چغندرقند/ جلد ۳۷/ شماره ۱/ ۱۴۰۰

مدل لجستیکی برآورد مقدار محصول چغندرقند پاییزه در استان خوزستان

Logistic model for estimation of the yield of autumn-sown sugar beet in Khozestan province

حمیدرضا کمالی[1*]، محمد خرمیان[2]، امیر ناصرین[3] و مصطفی حسین پور[4]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۵

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.22092/jsb.2021.354624.1276

ح. ر. کمالی، م. خرمیان، ا. ناصرین و م. حسین پور. ۱۴۰۰. مدل لجستیکی برآورد مقدار محصول چغندرقند پاییزه در استان خوزستان. **چغندرقند، ۳۷(۱): ۸۷-۹۸**

چکیده

پیش‌بینی مقدار محصول برای برنامه‌ریزی و مدیریت کارآمد یک عامل مهم به شمار می‌رود. در پژوهش حاضر یک مدل ساده ریاضی برای پیش‌بینی مقدار محصول چغندرقند پاییزه در منطقه خوزستان ارائه شده است. در این مدل از تابع لجستیک استفاده شده است که در آن مقدار محصول ریشه و شکر سفید به‌صورت تابعی از وضعیت آبیاری، بارندگی و تبخیر از طشتک تعریف شده است. جهت ارزیابی مدل، از اطلاعات آزمایش‌های انجام‌شده در دو سال ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳ در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی صفی‌آباد دزفول که تحت پنج تیمار آب آبیاری به روش قطره‌ای و بر اساس درصدی از نیاز آبی گیاه (۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد) انجام گردیده، استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مدل قادر است مقادیر نهایی عملکرد ریشه و محصول شکرسفید را با دقت خوبی برآورد نماید؛ به‌طوری که ریشه میانگین مربع‌های خطای نرمال شده (NRMSE) برای تخمین مقدار محصول ریشه در مرحله واسنجی و ارزیابی به ترتیب برابر ۹/۴ و ۱۳/۰ درصد بود. همچنین مقدار NRMSE برای تخمین مقدار محصول شکر سفید نیز در هر دو سال واسنجی و ارزیابی کمتر از ۱۰ درصد و به ترتیب برابر ۶/۸ و ۹/۸ درصد به دست آمد. نتایج نشان داد که مدل قادر است در طول فصل رشد نیز کارکرد مناسبی داشته و مقادیر عملکرد ریشه و شکر را طی روزهای مختلف بعد از کاشت (DAP) با خطای کمتر از ۲۰ درصد برآورد نماید. با توجه به اینکه مدل ارائه‌شده در پژوهش حاضر یک مدل تجربی می‌باشد، توصیه می‌شود جهت استفاده از مدل در مناطقی با شرایط اقلیمی متفاوت، ابتدا مدل واسنجی شده، سپس مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، شبیه‌سازی، کم آبیاری، مدل‌سازی

۱ – استادیار گروه مهندسی آب، مرکز آموزش عالی میناب، و عضو هسته پژوهشی اگرواکولوژی در مناطق خشک، دانشگاه هرمزگان. بندرعباس، ایران. *– نویسنده مسئول: hamidreza14kamali@yahoo.com

۲ – استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی صفی‌آباد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، دزفول، ایران.

۳– استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان. اهواز، ایران.

۴– استادیار مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقند سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

CC BY

مقدمه

چغندرقند در مناطق خشک و نیمه‌خشک عمدتاً به‌صورت آبی کشت می‌شود. به دلیل دوره رشد طولانی، تأمین و مدیریت مناسب آب برای تولید محصول چغندرقند و شکرسفید، در حد قابل قبول، ضروری است. اصولاً نیاز آبی در کشت چغندرقند به شرایط آب و هوایی، مدیریت آبیاری، دوره رشد، تراکم کشت، ژنوتیپ و میزان کود نیترات مورد استفاده بستگی زیادی دارد (Soltani and Kocheki 1996). با توجه به شرایط اقلیمی ایران، امکان کشت چغندرقند به‌صورت پاییزه و بهاره وجود دارد. در استان خوزستان، کشت پاییزه چغندرقند بهره‌برداری از بارش‌های زمستانی (به‌عنوان بارش غالب منطقه) را به حداکثر رسانده و نیاز گیاه به آبیاری کاهش می‌یابد. در نتیجه، کشت چغندرقند در منطقه شمال خوزستان از لحاظ اقتصادی هم مقرون‌به‌صرفه می‌باشد. طبق مطالعات انجام‌شده توسط وزارت جهاد کشاورزی (Moayeri 2018)، بسته به نیاز آبی چغندرقند، وقوع بارش‌های فصلی و تلفات آبیاری، حجم کل آبیاری مورد نیاز چغندرقند پاییزه در استان خوزستان حدود ۹۰۰۰ الی ۱۳۰۰۰ مترمکعب در هر هکتار است.

نتایج تحقیقات بسیاری در مورد گیاهان مختلف مثل گندم (Alizade *et al*. 2020)، ذرت (Zou *et al*. 2021)، سیب‌زمینی (Afshar *et al*. 2020) و پیاز (Piri and Naserin 2020) بیانگر این است که با وجود کاهش محصول بر اثر اعمال کم‌آبیاری، به دلیل صرفه‌جویی در آب مصرفی، کارایی مصرف آب افزایش می‌یابد. اعمال کم‌آبیاری در کشت چغندرقند علاوه بر بهبود شاخص‌های تولید، موجب افزایش درآمد حاصل از کشت چغندرقند می‌شود (Khoramian and Hossienpour 2016). نتایج برخی از پژوهش‌ها نشان می‌دهد که آبیاری تأثیر معنی‌داری بر خصوصیات کمی و کیفی چغندرقند دارد؛ به‌نحوی‌که با افزایش آبیاری مقدار ریشه و شکرسفید افزایش می‌یابد در حالی که درصد شکر کاهش می‌یابد. همچنین، خزائی و همکاران (Khozaei *et al*. 2020) بیان کردند که کم‌آبیاری بدون کاهش محصول شکرسفید، درصد قند را در ریشه چغندرقند افزایش می‌دهد. بر خلاف نتایج توپاک و همکاران (Topak *et al*. 2011) که گزارش دادند با افزایش کم‌آبیاری درصد قند در ریشه افزایش می‌یابد، حق‌وردی و همکاران (Haghverdi *et al*. 2017) افزایش درصد قند در ریشه چغندرقند ناشی از افزایش کم‌آبیاری مشاهده نکردند.

