Archive of SID
DOI: 10.22059/ijswr.2019.267026.668022 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۰، شماره ۷، آذر ۱۳۹۸ (ص ۱۷۸۰-۱۷۷۱)

The Effect of Spinach Planting Density on Normalized Water Productivity

MOHAMMAD REZA RAHMAVAND[1], ALI RAHIMIKHOOB[2*], MOSTAFA ARAB[3], MARYAM VARAVIPOUR[4]

1. MSc. Student, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran,Tehran, Iran.
2. Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran,Tehran, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Aburaihan, University of Tehran,Tehran, Iran.
4. Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran,Tehran, Iran.

ABSTRACT

The normalized water productivity parameter is one of the AquaCrop model's input, upon which the crop biomass yield is simulated on a daily basis. The necessitate of this research is that the amount of normalized water productivity for spinach has not been determined so far. This research was carried out at the Abourihan Campus farm of the University of Tehran which is located in Pakdasht. The experiments were performed during cultivation year of 2017-2018 with six planting densities of 12, 16, 17, 22, 25 and 33 plants per square meter and four replications with full irrigation. The biomass yield was measured seven times during the cultivation season. Considering the measured data of biomass and relative transpiration, the normalized water productivity was obtained for five treatments. The highest amount of normalized water productivity (12.4 g/m^2) was related to 25 plants per square meter density. A relationship function was found using normalized water productivity and planting density data. This function was tested using the remaining treatment and placing the normalized water productivity in the Aqua Crop model. The mean root square error and the mean bias error between the measured and simulated data were 20.9 and 6.6 g/m^2 at the test step. The results of this study showed that the planting density affects normalized water productivity and it is increased by increasing planting density (optimum density) and then it is decreased. Finally, this study suggests that the normalized water productivity regarding to planting density is entered to the AquaCrop model.

Keyword: AquaCrop, Biomass, yield, simulation, Verification

* Corresponding Author's Email: akhob@ut.ac.ir
www.SID.ir

Archive of SID

اثر تراکم کاشت گیاه اسفناج بر روی بهره‌وری آب نرمال‌شده

محمدرضا رحماوند[۱]، علی رحیمی خوب[۲]، مصطفی عرب[۳]، مریم وراوی‌پور[۴]

۱. داتشجوی ارشد گروه آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. استاد، گروه آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران ، تهران، ایران

۳. استادیار، گروه تولیدات گیاهی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴. دانشیار، گروه آبیاری و زهکشی،پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۲۲- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۲/۱۴- تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱۲/۱۸)

چکیده

عامل بهره‌وری آب نرمال شده یکی از ورودی‌های مدل آکواکراپ است که بر اساس آن عملکرد زیست‌توده محصول در مقیاس روزانه شبیه‌سازی می‌شود. ضرورت این پژوهش آن است که تاکنون مقدار بهره‌وری آب نرمال شده برای گیاه اسفناج تعیین نشده است. این پژوهش در مزرعه کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران واقع در پاکدشت انجام شد. آزمایش‌ها در سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ در شش تراکم کاشت ۱۲، ۱۶، ۱۷، ۲۲، ۲۵و ۳۳ بوته در مترمربع در چهار تکرار با آبیاری کامل انجام شد. عملکرد زیست‌توده در طول فصل کشت در کل هفت بار اندازه‌گیری شد. با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده زیست‌توده و تعرق نسبی گیاه، بهره‌وری آب نرمال شده برای پنج عدد از تیمارها به دست آمد. بیشترین بهره‌وری آب نرمال شده با ۱۲/۴ گرم بر مترمربع مربوط به تیمار دارای تراکم کاشت ۲۵ بوته در مترمربع بود. با استفاده از داده‌های بهره‌وری آب نرمال شده و تراکم کاشت (بوته در مترمربع) رابطه‌ای به دست آمد. این رابطه با استفاده از یک تیمار باقی‌مانده و قرار دادن بهره‌وری آب نرمال شده در مدل آکواکراپ آزمون شد. ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای اریب بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در مرحله تست ۲۰/۹ و ۶/۶ گرم بر مترمربع بود. نتایج این پژوهش نشان داد تراکم کاشت روی بهره‌وری آب نرمال شده تأثیر دارد و با افزایش تراکم کاشت بهره‌وری آب نرمال شده افزایش و سپس کاهش می‌یابد. پیشنهاد کلی این پژوهش آن است که عامل بهره‌وری آب نرمال شده با توجه به میزان تراکم کشت در مدل آکواکراپ انتخاب و وارد شود.

واژه‌های کلیدی: آکواکراپ، زیست‌توده، عملکرد، شبیه‌سازی، صحت‌سنجی

مقدمه

عملکرد هر گیاه تحت تأثیر روش کشت، تراکم بوته، میزان آب آبیاری و تغذیه مناسب می‌باشد. در گیاه اسفناج، افزایش سطح برگ‌ها عامل دریافت بیشتر تشعشع خورشیدی بوده و در نتیجه افزایش عملکرد را به همراه خواهد داشت. درکشت‌های ردیفی با فواصل کم، بایستی تعداد گیاهان زیادتر باشد تا بتوانند با علف‌های هرز رقابت نمایند. آبیاری نامناسب از نظر میزان آب این گیاهان از یک‌سو موجب کاهش کیفیت و بازارپسندی محصول می‌شود و از سوی دیگر با تخریب اندام فتوسنتز کننده گیاه، تأثیر نامطلوبی بر عملکرد خواهد داشت (Kukchi and Sarmadnia, 1997). تعیین تراکم مناسب گیاهی، مستلزم آگاهی کامل از ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه و ارتباط آن با عوامل محیطی است. تعیین تراکم مناسب و توزیع متعادل بوته در واحد سطح موجب استفاده بهتر از نور، رطوبت و مواد غذایی گردیده و عملکرد را افزایش می‌دهد. در اکثر گیاهان، تراکم پایین کشت سبب می‌شود از پتانسیل موجود مزرعه بهره‌برداری کافی به عمل نیاید. از طرفی افزایش بیش از حد تراکم نیز باعث کاهش عملکرد از طریق افزایش رقابت درون‌گونه‌ای و نقصان شاخص برداشت می‌گردد (Sarmadnia and Kukchi, 1989). افزایش سطح برگ می‌تواند سبب افزایش عملکرد شده و از این‌رو عوامل مؤثر بر روی این شاخص، مانند تراکم بوته و کود مصرفی مهم تلقی می‌شوند (Hosseinpour *et al*., 1998). تراکم و آرایش کاشت دو عاملی هستند که با تحت تأثیر قرار دادن ساختار سایه‌انداز، از طریق تغییر شکل اندام‌های هوایی (همچون اندازه برگ‌ها، جهت‌گیری و نحوه اتصال آن‌ها به ساقه) قادر به کاهش پتانسیل تداخل علف‌های هرز از طریق افزایش جذب نوری کانوپی هستند (Weiner *et al*., 2001, Maddonni *et al*., 2001). تلاش‌های پژوهشگران تاکنون عمدتاً به افزایش تولید در واحد سطح معطوف بوده، درصورتی‌که در شرایط محدودیت منابع آب و فراوانی نسبی اراضی قابل‌کشت (شرایط حاکم بر اکثر مناطق ایران) هدف اصلی

