کاهش آبیاری آن در گلخانه کاملاً انطباق دارد که مطابق با نتایج پژوهش *Sarkohaki et al.* (2021) در بررسی میزان دقت و کارایی دو مدل AquaCrop و SWAP در شبیه سازی عملکرد، زیست توده و کارایی مصرف آب ذرت می باشد. با توجه به نتایج در اکثر تیمارها مدل دچار خطای بیش برآورد شده است که علت این امر می تواند وجود شرایط ایتیم و بهینه در مدل نسبت به شرایط حاکم بر محیط گلخانه باشد، البته اگر میزان این خطا در مدل برحسب درصد بیان شود با بررسی مقادیر میانگین عملکرد محصول در دو روش آبیاری قطره ای و فیتله ای تحت کشت در بافت های مختلف در حالت شرایط مشاهداتی مشاهده می شود که مدل در مجموع به ترتیب ۴/۵۰ و ۳/۵۰ درصد بیش برآورد داشته است. این نتایج با مشاهدات *Heng et al.* (2009) و *Farahani et al.* (2009) مطابقت داشت. اما در مجموع نتایج نشان داد که کم ترین میزان خطای بیش برآورد در بین تیمارهای مورد بررسی در روش آبیاری قطره ای و روش آبیاری فیتله ای به ترتیب در تیمارهای $T2S_3$ و $W2S_3$ مشاهده شده است.

با توجه به پارامتر درصد انحراف به دست آمده در صفت عملکرد محصول جدول (۷) بیش ترین دقت برآورد مدل به ترتیب در تیمارهای $T2S_3$ و $W2S_3$ با میانگین درصد انحراف ۱/۹ و ۲/۶ مشاهده شد. کم ترین دقت شبیه سازی مدل نیز در تیمارهای $T2S_1$ و $W2S_1$ به ترتیب با میانگین درصد انحراف ۷/۳ و ۵/۰ مشاهده گردید. بیش ترین دقت برآورد مدل در صفت بهره وری مصرف آب نسبت به محصول نیز به ترتیب با میانگین درصد انحراف ۱/۸۷ و ۰/۱۴ در تیمارهای $T2S_3$ و $W2S_3$ مشاهده شد. بیش ترین دقت برآورد مدل در صفات زیست توده و بهره وری مصرف آب نسبت به زیست توده به ترتیب با درصد انحراف ۰/۰۴ و ۰/۱۴ در تیمار $W2S_3$ مشاهده شد. در مجموع مدل توانست در تمام تیمارها با دقت قابل قبولی شبیه سازی رشد گیاهی را انجام دهد.

در بررسی صفت عملکرد محصول طبق نتایج ارزیابی مدل، سازگاری مناسبی بین داده های حاصل از خروجی مدل و داده های واقعی وجود داشت، به طوری که در تیمارهای $T2S_1$ ، $T2S_2$ ، $T2S_3$ ، $W2S_1$ ، $W2S_2$ و $W2S_3$ اعتبارسنجی مدل به ترتیب با nRMSE معادل ۷/۵۰، ۵/۲۰، ۲، ۶/۶۰، ۲/۱۰ و ۲/۸۰ درصد محاسبه شد که در محدوده کم تر از ۱۰ و نشان دهنده کارکرد عالی مدل در برآورد داده های خروجی است. ضرایب تعیین به دست آمده نیز بیانگر همبستگی خوب بین داده های شبیه سازی و اندازه گیری شده است. در پژوهشی کارایی مدل AquaCrop در منطقه کرج مورد ارزیابی قرار گرفت، نتایج نشان داد که این مدل از دقت کافی در تخمین عملکرد محصول در شرایط آبیاری کامل، کم آبیاری و آبیاری تکمیلی برخوردار است (*Alizadeh et al.*, 2010).

در صفت عملکرد زیست توده به ترتیب شاخص های nRMSE در تیمارهای $T2S_1$ ، $T2S_2$ ، $T2S_3$ ، $W2S_1$ ، $W2S_2$ و $W2S_3$ مقادیر ۲/۲۰، ۴/۷۰، ۲/۶۰، ۶/۳۰، ۲/۸۰ و ۱/۷۰ درصد و R^2 مقادیر ۹۷، ۱۰۰، ۹۹، ۹۵، ۹۹ و ۹۹ درصد محاسبه شدند که نشان از انطباق بالای برآورد مدل با داده های مشاهداتی می باشد. این نتایج نشان داد که عملکرد مدل در شبیه سازی میزان زیست توده به اندازه شبیه سازی عملکرد محصول بالا می باشد که با نتایج *Esmailian and Ramroudi* (2018) و *Abedinpour et al.* (2012) مطابقت داشت. همچنین نتایج مطالعه دیگری نیز نشان داد که مدل AquaCrop به طور قابل قبولی زیست توده اندام هوایی را برای چهار رقم ذرت باتیمارهای مختلف آبیاری به کاررفته شبیه سازی کرده است (*Hsiao et al.*, 2009).