برای تحلیل بهتر چگونگی واکنش گیاهان به پارامترهای مؤثر بر رشد و تولید محصول از مدل‌های مختلف باید این واکنش‌ها کمی‌سازی شوند. برای کمی‌کردن رشد و تولید گیاهان مختلف از روش تحلیل رشد استفاده می‌شود (Mahlouji and Afyouni 2004). با این وجود، می‌توان از این ابزار در جهت تشخیص وجود مشکل در شرایط رشدی گیاه استفاده کرد. بدیهی است برای تهیه‌ی مدل‌های مورد استفاده، تعیین شاخص‌هایی مثل میزان محصول و یا ماده خشک تولیدی و یا اجزای مهم آن (مثل درصد روغن در گیاهان روغنی یا شکر در نیشکر و چغندرقند) در طول دوره رشد ضروری است. گرچه برخی پارامترهای دیگر مثل سطح برگ گیاه (Ebrahimi *et al*. 2018) و یا ارتفاع گیاه (Jiang *et al*. 2020) هم مورد توجه بوده‌اند. همه‌ی متغیرهای مذکور، تحت تأثیر عوامل مختلفی همچون میزان آب و کود قرار دارند. پیش‌بینی تولید و پارامترهای رشد با مدل‌های رشدی تهیه‌شده در شرایط معمول با خطا همراه خواهد بود.

مدل‌های رگرسیونی غیرخطی، برخلاف روش‌های خطی قابلیت خوبی در پیش‌بینی تولید دارند (Hunt 2003; Piri and Naserin 2021). از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های گمپرتز (Gompertz)، لجستیک، ریچاردز (Richards) و ون‌برتالانفی (Von Bertalanffy) اشاره کرد (Archontoulis and Miguez 2015). بسیاری از این مدل‌ها برای شبیه‌سازی رشد درختان مورد استفاده بوده‌اند (Jiang *et al*. 2020) و در مطالعات کمی برای گیاهان زراعی مورد استفاده بوده‌اند (Setiyono *et al*. 2008). این مدل‌ها اگرچه در مناطق مختلف و بر روی گیاهان مختلف بررسی شده و میزان کارایی‌شان تعیین شده است؛ اما به دلیل وجود تفاوت در

شرایط محلی و محیطی و ارقام مورد استفاده، بایستی کارایی آنها در محل آزمایش بررسی شود.

بر اساس مطالعات پیشین، مدل‌های رگرسیون غیرخطی در شرایط متفاوت دارای سطوح دقت مختلف بوده‌اند. در این میان مدل لجستیک در بسیاری از تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته و دقت آن مورد تأیید واقع شده است. مهبد و همکاران (Mahbod *et al*. 2014) با استفاده از نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای روی گندم در مقادیر مختلف آب آبیاری و کود نیتروژن، توانایی مدل لجستیک را مورد بررسی قرار داد. بر این اساس، مدل لجستیک میزان تولید ماده خشک اندام‌های هوایی و محصول دانه گندم را به‌خوبی پیش‌بینی کرد. ژیانگ ژیانگ و همکاران (Xiangxiang *et al*. 2014) معادله‌ای جدید با الگوی لجستیک برای محاسبه شاخص سطح برگ و زیست‌توده هوایی گندم زمستانه با استفاده از ارتفاع گیاه برای تیمارهای مختلف آبیاری ارائه کردند که نتایج سازگاری خوبی بین مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری شده نشان داد.

جیانگ و همکاران (Jiang *et al*. 2020) با مقایسه شش مدل اصلاح شده برای تخمین ارتفاع گندم پاییزه، در شرایط رطوبتی مختلف خاک، نتیجه گرفتند که مدل لجستیک اصلاح‌شده با کمترین تغییرات دقت در دوره چهارساله آزمایش، بهترین مدل در برآورد ارتفاع بوته گندم بود. به‌علاوه، نرخ افزایش طول و ارتفاع شبیه‌سازی‌شده با مدل لجستیک اصلاح‌شده مطابقت بیشتری با رشد فیزیولوژیک واقعی ساقه گندم داشت. رفیعی و مهبد (Rafiee and Mahbod 2020) از مدل لجستیک برای تخمین محصول و ماده خشک بادمجان در شرایط گلخانه‌ای و مزرعه‌ای و سطوح مختلف شوری آب آبیاری و تنش آبی استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل لجستیک قابلیت خوبی در پیش‌بینی میزان محصول تولیدی و ماده خشک بادمجان دارد.

برای پیش‌بینی رشد و محصول گیاه چغندرقند تاکنون مدل‌های مختلفی ارائه شده است. این مدل‌ها برآورد گستره‌ی وسیعی از عوامل را در برمی‌گیرد؛ از عواملی نظیر پوشش سبز، شاخص سطح برگ، سطح نیتروژن گیاهی گرفته (Kamali 2016a; 2016b) تا مدل شبیه‌سازی چغندرقند (Sugar beet Simulation Model, SSM) قادر هستند مقدار رشد و محصول گیاه چغندرقند بهاره را با دقت بسیار خوبی برآورد نماید. به‌علاوه، از مدل‌های مختلف رایانه‌ای برای برآورد میزان محصول چغندرقند استفاده شده است. در پژوهشی که توسط زارع و همکاران (Zare *et al*. 2015) انجام شد کارایی مدل آکواکراپ (Aqua Crop) در برآورد مقدار محصول چغندرقند بهاره مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش که در منطقه‌ی باجگاه استان فارس در دو سال ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ انجام شد، در سال اول شش سطح آبیاری شامل ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰، ۷۰، ۶۵ و ۵۰ درصد آبیاری کامل و در سال دوم چهار سطح آبیاری شامل ۱۲۰، ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد آبیاری اعمال شد. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل نشان داد که مقدار خطای استاندارد (NRMSE) در برآورد ماده خشک و عملکرد شکر کم بود و دقت مدل بسیار خوب بوده است.

مدل DSSAT (Hogenboom *et al*. 2019) از دیگر مدل‌هایی هست که در سال‌های اخیر پیشرفت چشمگیری داشته و در پژوهش آنار و همکاران (Anar *et al*. 2019) ارزیابی مدل در زمینه‌ی برآورد مقدار محصول چغندرقند ارائه شده است. در این پژوهش عنوان شده که مدل قادر است مقادیر حداکثر محصول ریشه، قسمت هوایی، شاخص سطح برگ و تعداد برگ را در شرایط مختلف خاک و اقلیم بدون منظور کردن اثرات کمبود آب و کود با دقت خوب و خطای پایین برآورد نماید.

برخی از پژوهشگران مدل‌های ساده‌تری ارائه کرده‌اند که نیاز به اطلاعات ورودی کمتری دارد. به‌عنوان مثال در پژوهش مشابهی که توسط سپاسخواه و همکاران (Sepaskhah *et al*. 2011) انجام شده است یک رابطه لجستیکی بین مقدار محصول ذرت و شاخص برداشت با مقدار کل آب و نیتروژن مصرفی ارائه شده است. در معدود پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه تخمین محصول چغندرقند با استفاده از تابع لجستیک، کمالی و همکاران (Kamali *et al*. 2016c) یک

مدل ریاضی برای تخمین مقدار محصول چغندرقند بهاره ارائه کردند که قادر است در شرایط مختلف آبی و نیتروژن، مقدار محصول ماده خشک و شکر تولیدی را با دقت خوبی تخمین بزند. در این مدل از معادله لجستیکی برای تخمین شاخص‌های عملکرد در طول فصل رشد استفاده شده است که نتایج پژوهش نشان‌دهنده قابلیت این مدل در تخمین محصول چغندرقند بهاره دارد. با توجه به تفاوت‌های ذکرشده در مورد کشت پاییزه و بهاره و بازه‌های مختلف فنولوژیک کشت چغندرقند در این دو فصل، هدف از انجام این تحقیق ارزیابی قابلیت تابع لجستیک در تخمین محصول چغندرقند و شکرسفید حاصل در کشت پاییزه چغندرقند در منطقه شمال خوزستان است.

