

تعیین تابع تولید آب- شوری- عملکرد برای گیاه اسفناج

هادی دهقان^{۱*}، مهدی مکاری و میثم عابدین پور

استادیار گروه علوم و مهندسی آب مرکز آموزش عالی کاشمر.

h.dehghan@kashmar.ac.ir

استادیار گروه علوم و مهندسی آب مرکز آموزش عالی کاشمر.

mehdimokari@gmail.com

استادیار گروه علوم و مهندسی آب مرکز آموزش عالی کاشمر.

abedinpour_meysam@yahoo.com

چکیده

با توجه به افت کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی، بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی ضروری است. یکی از روش‌های بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی بخصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک، استفاده از توابع تولید آب- شوری- عملکرد می‌باشد. لذا این مطالعه به منظور پیش‌بینی عملکرد و اجزای عملکرد گیاه اسفناج و تعیین تابع تولید بهینه در شرایط تنش شوری و خشکی در منطقه کاشمر اجرا شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار شامل سه فاکتور شوری (آب شرب $S_1=0/75$ ، $S_2=4$ ، $S_3=8$ دسی‌زیمنس بر متر) و سه سطح آبیاری (شامل آبیاری کامل (۱۰۰٪ نیاز آبی)، $I_1=0/75I_1$ و $I_2=0/50I_1$) اجرا گردید. داده‌های عملکرد و اجزای عملکرد اسفناج (شامل سطح برگ، ارتفاع گیاه، ارتفاع ساقه، طول ریشه، وزن خشک گیاه و وزن خشک ریشه) بر مدل‌های مختلف توابع تولید شامل خطی ساده، کاب داگلاس، درجه دوم و متعالی برازش داده شد و پس از تعیین ضرایب توابع مختلف، تابع تولید بهینه اسفناج تعیین گردید. برای ارزیابی توابع مختلف از شاخص‌های آماری میانگین مجذور مربعات خطای نرمال شده، میانگین مطلق خطا، کارایی مدل‌سازی، شاخص توافق و ضریب تعیین استفاده شد. نتایج نشان داد که ضریب تعیین (R^2) بر آورد وزن کل زی‌توده توسط توابع درجه دوم، متعالی، خطی ساده و کاب‌داگلاس به ترتیب ۰/۹۳، ۰/۸۹، ۰/۸۸ و ۰/۸۶ بود. همچنین، بیشترین مقدار شاخص‌های میانگین مجذور مربعات خطای نرمال شده و میانگین مطلق خطا مربوط به توابع خطی ساده و کاب داگلاس می‌باشد. بنابراین بر اساس نتایج این تحقیق، تابع تولید درجه دوم به عنوان تابع تولید بهینه برای عملکرد و اجزای عملکرد گیاه اسفناج، در منطقه قابل توصیه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، تنش شوری، کاب داگلاس، مدل خطی ساده، مدل درجه دوم

۱- آدرس نویسنده مسئول: گروه علوم و مهندسی آب مرکز آموزش عالی کاشمر، کاشمر.

* - دریافت: آذر ۱۳۹۸ و پذیرش: خرداد ۱۳۹۹

شین و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه‌ای توابع تولید عملکرد روغن آفتابگردان را در شرایط استفاده از آب شور و کم-آبیاری بررسی کردند. مدل‌های مختلف شامل خطی، منحنی، درجه دوم و متعالی برای شبیه‌سازی عملکرد نسبی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد تنش آب در مقایسه با تنش شوری تأثیر معنی‌داری بر عملکرد روغن آفتابگردان داشته است و ضرایب مربوط به آب آبیاری در توابع تولید از حساسیت بیشتری برخوردارند و لذا باید با دقت بیشتری برآورد گردند. در نهایت توابع متعالی نسبت به سایر مدل‌ها برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی عملکرد روغن آفتابگردان در شرایط استفاده از آب شور عملکرد مناسب-تری داشتند. تارکالسون و همکاران (۲۰۱۸) توابع تولید عملکرد چغندر قند را در یک اقلیم خشک بررسی کردند. روابط خطی مثبت و معنی‌داری بین تبخیر-تعرق واقعی و عملکرد ریشه و قند بازیافت شده مشاهده شد ($r^2=0.78$). با رسیدن تبخیر-تعرق گیاه به ۷۱۹ و ۷۲۹ میلی‌متر به ترتیب عملکرد ریشه و مقدار قند به حداکثر میزان خود رسید.

همچنین زمانی که میزان آب کاربردی (آبیاری + بارندگی) به ۵۹۸ و ۶۰۵ میلی‌متر رسید، به ترتیب عملکردهای ریشه و عیار قند به حداکثر مقدار رسید. کیانی و همکاران (۱۳۸۴) بهترین تابع تولید آب-شوری گندم را در منطقه شمال‌گراگان تعیین کردند. چهار نوع تابع تولید شامل خطی ساده^۱، لگاریتمی^۲، درجه دوم^۳ و متعالی^۴ ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که در شرایط توأم شوری و خشکی، تابع متعالی عملکرد گندم را بهتر از توابع دیگر پیش‌بینی می‌کند. برآورد تولید نهایی نسبت به متغیرهای شوری و رطوبت خاک نشان داد اثر هر کدام بر عملکرد یکسان نیست و عملکرد گندم تحت تغییرات رطوبت خاک نسبت به تغییرات شوری خاک حساس‌تر است. محمدی و همکاران (۱۳۸۹) در مطالعه‌ای ضرایب حساسیت و تابع تولید گوجه‌فرنگی را براساس رابطه آب کاربردی - عملکرد در شرایط توأم تنش شوری و خشکی در منطقه

کمبود شدید آب باعث توسعه و بهره‌برداری از منابع شور و لب‌شور آب زیرزمینی و همچنین استفاده از کم‌آبیاری به عنوان روشی برای رفع کمبود آب کشاورزی شده است. با این حال تنش آبی ناشی از کم‌آبیاری یا کاربرد آب شور، برداشت آب توسط گیاه را محدود می‌کند. لذا پیش‌بینی دقیق عملکرد محصول در این شرایط بسیار مهم است (شین و همکاران، ۲۰۱۶). مطالعات بسیاری واکنش گیاهان به تنش شوری و خشکی را بررسی کرده‌اند. وابستگی خطی عملکرد محصول نسبی و تبخیر-تعرق نسبی تحت تنش آب برای اقلیم‌های مختلف و شرایط مختلف آبیاری بررسی شده است (سینگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ آنلی و همکاران، ۲۰۱۱). به طور مشابه، مطالعات متعددی رابطه خطی بین عملکرد محصول و شوری را ارائه داده‌اند (لاتی و همکاران، ۱۹۸۵؛ بتانا و لازاروویچ، ۲۰۱۰). علی‌رغم تعداد زیادی از تحقیقات، اثرات همزمان تنش آب و نمک بر عملکرد محصول به دلیل پیچیدگی، کمتر بررسی شده است (شین و همکاران، ۲۰۱۶)؛ بنابراین رابطه کمی بین عملکرد محصول، شوری و مصرف آب بایستی تعیین گردد.