(*- نویسنده مسئول: akhob@ut.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

بایستی بیشتر متمرکز بر تولید پایدار به ازای واحد آب مصرفی و استفاده بهینه از این منابع باشد (English *et al*., 1990).

بهره‌وری آب نرمال شده یکی از عوامل مهم برای تعیین زیست‌توده گیاهی در مدل آکواکراپ است (Karimi organy *et al*., 2015). بهره‌وری آب در مدل آکواکراپ، میزان عملکرد گیاه در واحد سطح در شرایط پوشش ۱۰۰ درصد (کامل) و بدون هیچ‌گونه تنشی (اعم از تنش آبی، شوری و دمایی) تعریف شده است. این عامل در نرم‌افزار آکواکراپ برای هر گیاه ثابت در نظر گرفته شده است (Steduto *et al*., 2009). تحقیقات نشان داده است این عامل مقدار مشخص و ثابتی ندارد و برای هر منطقه و نوع رقم گیاه متفاوت است (Karimi organy *et al*., 2015).

تاکنون مدل‌های متعددی مثل کراپ‌سیست[1] و وفوست[2] برای شبیه‌سازی عملکرد محصول ارائه شده و اغلب آن‌ها از عوامل زیادی استفاده می‌کنند که علاوه بر اینکه کار کردن با این مدل‌ها را سخت و دشوار می‌کند، واسنجی آن‌ها برای هرگونه گیاهی بسیار پیچیده می‌شود. سازمان فائو مدلی به نام آکواکراپ[3] عرضه نموده که عملکرد محصول را در پاسخ به مقدار آب کاربردی شبیه‌سازی می‌کند (Steduto at al., 2009). این مدل در مقایسه با دیگر مدل‌های شبیه‌سازی گیاه مثل کراپ‌سیست از عوامل کمتری استفاده می‌کند و در آن سعی شده که تعادلی بین دقت، سادگی و سهولت استفاده برای کاربران برقرار شود (Hsiao *et al*., 2009). تاکنون پژوهش‌های گوناگونی در رابطه با صحت‌سنجی و واسنجی برخی از پارامترهای مدل آکواکراپ برای محصولات مختلف در مناطق مختلف جهان انجام شده است. این مدل با استفاده از داده‌های تجربی شش فصل زراعی بر روی ذرت در دانشگاه کالیفرنیا مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد این نرم‌افزار قادر است، زیست‌توده و عملکرد محصول را در شرایط مختلف تراکم بوته، تاریخ کاشت و نیاز آبی با دقت مناسبی شبیه‌سازی کند (Hsiao *et al*., 2009). Garcia *et al*. (2009) مدل آکواکراپ را برای بهینه کردن مقدار آبیاری در پنبه در جنوب اسپانیا بکار بردند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل مذکور عملکرد، توده گیاهی و کارآیی مصرف آب را برای پنبه به خوبی شبیه‌سازی کرده است. Iqbal *et al*. (2014) به منظور بررسی عملکرد مدل آکواکراپ برای گندم زمستانه، مطالعه‌ای در دشت شمالی چین انجام دادند. آزمایش‌های مزرعه‌ای در ایستگاه لانچنگ در سال‌های ۱۹۹۸-۲۰۰۱ تحت کم‌آبیاری اجرا شد و مدل آکواکراپ با بخشی از تیمارها، واسنجی و با دسته دیگر اعتبارسنجی شد. مدل آکواکراپ با داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی عملکرد دانه و با در نظر گرفتن شرایط واقعی مزرعه در سال‌های ۱۹۹۰ تا۲۰۱۰ مورد اعتبارسنجی مجدد قرار گرفت. به طور کلی در اعتبارسنجی مدل، ریشه میانگین مربعات خطا برای عملکرد دانه ۰/۵۸ تن در هکتار، بیوماس ۰/۸۷ تن در هکتار، تبخیر و تعرق واقعی ۳۳/۲ میلی‌متر و رطوبت حجمی خاک ۲۴/۵-۳۷/۶ میلی‌متر بود. نتایج کلی براساس اعتبارسنجی و اعتبارسنجی مجدد نشان داد که آکواکراپ، مدلی معتبر است و می‌توان با درجه قابل اطمینان از دقت و صحت مدل برای بهینه‌سازی تولید عملکرد دانه گندم زمستانه و نیاز آبی در دشت شمالی چین استفاده کرد. در نهایت محققان به این نتیجه رسیدند که مدل آکواکراپ ابزاری توانمند در شبیه‌سازی عملکرد محصول در شرایط مختلف می‌باشد. Stricevic *et al*. (2014) اثر کم آبیاری و افزودن کود نیتروژن بر عملکرد ذرت و بهره‌وری آب طی سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ در دهلی را با استفاده از مدل آکواکراپ شبیه‌سازی نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل مذکور از دقت خوبی در برآورد مقدار زیست‌توده و وزن دانه ذرت برخوردار است (میانگین ریشه مربعات خطا در این تحقیق ۰/۲۹ تا ۰/۴۲ تن بر هکتار و ضریب تبیین ۰/۹ تا ۰/۹۱ بود). همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که دقت مدل با افزایش سطح تنش کاهش می‌یابد به طوری که کمترین دقت در تیمار بدون افزودن کود و تیمار حداکثر کم آبیاری حاصل شد. میزان خطای مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی بهره‌وری آب ۲/۳۵ تا ۲۷/۵ درصد بود.