مواد و روش‌ها

برای واسنجی و ارزیابی مدل ارائه‌شده در پژوهش حاضر از اطلاعات حاصل از پژوهش حسین پور و همکاران (Hosseinpour *et al*. 2006) استفاده شد. این پژوهش در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳ در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی صفی‌آباد دزفول با مختصات جغرافیایی ´۱۶ °۳۲ عرض شمالی، ´۲۵ °۴۸ طول شرقی و ارتفاع ۸۲ متری از سطح دریا و با میانگین بارندگی ۳۴۴ میلی‌متر انجام شده است. از اطلاعات سال اول آزمایش (۱۳۸۲) برای انجام واسنجی و از اطلاعات سال دوم (۱۳۸۳) برای ارزیابی مدل استفاده شد. در این پژوهش پنج تیمار آبیاری و دو رقم چغندرقند در قالب طرح آماری کرت‌های یک‌بار خردشده با چهار تکرار مورد بررسی قرار گرفته‌اند که کرت‌های اصلی شامل سطوح مختلف آبیاری و کرت‌های فرعی به رقم اختصاص داده شده است.

خاک محل آزمایش دارای بافت سیلتی– لومی با شوری ۰/۴۵ دسی زیمنس بر متر و اسیدیته حدود ۷/۵ بوده است. همچنین مقدار رطوبت در حالت ظرفیت زراعی حدود ۲۲ درصد وزنی، رطوبت نقطه پژمردگی دائم حدود ۱۲ درصد وزنی و وزن مخصوص ظاهری ۱/۶۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده است. کودهای مورد استفاده قبل از کشت در این پژوهش عبارت است از ۱۵۰ کیلوگرم K_2O در هکتار از منبع سولفات پتاسیم، ۹۰ کیلوگرم P_2O_5 در هکتار از منبع سوپرفسفات تریپل و نیمی از نیتروژن (۹۰ کیلوگرم در هکتار) از منبع اوره بوده‌اند. نیمه دیگر کود نیتروژن در اوایل آذرماه و پس از تنک کردن مزرعه (با فاصله بوته ۲۰ سانتی‌متر رو خطوط کشت) در اختیار گیاه قرار گرفته است. جهت انجام کشت پشته‌هایی با فاصله ۱۲۰ سانتی‌متر ایجاد و بر روی هر پشته بذر چغندرقند به فاصله ۶۰ سانتی‌متر کشت گردید.

بالاترین کارایی مصرف آب آبیاری برای عملکرد ریشه و شکر مربوط به تیمار ۲۵ درصد تأمین نیاز آبی گیاه، به ترتیب برابر ۱۸/۷ و ۲/۶ کیلوگرم بر مترمکعب آب مصرفی بوده است. همچنین در این پژوهش ذکر شده است که اختلاف معنی‌داری در ویژگی‌های کمی و کیفی و کارایی مصرف آب، بین ارقام مورد آزمایش مشاهده نشده است (Hosseinpour *et al*. 2006).

آبیاری به روش قطره‌ای با استفاده از نوارهای تیپ (با فاصله روزنه ۳۰ سانتی‌متر و آبدهی چهار لیتر در ساعت در هر متر نوار) انجام شده است. نوارها بین دو ردیف کشت قرار گرفته به‌طوری که فاصله آنها تا ردیف کشت از هر طرف برابر ۳۰ سانتی‌متر بود. اولین آبیاری در سال اول و دوم به ترتیب در تاریخ ۲۸ مهر و ۳۰ مهر انجام شد. تیمارهای آبیاری در این پژوهش شامل پنج سطح ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی با نمادهای به ترتیب I5، I4، I3، I2 و I1 بوده که مقادیر آب مصرفی در تیمارهای مختلف در سال اول به ترتیب برابر ۳۷۹۴، ۴۹۹۶، ۶۰۹۶، ۷۲۵۲ و ۸۴۰۱ مترمکعب در هکتار و در سال دوم به ترتیب برابر ۴۴۰۳، ۵۷۵۵، ۶۹۵۳، ۸۸۳۰ و ۹۵۰۵ مترمکعب در هکتار بوده است. مقدار بارندگی مؤثر در سال اول و دوم به ترتیب برابر ۲۰۰ و ۲۷۷ میلی‌متر و مقدار تبخیر از تشت در سال اول و دوم به ترتیب برابر ۸۴۹ و ۹۱۲ میلی‌متر گزارش شده است.

در پژوهش حاضر جهت برآورد عملکرد ریشه و شکر محصول چغندرقند پاییزه از تابع لجستیکی (رابطه ۱) استفاده شد (Kamali *et al*. 2016c):

$$R = \frac{R_m}{(1 + A \times e^{-B \times DAP})} \qquad (۱)$$

که در این معادله R مقدار عملکرد ریشه، Rm مقدار حداکثر عملکرد ریشه، A ضریبی است که به مقدار حداکثر عملکرد ریشه وابسته است، ضریب B معرف نرخ رشد و DAP روزهای بعد از کاشت می‌باشد.

مقادیر Rm، A و B تابعی از وضعیت آبی مزرعه (IR^*) است که به شیوه‌ی زیر در نظر گرفته شد:

$$R_m = R_1 + R_2(IR^*) + R_3(IR^*)^2 \quad (۲)$$

$$A = A_1 + A_2(IR^*) + A_3(IR^*)^2 \quad (۳)$$

$$B = B_1 + B_2(IR^*) + B_3(IR^*)^2 \quad (۴)$$

که مقادیر R1 تا R3، A1 تا A3 و B1 تا B3 ضرایب ثابتی هستند که به روش رگرسیون خطی به دست می‌آیند. در پژوهش حاضر IR^* به‌عنوان یک معرف از وضعیت آب در خاک تعریف و طبق معادله‌ی زیر در نظر گرفته شد:

$$IR^* = \frac{IR + p}{E} \quad (۵)$$

که در آن IR مقدار آبیاری، P مقدار بارندگی و E مقدار تبخیر از تشت می‌باشد.

