

شبیه‌سازی اثر تنش آبی و شوری بر عملکرد محصول چغندر قند با استفاده از روش پویایی سیستم

حامد نوذری^{۱*}، سعید آزادی^۱ و وحید رضاوودی‌نژاد^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۶/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۳/۹)

چکیده

با توجه به افزایش جمعیت، افزایش تولید گیاهان زراعی یکی از نیازهای ضروری جامعه است. از آنجایی که شوری آب و خاک تأثیر زیادی در کاهش عملکرد محصولات کشاورزی دارد، لذا با اعمال روش‌های مناسب آبیاری می‌توان میزان کاهش محصول را تا حدود زیادی برطرف کرد. در تحقیق حاضر، با بسط مدل کامپیوتری VENSIM که مبتنی بر روش تحلیل پویایی سیستم است، علاوه بر شبیه‌سازی اثر توأم تنش آبی و شوری بر عملکرد محصول چغندر قند، رطوبت و شوری خاک در ناحیه ریشه نیز شبیه‌سازی شد. همچنین، به منظور واسنجی و اعتباریابی نتایج مدل از داده‌های جمع‌آوری شده مربوط به ۹ تیمار از اراضی تحقیقاتی شبکه آبیاری سمت راست آبشار واقع در حوضه هیدرولوژیک رودخانه زاینده‌رود استفاده شد. پس از تجزیه و تحلیل آماری و محاسبه RMSE و خطای استاندارد، میزان برآزش میان مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده عملکرد محصول، رطوبت و شوری خاک در ناحیه ریشه محاسبه شد. میانگین این شاخص‌ها برای تمامی تیمارها به ترتیب ۲۷۷۶/۹۸ کیلوگرم بر هکتار و ۰/۰۷ برای عملکرد محصول، ۰/۰۲۶ و ۰/۰۹ برای رطوبت خاک و نهایتاً ۰/۵۴ دسی زیمنس بر متر و ۰/۰۸ برای شوری خاک در ناحیه ریشه برآورد شد که دقت خوبی را نسبت به شرایط واقعی نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که مدل حاضر می‌تواند با واسنجی دقیق و کامل، در تخمین عملکرد محصول از دقت خوبی برخوردار باشد.

واژه‌های کلیدی: اعتباریابی، شبکه آبیاری، مدل‌سازی، VENSIM

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: hanozari@yahoo.com

مقدمه

(۱۳).

در تحقیقی به منظور ارزیابی تأثیر نمک بر آب خاک و عملکرد محصول، یک مدل ریاضی ارائه شد و نشان داده شد که کمبود رطوبت خاک به طور مستقیم به شوری وابسته است (۱۴). همچنین از مدل CropSyst، که یک مدل شبیه‌سازی سیستم‌های کشت برای گیاهان یک یا چند ساله است، برای تخمین عملکرد و شبیه‌سازی رشد گیاه کلزا استفاده شد. نتایج نشان داد که کاربرد مدل در انجام تحقیقات زراعی گیاه کلزا قابل اعتماد است (۹).

با توجه به مطالعات صورت گرفته، مدل‌های عددی بسیاری وجود دارند که می‌توانند انتقال املاح را در محیط متخلخل شبیه‌سازی و عملکرد محصول را برآورد کنند. اما به دلیل تعدد پارامترهای ورودی مورد نیاز، مدت زمان بالای اجرای آنها و حساسیت این مدل‌ها به شرایط مرزی، استفاده از آنها در شرایط مزرعه بحث‌برانگیز است (۴ و ۱۱). در بیشتر مدل‌های تحلیلی موجود نیز نمی‌توان سهم مشارکت کمی و کیفی آب آبیاری را به صورت همزمان و نسبت به زمان در عملکرد محصول تعیین کرد.

اما یکی از روش‌های بسیار مؤثر برای بررسی وضعیت سیستم‌ها، روش تحلیل پویایی سیستم است که یکی از روش‌های قدرتمند و بصری شبیه‌سازی است. این روش ابتدا برای درک بهتر مسائل استراتژیک در سیستم‌های پویای پیچیده ابداع شد (۶). مدل‌هایی که با این روش نوشته می‌شوند، با بینش فرایندهای بازخورد، کاربران سیستم را به فهم بهتری از رفتار دینامیک سیستم‌ها در طول زمان نائل می‌سازند. زمینه‌های کاربردی این روش بسیار وسیع بوده و بیشتر در مسائل اجتماعی و اقتصادی به کار برده می‌شود. استفاده از این روش در تحقیقات آب نیز صورت گرفته که می‌توان به رابطه بین عملکرد محصول و تنش آبی وارده بر آن در طول دوره رشد به کمک روش پویایی سیستم اشاره کرد. نتایج حاکی از توانایی مدل در مدیریت میزان کاربرد آب آبیاری در مزرعه بود (۳). همچنین، از این روش به عنوان یک روش تحلیل تصمیم در مدیریت کم‌آبی استفاده شده است (۵). لو و همکاران (۱۵) از

با توجه به افزایش جمعیت جهان، افزایش عملکرد گیاهان زراعی اجتناب‌ناپذیر است. اما در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، میزان محصول تولیدی در واحد سطح بسیار کم است (۱۹). علت اصلی کاهش محصول، تنش‌هایی است که در طول دوره رشد به گیاه وارد می‌شود که از مهم‌ترین آنها تنش‌های خشکی و شوری است. لذا با اعمال روش‌های مناسب مدیریتی می‌توان میزان کاهش محصول در اثر کمبود آب آبیاری و شوری آن را تا حدود زیادی برطرف کرد (۱۰ و ۲۲).

به منظور بررسی و تحلیل مدیریت‌های مختلف آبیاری با آب شور می‌توان از آزمایش‌های صحرایی بهره برد. این آزمایش‌ها بسیار مفید هستند، اما محدودیت‌های قابل توجهی نیز دارند. مهم‌ترین محدودیت، اعتبار آزمایش‌ها است که به شرایط فیزیکی و منطقه‌ای که آزمایش در آن انجام می‌شود، وابسته است. علاوه بر آن، هزینه بالا، صرف زمان زیاد در بررسی آزمایشگاهی سیستم آب و خاک و ثابت نگه داشتن شرایط آزمایش در طول تحقیق نیز بسیار دشوار است. دقت این مدل‌ها عمدتاً به دقت داده‌های ورودی بستگی دارد و در صورتی که به درستی و اسنجی شوند، بدون محدودیت زمانی و مکانی موجود در آزمایش‌های مزرعه‌ای و نیز صرف زمان و هزینه زیاد، می‌توانند برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری به کار گرفته شوند (۱۶).