مدل آکواکراپ برای تعدادی محصول و برخی از مناطق ایران نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. Alizadeh *et al*. (2010) کارآیی مدل آکواکراپ را برای گندم در منطقه کرج برای دور آبیاری ۷ و ۱۴ روز مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل در پیش‌بینی عملکرد دانه، کارآیی مصرف آب قابلیت خوبی داشت ولی با افزایش دور آبیاری به ۱۴ روز، دقت مدل کاهش یافت. مدل آکواکراپ برای محصول آفتابگردان در استان خوزستان مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد این مدل با دقت بالایی عملکرد محصول را شبیه‌سازی می‌کند (Haydarinia *et al*., 2012). مدل فوق برای ذرت علوفه‌ای در منطقه قزوین توسط Rahimikhoob *et al*. (2014) مورد واسنجی قرار گرفت. بر اساس نتایج آن‌ها متوسط خطای مدل حدود ۱۱ درصد تعیین شد. در مدل آکواکراپ، تبخیر و تعرق به دو جزء تعرق گیاه و تبخیر از خاک تفکیک می‌گردد و زیست‌توده با استفاده از تعرق روزانه گیاه و عامل بهره‌وری آب نرمال شده

1 - CropSyst
2 - WOFOST
3 - AquaCrop

www.SID.ir

Archive of SID

(BWP) برآورد می‌گردد (Hsiao *et al.*, 2009). پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده یکی از عوامل مهم برای تعیین زیست‌توده گیاهی در مدل آکواکراپ است و لازم است برای هر منطقه و نوع رقم گیاه تعیین گردد. بررسی منابع نشان می‌دهد تاکنون این عامل برای گیاه اسفناج تعیین نشده و با توجه به اینکه تراکم بوته بر روی عملکرد محصول در واحد سطح اثر مهمی دارد، لذا بررسی اثر تراکم بر روی بهره‌وری آب نرمال شده مهم می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش به دست آوردن عامل BWP برای گیاه اسفناج و بررسی اثر تراکم کاشت بر روی بهره‌وری آب نرمال‌شده (BWP) می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مشخصات محل آزمایش

این پژوهش در منطقه پاکدشت در جنوب شرقی شهر تهران انجام شد. پاکدشت یکی از مهم‌ترین قطب‌های کشاورزی استان تهران می‌باشد. پاکدشت مطابق طبقه‌بندی اقلیمی دو مارتن جزو مناطق خشک محسوب می‌شود که در آن میانگین بارندگی سالانه ۱۴۱میلی‌متر، دمای متوسط سالانه ۱۵/۶ سانتی‌گراد و تبخیر-تعرق سالانه ۱۳۹۰ میلی‌متر است (Amiritabar *et al.*, 2014). پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران در منطقه پاکدشت قرار گرفته است و این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی آن بر روی گیاه اسفناج رقم ویروفلای (VIROFLAY) در سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ انجام‌شد. این مزرعه در طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی, عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۰۲۷ متر واقع شده است. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و آب محل آزمایش در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات خاک مزرعه

ضخامت لایه (m)	بافت خاک	رطوبت مزرعه (درصد حجمی)	رطوبت پژمردگی (درصد حجمی)	جرم مخصوص ظاهری (g/cm^3)	رطوبت اشباع (در صد حجمی)	EC_e (dS/m)
۰-۲۰	لوم سیلتی	۲۰/۲	۱۰/۰	۱/۴	۴۴/۶	۳/۵
۲-۴۰	لوم شنی	۲۰/۵	۱۰/۲	۱/۲	۴۳/۶	۳/۷
۴۰-۶۰	لوم شنی	۲۱/۴	۱۰/۷	۱/۳	۴۰/۹	۴/۱
۶۰-۱۰۰	لوم شنی	۱۸/۸	۹/۶	۱/۳	۴۸/۶	۴/۶

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی آب

پارامتر	Ca + Mg (meq/lit)	Na (meq/lit)	pH	EC (dS/m)
مقدار	۱۶	۲/۹	۷/۲	۱/۴

تشریح مدل

در این پژوهش از نسخه ۵ مدل اکواکراپ استفاده شد. در این مدل، مقدار عملکرد زیست‌توده تا i امین روز پس از کاشت از رابطه (۱) حساب می‌شود (Steduto *et al.*, 2009):

$$B = BWP \times \left(\sum \frac{T_{r,i}}{ET_{o,i}}\right) \quad \text{(رابطه ۱)}$$

در رابطه فوق، B عملکرد زیست‌توده تا i امین روز پس از کاشت (گرم بر مترمربع)، BWP ضریب بهره‌وری نرمال شده (گرم بر مترمربع)، $T_{r,i}$ تعرق روزانه گیاه (میلی‌متر در روز) و ET تبخیر و تعرق مرجع (میلی‌متر در روز) می‌باشند. در مدل آکواکراپ، پارامتر تعرق گیاه (T_r) از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$T_r = K_s \times K_c \times CC \times ET_o \quad \text{(رابطه ۲)}$$

در رابطه فوق، K_s ضریب تنش آبی، K_C ضریب گیاهی، CC ضریب پوشش گیاهی و ET_o تبخیر و تعرق مرجع می‌باشند. با توجه به اینکه برنامه آبیاری در این پژوهش به صورتی بوده که گیاه تحت تنش کم‌آبی قرار نگیرد، لذا ضریب Ks برابر یک در نظر گرفته شد. ضریب گیاهی K_C نسبت بین تبخیر و تعرق گیاه بدون تنش آبی به تبخیر و تعرق مرجع است. این ضریب در مدل آکواکراپ با استفاده از روش ارائه شده در نشریه شماره ۵۶ فائو (Allen *et al.*, 1998) در طول دوره رشد برآورد می‌شود. ضریب پوشش گیاهی در مدل آکواکراپ از زمان کاشت بذر تا پایان مرحله توسعه با استفاده از دو معادله زیر برآورد می‌شود (Steduto *et al.*, 2009):

$$C = CC_O \times e^{(CGC \times t)} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

$$CC = CC_X - [CC_O \times e^{(-CGC \times t)}] \quad \text{(رابطه ۴)}$$

معادله (۳) برای دوره زمانی کاشت بذر تا نیمه مرحله توسعه استفاده می‌شود و معادله (۴) برای دوره زمانی از نیمه، مرحله توسعه تا آخر مرحله توسعه است. در معادلات فوق, CC پوشش گیاهی در t روز پس از کاشت، CC_x حداکثر پوشش گیاهی، CC_o پوشش اولیه گیاه در زمان t=0 و CGC نرخ رشد پوشش گیاه در روز است. پوشش گیاه در طول دوره مرحله آخر

www.SID.ir

Archive of SID

که در آن شیب پوشش گیاهی به صورت نزولی است، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$CC = CC_X \times \{1 - 0.05 \times [e^{\left(\frac{CDC}{CC_X}\times t\right)} - 1]\}$$ (رابطه ۵)