جهت برآورد مقدار شکر نیز معادلات مشابهی استفاده شد (معادلات ۶ تا ۹). در این معادلات نیز مقدار شکر تولیدی به مقادیر آبیاری، بارندگی و تبخیر از تشت وابسته است. در این معادلات S مقدار عملکرد شکر، Sm مقدار حداکثر عملکرد شکر، a ضریبی است که به مقدار حداکثر عملکرد ریشه وابسته است، b ضریبی که معرف نرخ رشد می‌باشد و DAP روزهای بعد از کاشت می‌باشد. مقادیر S1 تا S3، a1 تا a3 و b1 تا b3 ضرایب ثابتی هستند که به روش رگرسیون خطی محاسبه شدند:

$$S = \frac{S_m}{(1 + a \times e^{-b \times DAP})} \quad (۶)$$

$$S_m = S_1 + S_2(IR^*) + S_3(IR^*)^2 \quad (۷)$$

$$a = a_1 + a_2(IR^*) + a_3(IR^*)^2 \quad (۸)$$

$$b = b_1 + b_2(IR^*) + b_3(IR^*)^2 \quad (۹)$$

محاسبات لازم جهت برآورد ضرایب معادلات فوق، در محیط نرم‌افزار Excel و با استفاده از گزینه‌ی Solver انجام شد. جهت ارزیابی نتایج مدل، از ریشه میانگین مربع‌های خطای نرمال شده (NRMSE) استفاده گردید:

$$NRMSE = \frac{100}{\bar{O}} \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(p_i - O_i)^2} \quad (۱۰)$$

که در آن n تعداد نمونه‌های مورد مقایسه، Pi مقادیر برآورد شده، Oi مقادیر اندازه‌گیری شده و $\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری می‌باشد.

نتایج و بحث

چنانچه در قسمت قبل توضیح داده شد، بر اساس اطلاعات سال‌های اول و دوم واسنجی و ارزیابی انجام گردید. ضرایب معادلات ۲ تا ۴ جهت مدل برآورد مقدار عملکرد ریشه به شرح زیر به دست آمد:

$$R_m = 48.3 + 40.9(IR^*) - 1.4(IR^*)^2 \quad (۱۱)$$

$$A = 487 - 43(IR^*) - 104(IR^*)^2 \quad (۱۲)$$

$$B = 0.0365 + 0.0074(IR^*) - 0.0079(IR^*)^2 \quad (۱۳)$$

همچنین ضرایب مربوط به تولید شکر (معادلات ۷ تا ۹) نیز به شرح زیر به دست آمد:

$$S_m = 3.4 + 14.8(IR^*) - 5.5(IR^*)^2 \quad (۱۴)$$

$$a = 233 + 867(IR^*) - 638(IR^*)^2 \quad (۱۵)$$

$$b = 0.045 - 0.011(IR^*) + 0.0013(IR^*)^2 \quad (۱۶)$$

ضرایب $(IR^*)^2$ در معادلات ۱۱ و ۱۴ منفی شده است و این مسئله به این معنی است که رابطه بین وضعیت آبی خاک (IR^*) با حداکثر عملکرد ریشه (Rm) و حداکثر عملکرد شکر (Sm) به‌گونه‌ای است که دارای نقطه بهینه می‌باشد. به عبارت دیگر افزایش مقدار آب در مزرعه، تا یک حد مشخص باعث افزایش حداکثر عملکرد ریشه و شکر، و از آن حد به بعد باعث کاهش عملکرد شده است. این مسئله برای حداکثر عملکرد شکر (Sm) مورد بررسی قرار گرفت. با مشتق‌گیری از معادله‌ی ۱۴ مقدار IR^* برای نقطه‌ی بهینه برابر ۱/۳۵ به دست می‌آید. با توجه به تعریف IR^* ($IR^* = \frac{IR+p}{E}$)، مقدار ۱/۳۵ به این معنی است که حداکثر مقدار شکر تولیدی زمانی اتفاق می‌افتد که مجموع بارندگی (P) و آبیاری (IR) ۱/۳۵ برابر مقدار تبخیر از تشت (E) باشد.

از روابط به‌دست‌آمده می‌توان مقدار محصول چغندرقند در حالت دیم را نیز تخمین زد. برای این منظور فرض می‌کنیم که در سال دوم مقدار بارندگی مؤثر برابر ۲۷۷ میلی‌متر و مقدار آبیاری در طول فصل رشد صفر بوده و تنها پس از کاشت و جهت اطمینان از سبز شدن بذرها، آبیاری به میزان ۱۴۶ میلی‌متر (برابر با کل آب در دسترس گیاه تا عمق ۹۰ سانتی‌متر) انجام شده باشد. بر این اساس اگر در معادله ۵ مقدار IR را برابر صفر قرار دهیم، مقدار IR^* برابر ۰/۳ به دست می‌آید. با قرار دادن مقدار IR^* در معادله ۱ و ضرایب به‌دست‌آمده در معادلات ۱۱، ۱۲ و ۱۳ مقدار محصول ریشه برابر ۵۴/۷ تن بر هکتار به دست می‌آید. همچنین با قرار دادن مقدار IR^* در معادله ۶ و ضرایب به‌دست‌آمده در معادلات ۱۴، ۱۵ و ۱۶ مقدار محصول شکر تولیدی برابر ۷/۰۲ تن بر هکتار به دست می‌آید. این نتیجه با نتایج پژوهش خرمیان و همکاران (Khoramian *et al*. 2015) قابل مقایسه است. در این پژوهش تابع تولید چغندرقند پاییزه بر اساس عمق آبیاری و بارش ارائه شده است. در صورتی که مقدار مجموع آب مصرفی گیاه (۲۷۷+۱۴۶ میلی‌متر) را در معادله قرار دهیم، مقدار چغندرقند تولیدی برابر ۴۷/۳ تن بر هکتار به دست می‌آید. چنانچه مشاهده می‌شود مقدار تخمینی چغندرقند دیم تولیدی در پژوهش حاضر (۵۴/۷ تن بر هکتار) در مقایسه با مقدار به‌دست‌آمده از تابع تولید پیشنهادی پژوهش خرمیان و همکاران (۴۷/۳ تن بر هکتار) بیشتر است. این اختلاف نشان می‌دهد که مدل در حالت دیم، مقدار محصول را بیشتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند.

نتایج واسنجی و ارزیابی مدل جهت برآورد عملکرد نهایی ریشه در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار خطای نرمال استاندارد (NRMSE) در سال اول (واسنجی) کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد و مقادیر برآورد و اندازه‌گیری شده به خط یک‌به‌یک نزدیک می‌باشد. از طرفی در سال دوم (ارزیابی) نیز مقدار خطا در حد قابل قبولی بوده و مقادیر برآورد و اندازه‌گیری به خط یک‌به‌یک نزدیک می‌باشد.