در صفات بهره وری مصرف آب نسبت به عملکرد محصول و زیست توده نیز نتایج نشان داد که بین مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی همبستگی مناسبی وجود دارد. شاخص های nRMSE در تیمارهای $T2S_1$ ، $T2S_2$ ، $T2S_3$ ، $W2S_1$ ، $W2S_2$ و $W2S_3$ مقادیر ۵/۷۰، ۲/۸۰، ۲/۱۰، ۶/۶۰، ۲/۱۰ و ۱/۱۰ درصد و R^2 مقادیر ۹۶، ۱۰۰، ۹۹، ۹۵ و ۹۹

درصد محاسبه شدند. در صفت بهره‌وری مصرف آب نسبت به زیست‌توده نیز هم‌چنین، ضرایب تعیین به‌دست‌آمده بیانگر همبستگی خوب بین داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری است. همان‌طور که مشخص است مدل روند تغییرات پارامتر بهره‌وری مصرف آب نسبت به محصول و زیست‌توده را برای تیمارهای T2S₃ و W2S₃ در نتیجه تغییر در بافت خاک در هر دو روش آبیاری با دقت بالاتری مطابق با شرایط مزرعه‌ای شبیه‌سازی کرد.

براساس نتایج، بهره‌وری مصرف آب با کاهش حجم آبیاری در روش فتیله‌ای مویبگی نسبت به روش قطره‌ای با توجه به ماهیت این سیستم و با توجه به میزان تولید محصول، عملکرد تقریباً یکسانی را نشان دادند و عملکرد مدل نیز در شبیه‌سازی این تغییر روند بسیار مناسب بود. در همین ارتباط، نتایج پژوهشی نشان داده است که کاهش دور آبیاری باعث افزایش کارایی مصرف آب می‌شود (Oktem *et al.*, 2003). بیش‌ترین بهره‌وری مصرف آب نسبت به محصول و زیست‌توده هم در مورد خروجی‌های مدل و هم در مورد مقادیر اندازه‌گیری‌شده در تیمار T2S₁ به دلیل میزان تولید بیش‌تر در خاک S₁ مشاهده شد. در شکل‌های (۲) تا (۴) مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در صفات مورد بحث در تیمارهای مورد استفاده در مرحله اعتبارسنجی مدل مشاهده می‌شود.