از این رو، تلاش‌های زیادی به منظور توسعه مدل‌های کامپیوتری صورت گرفته است. به عنوان نمونه، می‌توان به مدل کامپیوتری Drainmod اشاره کرد (که به منظور شبیه‌سازی سطح ایستابی و زهاب خروجی از زهکش‌های زیرزمینی در مناطق مرطوب با سطح ایستابی کم عمق توسعه یافته است (۲۳)). همچنین، مدل SWAP توانایی شبیه‌سازی رشد محصولات و انتقال آب و نمک در مقیاس صحرایی را دارد (۱۶). اگر چه این مدل توانایی شبیه‌سازی‌های همه جانبه مانند عملکرد محصول، نحوه حرکت آب و املاح در خاک و انتقال حرارت را تحت شرایط مختلف مدیریتی مزرعه دارد، اما با محدودیت‌هایی نیز روبه‌رو است. از جمله محدودیت‌های مدل، تعداد ورودی‌های زیاد آن است

شامل زیربخش‌های جمعیت، فعالیت‌های اقتصادی، تقاضای آب و منابع آب است (۲۰). همچنین در تحقیقی نشان داده شد که روش تحلیل پویایی سیستم جایگزین خوبی برای سیستم‌های شبیه‌سازی معمولی بوده و دارای مزیت‌هایی از جمله افزایش سرعت توسعه مدل، سهولت اصلاح ساختار آن، توانایی انجام آنالیز حساسیت و ارتباط مؤثر بین اجزا است (۱).

با توجه به مطالعات صورت گرفته، ملاحظه می‌شود که تحقیقات زیادی در زمینه توسعه مدل‌های کامپیوتری صورت گرفته و مدل‌های تحلیلی و عددی مختلفی به منظور محاسبه عملکرد محصول کشاورزی ارائه شده‌اند. اما به دلایلی که ذکر شد (تعدد پارامترهای ورودی مورد نیاز، مدت زمان بالای اجرای مدل و حساسیت مدل‌های عددی به شرایط مرزی) استفاده از آنها در شرایط مزرعه بحث‌برانگیز است. در بیشتر مدل‌های تحلیلی موجود نیز نمی‌توان تأثیر توأم کمیت و کیفیت آب آبیاری را در شوری ناحیه ریشه نسبت به زمان، بر عملکرد محصول تعیین کرد.

بنابراین با توجه به ضرورت وجود یک مدل تحلیلی منطبق با شرایط صحرا و مزایای استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم در حل مسائل، از قبیل سرعت اجرای بالا و امکان دسترسی کاربر به خطوط برنامه و همچنین سادگی حذف یا اضافه کردن یک پارامتر و بررسی تأثیر آن بر کل سیستم، تصمیم به استفاده از تکنیک تحلیل پویایی سیستم برای شبیه‌سازی سیستم آب و خاک در حضور سیستم زهکشی زیرزمینی گرفته شد. بدین منظور، ابتدا سیستم آب و خاک و عملکرد محصول به کمک مدل پویایی سیستم شبیه‌سازی شد و سپس تأثیر کمیت و کیفیت آب آبیاری نسبت به زمان بر عملکرد محصول مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مدل با داده‌های جمع‌آوری شده از مزارع چغندر قند شبکه آبشار اصفهان مقایسه و اعتباریابی شد. همچنین در این تحقیق با توجه به نتایج به دست آمده از روش تحلیل پویایی سیستم به بررسی اعتبار نتایج مدل در شبیه‌سازی رطوبت خاک و املاح ناحیه ریشه و مقایسه آن با داده‌های تیمارهای چغندر قند پرداخته شد.

روش تحلیل پویایی سیستم برای توسعه نفوذ، تبخیر و تعرق، رواناب سطحی و صعود موئینگی، در کشت برنج واقع در پایین دست رودخانه زرد چین استفاده کردند. نتایج این مدل که از آنالیز و روابط بازخورد بین فرایندهای هیدرولوژی استفاده می‌کند، نشان داد که با سطح اطمینان ۹۵ درصد رابطه معنی‌داری بین پارامترهای شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای وجود دارد.

سیسل و بارلس در تحقیقی مدل دینامیک شوری در زمین‌های آبیاری جنوب شرقی ترکیه را مورد بررسی کردند. این پژوهشگران با شبیه‌سازی محیط خاک در حضور سیستم‌های زهکشی زیرزمینی، نشان دادند که روش پویایی سیستم می‌تواند روش مناسبی برای شبیه‌سازی این محیط باشد (۲۱). با استفاده از روش پویایی سیستم، بهره‌برداری از منابع آب در شبکه‌های آبیاری در حوضه کوینتانگ چین شبیه‌سازی شد. در این تحقیق، تأثیر هر یک از عوامل مؤثر در مدیریت منابع آب در شبکه‌های آبیاری، شامل تغییر راندمان آبیاری سطحی و تحت فشار، تغییر الگوی کشت و تغییر سطح اراضی هر یک از محصولات مورد بررسی قرار گرفته است (۱۲). با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم، تراز سطح آب و شدت زهاب خروجی از اراضی مجهز به سیستم زهکش زیرزمینی، در شرایط غیرماندگار، به‌طور کامل مدل‌سازی شد. این پژوهشگران روش پویایی سیستم را به‌عنوان ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی بیشتر فرایندهای شناخته شده در سیستم‌های پیچیده آب و خاک اعلام کردند (۱۸).

با استفاده از نرم‌افزار VENSIM کیفیت آب رودخانه در شرایط ماندگار و غیرماندگار شبیه‌سازی شد. این محققین به شبیه‌سازی پارامترهای کیفی متعددی از جمله DO, BOD, pH, نیترات، نیتريت، دما، و سایر پارامترهای کیفی پرداختند و در نهایت بیان داشتند که استفاده از VENSIM به‌عنوان یک ابزار بنیادی در توسعه مدل‌های زیست‌محیطی راه حل بسیار مناسبی است (۷). در تحقیقی با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم یک مدل جامع پویایی برای حوضه آبریز کرخه بسط داده شد که

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم

الف- بیان آب و نمک در خاک

به منظور برآورد میزان ذخیره آب و نمک در خاک به ترتیب از معادله بیان حجمی و بیان جرمی استفاده شد. بدین ترتیب که محیط آب خاک به سه لایه تقسیم و هر لایه به صورت یک متغیر حالت تعریف شده است. لایه اول شامل بخشی از محیط آب و خاک است که ناحیه رشد ریشه گیاه است. لایه دوم شامل منطقه زیر توسعه ریشه گیاه است و تا عمق نصب زهکش‌ها ادامه می‌یابد. لایه سوم از عمق نصب زهکش‌ها تا سنگ بستر و لایه نفوذ ناپذیر ادامه دارد. بنابراین، محدوده این لایه‌ها نیز با توجه به شرایط منطقه، ریشه گیاه و عمق نصب زهکش‌ها می‌تواند متفاوت باشد. میزان آب ورودی به سیستم شامل آب آبیاری، بارش، جریان جانبی و جریان رو به بالا است. همچنین، آب خروجی از سیستم نیز شامل تبخیر و تعرق، نشت جانبی زهکش و نفوذ عمقی است.

