Archive of SID

مدیریت آب و آبیاری
دوره ۹ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۸
صفحه‌های ۷۹-۶۹

بررسی کارایی مدل SALTMED در تخمین عملکرد گیاه نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) تحت تنش‌های شوری و کم‌آبیاری

مهسا بصیری[۱]، هوشنگ قمرنیا[۲*]، مختار قبادی[۳]، رجب رجب[۴]
۱. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
۲. استاد، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
۳. دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
۴. استاد، مرکز اکولوژی و هیدرولوژی، والینگفورد، انگلستان.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۰۶

چکیده

در سال‌های اخیر، مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاه به‌منظور پیش‌بینی عملکرد گیاهان مختلف موردتوجه محققین کشاورزی قرار گرفته است. این در حالی است که تاکنون کم‌تر به شبیه‌سازی رشد گیاهان دارویی پرداخته شده است. در این تحقیق برای اولین بار به بررسی عملکرد مدل شبیه‌ساز رشد SALTMED در تخمین عملکرد گیاه نعناع فلفلی تحت تنش‌های شوری و کم‌آبیاری پرداخته شده است. تیمارهای در نظر گرفته‌شده در این مطالعه شامل تنش خشکی (۱۰۰٪ نیاز آبی (شاهد)، ۲۰ و ۴۰٪ کم‌آبیاری) و تنش شوری (شاهد، دو، سه و چهار دسی‌زیمنس بر متر) بودند. واسنجی براساس تیمارهای شاهد، ۴۰٪ کم‌آبیاری، دو و سه دسی‌زیمنس بر متر (۶۷٪ کل داده‌ها) و صحت‌سنجی مدل برای بقیه تیمارها (تیمار ۲۰٪ کم‌آبیاری و چهار دسی‌زیمنس بر متر) انجام گرفت. نتایج نشان داد که دقت مدل در پیش‌بینی عملکرد نعناع فلفلی نسبتاً خوب بوده است. مقادیر ضریب تبیین مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر ۰/۸۷ و ۰/۸۶ به‌دست آمد. بررسی تفکیکی نتایج نشان داد که مدل حداکثر محصول را در تیمارهای کم‌آبیاری با دقت بیش‌تری نسبت به تیمارهای شوری برآورد کرده است. حداکثر عملکرد محاسباتی مدل در تیمارهای ۲۰ و ۴۰٪ کم‌آبیاری برابر ۲/۳۵، ۲/۰۶ تن در هکتار به‌دست آمد. درحالی‌که برای تیمارهای دو، سه و چهار دسی‌زیمنس عملکرد برابر ۲/۱، ۲/۰۶ و ۲/۰۵ تن در هکتار به‌دست آمد.

کلیدواژه‌ها: تنش، تیمار شاهد، خشکی، مدل شبیه‌ساز رشد، نیاز آبی.

Study of SALTMED model performance to predicte peppermint (*Mentha piperita* L.) yield production under various deficit irrigation and salinity management conditions

Mahsa Basiri[1], Houshang Ghamarnia[2*], Mokhtar Ghobadi[3], Ragab Ragab[4]
1. Ph.D. Candidate Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.
2. Professor, Department of WaterEngineering, Razi University, Kermanshah, Iran.
3. Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Razi University, Kermanshah Iran.
4. Professor, Centre for Ecology & Hydrology, Wallingford, UK.
Received: July 20, 2019 Accepted: September 28, 2019

Abstract

In the recent years, plant growth simulation models have been attracted for agricultural engineers in order to predict different crop yields. However, growth simulation of medicinal crops has been rarely studied. In current research, for the first time, the performance of SALTMED model in predicting peppermint yield under different deficit irrigation and salinity conditions was studied. Treatments of water deficit included (100% irrigation requirement (as control), 20 and 40% water deficit) and salinity treatments (0.9 as control treatment, 2, 3 and 4 dSm^{-1}). Calibration of model conducted using control, 40% water deficit, 2 and 3 dS m^{-1} treatment data (67% of total data) and validation of model conducted using other treatments data (20% water deficit and 4 dS m^{-1}). Results indicated that model accuracy for predicting peppermint yield was relatively good. The coefficient of determination of model during calibration and validation were 0.953 and 0.801. Studying the separate results showed that the model predicted maximum yield of water deficit levels with higher accuracy than salinity levels. Maximum simulated yield of 20 and 40% water deficit levels were2.35 and 2.06 ton per hectare while the yield of 2, 3 and 4 dS m^{-1}obtained as 2.1, 2.06 and 2.05 ton per hectare.

Keywords: Control treatment, Drought, Growth Simulation model, Irrigation requirement, Tension.

* نویسنده مسئول
Email: hghamarnia@razi.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهان در واقع بیان ریاضی مراحل و فرآیندهای رشد گیاه تحت تأثیر عوامل مختلف محیطی و مدیریتی می‌باشد. این مدل‌ها برای هدف‌های مختلفی ایجاد می‌شوند و هر کدام نیازمند دانستن جزییات فرآیندهای کلیدی رشد گیاه و حساسیت این فرآیندها به محیط و اعمال مدیریت‌های مختلف می‌باشند (۲). مدل SALTMED یک ابزار قوی در مدیریت آب کشاورزی است و از آن می‌توان در پیش‌بینی برنامه‌ریزی‌های آینده و تعیین بهره‌وری گیاهان در شرایط تغییر اقلیم بهره جست (۲۱).