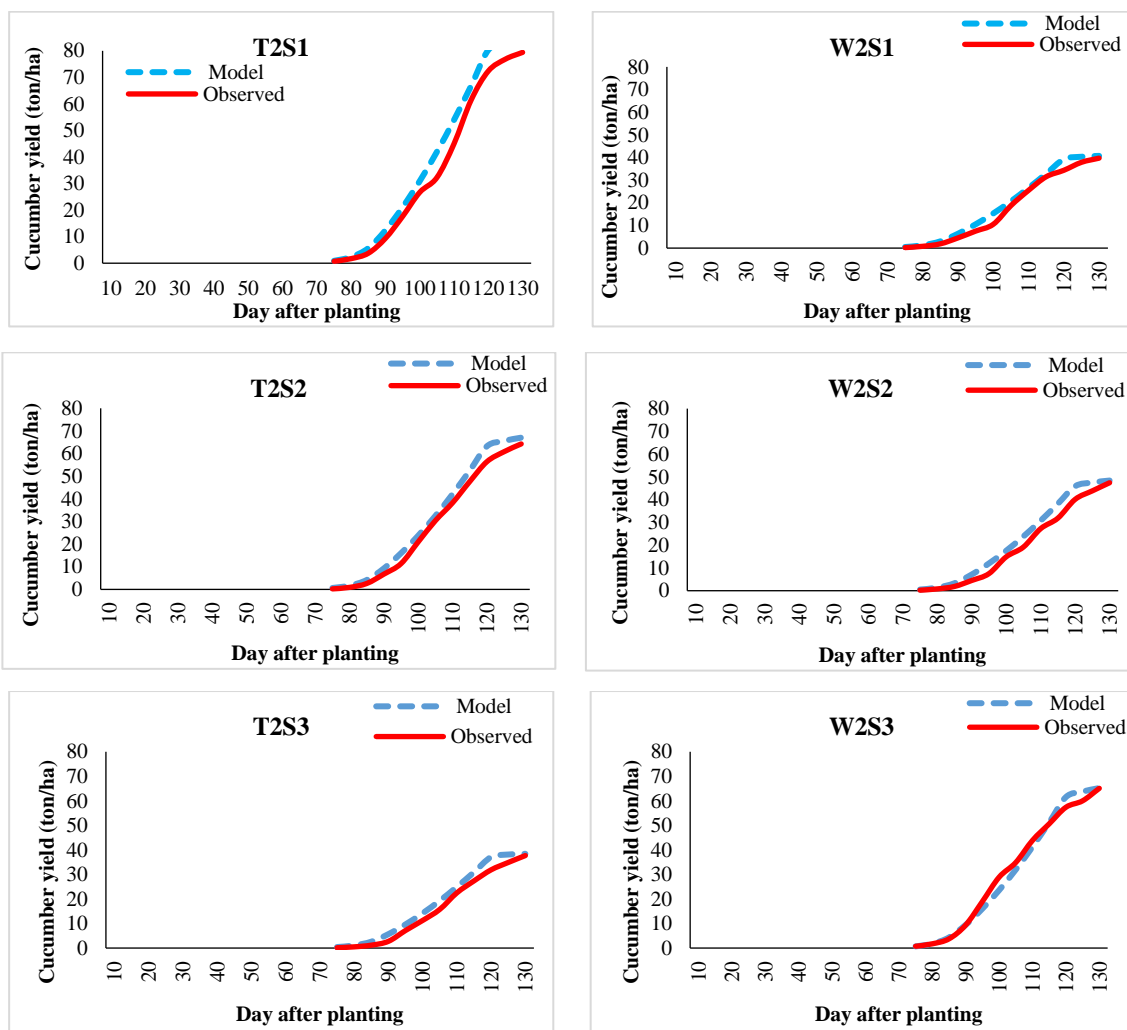


Figure 2. Observed and simulated cucumber product performance in the model validation stage