سینگ و همکاران (۲۰۰۹) رابطه بین عملکرد دانه و آب کاربردی در یک سطح شوری معین به صورت منحنی به دست آوردند. کیانی و میرلطیفی (۲۰۱۲) رابطه بین عملکرد دانه و آب کاربردی در یک سطح شوری معین به صورت تابع متعالی به دست آوردند. روسو و بیکر (۱۹۸۷) توابع تولید عملکرد پنبه و ذرت را به صورت غیرخطی گزارش کردند. داتا و همکاران (۱۹۹۸) نشان دادند که عملکرد گندم بطور مستقیم تحت تأثیر کمیت و شوری آب آبیاری قرار دارد و توابع غیرخطی در مقایسه با فرم‌های خطی و لگاریتمی عملکرد گندم را تحت تنش‌ها بهتر نشان دادند.

عملکرد کوشیا را بهتر از توابع دیگر پیش‌بینی می‌کند. نادریان‌فر (۱۳۹۵) تابع تولید گیاه ریحان را تحت شرایط کم‌آب‌باری و استفاده از نانوکود بررسی کرد. نتایج نشان داد که در شرایط محدودیت آب، با هدف استفاده حداکثر از واحد حجم آب، عمق بهینه آب مصرفی نسبت به آبیاری بیشینه ۲۰ درصد کاهش یافت. همچنین با این میزان کم-آب‌باری حداکثر بازده ریالی به ازای هر متر مکعب آب مصرفی ۱۸۴۹ ریال بدست آمد. علی حوری (۱۳۹۶) تابع تولید برتر آب-شوری-عملکرد ماده خشک خرما را تعیین نمود. مقایسه توابع تولید آب-شوری-عملکرد ماده خشک نشان داد که در دوره رشد رویشی خرما رقم برحی، معادله درجه دوم دارای دقت بیشتری در برآورد عملکرد ماده خشک بود. تمام معادلات به‌جز معادله درجه دوم، میزان ماده خشک اندام هوایی را کمتر از میزان واقعی برآورد نمودند. پیری و همکاران (۱۳۹۷) تابع تولید آب-شوری-عملکرد را با در نظر گرفتن زمان برداشت علوفه در گیاه ذرت خوشه‌ای بررسی کردند. نتایج نشان دادند که تابع درجه‌ی دوم عملکرد ذرت خوشه‌ای را بهتر ارائه می‌کند. علی حوری (۱۳۹۷) امکان‌سنجی مصرف آب‌های شور را با تعیین تابع تولید شوری آب در نهال‌های گیاه کنار بررسی کرد. توابع تولید آب-ماده خشک اندام هوایی به صورت پنج معادله خطی، درجه دوم، درجه سوم، لگاریتمی و نمایی برآورد شدند. معادله درجه سوم با بیشترین ضریب تعیین تعدیل شده و کارایی مدل‌سازی و کمترین مقدار حداکثر خطا، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده و ضریب جرم باقی‌مانده دارای دقت برآزش بیشتر از سایر معادله‌ها بود.

مرور منابع نشان می‌دهد تاکنون توابع تولید برای گیاهان مختلف ارزیابی و توسعه داده شده‌اند، اما مطالعات در خصوص سبزیجات و بخصوص اسفناج بسیار محدود می‌باشد، در حالی که اسفناج از مهمترین سبزی‌های برگ‌ی است که دارای ارزش غذایی مهمی بوده و برگ‌ها و ساقه‌های آن به صورت تازه یا فرآوری شده مصرف می‌شود (شیخی و رونقی، ۱۳۹۲). آستانه کاهش محصول اسفناج به

کرج بررسی کردند. نتایج نشان داد که تابع تولید درجه دوم برای گوجه فرنگی به عنوان تابع بهینه تولید، قابل توصیه می‌باشد. مقدار متوسط ضریب K_v در شرایط تنش توأم آن شوری و خشکی برابر با ۱/۹۷ به دست آمد. مقادیر ضریب حساسیت گیاه (K_s) با افزایش تنش شوری و خشکی کاهش یافت به طوری که کمترین مقدار آن (۰/۵۷) مربوط به تیمار W_3S_4 (تنش آبی ۵۰ درصد نیاز آبی و شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) می‌باشد. شیرمحمدی و همکاران (۱۳۹۲) توابع تولید آب-شوری-عملکرد ذرت علوفه‌ای را در استان خراسان رضوی ارزیابی کردند. چهار نوع تابع خطی ساده، لگاریتمی، درجه دوم و متعالی ارزیابی شدند. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که در شرایط توأم شوری و خشکی، تابع درجه دوم، عملکرد ذرت علوفه‌ای را بهتر از توابع دیگر پیش‌بینی می‌کند. نجفی مود و همکاران (۱۳۹۳) تابع برتر آب-شوری-اجزای کمی عملکرد ارقام پنبه ورامین و خرداد را بررسی کردند. نتایج بدست آمده در مورد هر دو رقم نشان داد که برای پارامتر وزن قوزه تابع درجه دوم و برای پارامترهای تعداد قوزه در متر مربع و ارتفاع بوته تابع متعالی توانستند به عنوان تابع برتر نسبت به سایر توابع در منطقه اقلیمی بیرجند معرفی شوند. یزدانی و همکاران (۱۳۹۳) عملکرد کلزا را به صورت تابعی از ارتفاع آب آبیاری و شوری در منطقه مشهد ارزیابی کردند. نتایج نشان داد تابع درجه دوم (با رتبه نهایی یک) نسبت به سایر توابع برتری نسبی دارد و پس از آن تابع متعالی با رتبه ۲ نتایج قابل قبولی دارد و توابع خطی ساده و خطی لگاریتمی در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. فعالیان و همکاران (۱۳۹۴) اثر تنش‌های همزمان شوری و خشکی را بر عملکرد گوجه فرنگی در کشت بدون خاک بررسی کردند. توابع مختلف تولید (خطی ساده، نمایی، کاپ داگلاس، درجه دوم) بر روی داده‌های عملکرد برآزش داده شد، مشخص شد که تابع تولید خطی ساده تابع تولید بهینه می‌باشد. صالحی و همکاران (۱۳۹۵) بهترین تابع آب-شوری کوشیا را در اراضی شمال گلستان تعیین کردند. نتایج نشان داد در شرایط توأم شوری و خشکی، تابع درجه دوم