در تحقیقی به شبیه‌سازی عملکرد گیاه ذرت در شرایط استفاده از آب آبیاری شور با استفاده از مدل SALTMED پرداخته شد. آزمایش‌های مزرعه‌ای تحقیق یادشده در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. تیمارها شامل شاهد ۲/۵، ۳/۵، ۴/۵، ۵/۵ و ۶/۵ دسی‌زیمنس بر متر بود. واسنجی مدل به‌کمک تیمار شاهد انجام گرفت. سپس صحت‌سنجی برای بقیه تیمارها صورت پذیرفت. نتایج مربوط به شبیه‌سازی عملکرد بیولوژیکی و عملکرد دانه، نشان داد که دقت مدل خوب بوده است. ضریب تبیین به‌دست‌آمده برای عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی به‌ترتیب برابر ۰/۸۲ و ۰/۹۳ به‌دست آمد (۵). در مطالعه دیگری به‌کمک مدل SALTMED پیش‌بینی رطوبت خاک و عملکرد گیاه کینووا، تحت شرایط کم‌آبیاری در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ انجام گرفت. تیمارهای مورد بررسی شامل آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی)، ۵۰ و ۳۳ درصد نیاز آبی و دیم بود. واسنجی مدل برای تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری انجام گرفت. از نتایج به‌دست‌آمده بقیه تیمار در مرحله صحت‌سنجی استفاده گردید. نتایج مربوطه نشان داد که مدل SALTMED با دقت بسیار بالایی عملکرد را پیش‌بینی می‌کند. ضریب تبیین به‌دست‌آمده برابر ۰/۹۹۸ گزارش شد (۱۱). محققین به بررسی عملکرد مدل‌های AquaCrop و SALTMED و SWAP در شبیه‌سازی شوری خاک و عملکرد ذرت علوفه‌ای پرداختند. آزمایش‌های مزرعه‌ای در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با نه تیمار، در سه تکرار و بیست و هفت کرت آزمایشی انجام شد. واسنجی مدل براساس تیماری که در کل دوره رشد با آبی با شوری ۰/۴ دسی‌زیمنس بر متر آبیاری شده بود، انجام گرفت. سپس صحت‌سنجی برای بقیه تیمارها انجام شد. مقدار ضریب تبیین برای مدل‌های AquaCrop و SALTMED و SWAP در برآورد عملکرد محصول به‌ترتیب برابر ۰/۷۳، ۰/۸۵ و ۰/۵۹ گزارش شد (۱۳). در مطالعه‌ای به بررسی عملکرد مدل SALTMED در شبیه‌سازی رطوبت خاک، بهره‌وری آب، ماده خشک و عملکرد گیاه سیب زمینی پرداخته شد. آزمایش‌های مزرعه‌ای در قالب طرح کرت‌های خردشده با سه تکرار انجام گرفت. نتایج نشان داد که مدل با دقت خوبی قادر به پیش‌بینی تمام موارد است. ضریب تبیین بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده و به‌دست‌آمده از مدل، برای رطوبت در مرحله صحت‌سنجی و برای اعماق ۲۰-۰، ۳۰-۲۰، ۴۰-۳۰ و ۵۰-۴۰ سانتی‌متر به‌ترتیب برابر ۰/۹۲، ۰/۹۵، ۰/۸۵ و ۰/۹۰ به‌دست آمد. هم‌چنین این پارامتر برای محصول برآورده و شبیه‌سازی‌شده برابر ۰/۹۹۸ به‌دست آمد (۲۲). در تحقیق دیگری به‌کمک مدل شبیه‌ساز SALTMED به پیش‌بینی عملکرد گوجه‌فرنگی در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ پرداخته شد. شش تیمار در نظر گرفته‌شده در تحقیق شامل ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه در شرایط آبیاری با آب شیرین (شوری ۰/۹) و آب شور (شوری ۳/۶) دسی‌زیمنس بر متر بود. واسنجی مدل برای تیمار شاهد (۱۰۰ درصد نیاز آبی با آب شیرین) انجام گرفت. سپس صحت‌سنجی برای سایر تیمارها صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که ضریب تبیین مدل در برآورد عملکرد

www.SID.ir

Archive of SID

گوجه‌فرنگی در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ برابر ۰/۹۹ بوده است (۸).

تاکنون مدل SALTMED برای گیاهان مختلفی نظیر گوجه‌فرنگی، نیشکر، هویج، کلم، گنه‌گنه، لوبیاسبز، نخود، ذرت شیرین، فلفل، خیار، ذرت علوفه‌ای، سیب‌زمینی و ذرت مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفته است (۴، ۵، ۶، ۹، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۷، ۱۸، ۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳). در مورد گیاهان دارویی نظیر نعناع فلفلی مطالعه‌ای توسط هیچ‌کدام از مدل‌های شبیه‌ساز انجام نشده است و اطلاعات گیاه مورد نظر در هیچ‌کدام از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهی وجود ندارد. لذا، در این پژوهش به واسنجی مدل SALTMED در پیش‌بینی عملکرد گیاه نعناع فلفلی تحت تنش‌های مختلف شوری و کم‌آبی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مزرعه‌ای

این تحقیق در سال ۱۳۹۷ و در مزرعه تحقیقاتی گروه مهندسی آب پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی انجام گرفت. محل موردنظر دارای طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۹ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۳۱۹ متری از سطح دریا می‌باشد. این تحقیق در دو آزمایش جداگانه یکی برای مطالعه اثر کم‌آبیاری و دیگری برای بررسی تأثیر شوری آب آبیاری بر گیاه نعناع فلفلی و به‌صورت لایسیمتری[1] انجام شد. لایسیمترهای در نظر گرفته‌شده در این تحقیق از جنس پلی اتلین، با قطر ۱۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۴۰ سانتی‌متر بودند. در آزمایش کم‌آبیاری، تیمارهای مورد بررسی شامل سه سطح شاهد (آبیاری کامل یا ۱۰۰ درصد نیاز آبی)، ۲۰ درصد کم‌آبیاری (۸۰ درصد نیاز آبی) و ۴۰ درصد کم‌آبیاری (۶۰ درصد نیاز آبی) بودند. تیمارهای مورد بررسی در آزمایش شوری آب آبیاری شامل چهار سطح شاهد (با شوری ۰/۹ دسی‌زیمنس بر متر که با استفاده از آب چاه تأمین شد)، دو، سه و چهار دسی‌زیمنس بر متر بودند. برای ایجاد سطوح مختلف شوری از نمک NaCl خالص استفاده گردید. هر آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد.