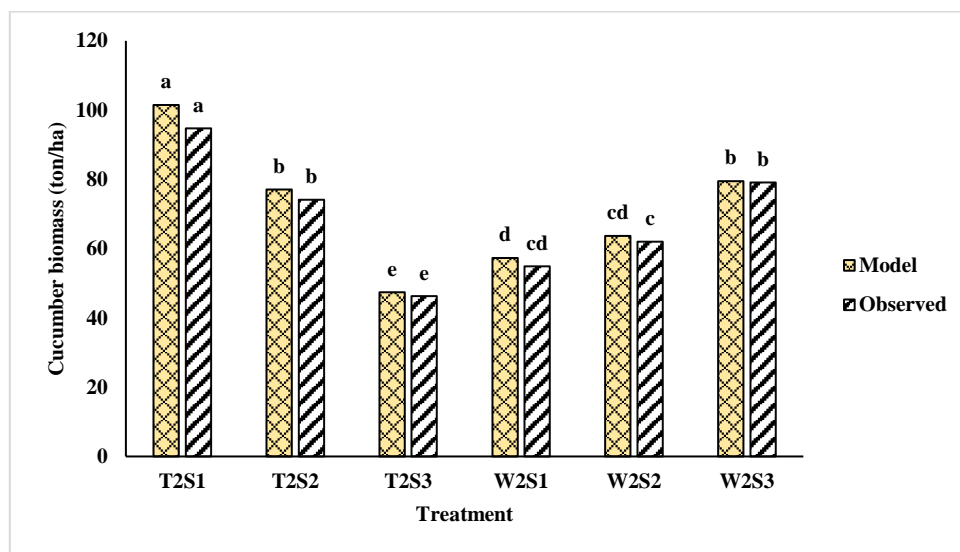


Figure 3. Observed and simulated cucumber biomass in model validation stage

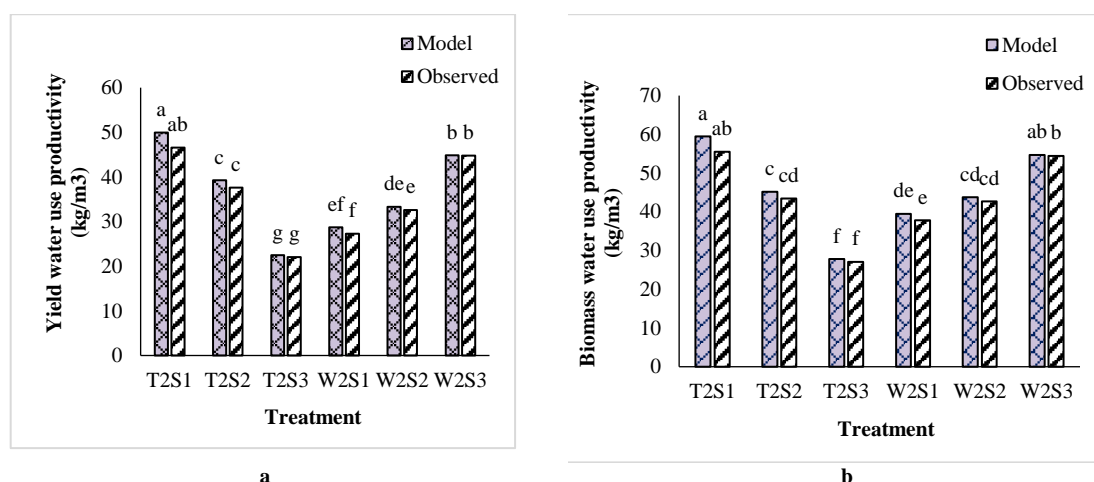


Figure 4. Observed and simulated yield (a) and biomass (b) water use productivity in validation stage

همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است بین داده‌های مشاهداتی مربوط به تیمارهای اعمال‌شده در سطوح مختلف خاک در دو روش آبیاری و داده‌های حاصل از خروجی شبیه‌سازی مدل، انطباق خوبی وجود دارد با توجه به شکل (۴) روند عملکرد بهره‌وری مصرف آب محصول و زیست‌توده در سیستم آبیاری قطره‌ای از خاک S₁ به خاک S₃ کاهش یافته و در سیستم فتیل‌ای این روند افزایشی است. که نشان از اهمیت بافت خاک در میزان این پارامتر مهم در روش‌های مختلف آبیاری دارد. مدل AquaCrop نیز در هر دو سیستم این روند را به خوبی شبیه‌سازی کرده است، به طوری که در تمام تیمارها مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل براساس روش آماری دانکن در گروه‌های آماری مشترک قرار گرفتند.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه خیار گلخانه‌ای در دو سیستم آبیاری قطره‌ای و فتیل‌ای