در روابط فوق، CDC نرخ کاهش پوشش گیاهی و t زمان برحسب روز که از مرحله چهارم رویش (پیری) شروع می‌شود. مدل آکواکراپ از روش واحد گرمایی برحسب درجه روزرشد، برای توصیف رشد گیاه استفاده می‌کند. با استفاده از این روش، طول دوره‌های رشد گیاه یا زمان لازم برای رسیدن به یک مرحله از رشد گیاه برحسب درجه روزرشد به‌جای تعداد روزها بیان می‌شود. درجه روزرشد از تفاضل دمای پایه[1] بر متوسط دمای روزانه هوا حساب می‌شود:

$$GDD = T_{avg} - T_{base}$$ (رابطه۶)

در رابطه فوق T_{avg} متوسط دمای روزانه هوا دمای پایه(°C) , T_{base} دمای پایه(°C) و GDD درجه روزرشد (°C) می‌باشند. دمای پایه دمایی است که کمتر از آن برای محاسبه درجه روزرشد به حساب نمی‌آید و به عبارتی رشد گیاه به جریان نمی‌افتد. همچنین در آکواکراپ آستانه دمای بالا (T_{upper}) هم در نظر گرفته می‌شود. آستانه دمای بالا، دمایی است که بالاتر از آن منجر به افزایش درجه روزرشد نمی‌شود. مقادیر دمای پایه و آستانه دمای بالا بر اساس مقادیر پیش‌فرض مدل به ترتیب برابر ۸- و ۴۰ در نظر گرفته شده است.

مشخصات تیمارها و اندازه‌گیری‌ها

تیمارهای آزمایش شامل شش تراکم مختلف کاشت گیاه اسفناج با آبیاری کامل (بدون تنش آبی) در سال آبی ۹۷-۱۳۹۶ در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار انجام شد. مشخصات تیمارها در جدول (۳) ارائه شده است. به منظور مستقل بودن تیمارها نسبت به هم، نیم متر بین کرت‌ها فاصله گذاشته شد. تمام عملیات کشاورزی در طول فصل کشت بر اساس توصیه‌های متخصصین کشاورزی انجام گرفت. برای اینکه تعداد بوته در هر کرت دقیق باشد ابتدا بذرها در سینی نشاء کشت شدند و بعد از دو هفته به زمین اصلی منتقل شدند. مقدار ۳۰ تن در هکتار کود حیوانی و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره مصرف شد. کود حیوانی قبل از کشت به زمین داده شد و کود اوره طی دو مرحله به صورت سرک به زمین داده شد.

جدول۳- مشخصات تیمارها

مشخصات	واحد	تیمار					
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
فاصله‌ها	سانتی‌متر	۳۰×۱۰	۳۰×۱۵	۳۰×۲۰	۴۰×۱۰	۴۰×۱۵	۴۰×۲۰
بوته در مترمربع	عدد	۳۳	۲۲	۱۶	۲۵	۱۷	۱۲

مقدار آبیاری کرت‌ها بر اساس مقادیر مصرف آب در گلدان-های تحت کشت اسفناج به صورتی تعیین می‌شد که تنش آبی به گیاه وارد نشود. برای این منظور سه گلدان به قطر ۲۰ و ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و یک بوته در هر گلدان کاشته شد. آبیاری هم در کرت‌ها و هم در گلدان‌ها به صورت روزانه انجام می‌گرفت. در این پژوهش مقدار تبخیر و تعرق گیاه معادل کاهش رطوبت خاک در هر گلدان نسبت به رطوبت ظرفیت مزرعه در نظر گرفته شد. در واقع از گلدان‌ها به‌مانند یک لایسیمتر وزنی استفاده شد. آماده‌سازی گلدان‌ها به این صورت انجام گرفت که در ابتدا با خاک مزرعه پر شدند و رطوبت خاک درون گلدان‌ها با آب زیاد به حد اشباع رسانده شد و سپس سطح آن‌ها با ورق فویل پوشانده شدند. پس از گذشت سه روز که اطمینان حاصل شد که آب ثقلی از گلدان‌ها خارج شده، گلدان‌ها توزین شدند و وزن گلدان‌های محتوی خاک در این حالت معرف وزن رطوبت ظرفیت خاک مزرعه به‌اضافه وزن گلدان فرض شد. زمان وزن‌گیری گلدان‌ها روزانه حدود ساعت هشت صبح بود و به گلدان‌ها به مقدار لازمی که وزنشان به وزن ظرفیت مزرعه برسد، آب داده شد. معادل ارتفاع آب مصرفی گلدان‌های هر تیمار از تقسیم میانگین حجم آب داده شده به گلدان‌ها بر سطح مقطع گلدان‌ها به دست می‌آمد. برای اینکه اطمینان حاصل شود که کرت‌های آزمایشی حداقل آب لازم بدون تنش آبی دریافت کرده باشد و همچنین مقداری آب از ناحیه رشد ریشه خارج شود تا تجمع املاح در دوره کشت اتفاق نیافتد، ارتفاع آبی که روزانه به کرت-های آزمایشی داده می‌شد به مقدار ۱۰ درصد بیشتر از ارتفاع آب مصرفی گلدان‌ها بود. حجم آب آبیاری بر اساس ارتفاع آب و مساحت کرت تعیین و میزان آب لازم با استفاده از آبپاش مدرج شده در هر کرت ریخته می‌شد. نیتروژن مورد نیاز با استفاده از کود اوره تأمین شد و مقدار و زمان کوددهی به‌قدر کفایت به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار به کرت‌ها داده شد. عملیات کوددهی به‌صورت سرک و طی دو نوبت در زمان‌های ۳۲ و ۴۷ روز بعد از

1 - Base temperature

www.SID.ir

Archive of SID

کشت انجام شد. در جدول (۴) ارتفاع آب داده شده به تیمارها در طول دوره کشت ارائه شده است.

جدول۴- میزان آبیاری در ماه‌های مختلف برای تیمارهای آبیاری کامل (بر حسب میلی‌متر)

ماه	عمق آبیاری (میلی‌متر)
دی	۴۰
بهمن	۱۰۶
اسفند	۲۵۹
فروردین	۱۵۸
مجموع	۵۶۳

پارامترهای هواشناسی شامل دمای حداکثر و حداقل هوا، رطوبت نسبی هوا، ساعات آفتابی و سرعت باد از ایستگاه هواشناسی پردیس از تاریخ اول دی‌ماه ۱۳۹۶ تا آخر فروردین ۱۳۹۷ جمع‌آوری شدند. تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از روش پنمن فائو مانتیث (Allen *et al*., 1998) محاسبه شد.