عنوان تابعی از هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک، ۲ دسی زیمنس بر متر و از نظر طبقه‌بندی جزو گیاهان نیمه-حساس به شوری است (علیزاده، ۱۳۸۳). در خصوص خشکی نیز نتایج مطالعات نشان داده است که گیاه اسفناج دارای کمترین توانایی در جهت مقابله با اثرات سوء ناشی از کمبود آب آبیاری می‌باشد. حداکثر تخلیه مجاز رطوبت (MAD) برای گیاه اسفناج کمتر از بسیاری از محصولات کشاورزی بوده و معادل ۲۰ درصد از کل آب قابل استفاده (AW) است (پوزشیرازی و رخشنده رو، ۱۳۸۷). از طرفی دشت کاشمر در استان خراسان رضوی از جمله دشت‌های ممنوعه بحرانی می‌باشد که منابع آب به لحاظ کمی و کیفی در محدودیت هستند، به طوری که کسری مخزن این دشت ۳۶/۲ میلیون متر مکعب برآورد شده است و شوری آب زیرزمینی در بعضی مناطق به ۱۸ دسی‌زیمنس بر متر رسیده است (بی‌نام، ۱۳۹۷). در چنین شرایطی پیش‌بینی عملکرد محصول تحت شرایط خشکی با کاربرد آب شور بسیار مهم و حائز اهمیت است. لذا هدف از این پژوهش ارزیابی توابع تولید مختلف آب- شوری- عملکرد (خطی ساده، کاب داگلاس، درجه دوم و متعالی) در گیاه اسفناج می‌باشد. از نوآوری‌های دیگر این پژوهش نسبت به سایر مطالعات انجام شده بررسی رابطه آب- شوری برای اجزای عملکرد می‌باشد که در کمتر مطالعه‌ای (تنها مطالعه نجفی مود و همکاران، ۱۳۹۳) به آن پرداخته شده است. از نتایج جنبی این پژوهش می‌توان به عنوان راهنما برای مدیریت آبیاری با آب شور در منطقه استفاده کرد.

مواد و روش‌ها

به منظور شبیه‌سازی تابع تولید عملکرد و اجزای عملکرد گیاه اسفناج در شرایط خشکی و کاربرد آب شور آزمایشی در سال زراعی ۱۳۹۷ در گلخانه تحقیقاتی مرکز آموزش عالی کاشمر واقع در استان خراسان رضوی و شهرستان کاشمر اجرا شد. محل اجرای طرح در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۱۲ دقیقه و طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۲۸ دقیقه واقع شده و ارتفاع از سطح دریا ۱۱۰۹/۷

متر است. متوسط بارندگی سالیانه ۱۸۸ میلی‌متر و دارای اقلیم خشک می‌باشد. این پژوهش به روش فاکتوریل در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی با دو عامل تنش خشکی در سه سطح (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبیاری به ترتیب I₁, I₂, I₃) و تنش شوری آب آبیاری ناشی از انحلال نمک کلرید سدیم در سه سطح (۰/۷۵، ۴ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب S₁, S₂, S₃) به صورت گلدانی در یک خاک لوم-شنی با چهار تکرار اجرا گردید. در جدول ۱ برخی خصوصیات شیمیایی آب شرب ارائه شده است. خصوصیات دیگری از خاک مانند بافت خاک به روش هیدرومتری و جرم مخصوص ظاهری خاک به روش نمونه-گیری با سیلندر فلزی تعیین شد. در جدول ۲ نیز برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک ارائه شده است. به منظور اجرای طرح، تعداد ۳۶ گلدان پلاستیکی با قطر ۲۸ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر تهیه گردید. وزن خاک خشک استفاده شده در گلدان‌ها، ۱۰/۲ کیلوگرم می‌باشد. آبیاری با دور زمانی سه روز انجام شد (پوزشیرازی و رخشنده رو، ۱۳۸۷). روز قبل از آبیاری همه گلدان‌ها وزن شدند و مقدار آب آبیاری با توجه به ظرفیت گلدان در ظرفیت زراعی (FC) تعیین گردید. برای تعیین وزن گلدان‌ها در ظرفیت زراعی، گلدان‌ها اشباع و سطح آن با پلاستیک پوشانده شده و پس از ۴۸ ساعت زهکشی توزین شد. از آنجا که نیاز آبی تیمارهای مختلف براساس بیلان وزنی رطوبت خاک به منظور جبران رطوبت تا حد ظرفیت زراعی تعیین شد، در نتیجه مجموع مقادیر آبیاری در طول فصل رشد برای هر تیمار به عنوان تبخیر- تعرق کل گیاه در طول فصل رشد در نظر گرفته شد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۰). با توجه به اینکه در شرایط واقعی مزرعه زارعین آب کافی در اختیار ندارند و شوری منابع آب زیرزمینی نیز در این منطقه در حال افزایش است، لذا عملاً امکان آبتوبی وجود ندارد و به همین دلیل در این مطالعه نیز مقداری برای آبتوبی در نظر گرفته نشده است. در هر گلدان یک نشاء گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) رقم Viroflay در تاریخ ۱۱ آبان ۱۳۹۷ کاشته شد. گلدان‌ها پس از نشاءکاری

وزن خشک گیاه و وزن خشک ریشه، برای یک بوته موجود در هر گلدان اندازه‌گیری شد. وزن کل بیوماس بلافاصله پس از برداشت محصول با ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری سطح برگ از روش وزنی و کاغذ میلی-متری استفاده شد. به این منظور ابتدا وزن کل برگ‌های هر بوته جداگانه اندازه‌گیری شد. سپس، سطح مشخصی از برگ‌های هر بوته با استفاده از کاغذ میلی‌متری برش داده شد و توزین گردید. در نهایت با استفاده از تناسب سطح برگ هر بوته برآورد گردید (توکلی و همکاران، ۱۳۹۴). ارتفاع گیاه، ارتفاع ساقه و طول ریشه به وسیله خط‌کش اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک گیاه و وزن خشک ریشه، ابتدا نمونه‌ها داخل پاکت‌های کاغذی قرار داده شدند، سپس به مدت ۴۸ ساعت در داخل آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند.