خصوصیات اندازه‌گیری‌شده اندام هوایی شامل وزن تر و خشک ساقه، وزن تر و خشک برگ، سطح برگ و ارتفاع گیاه و خصوصیات اندازه‌گیری‌شده اندام زیرزمینی شامل وزن خشک ریشه، حجم ریشه، سطح ریشه، طول ریشه و طول کل ریشه بود. برای اندازه‌گیری سطح برگ ابتدا برگ‌ها به‌کمک اسکنر اسکن گردید، سپس با استفاده از نرم‌افزار دیجی‌مایزر سطح برگ محاسبه گردید. طول و سطح ریشه به‌ترتیب از روش‌های تنانت و آتکینسون تعیین گردید. طول ریشه بعد از استخراج کل اندام زیرزمینی خاک اندازه‌گیری گردید. به این منظور بعد از برداشت اندام هوایی نعناع فلفلی لایسیمترها از خاک خارج گردید و با کج‌کردن لایسیمترها و کمک جریان ملایم آب به‌کمک سر دوش خاک اطراف ریشه‌ها شست‌وشو داده‌شده تا ریشه‌ها بدون آسیب نمایان گردند.

در طی مدت انجام تحقیق، داده‌های هواشناسی از ایستگاه هواشناسی تمام اتوماتیک که به فاصله پنجاه متری از مزرعه تحقیقاتی موردنظر قرار داشت، به‌صورت روزانه اخذ گردید. هم‌چنین به‌منظور محاسبه نیاز آبی، ضرایب گیاهی نعناع فلفلی برای مراحل رشد ابتدایی، توسعه و میانی به‌ترتیب معادل ۰/۶۹، ۱/۰۳ و ۱/۲۷ گزارش شدند (۷). جدول (۱) پارامترهای هواشناسی در طول آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول‌های ۲ و ۳ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهند.

1. Lysimeteric

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱. پارامترهای هواشناسی در طی رشد گیاه نعناع فلفلی در سال ۱۳۹۷

ماه	متوسط درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد)	متوسط رطوبت نسبی (٪)	متوسط سرعت باد (متر بر ثانیه)	بارندگی ماهیانه (میلی‌متر)	تابش (وات بر مترمربع)
خرداد	۲۴/۳۱	۳۰	۱/۲۵	۰	۳۱۶/۸۲
تیر	۲۹/۶۱	۱۸/۶۱	۱/۰۲	۰	۳۲۵/۶۹
مرداد	۲۹/۷۶	۲۱/۰۴	۱/۱۰	۰	۲۸۲/۶۸
شهریور	۲۷/۲۹	۱۹/۸۲	۰/۹۹	۰	۲۶۸/۱۵

جدول ۲. مشخصات فیزیکی خاک منطقه مورد مطالعه

عمق نمونه‌برداری (سانتی‌متر)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	بافت خاک	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)
۰-۲۵	۱/۲	سیلتی- رسی	۸/۷	۴۶/۹	۴۴/۴
۴۰-۲۵	۱/۲	سیلتی- رسی	۱۱/۲	۴۳/۴	۴۵/۴

جدول ۳. مشخصات شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه

pH	EC ($\mu mohscm^{-1}$)	فسفر قابل جذب (ppm)	پتاسیم قابل جذب (ppm)	کربن آلی (٪)	Mn ($mgkg^{-1}$)	Fe ($mgkg^{-1}$)	Zn ($mgkg^{-1}$)	Cu ($mg\ kg^{-1}$)
۷/۳	۱/۲	۲۶	۴۴۰	۱/۳۸	۷/۸	۱۱/۹	۱/۳۶	۱/۶۴

مدل SALTMED

اکثر مدل‌های طراحی‌شده برای یک سیستم آبیاری یا یک فرایند خاص مثل حرکت آب و املاح، نفوذ، آب‌شویی، جذب آب توسط ریشه، یا ترکیبی از این‌ها طراحی شده است. مدل SALTMED با استفاده از سیستم‌های آبیاری مختلف انواع خاک و لایه‌بندی آن، محصولات مختلف، تدابیر مختلف مدیریت آب آبیاری (مثل اختلاط یا تناوب آب شور و شیرین)، نیاز آب‌شویی، و کیفیت آب، کمبود در طراحی مدل‌های موجود را تا حدی برطرف کرده است. این مدل شامل معادلات تبخیر تعرق، جذب آب توسط گیاه، انتقال آب و املاح تحت سیستم‌های مختلف آبیاری، زهکشی و ارتباط بین عملکرد محصول و مصرف آب است (۳).

$$ET_o = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$ رابطه (۱)

در این رابطه، ET_0: تبخیر- تعرق گیاه مرجع (mmd^{-1})، R_n: تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($MJm^{-2}d^{-1}$)، $e_s - e_n$: کمبود فشار بخار در ارتفاع Z متری (KPa)، Δ: شیب منحنی فشار بخار ($KPa\ °C^{-1}$)، γ: ضریب رطوبتی ($KPa\ °C^{-1}$)، G: شار گرما به داخل خاک ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)، U2: سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه).