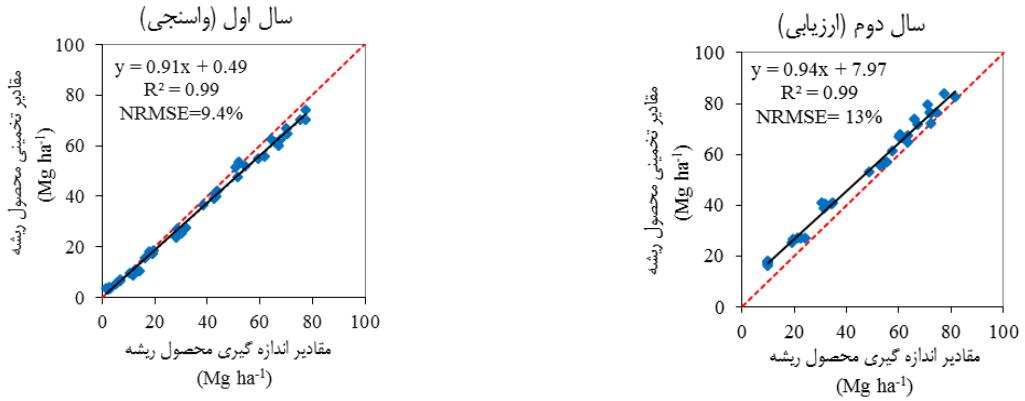
نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد که در طول فصل رشد نیز مطابقت خیلی خوبی بین مقادیر برآورد و اندازه‌گیری محصول ریشه وجود دارد. در این شکل برای هر پنج تیمار آزمایش مقادیر خطا کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی واسنجی مناسب مدل می‌باشد. در شکل ۳ نتایج مشابهی برای سال دوم (ارزیابی) به‌دست‌آمده است. در این شکل نشان داده شده است که مطابقت بین مقادیر برآورد و اندازه‌گیری در طول فصل رشد مناسب است.

عملکرد مدل در مورد برآورد مقدار نهایی شکر تولیدی نیز مناسب بود، به‌طوری که مقدار خطای مدل در برآورد مقدار محصول نهایی شکر تولیدی در هر دو سال اول (واسنجی) و سال دوم (ارزیابی) کمتر از ۱۰ درصد بود. همچنین مقایسه بین مقادیر برآورد توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده در نمودار یک‌به‌یک (شکل ۴)، نشان از دقت مناسب مدل داشت. علاوه بر دقت مناسب مدل در برآورد مقدار نهایی شکر تولیدی، در طول فصل رشد نیز تطابق بین مقادیر برآورد و اندازه‌گیری شکر تولیدی مناسب بود، به‌طوری که در سال اول (واسنجی) خطا کمتر از ۱۰ درصد (شکل ۵) و در سال دوم (ارزیابی) نیز، به‌جز در یکی از تیمارها، خطا از ۱۰ درصد کمتر بود.

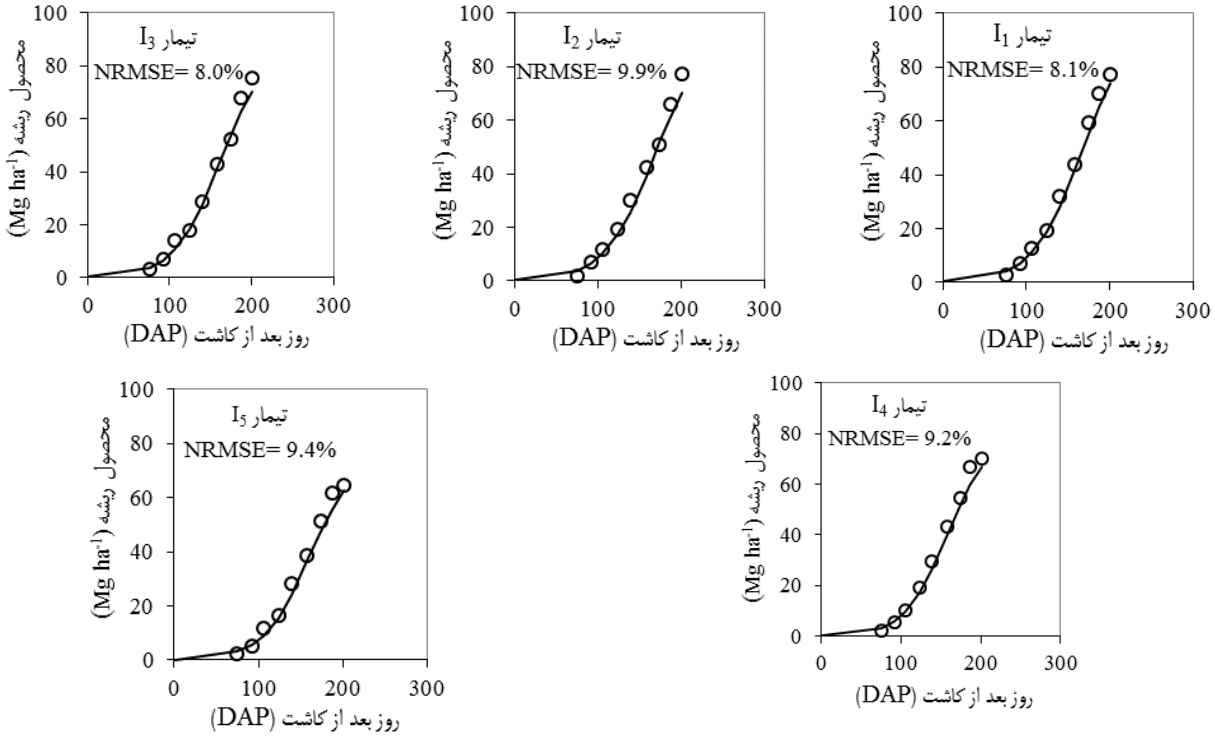
جهت مقایسه‌ی بهتر نتایج، جدول ۱ ارائه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، خطای مدل در برآورد مقدار شکر تولیدی کمتر از محصول ریشه می‌باشد. علت این امر ممکن است به این دلیل باشد که اطلاعات مربوط به محصول ریشه به دلیل داشتن رطوبت، دارای پراکندگی بیشتری می‌باشد؛ بنابراین ممکن است در صورت استفاده از داده‌های ماده خشک، این پراکندگی کمتر شود هرچند با توجه به اینکه اطلاعات مربوط به ماده‌ی خشک ریشه در اختیار نبود، امکان ارزیابی این نظریه وجود نداشت.