معادله‌ای که برای محاسبه بیان جرمی نمک در اراضی تحت آبیاری به کار برده می‌شود به صورت زیر است (۲):

$$D_{iw} \cdot EC_{iw} + D_{pe} \cdot EC_{pe} + D_g \cdot EC_g = D_p \cdot EC_p + \Delta \cdot EC \quad (1)$$

در این رابطه، D_{iw} ، D_{pe} ، D_g و D_p به ترتیب مقدار آب آبیاری، آب حاصل از بارندگی، آبی که از سفره زیرزمینی وارد منطقه ریشه می‌شود و مقدار نفوذ عمقی از منطقه ریشه (mm/day) و EC_{iw} ، EC_{pe} ، EC_g و EC_p غلظت نمک در آب آبیاری، بارندگی، زیرزمینی و نفوذ عمقی از ناحیه ریشه و $\Delta \cdot EC$ تغییر مقدار نمک در محلول خاک در منطقه ریشه (dS/m) است. در این معادله از مقدار نمکی که در خاک رسوب کرده یا توسط گیاه جذب می‌شود، صرف نظر شده است.

همچنین، باید توجه داشت که در تعیین مقدار EC_p ، تمامی آبی که به صورت نفوذ عمقی از لایه ریشه می‌گذرد در شست و شوی نمک مؤثر نیست؛ زیرا مقداری از آب آبیاری بدون اینکه با آب خاک ناحیه ریشه مخلوط شود از درز و شکاف‌ها و یا فضاهای درشت خاک، به صورت جریان ترجیحی، می‌گذرد.

رطوبت حجمی آستانه و رطوبت خاک را می‌توان از رابطه (۲) به دست آورد. همچنین ضریب رطوبت خاک K_s (بدون بعد) از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$\theta_{thr} = (1-P) \cdot \theta_{fc} + P \cdot \theta_{WP} \quad \theta_j = \frac{S_j}{h_j} \quad (2)$$

$$K_s = \begin{cases} 1 & \theta \geq \theta_{WP} \\ \frac{\theta - \theta_{WP}}{\theta_{thr} - \theta_{WP}} & \theta_{WP} \leq \theta < \theta_{thr} \end{cases} \quad (3)$$

در این روابط، P نسبت رطوبت در دسترس کل (بدون بعد)، θ_{fc} رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی (m^3/m^3)، θ_{WP} رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی (m^3/m^3)، θ_{thr} رطوبت حجمی آستانه در شرایط تنش آبی (m^3/m^3)، θ رطوبت حجمی خاک (m^3/m^3)، S_j ذخیره آب در خاک در پایان روز j ام، h_j ضخامت لایه j ام خاک و $j=1,2,3$

ب- عملکرد محصول

در این قسمت، عملکرد محصول وابسته به آب مصرفی و کیفیت آن بوده و در واقع رابطه کمی ریاضی بین آنها حاکم است. با در نظر گرفتن اثرات شوری و کم آبی در مراحل رشد گیاه، مدل تابع تولید-آب-شوری در مقیاس درون فصلی ونگ (۲۴)، به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد که هدف آن محاسبه عملکرد نسبی محصول نسبت به کمیت و کیفیت آب آبیاری است:

$$\frac{Y_a}{Y_{max}} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_i}{ET_{max-i}} \right)^{\lambda_i} \cdot \prod_{j=1}^m \left(\frac{S_{max-j} - S_j}{S_{max-j} - S_{min-j}} \right)^{\beta_j} \quad (4)$$

در این رابطه، Y_a عملکرد گیاه با توجه به تنش آب و شوری، Y_{max} حداکثر عملکرد در حالت بدون تنش شوری و کم آبی، ET_{max-i} حداکثر تبخیر و تعرق واقعی گیاه، بدون تنش شوری و با آب کافی طی مرحله رشد i ام، ET_i میانگین تبخیر و تعرق واقعی گیاه بدون تنش شوری و کم آبی طی مرحله رشد i ام، λ_i شاخص حساسیت آبی گیاه طی مرحله رشد i ام، n تعداد مراحل رشد محصول مرتبط با تأثیر تنش آبی بر عملکرد گیاه، m تعداد مراحل رشد محصول مرتبط با تأثیر تنش شوری بر بازده محصول، S_{max-j} حد بالای غلظت شوری خاک طی مرحله رشد j ام، S_j

میانگین غلظت شوری خاک واقعی طی مرحله رشد β_i و مقدار بحرانی غلظت شوری خاک طی مرحله رشد β_i و β_i شاخص حساسیت به شوری گیاه مورد نظر است.

مدل‌سازی پویایی سیستم

در این تحقیق، از محیط برنامه نویسی VENSIM که ابزاری برای مدل‌سازی به زبان پویایی سیستم و به صورت شی گرا بر پایه بازخورد است، استفاده می‌شود. این ابزار مدل‌سازی، امکان ایجاد مدل‌های پیچیده را با سهولت بیشتری نسبت به زبان‌های برنامه نویسی مرسوم به وجود می‌آورد.

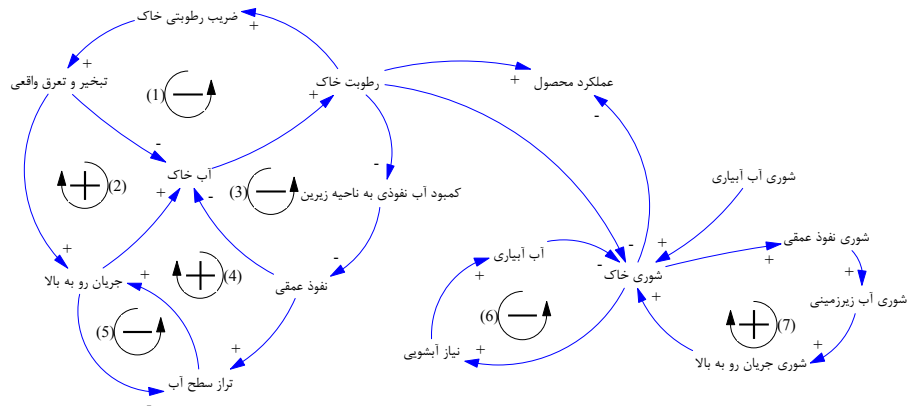
همان‌طور که گفته شد، اساس روش تحلیل پویایی سیستم بر پایه فرضیه فرایندهای بازخوردی است که متأثر از رفتار گذشته خود است و از نتایج آن در پیش‌بینی رفتار آینده استفاده می‌کند. این فرایند بازخوردی شامل حلقه‌های بازخوردی منفی و مثبت است که روابط علت و معلولی یک سیستم را نشان می‌دهند و در واقع، ساختار اصلی یک سیستم هستند. حلقه منفی نشان می‌دهد که اگر علت افزایش یابد اثر آن کاهش می‌یابد و اگر علت کاهش یابد اثر آن روند افزایشی دارد. حلقه مثبت نیز نشان می‌دهد که اگر علت افزایش یابد اثر آن نیز افزایش می‌یابد و اگر علت کاهش یابد اثر آن نیز روند کاهشی دارد. همچنین، برای اجرای یک مدل شبیه‌سازی به وسیله ابزار مدل‌سازی کامپیوتری مانند VENSIM باید حلقه‌های علت و معلولی را به نمودارهای حالت و جریان تبدیل کرد. در واقع، حالت‌ها انباشتگی‌های سیستم هستند و نشان‌دهنده وضعیت سیستم بوده و تصمیمات و فعالیت‌های سیستم بر پایه آنها صورت می‌گیرد. جریان‌ها نیز نرخ‌های تغییر را نشان می‌دهند؛ یعنی نشان‌دهنده فرایندهایی هستند که متغیر حالت را پر یا خالی می‌کنند. می‌توان گفت که در یک سیستم، بر اساس متغیر حالت، تصمیم‌ها اتخاذ شده و با تغییر متغیرهای جریان آن، تصمیمات اعمال می‌شوند.