هم‌چنین تبخیر و تعرق گیاه براساس ضرایب گیاهی دو جزیی به‌دست می‌آید:

$$ETc = ETo(Kcb + Ke)$$ رابطه (۲)

در این رابطه، ETc: تبخیر و تعرق واقعی گیاه، Kcb:

www.SID.ir

Archive of SID

ضریب پایه گیاهی، Ke: ضریب تبخیر از سطح خاک می‌باشند.

جذب توسط ریشه در حضور آب شور

این مدل هم‌چنین نرخ واقعی جذب آب را براساس رابطه‌ای که کاردن و لتی پیشنهاد دادند، حساب می‌کند:

رابطه (۳)
$$S(z,t)=\left[\frac{S_{max}(t)}{1+(\frac{a(t)h+\pi}{\pi_{50}(t)})^3}\right]\lambda(z,t)$$

$$\lambda(z)=\frac{5}{3}L \ for \ z\le 0.2L$$

$$\lambda(z)=\frac{25}{12}L\times(1-\frac{z}{L}) \ for \ 0/2L\le z\le L$$

$$\lambda(z)=0 \ for \ z>L$$

در این رابطه، S: جذب آب (d^{-1})، $S_{max}(t)$: حداکثر پتانسیل جذب آب توسط ریشه در زمان t، z عمق که رو به پایین مثبت در نظر گرفته می‌شود. $\lambda(z)$: کسر وابسته به زمان و عمق جرم کل ریشه، L: حداکثر عمق ریشه، h: ارتفاع فشار ماتریک، π: ارتفاع فشار اسمزی، $\pi_{50}(t)$: فشار اسمزی وابسته به زمان که در آن $S_{max}(t)$ به اندازه ۵۰ درصد کاهش یافته است، $a(t)$: ضریب وزنی که برای پاسخ دیفرانسیلی یک محصول به فشار محلول و ماتریک محاسبه می‌شود. ضریب $a(t)$ برابر $\pi_{50}(t)/h_{50}(t)$ است که در آن $h_{50}(t)$ فشار ماتریک در جایی است که $S_{max}(t)$، ۵۰ درصد کاهش یافته است (۱۰).

هم‌چنین $S_{max}(t)$ از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

رابطه (۴)
$$S_{max}(t)=ET_o(t)\times K_{cb}(t)$$

عملکرد نسبی و واقعی

عملکرد نسبی گیاه (RY) از جمع مقادیر جذب آب توسط ریشه در طول فصل رشد تقسیم بر ماکزیمم جذب آب به‌دست می‌آید:

رابطه (۵)
$$RY=\frac{\sum S(x,z,t)}{\sum S_{max}(x,z,t)}$$

در این رابطه x و z به‌ترتیب موقعیت‌های افقی و عمودی هستند. در نهایت عملکرد واقعی (AY) از طریق رابطه زیر به‌دست می‌آید:

رابطه (۶)
$$AY=RY\times Y_{max}$$

که در آن Y_{max} عملکرد در شرایط بدون تنش می‌باشد (۱۹).

واسنجی و صحت‌سنجی مدل SALTMED

واسنجی براساس تیمارهای شاهد، ۴۰٪ کم‌آبیاری، دو و سه دسی‌زیمنس بر متر (۶۷٪ کل داده‌ها) انجام گرفت. به این منظور داده‌های ورودی در اختیار مدل قرار گرفت. با توجه به این‌که در تیمار اول تنش شوری و کم‌آبیاری وجود نداشت، عملکرد محصول در تیمار شاهد برای تیمارهای دیگر به منزله داده ورودی؛ حداکثر میزان عملکرد محصول در شرایط بدون تنش در نظر گرفته شد. با استفاده از مؤلفه‌های گیاهی اندازه‌گیری‌شده، عملکرد محصول در پایان فصل زراعی در مرحله واسنجی به گونه‌ای به‌دست آمد تا نزدیک‌ترین نتایج به مقادیر مشاهده‌ای حاصل شود. مرحله صحت‌سنجی نیز با استفاده از سایر تیمارها (۲۰٪ کم‌آبیاری و چهار دسی‌زیمنس بر متر) انجام گرفت.

آنالیز حساسیت مدل

به‌طورکلی به‌منظور استفاده از یک مدل می‌باید دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی انجام گیرد. در این تحقیق صحت‌سنجی مدل SALTMED برای گیاه نعناع فلفلی انجام گرفت. قبل از صحت‌سنجی، آنالیز حساسیت مدل صورت پذیرفت. بررسی تأثیر تغییرات ورودی‌های مدل بر خروجی‌های مدل را آنالیز حساسیت گفته می‌شود. در این تحقیق از ضریب حساسیت ارائه‌شده توسط لیو و همکاران (۱۶) استفاده گردید.

www.SID.ir

Archive of SID

رابطه (۷)
$$S_c = \frac{\frac{\Delta W}{\overline{W}}}{\frac{\Delta P}{\overline{P}}}$$

در این رابطه، S_c: ضریب حساسیت، ΔW: اختلاف مقدار پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر داده ورودی، $\overline{W}$ متوسط پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر داده ورودی، ΔP اختلاف مقدار ورودی یک پارامتر به مدل و $\overline{P}$ متوسط مقدار ورودی یک پارامتر به مدل می‌باشد.

محاسبه S_c به‌کمک دامنه تعیین‌شده انجام گرفت (۱۶).