جدول ۱ مقدار ریشهی میانگین مربعهای خطای نرمال شده (NRMSE) برای تیمارهای مختلف و همچنین کل تیمارها

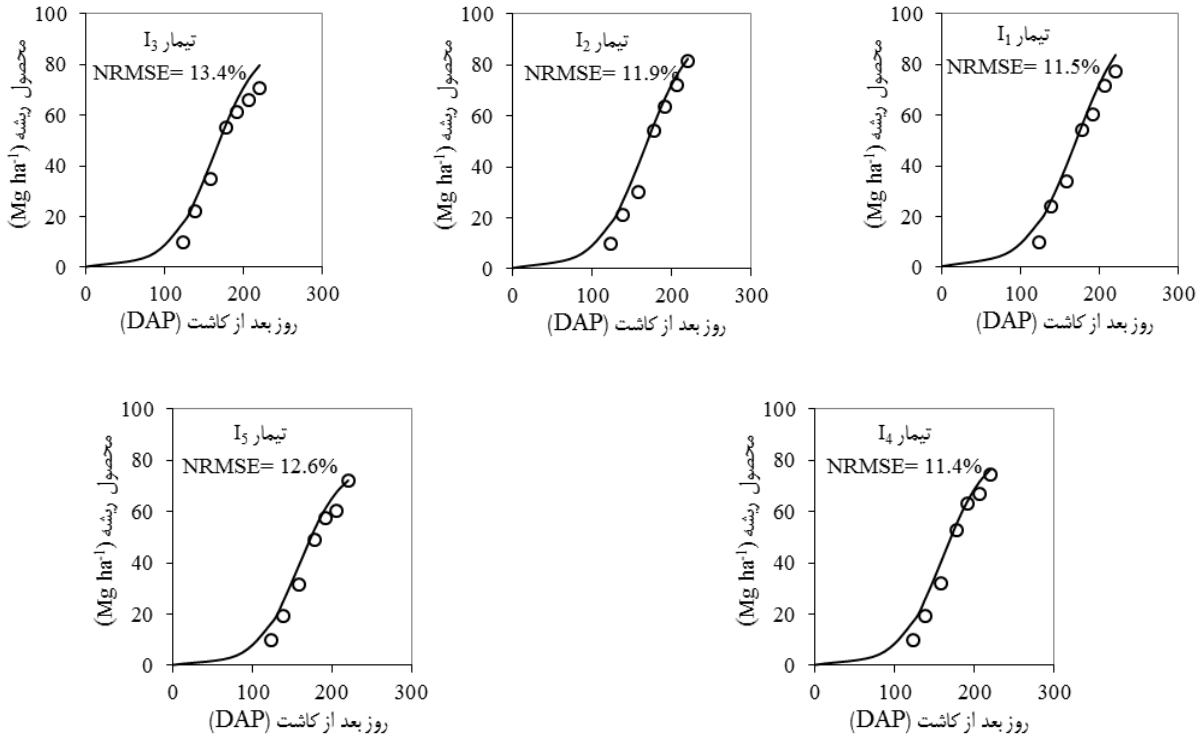
تیمار آبیاری	شکر		ریشه	
	واسنجی	ارزیابی	واسنجی	ارزیابی
۲۵	۷/۵	۹/۳	۹/۴	۱۲/۶
۵۰	۴/۶	۱۰/۹	۹/۲	۱۱/۴
۷۵	۸/۱	۹/۱	۸/۰	۱۳/۴
۱۰۰	۶/۱	۹/۸	۹/۹	۱۱/۹
۱۲۵	۶/۸	۹/۷	۸/۱	۱۱/۵
کل تیمارها	۶/۸	۹/۸	۹/۴	۱۳/۰



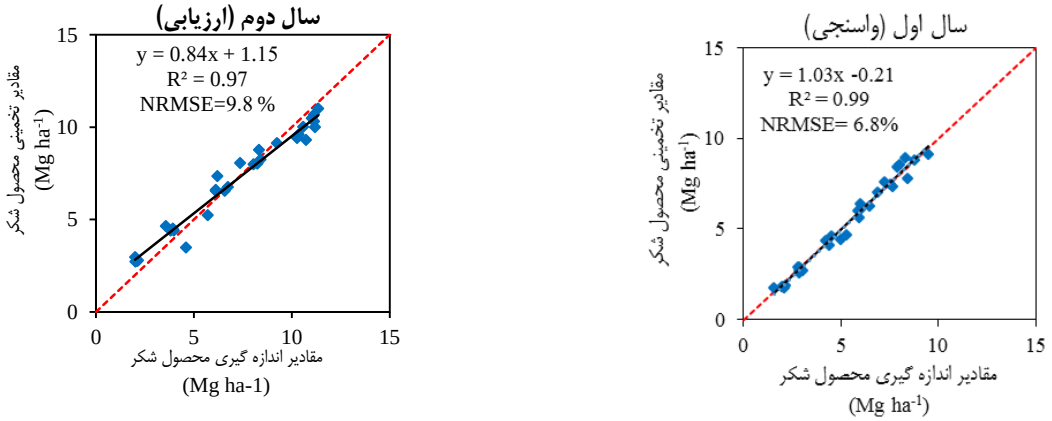
شکل ۱ مقادیر برآورد محصول ریشه در طول فصل رشد توسط مدل در مقایسه با مقادیر اندازهگیری شده ($Mg.ha^{-1}$) در سال اول (واسنجی) و سال دوم آزمایش (ارزیابی)



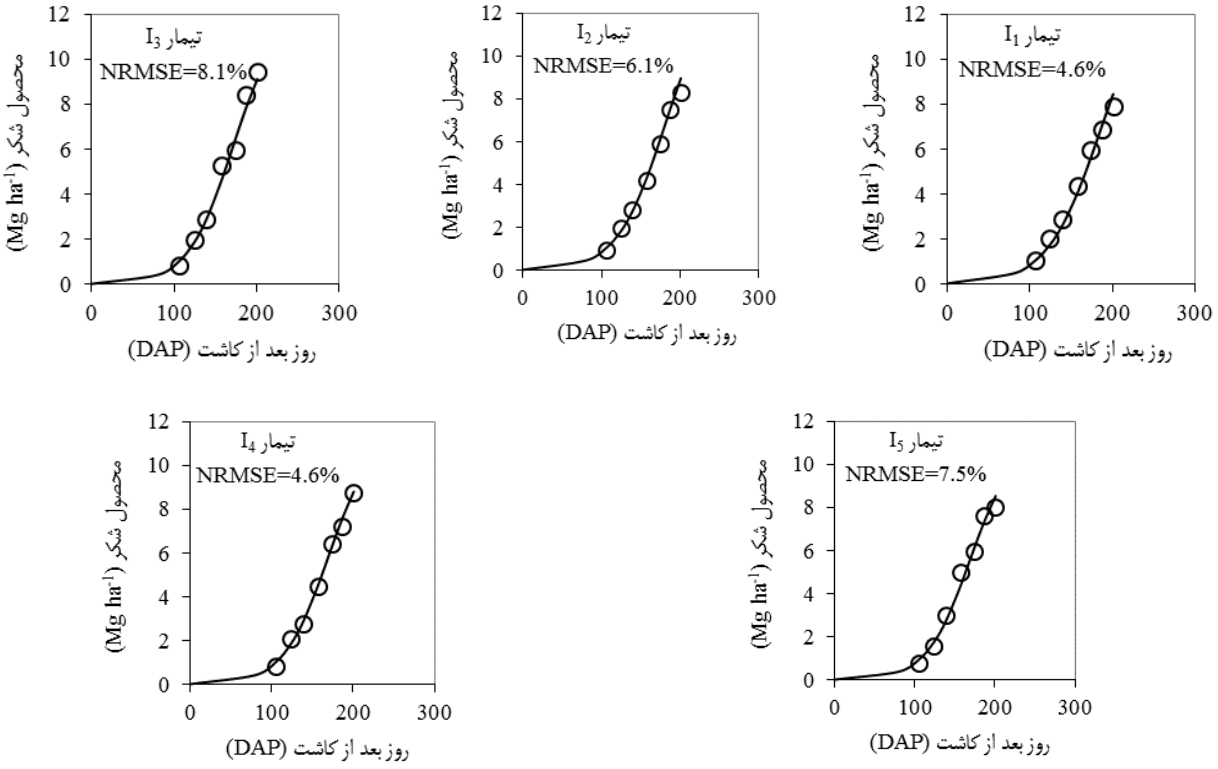
شکل ۲ مقایسهی مقادیر برآورد محصول ریشه ($Mg.ha^{-1}$) توسط مدل (——) در مقایسه با مقادیر اندازهگیری شده (○) در تیمارهای مختلف و در طول فصل کشت سال اول (واسنجی)