چهار پارامتر مربوط به پوشش گیاهی شامل درصد پوشش گیاه در شروع مرحله جوانه‌زنی (CCo)، نرخ رشد پوشش گیاه در مرحله توسعه (CGC)، حداکثر پوشش گیاه (CCX) و نرخ کاهش پوشش گیاه در مرحله پیری (CDC) برای اجرای مدل آکواکراپ لازم می‌باشند. برای تعیین پارامترهای فوق، درصد پوشش گیاه در طول دوره رشد اندازه‌گیری شد و بر پایه این اندازه‌گیری‌ها در صد پوشش گیاه در شروع مرحله جوانی و حداکثر پوشش گیاه و تغییرات پوشش گیاه بین دو اندازه‌گیری هم بر اساس شدت تغییرات بر روز محاسبه گردید. برای تعیین پوشش گیاهی از روش Patrignani and Ochsner (2015) استفاده شد. با استفاده از این روش، از سطح کرت عکس گرفته می‌شد و با انتقال عکس به نرم‌افزار کانوپی[1]، درصد پوشش گیاه محاسبه شد. برای گرفتن عکس‌ها، دوربین در ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر بالاتر از تاج پوشش گیاه و به طور موازی با سطح زمین قرار داده می‌شد. سه نمونه از عکس‌های قبل و بعد از پردازش در نرم‌افزار کانوپی در شکل (۱) ارائه شده است. طول و شروع دوره‌های مختلف رشد محصول اسفناج همراه با عملیات کشاورزی و آبیاری یادداشت‌برداری و ثبت می‌شد. مجموعه پارامترهای اندازه‌گیری شده و مشاهده‌شده از مراحل مختلف رشد که به عنوان ورودی به مدل آکواکراپ وارد شدند در جدول (۵) ارائه شده است. مقدار زیست‌توده تولیدشده در طول دوره رشد قبل از رسیدن کامل محصول و همچنین در زمان برداشت محصول درمجموع هفت مرتبه اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری زیست‌توده، کل قسمت اندام هوایی از سطح خاک به بالا از وسط هر کرت برداشت شد. نمونه‌ها به مدت ۳ روز در دستگاه آون با درجه حرارت ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند و سپس عملکرد کل محصول برای هر تیمار توزین شد. داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از نرم‌افزار SAS تحلیل آماری شدند.

برآورد بهره‌وری آب نرمال شده

برای تعیین بهره‌وری آب نرمال شده از روش (Steduto *et al*., 2009) استفاده شد. بدین‌صورت که نمودار پراکنش داده‌های نسبت تجمعی تعرق گیاه به تبخیر – تعرق مرجع ($\sum \frac{T_r}{ET_O}$) در مقابل زیست‌توده تجمعی رسم شد. برای به دست آوردن تعرق گیاه (Tr) مقادیر جدول (۵) را در مدل آکواکراپ وارد شد و با اجرای مدل مقادیر تعرق گیاه از آن استخراج گردید. ضریب معادله خطی که از مبدأ مختصات به داده‌های پراکنش برازش شده برابر بهره‌وری آب نرمال‌شده است. در این پژوهش برای بررسی رابطه بین تراکم کشت و بهره‌وری آب نرمال شده، داده-های تیمارهای T1، T2، T4، T5 و T6 برای واسنجی و داده‌های تیمار T3 برای صحت سنجی استفاده شدند. به منظور بررسی دقت رابطه تدوین شده علاوه ه بر ترسیم نمودارهای اندازه‌گیری شده در مقابل برآورد شده، از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای اریب (MBE) استفاده شده است. معادلات این شاخص‌ها به شرح زیر می‌باشند (Emamifar *et al*., 2014):

$$R^2 = \frac{[\sum(P_i-\bar{P})(O_i-\bar{O})]^2}{\sum(P_i-\bar{P})^2\sum(O_i-\bar{O})^2} \quad \text{(رابطه ۷)}$$

$$RMSE = [N^{-1}\sum_{i=1}^{N}(O_i-P_i)^2]^{0.5} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

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

که در آن‌ها، P_i مقادیر برآورد شده مدل، $\bar{P}$ متوسط مقادیر برآورد شده مدل، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده ، $\bar{O}$ متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده و N تعداد مشاهدات می‌باشند. میانگین خطای اریب میزان خطا را با بیش برآورد و یا کم برآورد نشان می‌دهد. درصورتی که این شاخص مثبت باشد نشان می‌دهد که درمجموع نتایج مدل بیشتر از مقادیر واقعی است.

نتایج و بحث

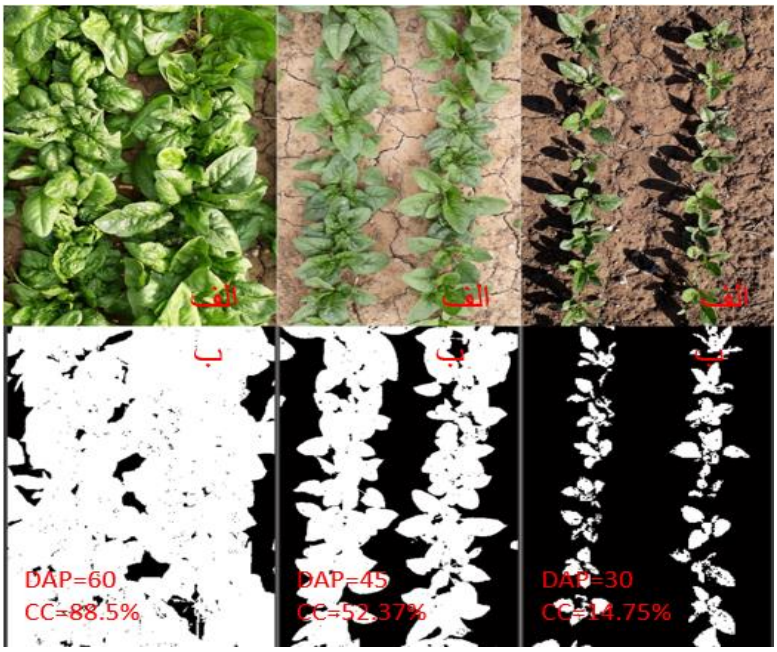
نتایج عملکرد زیست‌توده اندازه‌گیری شده در جدول (۶) ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل ملاحظه می‌گردد هرچقدر فاصله کاشت بیشتر گردد به دلیل اینکه گیاه فضای بیشتری را دارا می‌باشد عملکرد بیشتری داشته است و همچنین اگر فاصله‌ها از