به مدت یک هفته، به مقدار مساوی با آب شرب آبیاری شدند تا نشاءها در محل جدید استقرار یابند. پس از استقرار کامل گیاه تیمارهای شوری و خشکی مورد نظر به مدت ۱۰ هفته اعمال گردیدند. از آنجا که آب مورد نیاز در این پژوهش شامل سه سطح شوری بود (۰/۷۵، ۴ و ۸ دسی-ریمنس بر متر)، لذا این کیفیت از طریق حل کردن میزان نمک کلرید سدیم مورد نیاز در آب شرب شهری (شوری ۰/۷۵ دسی‌زیمنس بر متر) و اندازه‌گیری شوری با هدایت-سنج الکتریکی تهیه گردید. در پایان دوره‌ی رشد (۲۸ دی ۱۳۹۷)، نمونه‌برداری از اندام هوایی و زیرزمینی گیاه انجام شد. برای این منظور قسمت هوایی گیاه پس از اتمام فصل رشد، قطع و ریشه گیاه با شستشو به طور کامل خارج شد. در نهایت صفات مورفولوژیک گیاه اسفناج شامل وزن کل بیوماس، سطح برگ، ارتفاع گیاه، ارتفاع ساقه، طول ریشه،

جدول ۱- برخی خواص شیمیایی آب آبیاری

SAR	CL ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Mg ⁺²	Ca ⁺²	Na ⁺	K ⁺	PH	EC

(meq/L)									
۰/۶۹	۱/۱	۲/۸	۰/۳	۰/۶۲	۲/۶۸	۰/۸۹	۰/۰۲	۷/۷۵	۰/۷۵

جدول ۲- برخی خواص فیزیکی و شیمیایی خاک

SAR	CL ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Mg ⁺²	Ca ⁺²	Na ⁺	PH	EC	چگالی ظاهری	بافت خاک

(meq/L)										
									dS/m	gr/cm ³
۲/۴۳	۷/۲۴	۶/۵۷	۲/۸۱	۲/۹۵	۸/۳۱	۵/۷۶	۸/۲	۱/۷	۱/۴۱	لوم شنی

شکل توابع تحت بررسی، به فرم‌های خطی ساده، کاب‌داگلاس، درجه دوم و متعالی بودند که بصورت روابط زیر ارائه شده اند (کیانی و همکاران، ۱۳۸۲؛ کیانی و عباسی، ۲۰۰۹):

$$Y = a_0 + (a_1 \times I) + (a_2 \times EC_w) \quad (2)$$

الف) فرم خطی ساده

$$Y = a_0 \times I^{a_1} \times EC_w^{a_2} \quad (3)$$

ب) فرم کاب‌داگلاس

$$Y = a_0 + (a_1 \times I) + (a_2 \times I^2) + (a_3 \times EC_w) + (a_4 \times EC_w^2) + (a_5 \times I \times EC_w) \quad (4)$$

ج) فرم درجه دوم

د) فرم متعالی

با استفاده از داده‌های آماری حاصله از اجرای طرح و بکارگیری روش تخمین تابع تولید آب- شوری می‌توان عملکرد و اجزای عملکرد را تحت تأثیر مقادیر مختلف آب کاربردی و شوری آب آبیاری به طوری که سایر عوامل تولید ثابت نگه داشته شوند، به صورت معادله (۱) نشان داد (کیانی و همکاران، ۱۳۸۲؛ کیانی و عباسی، ۲۰۰۹):

$$Y = f(I, EC_w, X) \quad (1)$$

در معادله (۱) مقدار عملکرد یا اجزای عملکرد، I مقدار آب آبیاری یا تبخیر- تعرق و EC_w هدایت الکتریکی آب آبیاری (dS/m) و X بردار ثابت سایر عوامل تأثیرگذار در تولید است (کیانی و همکاران، ۱۳۸۲؛ کیانی و عباسی، ۲۰۰۹).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

در این توابع P_i و O_i به ترتیب مقدار عملکرد یا اجزای عملکرد پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده از هر تیمار، \bar{O} متوسط عملکرد یا اجزای عملکرد اندازه‌گیری شده و n تعداد مشاهدات می‌باشند. مقدار NRMSE نسبت اختلاف میان داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی به متوسط مشاهده‌ها را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی‌ها با توجه به شاخص NRMSE در چهار سطح طبقه‌بندی می‌شوند: عالی (NRMSE کمتر از ۱۰٪)، خوب (NRMSE بین ۱۰٪ تا ۲۰٪) و ضعیف (NRMSE بزرگتر از ۳۰٪) (جی و همکاران، ۲۰۱۴). بر طبق معیارها، مدلی مناسب است که میانگین خطای مطلق (MAE) آن کمترین مقدار را داشته باشد. مقدار EF می‌تواند منفی باشد. مقدار EF مقادیر پیش‌بینی شده را با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه می‌کند. مقدار منفی EF نشان می‌دهد که مقادیر میانگین اندازه‌گیری شده تخمین بهتری نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده به دست می‌دهد. نزدیک بودن شاخص توافق و بلموت (d) به یک نیز بیانگر نزدیکی مقادیر شبیه‌سازی شده به مشاهده شده و در حقیقت کارکرد بهتر مدل است. مقدار R^2 نسبت میان پراکنش مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده را به دست می‌دهد. در شرایطی که مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده با هم برابر باشند (بهترین حالت) مقادیر عددی شاخص‌های آماری به صورت زیر خواهند بود:

$R^2=1, d=1, EF=1, MAE=0, NRMSE=0$

نتایج و بحث

تعیین ضرایب توابع تولید عملکرد و اجزای عملکرد

در این مطالعه ابتدا ضرایب توابع مختلف آب- شوری- عملکرد (خطی ساده، لگاریتمی، درجه دوم و متعالی) و اجزای عملکرد گیاه اسفناج با استفاده از مقادیر مختلف آب و شوری و نرم‌افزار SPSS برآورد گردید. در

$$Y = a_0 \times I^{a_1} \times EC_w^{a_2} \times \exp((a_3 \times I) + (a_4 \times EC_w)) \quad (5)$$

در توابع تولید ذکر شده a_i ضرایب معادله می‌باشند. ضرایب توابع تولید با استفاده از داده‌های آماری عملکرد و اجزای عملکرد حاصل از اجرای طرح و نرم‌افزار SPSS تعیین گردید. در مرحله بعد با استفاده از ضرایب به‌دست آمده، مقادیر پیش‌بینی شده برای عملکرد و پارامترهای اجزای عملکرد اسفناج، به ازای تیمارهای مختلف عمق آب آبیاری و شوری محاسبه گردید. برای ارزیابی اعتبار توابع به‌دست آمده، از تحلیل خطاهای باقیمانده و اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده استفاده گردید. آماره‌های لازم برای این منظور شامل میانگین مجذور مربعات خطای نرمال (NRMSE)، میانگین مطلق خطا (MAE)، کارایی مدل‌سازی (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) می‌باشند. شکل ریاضی این آماره‌ها بصورت زیر می‌باشند (کیانی و عباسی، ۲۰۰۹؛ جی و همکاران، ۲۰۱۴):

$$NRMSE = \frac{\left[n^{-1} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]^{0.5}}{\bar{O}} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n} \quad (7)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (9)$$

محاسبات انجام شده واحد تبخیر- تعرق میلی‌متر، وزن کل بیوماس، وزن خشک گیاه و وزن خشک ریشه برحسب گرم در بوته، سطح برگ برحسب سانتی‌متر مربع، ارتفاع گیاه، ارتفاع ساقه و طول ریشه براساس سانتی‌متر می‌باشند. نتایج در جداول ۳ تا ۶ ارائه شده است. در این جداول آماره t بیانگر تأثیر معنی‌دار و تعیین‌کننده دو عامل عمق و شوری آب آبیاری براساس تغییرات عملکرد و اجزای عملکرد محصول بوده و آماره F بیانگر معنی‌داری کلی توابع است. با توجه به آماره t در جداول ۳ تا ۶، نتایج نشان می‌دهد که کلیه توابع توانسته‌اند برآورد تعیین‌کننده و معنی‌داری از پارامترهای عملکرد و اجزای عملکرد اسفناج ارائه کنند.

تعیین توابع تولید بهینه آب- شوری- عملکرد و اجزای عملکرد

جهت بررسی دقیق‌تر با استفاده از توابع تولید تعیین شده، مقادیر عملکرد و اجزای عملکرد پیش‌بینی گردیدند. برای ارزیابی توابع تولید، مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی عملکرد و اجزای عملکرد با استفاده از شاخص‌های مختلف آماری مقایسه شدند (جدول ۷).

جدول ۳- ضرایب تابع خطی ساده برای عملکرد و اجزای عملکرد گیاه اسفناج

آماره F	ضرایب			پارامترها
	a_2	a_1	a_0	
۵۰۵/۴۶۲	-۲/۷۱۶** (-۳/۰۴۲)	۰/۲۷۹** (۳/۶۹۹)	۴۰/۹۷۳* (۲/۲۸۱)	وزن کل بیوماس
۸۴۷/۹۸۳	-۶/۶۳۳ ^{ns} (-۰/۸۵۸)	۲/۷۸۴** (۴/۲۹۳)	۴۳۳/۰۸۳* (۲/۸۰۱)	سطح برگ
۱۴۶۴/۶۸۳	-۰/۹۷۹* (-۲/۹۶۲)	۰/۰۸۱* (۲/۹۱۹)	۴۲/۴۶۴** (۶/۴۱۹)	ارتفاع گیاه
۱۹۳/۲۵۴	۰/۳۲۲ ^{ns} (۱/۷۶۰)	۰/۱۲۱** (۷/۸۷۹)	-۱۵/۹۲۵** (-۴/۳۴۹)	ارتفاع ساقه
۲۰۹/۵۴۷	-۱/۱۱۹* (-۲/۵۹۳)	۰/۰۹۷* (۲/۶۷۸)	۱۱/۴۵۸ ^{ns} (۱/۳۲۷)	طول ریشه
۱۶۹۹/۳۷۲	-۰/۰۷۷* (-۲/۰۸۳)	۰/۰۱۵** (۴/۸۳۴)	۳/۶۹۹** (۴/۹۹۹)	وزن خشک گیاه
۳۱/۷۳۰	-۰/۹۴۳ ^{ns} (-۱/۸۵۵)	۰/۱۳۱** (۳/۰۷۱)	-۱۲/۳۷۲ ^{ns} (-۱/۲۱۶)	وزن خشک ریشه

^{ns}، * و ** نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار و تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و مقادیر داخل پرانتز آماره t می‌باشند

جدول ۴- ضرایب تابع کاب داگلاس برای عملکرد و اجزای عملکرد گیاه اسفناج

آماره F	ضرایب			پارامترها
	a_2	a_1	a_0	
۹۲۸۵/۵۳۰	-۰/۰۹۱* (-۲/۹۳۰)	۰/۶۵۴** (۳/۵۹۸)	۱/۱۱۲ ^{ns} (۱/۱۴۶)	وزن کل بیوماس
۳۰۰۱۵/۹۰۵	-۰/۰۱۰ ^{ns} (-۰/۳۸۶)	۰/۶۴۰** (۴/۱۵۲)	۳/۴۸۳** (۴/۱۷۵)	سطح برگ
۷۶۳۳۶/۹۸۶	-۰/۰۶۲** (-۶/۳۵۷)	۰/۲۵۹** (۴/۶۰۱)	۲/۶۹۴** (۸/۸۴۲)	ارتفاع گیاه
۱۸۹۲/۲۴۹	۰/۰۹۹* (۲/۷۸۲)	۲/۴۶۷** (۱۲/۰۱۲)	-۱۰/۹۵۰** (-۹/۸۵۲)	ارتفاع ساقه
۴۲۲۵/۷۱۹	-۰/۱۴۹** (-۴/۴۱۳)	۰/۶۴۸** (۳/۳۲۵)	-۰/۰۳۲ ^{ns} (-۰/۰۳۰)	طول ریشه
۳۸۱۹/۵۷۳	-۰/۰۲۲ ^{ns} (-۱/۰۷۱)	۰/۵۵۲** (۴/۶۵۶)	-۱/۰۳۰ ^{ns} (-۱/۶۰۶)	وزن خشک گیاه
۵۰۶/۹۲۱	-۰/۳۲۰** (-۴/۷۶۷)	۲/۳۷۴** (۶/۱۲۵)	-۱۰/۱۲۳** (-۴/۸۲۶)	وزن خشک ریشه