جدول ۴. دامنه تغییرات ضریب حساسیت (۱۶)

درجه حساسیت	مقدار S_c
بدون حساسیت	$S_c = 0$
حساسیت کم	$0 < S_c < 0.3$
حساسیت متوسط	$0.3 < S_c < 1.5$
حساسیت زیاد	$S_c > 1.5$

ارزیابی مدل

ارزیابی مدل SALTMED در تخمین عملکرد گیاه در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی به‌کمک شاخص‌های خطای نسبی ضریب باقیمانده (CRM)[1]، میانگین خطای مطلق (MAE)[2]، میانگین خطای انحراف (MBE)[3]، میانگین مربعات خطا (RMSE)[4] و ضریب تبیین (R^2)[5] انجام گرفت.

رابطه (۸)
$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n} O_i - \sum_{i=1}^{n} P_i}{\sum_{i=1}^{n} O_i}$$

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

رابطه (۱۰)
$$MBE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)$$

رابطه (۱۱)
$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}\right)^{0.5}$$

رابطه (۱۲)
$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})(P_i - \overline{P})\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2 \sum_{i=1}^{n}(P_i - \overline{P})^2}$$

در روابط (۸) تا (۱۲)، P_i: مقادیر تخمینی مدل، O_i: مقادیر مشاهداتی، n: تعداد مشاهدات، $\overline{P}$: میانگین مقادیر تخمین و $\overline{O}$: میانگین مقادیر مشاهداتی می‌باشد.

نتایج و بحث

بررسی آنالیز حساسیت مدل SALTMED به داده‌های ورودی مختلف نظیر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی خاک، داده‌های هواشناسی و خصوصیات مختلف گیاهی قابل انجام است. ازآنجاکه در این تحقیق تنها به بررسی دقت مدل در پیش‌بینی عملکرد گیاه پرداخته شده است. لذا، در این قسمت فقط نتایج آنالیز حساسیت برای تعدادی از پارامترهای گیاهی آورده شده است. جدول ۵ نتایج آنالیز حساسیت مدل در دامنه تغییرات ۵۰ ± درصدی تعدادی از پارامترهای گیاهی ورودی به مدل را نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود به‌غیر از ضریب خاموشی، مدل در برآورد حداکثر عملکرد گیاهی به سایر پارامترها بدون حساسیت یا حساسیت کمی داشته است. جدول ۶ نمایی از فایل گیاهی تهیه‌شده برای گیاه نعناع فلفلی در محیط مدل SALTMED را نشان می‌دهد. واسنجی مدل برای تیمار شاهد انجام گرفت. بعد از اطمینان از نتایج مدل، صحت‌سنجی برای تیمارهای دیگر انجام شد. مقادیر ضریب گیاهی یک جزیی و پایه براساس نتایج محققین در شرایط آب‌وهوایی و گیاهی یکسان استخراج گردید (۷). ارتفاع گیاه، شاخص سطح برگ، تاریخ کشت، حداکثر محصول بدون تنش، حداقل و حداکثر عمق ریشه گیاه

1. Coefficient of residualmass
2. Mean absoluteerror
3. Mean bias error
4. Root mean square error
5. Coefficient of determination

www.SID.ir

Archive of SID

به‌کمک داده‌های اندازه‌گیری تعیین گردید. پارامترهای گیاهی دمای پایه، کسر پوشش گیاهی در هر مرحله از رشد گیاه و ضریب تخلیه آب سهل‌الوصول با توجه به نتایج گزارش‌شده قبلی استخراج گردید (۱ و ۸). همان‌طورکه مشاهده گردید؛ تغییرات پارامترهای راندمان فتوسنتز، کسر نیتروژن برگ، حداقل و حداکثر نیتروژن برگ، کوآنزیم، ضریب تنفس در پیش‌بینی عملکرد مدل دارای حساسیت کم یا بدون حساسیت بودند. به این منظور مقدار این پارامترها، همان پیش‌فرض نرم‌افزار در نظر گرفته شد. در نهایت مقادیر پارامترهای شاخص برداشت و درصد حداقل اکسیژن برای جذب نیز با سعی و خطا به‌طوری به‌دست آمد که نتایج خروجی از مدل بیش‌ترین تطابق را با نتایج اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای داشته باشند. بعد از اطمینان از نتایج مدل در مرحله واسنجی، به‌کمک داده‌های اندازه‌گیری‌شده سایر تیمارها، به صحت‌سنجی مدل پرداخته شد. جدول ۷ نمایی از ارزیابی مدل به‌کمک شاخص‌های خطا را نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشخص است دقت مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی قابل قبول بوده است. مقادیر خطای نسبی ضریب باقیمانده در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۵ و ۰/۰۷۴ و ضریب تبیین در این مراحل به‌ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۸۶ به‌دست آمد. مقادیر میانگین خطای مطلق، میانگین خطای انحراف و حداقل میانگین مربعات خطا در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر (۰/۲۴۲، ۰/۰۰۶، ۰/۳۶۴) و (۰/۲۷۸، ۰/۰۷۶ و ۰/۳۷۲) به‌دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد دقت مدل SALTMED– که اولین بار است برای گیاه نعناع فلفلی مورد استفاده قرار می‌گیرد– در پیش‌بینی عملکرد این گیاه نیز نسبتاً خوب بوده است.