موبینگی تحت کشت در بافت‌های مختلف خاک مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن توسط مدل AquaCrop ارزیابی شد. روش کار شامل کشت گیاه خیار گلخانه‌ای در دو دوره در سه نوع بافت خاک لومرسی با نشان (S₁)، لومرسی شنی با (S₂) و لوم‌شنی با (S₃) تحت اعمال آبیاری به دو روش قطره‌ای و فتیله‌ای و بررسی تأثیرات این عوامل بر صفات رویشی زایشی و ریشه‌ای گیاه خیار گلخانه‌ای رقم ناگین بود. نتایج این تحقیق نشان داد عملکردهای محصول و زیست‌توده به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات اصلی آبیاری، بافت خاک و دوره کشت قرار گرفتند. مقایسه میانگین داده‌ها نشان‌دهنده برتری نسبی عملکرد سیستم آبیاری قطره‌ای در صفات عملکرد محصول و زیست‌توده در دو دوره مورد بررسی نسبت به سیستم آبیاری فتیله‌ای بود. علت این نتیجه نحوه کود آبیاری در سیستم فتیله‌ای نسبت به سیستم قطره‌ای، و هم‌چنین بالابودن میزان EC خاک در سیستم فتیله‌ای به علت ضعف در آشفویی خاک در دوره اول کشت محصول بود که باعث کاهش عملکرد در صفات مذکور شد. در دوره دوم کشت به دلیل تجربه بیشتر و مدیریت مناسب‌تر سیستم‌های آبیاری خصوصاً در سیستم جدید فتیله‌ای و هم‌چنین اعمال آشفویی در سیستم در تمام صفات مورد بررسی شاهد عملکرد مناسب‌تر نسبت به دوره اول کشت بودیم. بیش‌ترین میزان عملکرد در اکثر صفات مورد بررسی در سیستم آبیاری قطره‌ای در خاک S₁ و در سیستم آبیاری فتیله‌ای در خاک S₃ مشاهده شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، بهره‌وری مصرف آب با کاهش حجم آبیاری در روش فتیله‌ای نسبت به روش قطره‌ای با توجه به ماهیت این سیستم و با توجه به میزان تولید محصول عملکرد تقریباً یکسانی را نشان دادند. به‌منظور ارزیابی و اعتبارسنجی مدل AquaCrop در پیش‌بینی تغییرات صفات کمی خیار گلخانه‌ای ابتدا مدل با توجه به شرایط محیط گلخانه و داده‌های حاصل از کشت در دوره اول محصول واسنجی گردید. داده‌های آماری سنجش دقت مدل نشان‌دهنده واسنجی مناسب مدل در تیمارهای مدنظر بود. نتایج اعتبارسنجی مدل با استفاده از داده‌های مرحله دوم کشت که با استفاده از شاخص‌های ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده انجام گرفت گویای شبیه‌سازی با دقت بالای مدل در تخمین عملکرد محصول و پیش‌بینی تغییرات آن منطبق با شرایط حاکم در گلخانه در روش‌های آبیاری و بافت‌های مختلف خاک بود. مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل شبیه‌سازی برای عملکرد زیست‌توده نیز از دقت قابل قبولی برخوردار بود. مدل AquaCrop پیش‌بینی قابل قبولی از تغییرات بهره‌وری مصرف نسبت به عملکرد محصول و زیست‌توده از خود ارائه داد، به‌طوری‌که در تمام تیمارها مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل براساس روش آماری دانکن در گروه‌های آماری مشترکی قرار گرفتند. در اکثر پارامترهای مورد بررسی برآورد مدل نسبت به داده‌های مشاهداتی به دلیل شرایط ایده‌آل‌تر مدل نسبت به محیط گلخانه بالاتر بود، اما روند افزایشی و کاهش‌ی شبیه‌سازی مدل در تیمارهای مورد بررسی کاملاً مطابق با داده‌های مشاهداتی بود. در مجموع نتایج حاصله نشان دادند مدل AquaCrop کارایی مناسبی برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه خیار گلخانه‌ای داشت.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Food and Agriculture Organization
2. Capillary Wick Irrigation System