^{ns}، * و ** نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار و تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و مقادیر داخل پرانتز آماره t می‌باشند

جدول ۵- ضرایب تابع درجه دوم برای عملکرد و اجزای عملکرد گیاه اسفناج

پارامترها	ضرایب						
	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	آماره F
وزن کل بیوماس	۳۴۴/۹۹۸ ^{NS} (۱/۷۲۴)	-۲/۵۰۲ ^{NS} (-۱/۳۸۰)	۰/۰۰۶ ^{NS} (۱/۵۴۳)	-۱۵/۰۰۱ ^{NS} (-۱/۳۳۷)	۰/۱۴۴ ^{NS} (۰/۳۳۸)	۰/۰۵۶ ^{NS} (۱/۱۸۸)	۲۲۹/۷۰۲
سطح برگ	۱۵۹/۴۳۷ ^{NS} (۰/۰۸۰)	۵/۴۱۳ ^{NS} (۰/۳۹۸)	-۰/۰۰۶ ^{NS} (-۰/۱۶۷)	۳/۱۶۴ ^{NS} (۰/۰۲۸)	-۲/۶۵۸ ^{NS} (-۰/۶۲۰)	۰/۰۶۸ ^{NS} (۰/۱۴۴)	۲۸۳/۴۸۶
ارتفاع گیاه	۹۱/۷۸۰ [*] (۲/۱۲۶)	-۰/۳۴۶ ^{NS} (-۰/۸۸۵)	۰/۰۰۰۹۶ ^{NS} (۱/۱۰۹)	-۴/۷۱۲ ^{NS} (-۱/۹۴۷)	۰/۲۷۸ ^{**} (۳/۰۱۶)	۰/۰۰۶ ^{NS} (۰/۶۲۴)	۱۹۳۵/۲۳۵
ارتفاع ساقه	۵۱/۱۲۹ [*] (۲/۸۳۸)	-۰/۴۹۳ ^{**} (-۳/۰۲۴)	۰/۰۰۱ ^{**} (۳/۷۲۷)	-۲/۰۹۳ [*] (-۲/۰۷۳)	-۰/۰۷۶ [*] (-۱/۹۸۳)	۰/۰۱۵ ^{**} (۳/۷۰۸)	۴۵۲/۹۸۳
طول ریشه	۶۱/۷۱۲ ^{NS} (۱/۳۳۳)	-۰/۳۰۵ ^{NS} (-۰/۷۲۹)	۰/۰۰۰۰۸۶ ^{NS} (۰/۹۲۷)	-۶/۹۵۷ [*] (-۲/۶۸۱)	۰/۴۲۲ ^{**} (۴/۲۶۷)	۰/۰۱۰ ^{NS} (۰/۹۴۷)	۴۱۳/۲۶۴
وزن خشک گیاه	۲/۸۷۵ ^{NS} (۰/۵۳۹)	-۰/۰۲۵ ^{NS} (-۰/۵۲۸)	-۰/۰۰۰۰۳ ^{NS} (-۰/۲۸۸)	-۰/۱۱۶ ^{NS} (-۰/۳۹۰)	-۰/۰۱۸ ^{NS} (-۱/۶۶۶)	۰/۰۰۱ ^{NS} (۰/۸۲۲)	۱۸۴۱/۰۶۴
وزن خشک ریشه	۹۲/۸۳۷ ^{NS} (۱/۶۵۱)	-۰/۸۲۷ ^{NS} (-۱/۶۲۳)	۰/۰۰۲ ^{NS} (۱/۹۴۷)	-۶/۰۰۶ ^{NS} (-۱/۹۲۳)	۰/۳۵۷ [*] (۲/۹۷۶)	۰/۰۱۰ ^{NS} (۰/۷۵۶)	۶۱/۵۴۱

ns، * و ** نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار و تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و مقادیر داخل پرانتز آماره t می‌باشند