جدول ۵. آنالیز حساسیت محاسبه‌شده در پارامترهای ورودی SALTMED

پارامتر خروجی / پارامتر ورودی	حداکثر عملکرد گیاهی (تن در هکتار)	ضریب حساسیت (درصد)	Sc (درصد)	درجه حساسیت
راندمان فتوسنتز	۵/۷۴	٪+۵۰	۱	حساسیت متوسط
	۱/۹۱	٪−۵۰	۱	حساسیت متوسط
ضریب خاموشی	–	٪+۵۰	–	–
	۲/۳۱	٪−۵۰	۱/۸۷	حساسیت زیاد
کسر نیتروژن برک	۳/۸۳	٪+۵۰	۰	بدون حساسیت
	۳/۸۳	٪−۵۰	۰	بدون حساسیت
حداقل نیتروژن برگ	۳/۸۳	٪+۵۰	۰	بدون حساسیت
	۳/۸۳	٪−۵۰	۰	بدون حساسیت
حداکثر نیتروژن برگ	۳/۸۳	٪+۵۰	۰	بدون حساسیت
	۳/۸۳	٪−۵۰	۰	بدون حساسیت
کوآنزیم	۳/۷۸	٪+۵۰	۰/۰۲۹	حساسیت کم
	۳/۸۶	٪−۵۰	۰/۰۱۱	حساسیت کم
ضریب تنفس	۳/۸۱	٪+۵۰	۰/۰۱۴	حساسیت کم
	۳/۸۵	٪−۵۰	۰/۰۰۸	حساسیت کم

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۶. پارامترهای گیاهی اندازه‌گیری‌شده یا واسنجی به SALTMED برای نعناع فلفلی

عامل گیاهی	نماد	واحد	مرحله	اندازه گیری	واسنجی
ضریب گیاهی یک‌جزیی	Kc	(/)	ابتدایی		۰/۶۷
			میانی		۱/۰۱
			انتهایی		۱/۲۳
ضریب گیاهی پایه	Kcb	(/)	ابتدایی		۰/۲۹
			میانی		۰/۸۶
			انتهایی		۱/۱۷
کسر پوشش گیاهی	Fc	(/)	ابتدایی		۰/۱
			میانی		۰/۷
			انتهایی		۰/۸
ارتفاع گیاه	h	(m)	ابتدایی	۰/۰۳۵	
			میانی	۰/۱۵۵	
			انتهایی	۰/۲۸۱	
شاخص سطح برگ	LAI	(/)	ابتدایی	۰/۱۸۵	
			میانی	۱/۶۱	
			انتهایی	۴/۱۲	
حداکثر محصول بدون تنش	-	(t/h)		۳	
حداقل اکسیژن برای جذب	-	(٪)			۱/۵
تاریخ کشت	-	(/)		۳۱ می ۲۰۱۸ (۱۰ خرداد ۱۳۹۷)	
حداقل عمق ریشه	-	(m)		۰/۲	
حداکثر عمق ریشه	-	(m)		۰/۴۸	
دمای پایه	–	(°C)			۱۰
راندمان فتوسنتز	-	(g/MJ)			۲
ضریب خاموشی	-	(g N/g dry weigth)			۰/۶
نسبت PAR	-	%			۰/۵
کسر نیتروژن برک	-	(g N/g dry weigth)			۰/۲
حداقل نیتروژن برگ	-				۰/۰۰۱
حداکثر نیتروژن برگ	-				۰/۲
کوآنزیم	Q10				۲
ضریب تنفس	–				۰/۰۱
شاخص برداشت	–				۰/۶
ضریب تخلیه آب سهل الوصول	–		ابتدایی		۰/۴
			میانی		۰/۴
			انتهایی		۰/۴

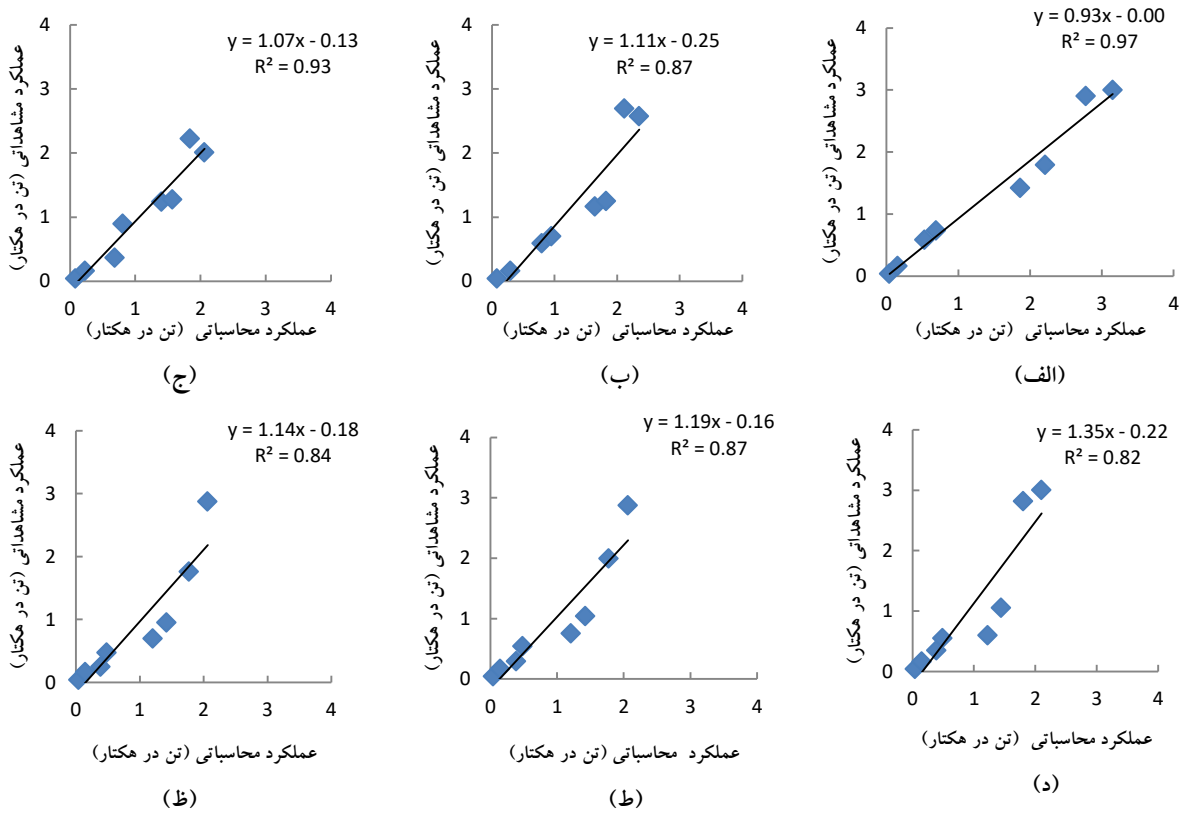
www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۷. شاخص‌های آماری محاسبه‌شده در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل SALTMED برای نعناع فلفلی