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Abedi Koupai, J., & Mesforoush, M. (2009). Evaluation of superabsorbent polymer application on yield, water and fertilizer use efficiency in Cucumber (*Cucumis sativus*). *Iranian Journal of irrigation and drainage*, 3(2), 100-111. (In Persian).
- Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T. B. S., Singh, M., Pathak, H., & Ahmad, T. (2012). Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110, 55-66.
- Abioye, A. E., Abidin, M. S. Z., Mahmud, M. S. A., Buyamin, S., Ishak, M. H. I., Abd Rahman, M. K. I., & Zangina, U. (2020). Performance comparison of experimental IOT based drip and fibrous capillary irrigation systems in the cultivation of cantaloupe plants. *Advances in Agricultural and Food Research Journal*, 1(2), 1-12.
- Adabi, V., Azizian, A., Ramazani Etedali, H., Kaviani, A., & Ababaei, B. (2020). Local sensitivity Analysis of AquaCrop Model for Wheat and Maize in Qazvin Plain and Moghan Pars-Abad in Iran. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 6(13), 1565-1579. (In Persian).
- Akhavan, S., Shabanpour, M., & Esfahani, M. (2012). Soil compaction and texture effects on the growth of roots and shoots of wheat. *Water and Soil*, 26(3), 727-735. (In Persian).
- Alizadeh, H.M., Nazari, B., Parsinezhad, M., Ramezani etedali, H. and Janbaz. R. 2010. Evaluation of AquaCrop model under water deficit management in Karaj region. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 2 (4), 273-283.
- Aly, A. A., Al-Omran, A. M., & Khasha, A. A. (2015). Water management for cucumber: greenhouse experiment in Saudi Arabia and modeling study using SALTMED model. *Journal of Soil and Water Conservation*, 70(1), 1-11.
- Ansari, M. A., Egdernezhad, A., & Ebrahimipak, N. A. (2019). Simulating of Potato (*Solanum tuberosum* L.) Yield under Different Irrigation Conditions using AquaCrop and Cropsyst Models. *Journal of Crop Ecophysiology*, 13(2), 287-304. (In Persian).
- Bannayan, M., & Hoogenboom, G. (2009). Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field crops research*, 111(3), 290-302.
- Darko, R. O., Shouqi, Y., Haofang, Y., Liu, J., & Abbey, A. (2016). Calibration and validation of AquaCrop for deficit and full irrigation of tomato. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 9(3), 104-110.
- Ebrahimipak, N. A., Egdernezhad, A., & Khodadadi Dehkordi, D. (2018). Evaluation of AquaCrop Model to Simulate Corn Yield under Water deficit and Superabsorbent application. *Journal of Water and Irrigation Management*, 31(1), 166-184. (In Persian).
- Esmailian, Y., & Ramroudi, M. (2018). Evaluation of AquaCrop model in simulating yield and water Use efficiency of three corn hybrids under hot-dry climatic conditions. *Journal of Crop Eco physiology*, 12(3), 355-376. (In Persian).
- Fadul, E., Masih, I., De Fraiture, C., & Suryadi, F. X. (2020). Irrigation performance under alternative field designs in a spate irrigation system with large field dimensions. *Agricultural Water Management*, 231.
- Faostat. F.A.O. (2019). Food and agriculture organization of the United Nations statistic division <https://www.Fao.org/faostat/en/#data>.
- Farahani, H. J., Izzi, G., & Oweis, T. Y. (2009). Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy journal*, 101(3), 469-476.
- Ghaemi, M., Kalarestaghi, K., & Nabavi, S. M. (2010). Effects of different substrates on quantitative characteristics of cucumber negin cultivar in hydroponic irrigation system. *New Findings in Agriculture*, 4(2), 157-166. (In Persian).
- Greaves, G. E., & Wang, Y. M. (2016). Assessment of FAO AquaCrop model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in a tropical environment. *Water*, 8(12), 557.
- Geerts, S., & Raes, D. (2009). Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96, 1275-1284.
- Hashem, F. A., Edanny M. A., Abd Elmonem, E. M., & Abdallah, M. M. F. (2011). Influence of greenhouse cover on potential evapotranspiration and cucumber water requirements. *Arab Universities Journal of Agricultural Sciences*, 19(1), 205-215.