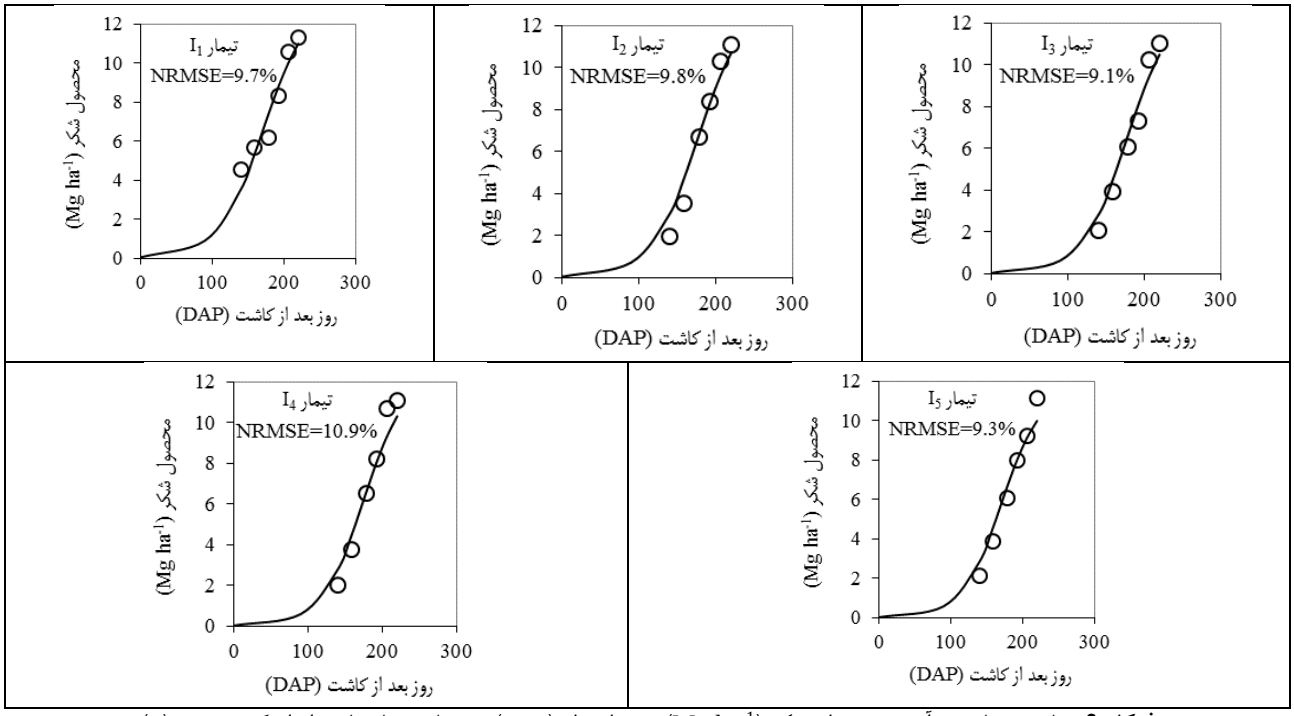
شکل ۳ مقایسه‌ی مقادیر برآورد محصول ریشه ($Mg.ha^{-1}$) توسط مدل (——) در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده (○) در تیمارهای مختلف و در طول فصل کشت سال دوم (ارزیابی)



شکل ۴ مقادیر برآورد محصول شکر در طول فصل رشد توسط مدل در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده ($Mg.ha^{-1}$) در سال اول (واسنجی) و سال دوم آزمایش (ارزیابی)



شکل ۵ مقایسه مقادیر برآورد محصول شکر (Mg.ha^{-1}) توسط مدل (——) در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده (○) در تیمارهای مختلف و در طول فصل کشت سال اول (واسنجی)



شکل ۶ مقایسه مقادیر برآورد محصول شکر (Mg.ha^{-1}) توسط مدل (——) در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده (○) در تیمارهای مختلف و در طول فصل کشت سال دوم (ارزیابی)

نتیجه‌گیری کلی

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که این مدل قادر است با دقت خوبی (خطای کمتر از ۱۰ درصد) مقدار محصول ریشه و شکر چغندرقند پاییزه را برآورد نماید. البته باید به این نکته اشاره کرد که مدل‌های پیشرفته‌تر دیگری موجود است که قادر است مقدار محصول چغندرقند را با دقت خیلی خوبی برآورد نماید، اما نیاز به اطلاعات ورودی فراوانی دارند که در برخی مواقع در اختیار نیست. به همین دلیل مدل‌های ساده‌ای، نظیر آنچه در پژوهش حاضر ارائه شد، می‌تواند خلأ کمبود اطلاعات را تا حدی جبران کند. در مدل پژوهش حاضر، با در دست داشتن اطلاعات مربوط به مقادیر تجمعی آبیاری، بارندگی و تبخیر از تشت، می‌توان مقدار محصول ریشه و شکر تولیدی چغندرقند پاییزه را با دقت خوبی به دست آورد. قابل ذکر است که عوامل مختلفی در رشد گیاهان مؤثر است. عواملی از جمله اقلیم، خصوصیات خاک، تنش‌های غیر زیستی (مانند خشکی، شوری و گرما)، تنش‌های زیستی (مانند بیماری‌ها، آفات و علف‌های هرز) و... در مورد تغییر اقلیم و تغییر شرایط آب و هوایی، باید به این نکته اشاره کرد که مدل تا حد قابل قبولی قادر است این مسئله را در نظر بگیرید چرا که در معادله ۵، شاخص IR^* ترکیبی از سه عامل آبیاری، بارندگی و تبخیر از تشت است. از طرفی تغییر شرایط آب و هوایی تأثیر خود را بر بارندگی (P) و تبخیر از تشت (E) خواهد گذاشت و به این ترتیب مدل قادر خواهد بود که میزان محصول متناسب با شرایط جدید را تخمین بزند. با این وجود و با توجه به اینکه مدل ارائه‌شده در پژوهش حاضر یک مدل تجربی می‌باشد و تحت شرایط خاص آب و هوایی و همچنین بر اساس مقدار محصول یک نوع رقم خاص، به‌دست آمده است، بنابراین توصیه می‌گردد جهت استفاده از مدل در مکانی دیگر و یا در شرایط اقلیمی و آب‌وهوای متفاوت و یا رقم متفاوت، ابتدا مدل واسنجی شده و سپس مورد استفاده قرار گیرد.