1. Canopeo

www.SID.ir

Archive of SID

یک حدی بیشتر شود باعث کاهش عملکرد می‌شود. بیشترین عملکرد مربوط به تیمار T4 (۲۵ بوته در مترمربع) به مقدار ۳۶۱/۷ گرم بر مترمربع بود. مقادیر اندازه‌گیری شده زیست‌توده با استفاده از طرح بلوک‌های تصادفی و نرم‌افزار SAS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. جدول تجزیه واریانس زیست‌توده در جدول (۷) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اثر بلوک غیر معنی‌دار می‌باشد و نتایج اندازه‌گیری قابل اعتماد می‌باشد. همچنین اثر تیمار (تراکم کاشت) برای زیست‌توده در سطح ۱٪ معنی‌دار است. بنابراین تراکم کاشت سبب اختلاف معنی‌داری در عملکرد زیست‌توده اسفناج شد.



شکل ۱. تصاویر تاج‌پوشش اسفناج در سه تاریخ مختلف، الف- تصویر برداشت شده توسط دوربین ب- تصاویر پردازش شده توسط نرم‌افزار کانوپی

جدول۵- مقادیر پارامترهای ورودی به مدل آکواکراپ

پارامتر	واحد	تیمار					
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
پوشش سطح اولیه (CC_0)	درصد	۰/۶	۰/۴۶	۰/۳۷	۰/۴	۰/۳۵	۰/۲۵
نرخ توسعه پوشش گیاه (CGC)	درصد بر روز	۱۳/۷	۱۴/۲	۱۴/۵	۱۴/۴	۱۴/۳	۱۴/۸
نرخ کاهش پوشش گیاه (CDC)	درصد بر روز	۴/۴	۴/۴	۴/۳	۴/۳	۳/۵	۳/۴
حداکثر پوشش گیاه (CC_X)	درصد	۹۰	۸۹	۸۷	۸۷	۷۱	۶۸
زمان جوانه‌زنی	روز بعد از کاشت	۷	۷	۷	۷	۷	۷
زمان رسیدن به حداکثر پوشش	روز بعد از کاشت	۶۲	۶۲	۶۲	۶۲	۶۲	۶۲
زمان شروع پیری	روز بعد از کاشت	۶۴	۶۴	۶۴	۶۴	۶۴	۶۴
زمان رسیدن محصول	روز بعد از کاشت	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵

جدول۶- متوسط عملکرد زیست‌توده محصول اسفناج در روزهای مختلف پس از کاشت در تیمارهای مختلف

روز پس از کاشت	واحد	تیمار					
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
۱۶	گرم بر متر مربع	۲/۵	۱/۹	۱/۰	۱/۴	۱/۴	۰/۶
۲۳	گرم بر متر مربع	۴/۴	۴	۲/۴	۳/۷	۲/۵	۲/۴
۳۲	گرم بر متر مربع	۱۹	۱۱/۵	۱۱/۶	۱۱/۵	۸/۵	۷/۰
۳۷	گرم بر متر مربع	۳۸/۶	۲۱/۸	۱۸/۸	۲۸/۲	۱۵/۴	۱۲/۵
۴۶	گرم بر متر مربع	۱۳۹/۶	۹۲/۲	۷۷/۸	۸۸/۳	۶۱/۷	۴۹/۳
۵۸	گرم بر متر مربع	۲۳۶/۵	۲۸۱/۶	۲۷۹/۶	۲۵۸/۵	۲۱۴/۵	۱۵۱/۵
۶۵	گرم بر متر مربع	۳۲۴/۳	۳۵۶/۱	۳۳۴/۲	۳۶۱/۷	۳۲۱/۴	۱۹۳/۷

www.SID.ir

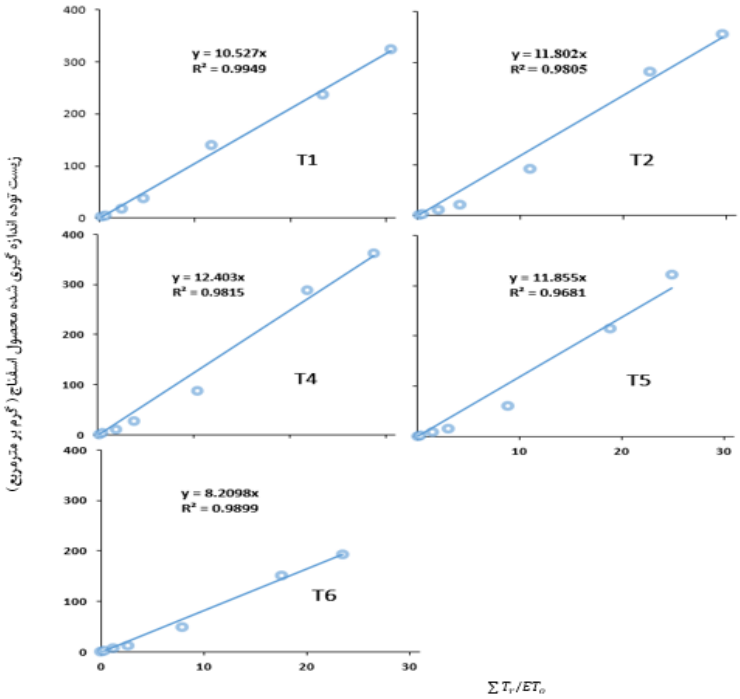
Archive of SID

جدول۷- جدول تجزیه واریانس زیست‌توده نهایی

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	Fs	Ft	
					۵٪	۱٪
بلوک	۲	۰/۰۱۴۵	۰/۰۰۷	۰/۴۷$^{n.s}$	۲/۲۲۸	۳/۱۶۹
تیمار	۵	۵/۷۲۱	۱/۱۴۴	۷۳/۹۰**	۲/۲۲۸	۳/۱۶۹
خطای آزمایشی	۱۰	۰/۱۵۴۸	۰/۰۱۵۴			
کل	۱۷	۵/۸۹۱				