شاخص خطا	واحد	واسنجی	صحت سنجی
CRM	(/)	۰۰۵/۰-	۰۷۴/۰-
MAE	تن بر هکتار	۲۴۲/۰	۲۷۸/۰
MBE	تن بر هکتار	۰۰۶/۰	۰۷۶/۰
RMSE	تن بر هکتار	۳۶۴/۰	۳۷۲/۰
R^2	(/)	۸۶۷/۰	۸۵۷/۰

شکل (۱) نمایی از معادله همبستگی برازش داده‌شده بین مقادیر عملکرد مشاهداتی و محاسباتی توسط مدل SALTMED را نشان می‌دهد. ضریب تبیین به‌دست‌آمده برای تیمارهای شاهد، ۲۰ درصد کم‌آبیاری، ۴۰ درصد کم‌آبیاری، دو، سه و چهار دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب برابر ۰/۹۷، ۰/۸۷، ۰/۹۳، ۰/۸۲، ۰/۸۷ و ۰/۸۴ به‌دست آمد. مقادیر میانگین خطای مطلق و میانگین خطای انحراف تیمارهای شاهد، ۲۰ درصد کم‌آبیاری، ۴۰ درصد کم‌آبیاری، دو، سه و چهار دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب معادل (۰/۱۵۴، ۰/۰۹۹)، (۰/۳۰۹، ۰/۱۱)، (۰/۱۷۷، ۰/۰۵۷)، (۰/۳۸۱، ۰/۱۱۴-)، (۰/۲۵۴، ۰/۰۱۹-) و (۰/۲۴۷، ۰/۰۴۲) به‌دست آمد. نتایج هم‌چنین نشان داد که مقادیر حداقل میانگین مربعات خطا برای تیمارهای مذکور به‌ترتیب ۰/۲۲۷، ۰/۳۶۴، ۰/۲۱۸، ۰/۵۴۶، ۰/۳۶۵ و ۰/۳۸ به‌دست آمد. جدول ۸ مقادیر شاخص‌های خطای محاسبه‌شده به تفکیک تیمارهای مورد بررسی در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۱. همبستگی مقادیر مشاهداتی و محاسباتی عملکرد نعناع فلفلی توسط SALTMED

الف) شاهد ب) ۲۰٪ کم‌آبیاری، ج) ۴۰٪ کم‌آبیاری، د) ۲dS/m، ط) ۳dS/m، ظ) ۴dS/m

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۸. شاخص‌های آماری محاسبه‌شده در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل SALTMED برای نعناع فلفلی به تفکیک تیمارها

پارامتر آماری	واحد	تیمار واسنجی			تیمار صحت‌سنجی	
		شاهد	۴۰٪ کم‌آبیاری	۲dS/m	۳dS/m	۲۰٪ کم‌آبیاری	۴dS/m
CRM	(/)	۰۷۵/۰-	۰۵۶/۰-	۱۰۷/۰	۰۲۰/۰	۰۹۶/۰-	۰۴۷/۰-
MAE	تن بر هکتار	۱۵۴/۰	۱۷۷/۰	۳۸۱/۰	۲۵۴/۰	۳۰۹/۰	۲۴۷/۰
MBE	تن بر هکتار	۰۹۹/۰	۰۵۷/۰	۱۱۴/۰-	۰۱۹/۰-	۱۱۰/۰	۰۴۲/۰
RMSE	تن بر هکتار	۲۲۷/۰	۲۱۸/۰	۵۴۶/۰	۳۶۵/۰	۳۶۴/۰	۳۸۰/۰
R^2	(/)	۹۷۰/۰	۹۲۸/۰	۸۱۹/۰	۸۶۷/۰	۸۷۴/۰	۸۳۹/۰

نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای اولین بار به بررسی عملکرد مدل شبیه‌ساز رشد SALTMED در تخمین عملکرد گیاه نعناع فلفلی در شرایط تنش‌های شوری و کم‌آبیاری پرداخته شد. بررسی نتایج نشان داد که با استفاده از مدل SALTMED می‌توان به پیش‌بینی عملکرد و تخمین محصول گیاه نعناع فلفلی پرداخته شود. نتایج نشان داد چنانچه پارامترهای گیاهی موجود در نرم‌افزار به‌خوبی در طول فصل رشد اندازه‌گیری شوند؛ مدل قادر به تخمین عملکرد با دقت بالایی است. مهم‌ترین پارامترهای اندازه‌گیری برای گیاه شامل شاخص سطح برگ، ارتفاع گیاه، حداقل و حداکثر ریشه، حداکثر عملکرد بدون تنش گیاه و ضرایب یک جزیی و پایه می‌باشند.

منابع

۱. امیدبیگی ر (۱۳۷۹) رهیافت‌های تولید و فرآوری گیاهان دارویی. انتشارات طراحان نشر، تهران. ۲۸۶ صفحه.