حلقه‌های علت و معلولی عملکرد گیاه نسبت به کمیت و کیفیت آب آبیاری به صورت شکل (۱) است که به وسیله سه حلقه مثبت و چهار حلقه منفی تعریف شده است. در حلقه

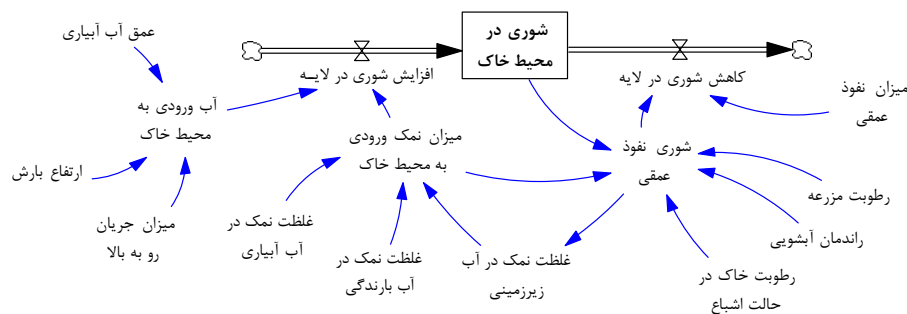
شماره (یک)، با افزایش تبخیر و تعرق واقعی، ظرفیت آب خاک کاهش می‌یابد. با کاهش آن میزان رطوبت خاک کاهش یافته و باعث کاهش ضریب رطوبتی خاک می‌شود. کاهش ضریب رطوبتی خاک نیز موجب کاهش تبخیر و تعرق واقعی می‌شود و یک حلقه منفی را تشکیل می‌دهد. از طرفی، در حلقه شماره (دو)، با افزایش تبخیر و تعرق واقعی، میزان جریان رو به بالا از سطح آب زیرزمینی افزایش می‌یابد که خود باعث افزایش آب خاک شده و یک حلقه مثبت را تشکیل می‌دهد. در حلقه سوم، که اثر متقابل بین ظرفیت آب خاک و نفوذ عمقی را نشان می‌دهد، با افزایش آب خاک، رطوبت خاک افزایش یافته و باعث افزایش آب نفوذی به ناحیه زیرین شده است و کمبود آن را جبران می‌کند. در نهایت، با افزایش نفوذ عمقی از ناحیه ریشه، میزان آب خاک در لایه‌های فوقانی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزایش نفوذ عمقی، تراز سطح آب افزایش یافته و با بالا آمدن تراز سطح آب، میزان جریان رو به بالا افزایش یافته است و باعث افزایش آب خاک در ناحیه غیر اشباع می‌شود (حلقه چهارم). در حلقه شماره پنج نیز با افزایش تراز سطح آب، میزان جریان رو به بالا افزایش یافته و در نتیجه توسط تبخیر و تعرق از محیط خاک خارج شده است و همین امر باعث کاهش تراز سطح آب می‌شود و یک حلقه منفی را تشکیل می‌دهد. در حلقه ششم، با افزایش شوری خاک، نیاز آبتیابی افزایش یافته است و برای آبتیابی منطقه ریشه نیاز به آب آبیاری افزایش می‌یابد و در اثر افزایش آب آبیاری، شوری خاک در ناحیه ریشه کاهش و این حلقه به صورت یک حلقه منفی تعریف می‌شود. اما در حلقه هفتم، افزایش شوری آب زیرزمینی باعث افزایش شوری جریان رو به بالا و در نهایت باعث افزایش شوری خاک می‌شود (۲۰).

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود عملکرد محصول به‌عنوان یک پارامتر خروجی است و یک حلقه را تشکیل نمی‌دهد. در واقع، مقدار رطوبت و شوری خاک تأثیر مستقیم بر عملکرد محصول داشته و با ایجاد شرایط مطلوب رطوبتی و کاهش شوری خاک می‌توان عملکرد محصول را افزایش داد.

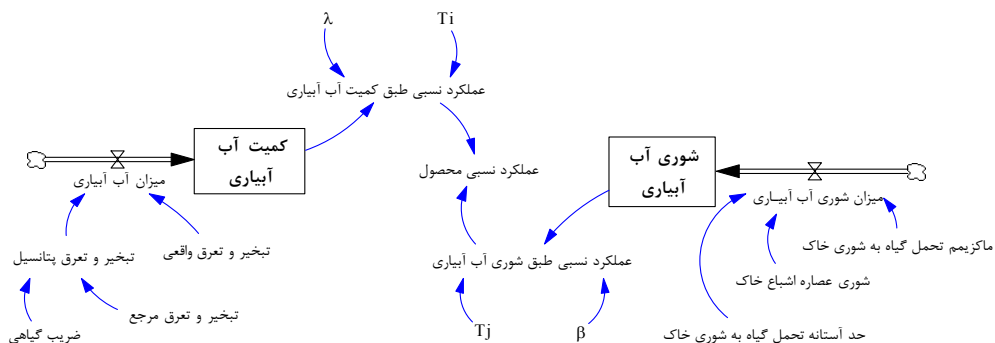
همچنین، نمودار حالت و جریان شوری خاک در شکل (۲)



شکل ۱. حلقه‌های علت و معلولی عملکرد محصول (۱۷)



شکل ۲. نمودار حالت و جریان شوری خاک (۲)



شکل ۳. نمودار حالت و جریان عملکرد محصول (۲)

شکل (۳) نیز نمودار حالت و جریان مربوط به عملکرد محصول است که در این قسمت به‌عنوان نمونه ارائه شده است. در شکل (۳)، T زمان و i و z گام‌های زمانی که ممکن است برای دوره‌های λ و β یکسان نباشد.

ارائه شده است. در این شکل، شوری در محیط خاک به‌عنوان متغیر حالت و نرخ تغییرات شوری به کمک دو متغیر جریان که یکی باعث افزایش از طریق تبخیر و تعرق و دیگری موجب کاهش از طریق شستشو و جریان نفوذی می‌شود، تعریف شده است.

جدول ۱. میانگین مشخصات خاک بلوک‌های آزمایشی

مقدار	پارامترهای خاک
۰/۰۰۰۱	$g (1/mm)$
۰/۵۵	P
۰/۳۰	$\Theta_{Fc} (m^3/m^3)$
۰/۱۸	$\Theta_{wp} (m^3/m^3)$
۰/۴۵	$\Theta_s (m^3/m^3)$
۱۰۰	$D_f (cm)$
۲۳/۹۵	$S_{maxj} (ds/m)$
۷	$S_{minj} (ds/m)$
۵/۹	b (%)

صحت‌سنجی نتایج

بدین‌منظور از داده‌های جمع‌آوری شده از یکی از مزارع تحقیقاتی شبکه آبیاری و زهکشی سمت راست آبخیز واقع در حوضه هیدرولوژیک رودخانه زاینده‌رود و دشت کوهپایه و سگری در شرق شهرستان اصفهان، استفاده شد. برای بررسی عملکرد گیاه، از ۹ تیمار چغندر قند که به‌صورت طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی در قالب کرت‌های دو بار خرد شده (اسپلیت اسپلیت پلات) کشت شده بود، استفاده شد. گیاه چغندر قند در تاریخ ۱۳۸۶/۲/۱۰ کشت شده و در ۱۳۸۶/۸/۲۹ برداشت شده است.