** معنی‌دار در سطح ۱٪ * معنی‌دار در سطح ۵٪ ns غیر معنی‌دار

همان‌طور که در مواد و روش‌ها ذکر شد، برای تعیین بهره‌وری آب نرمال شده از روش (Steduto *et al.*, 2009) استفاده شد و بهره‌وری آب نرمال شده برای پنج عدد از تیمارها به دست آمد. نتایج حاصل در شکل (۲) ارائه شده است. با توجه به شکل (۲) ملاحظه می‌شود تراکم کاشت روی بهره‌وری آب نرمال شده تأثیر دارد و ضریب بهره‌وری آب نرمال شده با افزایش تراکم کاشت، افزایش می‌یابد و بیشترین مقدار آن مربوط به تیمار ۲۵ بوته در متر مربع (T4) بود که مقدار آن ۱۲/۴۰۳ گرم بر مترمربع است و سپس کاهش می‌یابد. مقادیر ضریب بهره‌وری نرمال شده به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار SAS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. جدول تجزیه واریانس بهره‌وری آب نرمال‌شده در جدول (۸) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اثر بلوک غیر معنی‌دار می‌باشد و نتایج اندازه‌گیری قابل اعتماد می‌باشد. همچنین اثر تیمار (تراکم کاشت) برای بهره‌وری در سطح ۱٪ معنی‌دار است. بنابراین تراکم کاشت سبب اختلاف معنی‌داری در بهره‌وری آب نرمال‌شده گردید.



شکل ۲. رابطه بین زیست‌توده و تعرق گیاه به تبخیر-تعرق مرجع برای تراکم‌های مختلف

جدول۸- تجزیه واریانس بهره‌وری آب نرمال شده (WP)

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	Fs	Ft	
					۵٪	۱٪
بلوک	۲	۰/۰۲۵	۰/۰۱۲	۰/۲۱^{ns}	۲/۴۴	۳/۷
تیمار	۴	۳۴/۸۱۴	۸/۷۰	۱۴۱/۶۹**	۲/۴۴	۳/۷
خطای آزمایشی	۱۰	۰/۴۹۱۴	۰/۰۶۱۴			
کل	۱۴	۳۵/۳۳۰				

** معنی‌دار در سطح ۱٪ * معنی‌دار در سطح ۵٪ ns غیر معنی‌دار

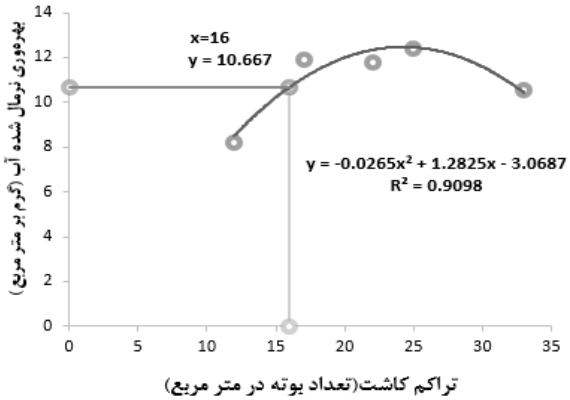
www.SID.ir

Archive of SID

همان‌طور که در مواد و روش‌ها ذکر شد، با استفاده از ۵ تیمار رابطه بین تراکم کاشت و بهره‌وری آب نرمال شده به دست آمد. در شکل (۳) رابطه بین تراکم کاشت و بهره‌وری نرمال شده آب ارائه شده است. ملاحظه می‌شود توزیع نقاط از منحنی درجه ۲ با ضریب تعیین حدود ۰/۹۱ پیروی می‌کند. معادله بین تراکم کشت و بهره‌وری نرمال شده آب به صورت زیر خواهد بود:

$$BWP = -0.0265 \times I^2 + 1.283 \times I - 3.069 \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

در رابطه فوق، BWP بهره‌وری آب نرمال شده (گرم بر مترمربع) و I تراکم کشت (تعداد بوته در متر مربع) می‌باشند. با توجه به معادله به دست آمده بیشترین بهره‌وری با مقدار ۱۲/۶ گرم بر مترمربع مربوط به تراکم ۲۴ بوته در مترمربع خواهد بود.



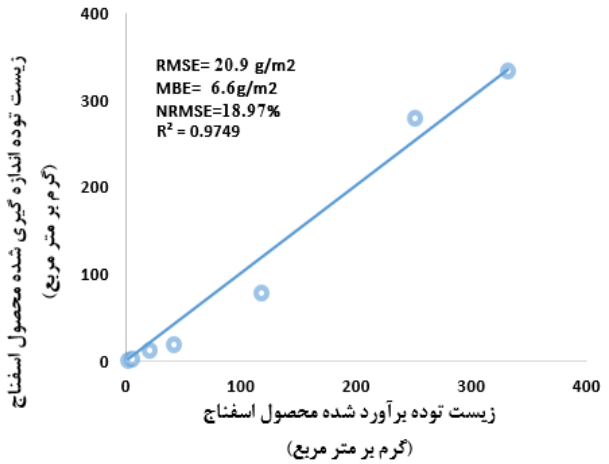
شکل ۳- رابطه بین تراکم کاشت و بهره‌وری آب نرمال شده. مقادیر متناظر تیمار T3 (تیمار صحت‌سنجی) با خط‌چین نشان داده شده است.

برای بررسی صحت سنجی رابطه (۱۰)، مدل آکواکرپ با استفاده از داده‌های تیمار T3 (داده‌های صحت سنجی) اجرا شد. بر اساس رابطه (۱۰) بهره‌وری نرمال شده برای تیمار T3 که تراکم آن ۱۶ بوته در مترمربع است حدود ۱۰/۷ گرم بر متر مربع برآورد شده است (شکل ۳). مقایسه نتایج برآورد زیست‌توده و اندازه‌گیری شده در جدول (۹) ارائه شده است.