- Heng, L. K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T., & Steduto, P. (2009). Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy journal*, 101(3), 488-498.
- Hoogenboom, G., White, J. W., & Messina, C. D. (2004). From genome to crop: integration through simulation modeling. *Field Crops Research*, 90(1), 145-163.
- Hsiao, T. C., Heng, L. K., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101, 448-459.
- Jamieson, P. D., Porter, J. R., & Wilson, D. R. (1991). A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field crops research*, 27(4), 337-350.
- Jodeyri Heydari, N., & Liaghat, A. (2021). Effectiveness of Wick Irrigation Method on Yield and Water Use Efficiency on Maize in Semi-Arid Area. *Environment and Water Engineering*, 8(1), 122-132. (In Persian).
- Khafajeh, H., Banakar, A., Minaei, S., & Delavar, M. (2020). Evaluation of AquaCrop model of cucumber under greenhouse cultivation. *The Journal of Agricultural Science*, 158(10), 845-854.
- Karimi Avargani, H., Rahimikhoob, A., & Nazarifar, M. H. (2017). Evaluation of AquaCrop model in simulating barley biomass production under deficit Irrigation. *Journal of Water Research in Agriculture*, 31(3), 341-353. (In Persian).
- Karimi, S., Egdernezhad, A., & Nakhjavanimoghaddam M. M. (2021). Assessing AquaCrop model accuracy for simulation of corn yield and water use efficiency in different plant densities and water amount. *Journal of Environment and Water Engineering* 7, 59-72.
- Khalili, N., Davary, K., Alizadeh, A., Kafi, M., & Ansari, H. (2015). Simulation of rainfed wheat yield using AquaCrop model, case study: Sisab rainfed researches station, Northern Khorasan. *Water and Soil*, 28(5), 939-9030. (In Persian).
- Kiyani, A. (2015). Guidelines for determining water efficiency in farms. Agricultural Engineering and Technical Research Institute-Office of the National Television Network of Agriculture and Knowledge Management.
- Lee, C., So, I., Jeong, S., & Huh, M. (2010). Application of Subirrigation Using Capillary Wick System to Pot Production. *Journal of Agriculture and Life*, 44, 7-13.
- Lim, T. J., Park, J. M., Park, Y. E., Lee, S. E., & Kim, K. I. (2015). Effect of soil textures on fruit yield, nitrogen and water use efficiencies of cucumber plant as affected by subsurface drip fertigation in the greenhouse. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 48(5), 372-378.
- Mohammadi, M., Davari, K., Ghahraman, B., Ansari, H., & Haghverdi, A. (2015). Calibration and validation of AquaCrop model for simulation of spring wheat yield under simultaneous salinity and water stress. *Journal of Water Research in Agriculture*, 29 (3), 277-295. (In Persian).
- Moslehi, S., Najafi, P., Tabatabaei, S., & Nourmahnad, N. (2011). Effect of soil moisture stress on yield and growth indexes of greenhouse cucumber. *Water and Soil*, 25(4), 770-775. (In Persian).
- Najafipour, R., Ramezani Etedali, H., & Nazari, B. (2020). Determination of water productivity and greenhouse cucumber water requirement in Qazvin. *Journal of Water and Soil*, 6(33), 811-822. (In Persian).
- Odhiambo, J. A., & Aguyoh, J. N. (2022). Soil moisture levels affect growth, flower production and yield of cucumber. *Agricultura Tropica et Subtropica*, 55(1), 1-8.
- Oktem, A., Simsek, M., & Oktem, A. G. (2003). Deficit irrigation effects on sweet corn (*Zea mays* saccharata Sturt) with drip irrigation system in a semi-arid region: I. Water-yield relationship. *Agricultural water management*, 61(1), 63-74.
- Pilling, D., Bélanger, J., & Hoffmann, I. (2020). Declining biodiversity for food and agriculture needs urgent global action. *Nature Food*, 1(3), 144-147.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2012). FAO, Land and water division Rome, Italy.
- Rahimikhoob, H., Sohrabi, T., & Delshad, M. (2020). 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*, 51(3), 541-552. (In Persian).
- Razavi, R., Majidi, A., Mokhtari, D., & Ghani Shaishte, F. (2009). Investigating the effect of deficit irrigation management on quantitative and qualitative performance and water use efficiency of rapeseed. In: Proceedings of the 11th *Iran Soil Science Congress*, July 11-24.
- Sarkohaki, A., Egdernezhad, A., & Minaei, S. (2021). Determining the accuracy and efficiency of water-driven and carbon-driven crop models to simulate the yield, biomass and water use efficiency of corn. *Journal of Water and Soil Sciences*, 25(1), 141-156. (In Persian).

- Semananda, N. P., Ward, J. D., & Myers, B. R. (2016). Evaluating the efficiency of wicking bed irrigation systems for small-scale urban agriculture. *Horticulturae*, 2(4), 13-25.
- Son, J. E., Oh, M. M., Lu, Y. J., Kim, K. S., & Giacomelli, G. A. (2006). Nutrient-flow wick culture system for potted plant production: System characteristics and plant growth. *Scientia horticulturae*, 107(4), 392-398.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water. I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101, 426-437.
- Takács, S., Csengeri, E., Pék, Z., Bíró, T., Szuvandzsiev, P., Palotás, G., & Helyes, L. (2021). Performance evaluation of AquaCrop model in processing tomato biomass, fruit yield and water stress indicator modelling. *Water*, 13(24), 1-15.
- Thomas, R. S., & Staub, J. E. (1992). Water stress and storage environment affect pillowy fruit disorder in cucumber. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117(3), 394-399.
- Wesonga, J. M., Wainaina, C., Ombwara F. K., Masinde, P. W., & Home, P. G. (2014). Wick material and media for capillary wick based irrigation system in Kenya. *International Journal of Science and Research*, 3, 613-617.
- Xu, J., Bai, W., Li, Y., Wang, H., Yang, S., & Wei, Z. (2019). Modeling rice development and field water balance using AquaCrop model under drying-wetting cycle condition in eastern China. *Agricultural Water Management*, 213, 289-297.
- Zarei, Z., & Heidari, H. (2017). Investigating water use efficiency in sunflower under furrow and wick irrigation methods. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 10(4), 521-530. (In Persian).
- Zamani, E., Kamali Ali abad, K., & Ramin, A. A. (2020). An investigation of Salinity Stress Effects on Vegetative and Physiological Characteristics of Cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Journal of Crop Breeding*, 12(33), 110-118. (In Persian).