تیمارهای مختلف دارای شرایط متفاوتی از نظر مقدار آب آبیاری، شوری آب آبیاری، شوری عصاره اشباع خاک و رطوبت خاک هستند. سه سطح شوری کم، متوسط و زیاد در نظر گرفته شد. بدین‌صورت که میانگین شوری آب آبیاری برای تیمارهای T_1 و T_2 برابر با دو دسی‌زیمنس بر متر، برای تیمارهای T_3 تا T_6 برابر با ۸ دسی‌زیمنس بر متر و برای تیمارهای T_7 تا T_9 برابر با ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر است. همچنین تیمارهای T_1 ، T_3 ، T_5 و T_8 تیمارهای بدون آبیاری بودند و در تیمارهای T_2 ، T_4 ، T_6 ، T_7 و T_9 آبیاری بر اساس ۷۵ درصد عملکرد گیاه در آنها اعمال شد. از طرفی، مقدار آب آبیاری برای کل دوره کشت در هر یک از تیمارهای T_1 ، T_2 ، T_3 ، T_6 و T_9 برابر با ۱۴۰۸ میلی‌متر، برای

تیمارهای T_4 و T_5 برابر با ۱۵۹۰ میلی‌متر و برای تیمارهای T_7 و T_8 برابر با ۱۶۸۹ میلی‌متر است.

به‌منظور بررسی عملکرد غده چغندر قند در رابطه با شوری عصاره اشباع، ابتدا عملکرد ماکزیمم تعیین و پس از آن عملکرد نسبی محاسبه می‌شود. در نهایت به کمک این دو پارامتر می‌توان عملکرد گیاه را بر حسب کیلوگرم بر هکتار محاسبه کرد. بیشترین عملکرد غده چغندر قند تحت شرایط آبیاری با آب شیرین است. بنابراین در طرح حاضر همان‌طور که ذکر شد از دو تیمار آبیاری با شوری دو دسی‌زیمنس بر متر استفاده شد که میانگین عملکرد غده در تیمار T_1 برابر ۴۹۹۰۰ کیلوگرم در هکتار، و در تیمار T_2 برابر ۴۸۷۰۰ کیلوگرم در هکتار بود. لذا عملکرد ماکزیمم طرح ۴۹۹۰۰ کیلوگرم در هکتار در نظر گرفته شد و از این تیمار به‌عنوان حداکثر عملکرد گیاه استفاده شد.

جدول (۱) مشخصات خاک، رطوبت خاک و برخی پارامترهای گیاهی که در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است را نشان می‌دهد.

پارامترهای جدول (۱) عبارتند از: g پارامتر نشان‌دهنده گنجایش خاک به شار انتقال موئینگی، P ضریب تخلیه آب خاک برای تبخیر- تعرق پنج میلی‌متر بر روز، Θ_{Fc} رطوبت حجمی ظرفیت زراعی، Θ_{pwp} رطوبت حجمی نقطه پژمردگی، Θ_s رطوبت حجمی اشباع، D_f عمق توسعه ریشه و b شیب نمودار کاهش

جدول ۲. میانگین عملکرد غده و شوری عصاره اشباع خاک در طول فصل زراعی در تیمارهای مختلف

تیمار	شوری آب آبیاری (dS/m)	شوری خاک (dS/m)	عملکرد غده (kg/ha)
T _۱	۲	۴/۵	۴۹۹۰۰
T _۲	۲	۴/۲۲	۴۸۷۰۰
T _۳	۸	۱۱/۵	۴۰۵۵۰
T _۴	۸	۱۰/۶۱	۴۱۱۵۰
T _۵	۸	۱۰/۳۵	۴۳۸۰۰
T _۶	۸	۹/۶۱	۴۱۰۶۶
T _۷	۱۲	۱۲/۶۹	۳۵۱۰۰
T _۸	۱۲	۱۲/۵۲	۳۵۷۰۰
T _۹	۱۲	۱۲/۳۵	۳۷۷۰۰

مقادیر عملکرد غده در تیمارهای مختلف و تحت شرایط متفاوت آبیاری و شوری خاک در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد غده با افزایش مقدار شوری خاک، کاهش می‌یابد. همچنین، آبشویی، عملکرد غده چغندر قند را در شوری‌های زیاد آب آبیاری افزایش داده و با افزایش شوری خاک، تأثیر آبشویی در افزایش عملکرد غده چغندر قند بیشتر بوده است. همچنین شکل (۴) مقادیر عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده تیمارهای مذکور را نشان می‌دهند.

به کمک آزمون F یک‌طرفه، تجزیه واریانس روی سری داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده صورت گرفت و مقدار P-Value برابر با ۰/۴۷۰ به دست آمد. با توجه به مقدار P-Value واریانس‌ها یکسان بوده و تفاوت معنی‌داری در سطح پنج درصد بین دو سری داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مشاهده نشد. بنابراین با استفاده از آزمون t دو طرفه با واریانس‌های یکسان، اختلاف بین دو سری مورد ارزیابی قرار گرفت. مقدار P-Value برابر با ۰/۴۷۴ به دست آمد که نشان‌دهنده این واقعیت است که تفاوت معنی‌داری در سطح پنج درصد بین دو سری داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده وجود ندارد. لذا می‌توان نتیجه گرفت مدل حاضر در شبیه‌سازی عملکرد محصول چغندر قند، از دقت قابل قبولی برخوردار است.

با توجه به مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای غده چغندر قند، مقدار شاخص‌های RMSE و خطای استاندارد برای عملکرد این محصول به ترتیب ۲۷۷۶/۹۸ کیلوگرم بر هکتار و

محصول برای هر دسی زمینس بر متر افزایش شوری است. به منظور مقایسه‌های آماری نتایج مدل با آمار مشاهده‌ای، از آزمون F برای تجزیه واریانس استفاده شد. همچنین از آزمون t به منظور بررسی اختلاف معنی‌داری بین دو سری داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده استفاده شد. به منظور ارزیابی و سنجش اعتبار مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول چغندر قند، رطوبت و شوری خاک در ناحیه ریشه، از شاخص‌های آماری مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای استاندارد (SE) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Y_m - Y_p)^2}{n}} \quad (5)$$

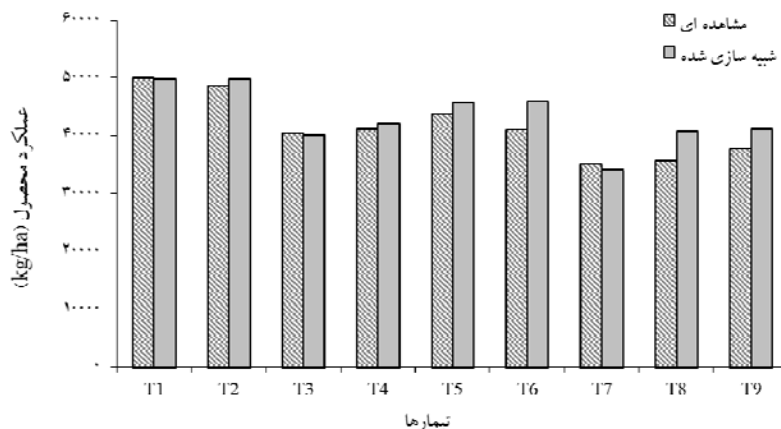
$$SE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (Y_m - Y_p)^2}}{\bar{Y}_m} \quad (6)$$

در این روابط، n تعداد روزهای دوره مورد مطالعه، Y_m مقادیر اندازه‌گیری شده در هر روز، Y_p مقدار پیش‌بینی شده با استفاده از مدل و \bar{Y}_m میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده است.