جدول ۶- ضرایب تابع متعالی برای عملکرد و اجزای عملکرد گیاه اسفناج

پارامترها	ضرایب					
	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	آماره F
وزن کل بیوماس	۱۲/۲۴۸ ^{NS} (۱/۲۴۴)	۰/۳۳۶ ^{NS} (۰/۱۴۷)	۰/۰۱۱ ^{NS} (۰/۱۰۹)	۰/۰۰۱ ^{NS} (۰/۱۲۶)	-۰/۰۳۶ ^{NS} (-۱/۰۶۷)	۴۷۷۳/۰۲۳
سطح برگ	۰/۰۰۹ ^{NS} (۰/۰۰۱)	۲/۵۶۰ ^{NS} (۱/۵۵۶)	۰/۰۶۲ ^{NS} (۰/۸۴۳)	-۰/۰۰۹ ^{NS} (-۱/۱۸۳)	-۰/۰۲۹ ^{NS} (۱/۱۹۳)	۲۲۰۴۷/۲۱۴
ارتفاع گیاه	۵۹/۹۰۶ ^{**} (۲۱/۷۹۱)	-۰/۰۷۳ ^{NS} (-۰/۱۱۴)	-۰/۰۹۷ ^{**} (-۳/۳۹۸)	۰/۰۰۱ ^{NS} (۰/۵۲۵)	۰/۰۱۳ ^{NS} (۱/۳۸۵)	۴۹۵۹۱/۱۶۲
ارتفاع ساقه	۰/۰۰۲ ^{NS} (۰/۰۰۰۱)	۱/۴۴۰ ^{NS} (۰/۵۶۹)	۰/۲۳۱ [*] (۲/۰۴۰)	۰/۰۰۴ ^{NS} (۰/۳۹۷)	-۰/۰۴۵ ^{NS} (-۱/۲۱۴)	۱۰۴۴/۴۷۷
طول ریشه	۴/۲۶۱ ^{NS} (۰/۴۹۴)	۰/۲۷۷ ^{NS} (۰/۱۲۸)	-۰/۳۰۶ ^{**} (-۳/۴۰۵)	۰/۰۰۲ ^{NS} (۰/۲۰۳)	۰/۰۵۶ ^{NS} (۱/۹۰۷)	۳۳۳۵/۹۲۳
وزن خشک گیاه	۰/۰۰۱ ^{NS} (۰/۰۰۰۲)	۲/۰۹۴ ^{**} (۳/۱۷۷)	۰/۰۷۲ [*] (۲/۴۵۷)	-۰/۰۰۷ [*] (-۲/۳۸۳)	-۰/۰۳۶ ^{**} (-۳/۷۴۷)	۱۰۳۴۵/۳۶۰
وزن خشک ریشه	۰ ^{NS} (۰)	۷/۰۳۶ ^{NS} (۱/۸۷۳)	-۰/۰۶۵۳ ^{**} (-۳/۸۸۵)	-۰/۰۲۲ ^{NS} (-۱/۲۲۹)	۰/۱۱۱ [*] (۲/۰۱۳)	۴۵۲/۵۶۰

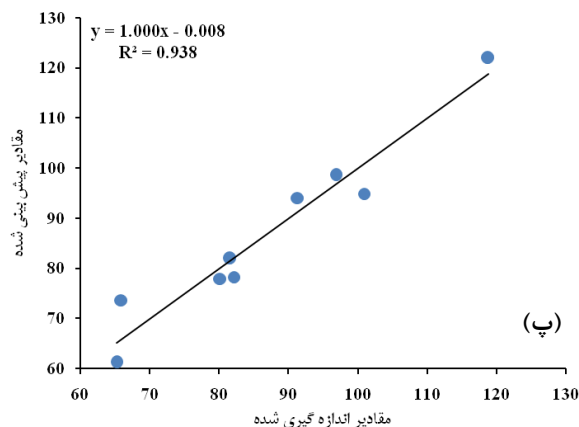
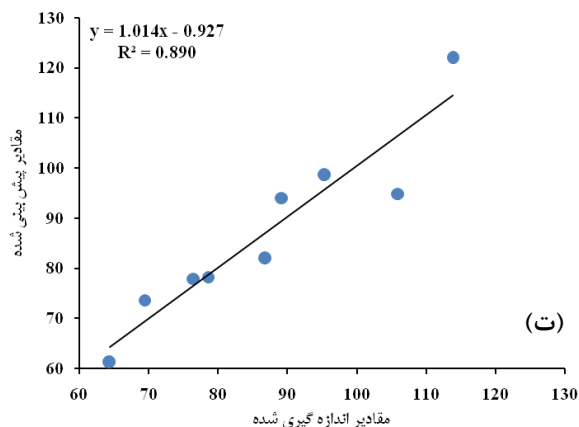
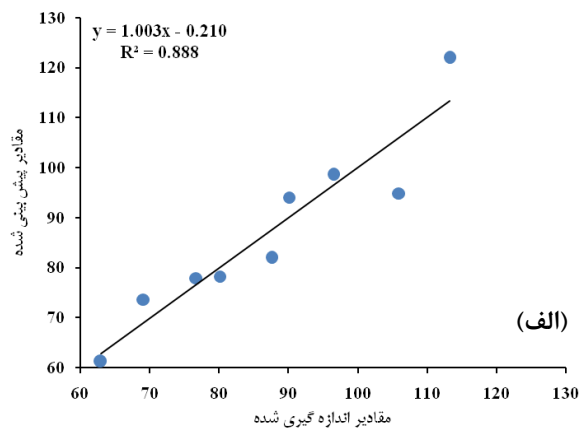
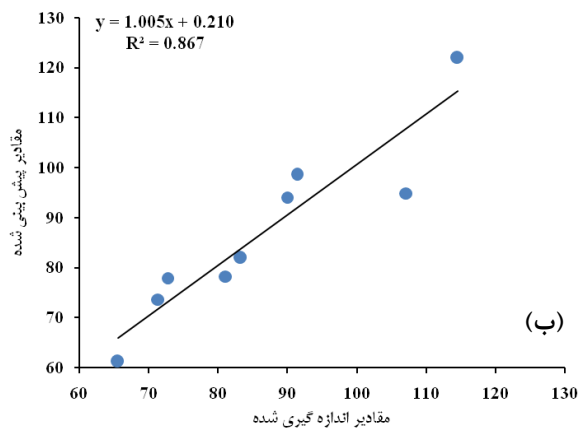
ns، * و ** نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار و تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و مقادیر داخل پرانتز آماره t می‌باشند

در شکل ۱ نمودار خط رگرسیون مقادیر اندازه-گیری شده و پیش‌بینی شده وزن کل بیوماس اسفناج با استفاده از توابع مختلف ارائه شده است. همچنین پارامترهای آماری مورد نیاز برای ارزیابی اعتبار توابع تولید بدست آمده در جدول ۷ ارائه شده‌اند. بررسی ضرایب تعیین، شیب و عرض از مبدأ معادلات خطوط رگرسیون رسم شده نشان می‌دهند که تابع درجه دوم با بیشترین مقدار ضریب تعیین (۰/۹۳۸)، بهترین شیب (۱) و کمترین میزان عرض از مبدأ (۰/۰۰۸) توانسته است نسبت به سایر معادلات پیش‌بینی مناسبی از پارامتر وزن کل بیوماس داشته است. با توجه به شاخص NRMSE که در همه توابع کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد، نتایج نشان می‌دهد که کلیه توابع مورد مطالعه برآورد مناسبی از وزن کل بیوماس باشند. با این حال پارامترهای آماری محاسبه شده در جدول ۷ نشان می‌دهد تابع درجه دوم با رتبه ۱ با کمترین مقدار NRMSE و MAE توانسته است به عنوان تابع تولید برتر برای پیش‌بینی وزن کل بیوماس در گیاه اسفناج معرفی شود.