منابع مورد استفاده:

References:

Alizadeh F, Nasrolahi A, Saeidinia M, Sharifipour M. Effect of Deficit Irrigation and Different Nitrogen Levels on Wheat Yield and Water Productivity (Case Study: Khorramabad). Iranian Journal of Soil and Water Research. 2020; 51(6): 1417-1426. (in Persian, abstract in English)

Abyaneh HZ, Jovzi M,Albaji, M. Effect of regulated deficit irrigation, partial root drying and N-fertilizer levels on sugar beet crop (Beta vulgaris L.). Agricultural Water Management. 2017; 194: 13-23.

Afshar A, Haghighatju P, Karandish F, mohammad rezapour O, Kouhestani S. The Effect of Deficit Irrigation on Yield and Water Use Efficiency of Several Main Crops in Jiroft. Iranian Journal of Soil and Water Research. 2020; 51(8): 2137-2148. (in Persian, abstract in English)

Anar MJ, Lin Z, Hoogenboom G, Sheliab V, Batchelord WD, Tebohe JM, Ostliee M, Schatze BG, Khanf M. Modeling growth, development and yield of Sugar beet using DSSAT. Agricultural Systems. 2019; 169: 58-70.

Ebrahimi N, Torabi B, Soltani A, Zenali E. Prediction of dry matter production and leaf area index in faba bean under different planting dates and densities. Journal of Crops Improvement. 2018; 20(1): 283-298. (in Persian, abstract in English)

Haghverdi A, Yonts CD, Reichert DL, Irmak S. Impact of irrigation, surface residue covers and plant population on sugar beet growth and yield, irrigation water use efficiency and soil water dynamics. Agricultural Water Management. 2017; 180: 1-12.

Hosseinpour M, Soroushzadeh A, Agha Alikhani M, Taleghani DF, Khoramian M. The Effect of irrigation in spring on water use efficiency and yield of autumn sown sugar beet. Journal of Sugar Beet. 2006; 22(2): 35-52. (In Persian, abstract in English)

Hunt R. Growth analysis, individual plants, In: Thomas B, Murphy DJ, Murray D, (Eds.). Encyclopedia of applied plant sciences. Academic Press, London. 2003; 579-588.

Jiang T, Liu J, Gao Y, Sun Z, Chen S, Yao N, Ma H, Feng H, Yu Q, He, J. Simulation of plant height of winter wheat under soil Water stress using modified growth functions. Agricultural Water Management. 2020; 232: 106066.

Kamali Hr. Development of a model for simulation of growth and yield of sugar beet at different levels of irrigation water and nitrogen (PhD dissertation). University of Shiraz; 2016 (a).

Kamali Hr, Zand-ParsaSh, Zare M. Estimating canopy cover, leaf area index and nitrogen status of sugar beet using color digital camera. Sugar beet. 2016 (b); 32(2): 123-133. (In Persian, abstract in English)

Kamali Hr, Zand-ParsaSh, Zare M. Estimation of sugar beet yield and its partitioning under different applied water and nitrogen. International Crop Modelling Symposium “Crop Modelling for Agriculture and Food security under Global Change” (iCROPM2016). 2016 (c) 15th to 17th March. Berlin, Germany. P 282-283.

Khoramian M, Hossien pour M. Autumn sugar beet irrigation water optimization basis of yield and cost functions in north of the Khuzestan. Irrigation Science Engineering. 2016; 39(3): 95-106. (in Persian, abstract in English)

Khozaei M, Haghighi AAK, Zand-ParsaSh, Sepaskhah AR, Razzaghi F, Yousef abadi VA, Emam Y. Evaluation of direct seeding and transplanting in sugar beet for water productivity, yield and quality under different irrigation regimes and planting densities. Agricultural Water Management. 2020; 238: 106230.

Mahbod M, Sepaskhah AR, Zand- Parsa Sh. Estimation of yield and dry matter of winter wheat using logistic model under different irrigation water regimes and nitrogen application rates. Archives of Agronomy and *Soil Science*. 2014; 60(12): 1661-1676.

Mahlouji M, Afyouni D. Study of growth analysis and grain yield in barley (*HordeumVulgare* L.) genotypes. Pajouhseh-va- Sazandegi. 2004; 17(2): 37-42. (in Persian, abstract in English)

Moayeri M. Irrigation of autumn sugar beet farms in Khozestan. Publication of agricultural education. 2018; pp. 54. (in Persian)

Piri H, Naserin A. Effect of different levels of water, applied nitrogen and irrigation methods on yield, yield components and IWUE of onion. Scientia Horticulturae. 2020; 268: 109361.

Piri H, Naserin A. Comparison of different irrigation methods for onion by means of water and nitrogen response functions. Journal of Horticultural Science and Biotechnology. 2021; 23: 1-5.

Rafiee MR, Mahbod M. Application of logistic model to estimate eggplant yield and dry matter under different levels of salinity and water deficit in greenhouse and outdoor conditions. Water SA. 2020; 46(3): 419-428.

Sepaskhah AR, Fahandezh- Saadi S, Zand- Parsa Sh. Logistic model application for prediction of maize yield under water and nitrogen management. Agricultural Water Management. 2011; 99: 51-57.

Setiyono TD, Weiss A, Specht JE, Cassman KG, Dobermann A. Leaf area index simulation in soybean grown under near-optimal conditions. Field Crops Res. 2008; 1: 82–92.

Soltani A, Kocheki A. Sugar beet cultivation. Jahad Daneshgahi Publication, Ferdowsi University of Mashhad. 1996; pp. 200. (in Persian)

Topak R, Süheri S, Acar B. Effect of different drip irrigation regimes on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield, quality and water use efficiency in Middle Anatolian, Turkey Irrigation Science. 2011; 29(1): 79–89.

Xiangxiang W, Quanjiu W, Jun F, Lijun S, Xinlei S. Logistic model analysis of winter wheat growth on China's Loess Plateau. Canadian Journal of Plant Science. 2014; 94(8): 1471-1479.

Zare M, Zand-ParsaSh, Kamali Hr. Evaluation of Aquacrop model in estimation of dry matter and yield of sugar beet (cultivar SBSI 005) under different water stress condition: Case study in Fars province. First national congress of irrigation and drainage. 2015. Mashhad, Iran. (in Persian).

Zou Y, Saddique Q, Ali A, Xu J, Khan MI, Qing M, Azmat M, Cai H, Siddique KH. Deficit irrigation improves maize yield and water use efficiency in a semi-arid environment. Agricultural Water Management. 2021; 243: 106483.