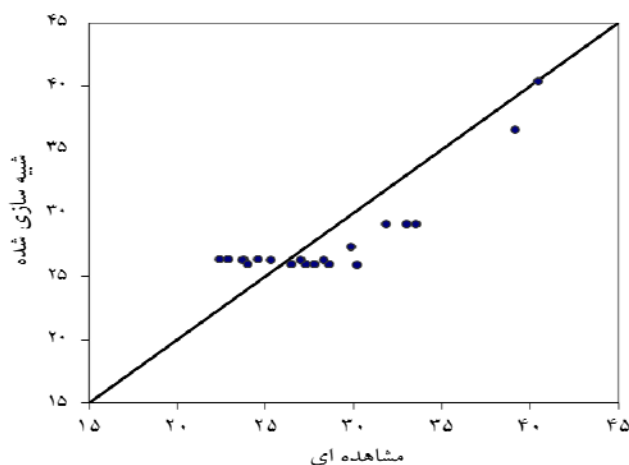
نتایج و بحث

عملکرد محصول زراعی

پس از بسط مدل، از آمار و اطلاعات مربوط به ۹ تیمار که در طول دوره رشد تحت مدیریت‌های مختلف کمی و کیفی آب آبیاری قرار گرفتند، برای اعتباریابی نتایج مدل استفاده شد.



شکل ۴. مقادیر عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی



شکل ۵. همبستگی مقادیر رطوبت خاک شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در ناحیه ریشه

در خاک است. مدل مذکور علاوه بر تخمین عملکرد محصول و با توجه به داده‌های ورودی به آن، روند رطوبت خاک در ناحیه ریشه را نیز شبیه‌سازی کرد. مقایسه این نقاط با نتایج مدل، نشان داد که مدل علاوه بر شبیه‌سازی عملکرد محصول و انطباق بین نتایج آن با داده‌های صحرائی، تقریب درستی از رطوبت خاک در ناحیه ریشه را دارد که حاکی از توانایی مدل است. شکل (۵) مقادیر رطوبت شبیه‌سازی و مشاهده‌ای خاک را در ناحیه ریشه چغندر قند طی دوره رشد برای تیمارها نشان می‌دهد.

با توجه به آزمون F یک‌طرفه، تجزیه واریانس روی سری

۰/۰۷ محاسبه شد. لازم به ذکر است که در مطالعات پیشین که در مورد ارزیابی مدل‌های شبیه‌سازی عملکرد محصول (مانند مدل SWAP) توسط پژوهشگران مختلف صورت گرفته است، شاخص آماری RMSE تا ۵۳۷۰ کیلوگرم بر هکتار را برای گیاه چغندر قند خوب ارزیابی کرده‌اند (۱۹). بنابراین با توجه به مقادیر خطای استاندارد و همچنین RMSE، می‌توان انطباق بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های صحرائی در تحقیق حاضر را قابل قبول دانست.

رطوبت خاک در ناحیه ریشه

یکی از پارامترهای مهم در عملکرد گیاه رطوبت قابل دسترس

جدول ۳. RMSE و خطای استاندارد رطوبت خاک برای تیمارهای مختلف

تیمار	SE	RMSE
T _۱	۰/۰۹	۰/۰۲۶
T _۲	۰/۰۹	۰/۰۲۵
T _۳	۰/۰۸	۰/۰۲۴
T _۴	۰/۰۹	۰/۰۲۳
T _۵	۰/۰۸	۰/۰۲۴
T _۶	۰/۰۸	۰/۰۲۶
T _۷	۰/۱۱	۰/۰۳۵
T _۸	۰/۰۷	۰/۰۲۶
T _۹	۰/۱۰	۰/۰۲۹

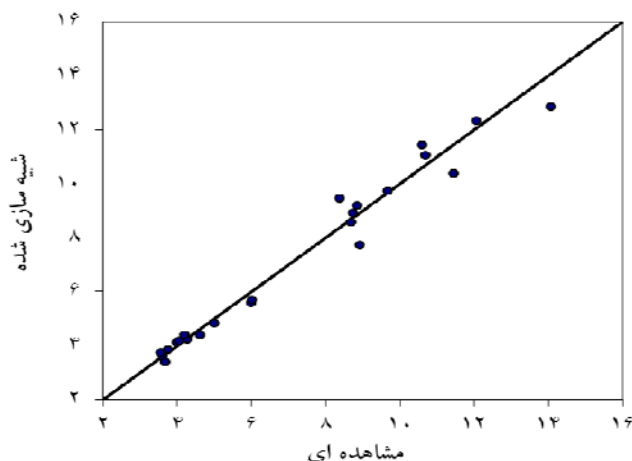
شوری خاک در ناحیه ریشه

یکی دیگر از پارامترهای مرجع در این تحقیق مقدار شوری عصاره اشباع خاک در ناحیه ریشه گیاه است. همانطور که در مورد رطوبت خاک در ناحیه ریشه ذکر شد، مدل روند شوری خاک در ناحیه ریشه را نیز شبیه‌سازی کرد. با توجه به نقاط موجود و مقایسه آنها با نتایج، علاوه بر شبیه‌سازی عملکرد محصول و تطابق موجود، مدل تقریب صحیحی از شوری خاک در ناحیه ریشه را داشت، که حاکی از توانایی آن در شبیه‌سازی عملکرد محصول را دارد. شکل (۶) و (۷) مقادیر شوری خاک شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای محصول چغندر قند برای تیمارها را نشان می‌دهد. با توجه به همبستگی نشان داده شده در شکل (۶) می‌توان گفت، تطابق بسیار خوبی بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای وجود دارد.