۲. ثابت سروستانی ع (۱۳۸۸) شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاه کلزا به‌وسیله مدل‌های گیاهی CropSyst و CRPSM تحت تیمارهای تنش آبی در مراحل مختلف رشد. دانشگاه شیراز. شیراز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد.

۳. حسن‌لی م، افراسیاب پ و ابراهیمیان ح (۱۳۹۴) ارزیابی مدل‌های AquaCrop و SALTMED در تخمین عملکرد محصول ذرت و شوری خاک. تحقیقات آب و خاک ایران ۴۶(۳): ۴۸۷-۴۹۸.

۴. خالوندی ن، برومند نسب س و سلطانی محمدی ا (۱۳۹۴) تحلیل حساسیت مدل SALTMED به پارامترهای ورودی در شرایط تنش شوری. دومین همایش ملی تغییرات اقلیم و مهندسی توسعه پایدار کشاورزی و منابع طبیعی. دانشگاه شهید بهشتی، ایران.

۵. خالوندی ن، سلطانی محمدی ا و برومند نسب س (۱۳۹۶) شبیه‌سازی رطوبت خاک و عملکرد ذرت در شرایط آبیاری با آب‌شور با مدل SALTMED. علوم و مهندسی آبیاری ۴۰(۱): ۲۳۱-۲۴۶.

۶. عباسی ف (۱۳۸۶) فیزیک خاک پیشرفته. انتشارات دانشگاه تهران، تهران. ۲۵۰ صفحه.

۷. قمرینا ه و موسی بیگی ف (۱۳۹۳) برآورد نیاز آبی، ضرایب گیاهی یک‌جزیی و دوجزیی نعناع فلفلی (*Mentha pipertia* L.). آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۸(۴): ۶۷۰-۶۷۸.

8. Alkhasha A and Al-Omran A (2019) Simulated tomato yield, soil moisture, and salinity using fresh and saline water: experimental and modeling study using the SALTMED model. Irrigation science (Online First Articles): 1-19.

9. Aly AA, Al-Omran AM and Khasha AA (2015) Water management for cucumber: greenhouse experiment in Saudi Arabia and modeling study using SALTMED model. Soil and Water Conservation 70 (1): 1-11.

www.SID.ir

Archive of SID

10. Cardon EG and Letey J (1992) Plant water uptake terms evaluated for soil water and solute movement models. *Soil Science Society American* 56: 1876-1880.
11. Fghire R, Wahbi S, Anaya F, Issa ali O, Benlhabib O and Ragab R (2015) Response of Quinoa to different water management strategies: field experiments and saltmed model application results. *Irrigation and Drainage* 64(1): 29-40.
12. Golabi M, Naseri AA and Kashkuli HA (2009) Evaluation of SALTMED model performance in irrigation and drainage of sugarcane farms in Khuzestan province of Iran. *Food, Agriculture and Environment* 7: 874-880.
13. Hassanli MEbrahimian H, Mohammadi E, Rahimi AR and Shokouhi AH (2016) Simulating maize yields when irrigating with saline water, using the AquaCrop, SALTMED, and SWAP models. *Agricultural Water Management* 176: 91-99.
14. Hirich A, Choukr-Allah R, Ragab R, Jacobsen SE, EL-Youssfi L and El-Omari H (2012) The SALTMED model calibration and validation using field data from Morocco. *Materials and Environmental Science* 3(2): 342-359.
15. Hirich A, Ragab R, Choukr-Allah R and Rami A (2014) The effect of deficit irrigation with treated wastewater on sweet corn: experimental and modelling study using SALTMED model. *Irrigation Science* 32 (3): 205-219.
16. Liu HF, Genard M, Guichard S and Bertin N (2007) Model assisted analysis of tomato fruit growth in relation to carbon and water fluxes. *Experimental Botany* 58(13): 3567-3580.
17. Mehanna HM, Sabreen RHP and El-Hagarey ME (2012) Validation of SALTMEDmodel under different conditions of drought and fertilizer for snap bean indelta, Egypt. Minia International Conference for Agriculture and Irrigation in the Nile Basin Countries. El-Minia, Egypt.
18. Montenegro SG, Montenegro A and Ragab R (2010) Improving agricultural water management in the semi-arid region of Brazil: experimental and modeling study. *Irrigation Science* 28(4): 301-316.
19. Ragab R (2002) A holistic generic integrated approach for irrigation: crop and field management the SALTMED model. *Environmental Modelling and Software* 17 (4): 345-361.
20. Ragab R, Malash N, Abdel Gawad G, Arsalan A and Ghaibeh A (2005b) A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management 2-The SALTMED model validation using field data of five growing seasons from Egypt and Syria. *Agricultural Water Management* 78(1-2): 89-107.
21. Ragab R, Choukr-Allah R, Nghira A and Hirich A (2017) SALTMED model and its application on field crops, different water and field management and under current and future climate change. The Souss-Massa river basin, Morocco. Cham. Switzerland. Springer: 227-274. (The handbook of environmental chemistry, 53).
22. Shafie AF, Osama MA, Hussein MM, El-Gindy AM and Ragab R (2016) Predicting soil moisture distribution, dry matter, water productivity and potato yield under a modified gated pipe irrigation system: SALTMED model application using field experimental data. *Agricultural Water Management* 184: 221-233.
23. Silva LL, Ragab R, Duarte I, Lourenc OE, Simoes N and Chaves MM (2013) Calibration and validation of SALTMED model under dry and wet year conditions using chickpea field data from southern Portugal. *Irrigation Science* 31(4): 651-659.

www.SID.ir