جدول ۹- مقایسه بین نتایج برآورد شده زیست‌توده در طول دوره رشد با نتایج مدل آکواکراپ برای تیمار صحت سنجی

روز پس از کاشت	زیست‌توده (گرم بر متر مربع)		مقدار خطا (گرم بر متر مربع)
	برآورد شده	اندازه‌گیری شده	
۱۶	۱/۰۶	۱/۰۵	۰/۵۵۲
۲۳	۵/۴	۲/۴۳	۲/۷۹۱
۳۲	۲۰/۹	۱۱/۵۸	۹/۳۱۷
۳۷	۴۱/۹	۱۸/۸۳	۲۳/۰۶۸
۴۶	۱۱۸/۱	۷۵/۷۷	۴۰/۳۵۰
۵۸	۲۵۱/۳	۲۷۹/۵۵	-۲۸/۲۵۳
۶۵	۳۳۲/۱	۳۳۴/۱۷	-۲/۶۷
میانگین	۱۱۰/۱۸	۱۰۳/۶۲	۶/۵۶

نتایج حاصل از زیست‌توده اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با استفاده از داده‌های صحت سنجی در شکل (۴) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود، ضریب تعیین داده‌ها حدود ۰/۹۷ برآورد شده است که نشان می‌دهد معادله واسنجی شده (۱۰) که از روی آن مقدار بهره‌وری آب نرمال شده بر اساس تراکم بوته در واحد سطح به دست می‌آید، تا حدود ۹۷ درصد تغییرات زیست‌توده را در طول دوره رشد شبیه‌سازی می‌کند. جذر میانگین مربعات خطا حدود ۲۰/۹ گرم در مترمربع برآوردشده است که با توجه به میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده (۱۱۰ گرم بر متر مربع) معادل ۱۸/۹۷ درصد می‌باشد. میانگین خطای اریب ۶/۶ گرم بر مترمربع برآوردشده است که نشان می‌دهد عملکرد زیست‌توده به طور متوسط ۵/۹۵ درصد در مدل آکواکراپ بیشتر از مقادیر واقعی برآورد می‌شود.



شکل ۴. پراکنش نتایج زیست‌توده اندازه‌گیری شده و برآورد شده محصول اسفناج برای داده‌های صحت سنجی

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، بهره‌وری آب نرمال‌شده که یکی از عوامل مهم برای شبیه‌سازی عملکرد محصول در مدل آکواکراپ است، برای گیاه اسفناج در تراکم‌های مختلف به دست آمد. نتایج آزمون آماری نشان داد، زیست‌توده و بهره‌وری آب نرمال شده در تیمارهای مختلف تفاوت معنی‌داری داشتند این یعنی اینکه تراکم کاشت روی زیست‌توده و بهره‌وری آب نرمال‌شده تأثیر داشته است. نتایج این بررسی نشان داد عامل بهره‌وری آب نرمال شده تابع تراکم کشت است و از یک معادله درجه ۲ با ضریب تعیین ۰/۹۱ پیروی می‌کند. بر اساس این معادله بیشترین مقدار بهره‌وری آب نرمال شده برابر ۱۲/۴ گرم بر متر مربع با تراکم کشت ۲۴ عدد بوته در متر مربع به دست آمد. با توجه به یافته این پژوهش پیشنهاد می‌شود برای سایر گیاهان نیز رابطه بین تراکم کشت و بهره‌وری آب نرمال شده تهیه گردد.

www.SID.ir

Archive of SID

REFERENCESS

Alizadeh, H.A., Nazari, B., Parsinejad, M., Ramezani Eetedali, H., and janbaz, H.R. (2010). Evaluation of AquaCrop Model on Wheat Deficit Irrigation in Karaj Area. Iranian Journal Irrigation and drainage, 2(4), 273-283. (In Farsi)

Allen, R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome.

Amiritabar, R., Rahimikhoob, A. and Behbahani, M. R. (2014). Comparative study of temperature parameters and reference evapotranspiration at two weather stations located within the uncultivated and well-watered area- Case study in arid region of southeast of Tehran. J. of Water and Soil Conservation, 21(1), 253-270.

Emamifar, S., Rahimikhoob, A. and Noroozi, A. A. (2014). An Evaluation of M5 Model Tree vs. Artificial Neural Network for Estimating Mean Air Temperature as Based on Land Surface Temperature Data by MODIS-Terra Sensor. Iranian, J. Soil and Water Research, 45(4), 423-433.

English, M.J., Musick, J.T. and Murty, V.V. (1990). Deficit irrigation, Journal of farm irrigation systems, ASAE, 12(3), 222-230.

Haydarinia, M., Naseri, A. A., and Broomabd-Nasab, S. (2012). Investigate the possibility of application of model for irrigation scheduling of sunflower in Ahwaz. Journal of Water Resources, 5(1), 39-41. (In Farsi).

Hosseinpour, M., Hashemi Dezfuli, A., Mir Gelavand, A., and Sharifi, h. (1998). Effect of Nitrogen and Plant Density on Some Growth Indices of Sugar Beet in Dezful Area. Abstract Articles of the Fifth Iranian Congress of Agronomy and Plant Breeding. The Journal of Agricultural Education, pp. 317.

Hsiao, T.C., Steduto, P., Raes, D. and Fereres, E. (2009). AquaCrop: the FAO crop water model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. Agricultural Journal, 101, 448-459.

Iqbal M., Shen Y., Stricevic R., Pei H., Sun H., Amiri E., Penas A., and del Rio S. (2014). Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. Agricultural Water Management, 135, 61-72.

Garcia-Vila, M., Fereres, E., Mateos, L., Orgaz, F. and Steduto, P. (2009). Deficit Irrigation Optimization of Cotton with Aquacrop. Agron. J, 101, 477–487.

Karimi Orghani, H., Rahimikhoob, A., and Nazari Fard, M. (2015). Calibration and verification of aquacap model for barley in Pakdasht area. Iranian water and soil research, 74(3), 579-539. (In Farsi)

Kukchi, A., Sarmadnia, Gh. (1997). Physiology of crops. Mashhad University Press, Mashhad, Iran.

Maddonni, G.A., Otegui, M.E., Cirilo, A.G. (2001). Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. Field Crops Research, 71, 183- 193.

Patrignani, A. and Ochsner, T.E. (2015). Canopeo: A Powerful New Tool For Measuring Fractional Green Canopy Cover. Agronomy Journal, 107(6), 2312-2320.

Rahimikhoob, H., Sotoodehnia, A., and Massahbavani, A. R. (2014). Calibration and Evaluation of AquaCrop for Maize in Qazvin Region. Iranian Journal of lrrigation and Drainage, 8(1), 108-115.

Sarmadnia, Gh., Kukchi, A. (1989). Physiology of crops(Translation). Mashhad University Press, Mashhad, Iran.

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.

Stricevic, R., Dzeletovic, Z., Djurovic, N. and Cosic, M. (2014). Global change biology bioenergy.doi 10.111/gcbb. 12206.

Weiner, J., Griepentrog, H.W. and Kristensen, L. (2001). "Suppression of weeds by spring wheat Triticumaestivum increases with crop density and spatial uniformity." Journal of Applied Ecology, 38(4), 784-790.

www.SID.ir