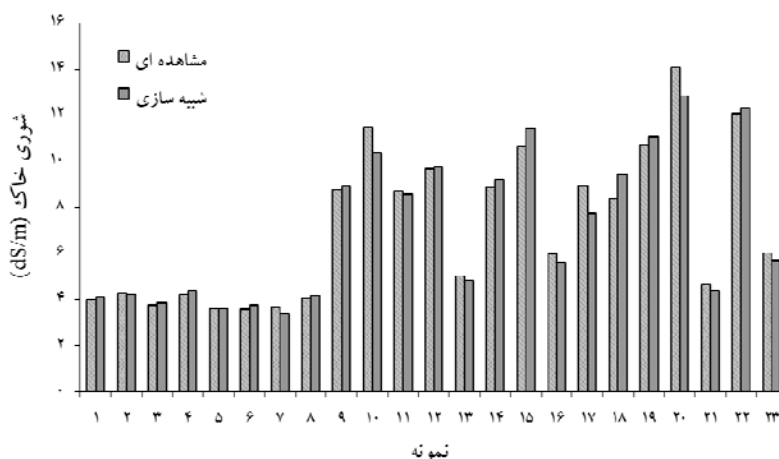
با توجه به آزمون F یک‌طرفه، تجزیه واریانس سری داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده شوری خاک، مقدار P-Value برابر با ۰/۴۷۰ به دست آمد. لذا با توجه به P-Value واریانس‌ها یکسان بوده و تفاوت معنی‌داری در سطح پنج درصد بین دو سری داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده شوری خاک در ناحیه ریشه مشاهده نشد. بنابراین با استفاده از آزمون t دو طرفه با واریانس‌های یکسان، اختلاف بین دو سری ارزیابی شد و P-Value برابر با ۰/۹۴۶ به دست آمد که نشان می‌دهد تفاوت معنی‌داری در سطح پنج درصد بین دو سری داده‌های مشاهده‌ای

داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده رطوبت خاک در ناحیه ریشه صورت پذیرفت و مقدار P-Value برابر با ۰/۰۶۸ به دست آمد. با توجه به P-Value، واریانس‌ها یکسان بود و تفاوت معنی‌داری در سطح پنج درصد بین دو سری داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مشاهده نشد. سپس با استفاده از آزمون t دو طرفه با واریانس‌های یکسان، اختلاف بین دو سری مورد بررسی قرار گرفت و P-Value برابر با ۰/۷۹۴ به دست آمد که نشان می‌دهد تفاوت معنی‌داری در سطح پنج درصد بین دو سری داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده وجود ندارد. لذا مدل حاضر در شبیه‌سازی رطوبت خاک ناحیه ریشه نیز توانمند بوده است.

همچنین مقادیر شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای استاندارد (SE) رطوبت خاک برای تمامی تیمارها در جدول (۳) نشان داده شده است که تطابق قابل قبول بین نتایج را تأیید می‌کند. با توجه به جدول (۳) مقادیر میانگین RMSE و SE رطوبت خاک برای تمامی تیمارها به ترتیب برابر با ۰/۰۲۶ و ۰/۰۹ است. زندپارسا و همکاران در تحقیقی که در آن به بررسی رطوبت خاک توسط مدل WSM پرداختند، شاخص SE در تخمین مقدار رطوبت خاک در لایه‌های مختلف عمق ریشه را ۰/۱۴ به دست آورده و نتایج مدل را خوب ارزیابی کردند (۲۵). در نتیجه با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان انطباق بین نتایج شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهده‌ای در تحقیق حاضر را خوب ارزیابی کرد.



شکل ۶. همبستگی مقادیر شوری خاک شبه‌سازی شده و مشاهده‌ای در ناحیه ریشه (dS/m)



شکل ۷. مقادیر شوری خاک شبه‌سازی شده و مشاهده‌ای در مزرعه چغندر قند

برای شوری خاک ۰/۱۲ به دست آمد که می‌توان انطباق بین نتایج شبه‌سازی و داده‌های صحرائی در تحقیق حاضر را بسیار خوب ارزیابی کرد (۸).

نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مدل شبه‌سازی عملکرد محصول به روش پویایی سیستم تهیه شده است. با اجرای مدل فوق می‌توان تأثیر هر یک از عوامل مؤثر بر عملکرد محصول را بررسی کرد. به منظور واسنجی و اعتباریابی نتایج مدل در مجموع از ۹ تیمار آزمایشی محصول چغندر قند که از مزرعه تحقیقاتی سمت راست آبشار

و شبه‌سازی شده وجود ندارد. در اینجا نیز مدل، در شبه‌سازی شوری خاک ناحیه ریشه، از دقت خوبی برخوردار بوده است.

در این پارامتر مقادیر شاخص‌های RMSE و SE برای تیمارها در جدول (۴) ارائه شده است که نشان‌دهنده تطابق قابل قبول نتایج شبه‌سازی و مشاهده‌ای است. با توجه به این جدول مقادیر میانگین RMSE و SE شوری خاک برای تمامی تیمارها به ترتیب برابر با ۰/۵۴ دسی‌زیمنس بر متر و ۰/۰۸ است. باید خاطر نشان کرد در تحقیقی به منظور ارزیابی مدل AquaCrop در تخمین شوری خاک تحت شرایط مدیریت‌های مختلف زراعی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید چمران اهواز، شاخص SE

جدول ۴. RMSE و خطای استاندارد شوری خاک برای تیمارهای مختلف

تیمار	SE	RMSE
T ₁	۰/۰۵	۰/۱۲
T _۲	۰/۰۶	۰/۱۸
T _۳	۰/۰۸	۰/۶۴
T _۴	۰/۰۷	۰/۳۵
T _۵	۰/۰۷	۰/۶۴
T _۶	۰/۱۱	۰/۸۱
T _۷	۰/۰۹	۰/۷۴
T _۸	۰/۰۶	۰/۵۱
T _۹	۰/۱۱	۰/۹۱

برخوردار است. همچنین مدل مذکور علاوه بر تخمین عملکرد محصول و با توجه به داده‌های ورودی به آن، روند رطوبت خاک و شوری خاک در ناحیه ریشه را نیز شبیه‌سازی کرد. میانگین شاخص‌های آماری RMSE و خطای استاندارد رطوبت خاک برابر با ۰/۲۶ و ۰/۰۹ و برای شوری خاک ۰/۵۴ دسی زیمنس بر متر و ۰/۰۸ بود که نشان‌دهنده تطابق بسیار خوبی بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای است. از قابلیت مدل تهیه شده در این تحقیق علاوه بر نمایش تغییرات تمامی پارامترهای مؤثر در سیستم نسبت به زمان، می‌توان به افزایش سرعت ایجاد مدل، سادگی اصلاح ساختار مدل در واکنش به تغییرات سیستم، پذیرش الگوی کشت، بهینه‌سازی، قابلیت تحلیل حساسیت و صرف زمان کمتر در اجرای برنامه اشاره کرد.

جمع‌آوری شده بود، استفاده شد. میزان برآزش میان مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده عملکرد محصول برای تمامی تیمارها با محاسبه شاخص‌های آماری RMSE و خطای استاندارد محاسبه شد. میانگین این شاخص‌ها برای تمامی تیمارها به ترتیب ۲۷۷۶/۹۸ کیلوگرم بر هکتار و ۰/۰۷ برآورد شد که دقت خوبی را نسبت به شرایط واقعی نشان می‌دهد. در مطالعاتی که رضاوردی‌نژاد (۱۹) در مورد ارزیابی مدل‌های شبیه‌سازی عملکرد محصول (مانند مدل SWAP) انجام داده است، شاخص آماری RMSE را تا ۵۳۷۰ کیلوگرم بر هکتار برای گیاه چغندر قند خوب ارزیابی کرده است. لذا می‌توان گفت روش تحلیل پویایی سیستم، در شبیه‌سازی محیط آب و خاک و عملکرد محصول در شرایط شوری خاک از دقت خوبی

منابع مورد استفاده

- Ahmadi, M. H., R. Rajabpour, F. Raeiszadeh and S. Farzin. 2014. Investigation the effects of reservoir operation on providing different demands by System dynamics (Case study: Kowsar dam in Iran). *International Journal of Scientific Research and Management* 2(14): 1807-1811.
- Azadi, S. 2013. Effect of quantity and salinity of irrigation water on crop yield using system dynamic approach. MSc. Thesis, Irrigation and Drainage, Department of Water Science Engineering, BU-Ali Sina University, Hamedan. (In Farsi).
- Bala, B. K., M. A. Satter, M. A. Halim and M. S. U. Talukdar. 1998. Simulation of crop-irrigation systems. *Agricultural Systems* 27: 51-65.
- Chops, G. and W. Hopmans. 2002. Analytical model for vadose zone solute transport with root water and solute uptake. *Vadose Zone Journal* 1: 158-171.
- Fletcher, E. J. 1998. The use of system dynamics as a decision support tool for the management of surface water resources. In: *Proceeding of the 1st International Conference on New Information Technology, For Decision-Making in Civil Engineering*, University of Quebec, Montreal, Canada, pp. 909-920.

6. Forrester, J. W. 1961. *Industrial Dynamics*. Productivity Press. Portland Oreg.
7. Gonçalves, J. C. and M. F. Giorgetti. 2013. Mathematical model for the simulation of water quality in rivers using the VENSIM PLE® software. *Journal of Urban and Environmental Engineering* 7(1): 48-63.
8. Heidarinia, M., S. Boroomand Nasab and A. Naseri. 2017. AquaCrop model evaluation to estimate of Maize yield and soil salinity under different agriculture managements and irrigation with saline water. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 48(1): 50-61. (In Farsi).
9. Honar, T., A. Sabet Sarvestani, A. Sepaskhah, A. A. Kamgar Haghighi and S. Shams. 2012. Simulation of soil water content and yield of canola using CRPSM. *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)* 16(59): 45-57. (In Farsi)
10. Houshmand, S., A. Arzani, S. A. M. Maybody and M. Feizi. 2005. Evaluation of salttolerant genotypes of durum wheat derived from in vitro and field experiments. *Field Crop Research* 91: 345-354.
11. Jorenush, M. H. and A. R. Sepaskhah. 2003. Modelling capillary rise and soil salinity for shallow saline water table under irrigated and non-irrigated conditions. *Agricultural Water Management* 61: 125-141.
12. Khan, S. 2004. Irrigation Development, Rational Allocation of Water Resources and Food Security in China. Chinese National Committee on Irrigation and Drainage, China.
13. Kroes, J. G. and J. C. Van Dam. 2008. Reference manual SWAP version 3.2., Alterra Green World Research. Wageningen, Report 1649, Availabel online at: www.alterra.nl/models/swap.
14. Lamsal, K., G. N. Paudyal and M. Saeed. 1999. Model for assessing impact of salinity on soil water availability and crop yield. *Agricultural Water Management* 41: 57-70.
15. Luo, Y., S. Khan and Y. Cui. 2009. Application of system dynamics approach for time varying water balance in aerobic paddy fields. *Paddy Water Environ* 7: 1-9.
16. Mostafazadeh-fard, B., H. Mansouri, S. F. Mousavi and M. Feyzi. 2009. Effects of different levels of irrigation water salinity and leaching on yield and yield components of wheat in an arid region. *Irrigation and Drainage Engineering, ASCE* 135(1): 32-38.
17. Nozari, H., M. Heydari and S. Azadi. 2014. Simulation of a right Abshar irrigation network and its cropping pattern using a system dynamics approach. *Irrigation and Drainage Engineering* 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000777: 1-7.
18. Nozari, H., A. liaghat, M. Khayat kholghi and A. Sedighi. 2009. Simulation of subsurface drainage systems in unsteady states using system dynamics. *Journal of Agricultural Engineering Research* 10(2): 71-86. (In Farsi).
19. Rezaverdinejad, V. 2010. Optimization of cropping pattern and water use allocation under salinity and limited water supply conditions in right Abshar irrigation network. Ph.D. Thesis, Irrigation and Drainage, Department of Agriculture Tehran University, Tehran. (In Farsi).
20. Sadeghi khalegh abadi, L., A. Shamsai and H. Goharnejad. 2014. An analysis of the sustainability of basin water resources using Vensim model. *Journal of Civil Engineering* 19(6): 1941-1949.
21. Saysel, A. and Y. Barlas. 2001. A dynamic model of salinization on irrigated lands. *Ecological Modelling* 139: 177-199.
22. Sharma, B. R. and P. S. Minhas. 2005. Strategies for managing saline/alkali waters for sustainable agricultural production in South Asia. *Agricultural Water Management* 78: 136-151.
23. Skaggs, R. W. 1980. Drainmod Reference Report. Method for Design and Evaluation of Drainage Water Management Systems for Soils with High Water Tables. USDA-SCS, United States.
24. Wang, Y. R., S. Z. Kang, L. Zhang, L. F. Sheng and J. H. Zang. 2007. Saline water irrigation scheduling through a crop-water-salinity production function and a soilwater- salinity dynamic model. *Soil Science Society of China* 17(3): 303-317.
25. Zand-Parsa, Sh., S. Parvizi, A. R. Sepaskhah and M. Mahbod. 2016. Evaluation of simulated soil water content, dry matter and grain yield of winter wheat (cv. Shiraz) using WSM and AquaCrop models. *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)* 20(77): 59-70. (In Farsi).

Simulation of the Effect of Salinity and Water Stress on Sugar beet Using the System Dynamics Approach

H. Nozari^{1*}, S. Azadi² and V. Rezaverdinejad³

(Received: September 13-2016 ; Accepted: May 30-2018)

Abstract

Due to the growing population, crop production is one of the essential needs of the society. Since soil and water salinity can have a great impact on the crop yield loss; so, the appropriate irrigation method can be applied to reduce these effects. In this study, the system dynamics model was developed using VENSIM. The model simulated the effect of salinity and water stress on the crop yield, moisture and salinity of the root zone. In order to calibrate and validate the model results, 9 treatments data were collected from the Right Abshar Irrigation Network, on the Zayandehrud basin. After statistical analysis and calculation of RMSE index and the standard error, the fit between the measured and simulated crop yield, the moisture and salinity of root zone was calculated. The average of these indexes for all treatments was 2776.98 kg/ha and 0.07 for crop yield, 0.026 and 0.09 for soil moisture and final, 0.54 dS/m and 0.08 for the salinity of root zone, respectively. The results showed that the model could be calibrated accurately and completely in estimating the crop yield with the reasonable accuracy.

Keywords: Calibrate, Irrigation network, Modeling, VENSIM

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

*: Corresponding Author, Email: hanozari@yahoo.com