همچنین شاخص‌های EF و d نیز به عدد یک نزدیک می‌باشند که حاکی از مناسب بودن تابع درجه دوم می‌باشد. بعد از تابع درجه دوم تابع متعالی بالاترین دقت را نسبت به سایر توابع تولید داشت. نتایج مطالعه نجفی مود و همکاران (۱۳۹۳) نیز نشان داد برای پارامتر وزن فوزه پنبه توابع درجه دوم و متعالی توانسته‌اند برآورد قابل قبولی نسبت به سایر توابع داشته باشند. همانطور که در جدول ۷ مشاهده می‌گردد برای پارامتر سطح برگ، مدل‌های درجه دوم و متعالی در رتبه‌های اول و دوم و توابع خطی ساده و کاب داگلاس در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. برای پارامترهای ارتفاع گیاه، ارتفاع ساقه، طول ریشه و وزن خشک اندام هوایی، توابع درجه دوم، متعالی، خطی ساده و کاب داگلاس به ترتیب در رتبه‌های اول تا چهارم قرار گرفتند (جدول ۷). نتایج مطالعه نجفی مود و همکاران (۱۳۹۳) در منطقه بیرجند نشان داد در خصوص پارامتر ارتفاع بوته، تابع متعالی بهترین تابع می‌باشد. نتایج نشان داد در خصوص پارامتر وزن خشک ریشه، توابع درجه دوم،

به سایر توابع، وجود ضرایب بیشتر در این معادله باشد، به طوری که تابع درجه دوم دارای شش ضریب، تابع متعالی داری پنج ضریب و توابع کاب داگلاس و خطی ساده دارای سه ضریب می‌باشند. همچنین دقت بالای تابع درجه دوم در همه پارامترهای مرتبط با عملکرد گیاه می‌تواند به دلیل همبستگی بالای عملکرد و اجزای عملکرد باشد.

کاب داگلاس متعالی و خطی ساده به ترتیب در رتبه‌های اول تا چهارم قرار گرفتند. به طور کلی با توجه به نتایج جدول ۷ و در نظر گرفتن رتبه‌های نهایی توابع تولید مختلف در پیش‌بینی عملکرد و اجزای عملکرد گیاه اسفناج، می‌توان گفت تابع درجه دوم می‌تواند به عنوان تابع برتر در شرایط توأم شوری و خشکی در منطقه کاشمر معرفی گردد. به نظر می‌رسد یکی از دلایل برتری تابع درجه دوم نسبت



شکل ۱- مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده پارامتر وزن کل بیوماس (گرم در بوته) با توابع مختلف (الف: خطی ساده، ب: کاب داگلاس، پ: درجه دوم، ت: متعالی)

جدول ۷- پارامترهای آماری محاسبه شده برای مقایسه توابع تولید عملکرد و اجزای عملکرد اسفناج

پارامتر	نوع تابع	NRMSE	MAE	EF	d	R ²	رتبه نهایی
وزن کل	خطی ساده	(۳) ۶/۳۹۶	(۲) ۴/۵۳۶	(۳) -/۸۸۸	(۳) ۰/۹۳۰	(۳) ۰/۸۸۸	۳
	کاب داگلاس	(۴) ۷/۰۱۲	(۴) ۵/۲۳۱	(۴) -/۸۶۶	(۴) ۰/۹۲۱	(۴) ۰/۸۶۷	۴
بیوماس	درجه دوم	(۱) ۴/۷۴۵	(۱) ۳/۵۵۱	(۱) ۰/۹۳۹	(۱) ۰/۹۵۷	(۱) ۰/۹۳۸	۱
	متعالی	(۲) ۶/۳۵۷	(۳) ۴/۵۷۱	(۲) ۰/۸۹۰	(۲) ۰/۹۳۱	(۲) ۰/۸۹۰	۲
سطح برگ	خطی ساده	(۳) ۴/۸۸۶	(۲) ۳۶/۲۴۶	(۳) -/۸۴۱	(۳) ۰/۹۰۸	(۳) ۰/۸۴۰	۳
	کاب داگلاس	(۴) ۵/۰۹۲	(۴) ۴۲/۳۳۱	(۴) -/۸۲۷	(۴) ۰/۹۰۲	(۴) ۰/۸۳۰	۴
ارتفاع گیاه	درجه دوم	(۱) ۴/۲۲۷	(۱) ۳۱/۸۷۴	(۱) -/۸۸۱	(۱) ۰/۹۲۵	(۱) ۰/۸۸۰	۱
	متعالی	(۲) ۴/۵۲۰	(۳) ۳۷/۳۱۹	(۲) -/۸۶۴	(۲) ۰/۹۱۸	(۲) ۰/۸۶۴	۲
ارتفاع ساقه	خطی ساده	(۴) ۳/۷۱۹	(۴) ۱/۶۷۳	(۴) -/۸۵۹	(۴) ۰/۹۱۳	(۴) ۰/۸۵۹	۴
	کاب داگلاس	(۳) ۲/۳۸۹	(۳) ۱/۰۶۶	(۳) -/۹۴۲	(۳) ۰/۹۵۹	(۳) ۰/۹۴۲	۳
طول ریشه	درجه دوم	(۱) ۱/۶۱۳	(۱) ۰/۷۱۶	(۱) ۰/۹۷۳	(۱) ۰/۹۷۹	(۱) ۰/۹۷۳	۱
	متعالی	(۲) ۱/۸۱۲	(۲) ۰/۸۵۷	(۲) -/۹۶۶	(۲) ۰/۹۷۵	(۲) ۰/۹۶۶	۲
وزن خشک	خطی ساده	(۴) ۱۰/۸۷۳	(۴) ۰/۸۶۵	(۴) -/۹۲۱	(۴) ۰/۹۴۵	(۴) ۰/۹۲۱	۴
	کاب داگلاس	(۳) ۷/۷۳۱	(۳) ۰/۶۶۱	(۳) -/۹۶۰	(۳) ۰/۹۷۰	(۳) ۰/۹۶۲	۳
اندام هوایی	درجه دوم	(۱) ۳/۵۶۳	(۱) ۰/۳۱۷	(۱) ۰/۹۹۱	(۱) ۰/۹۹۳	(۱) ۰/۹۹۱	۱
	متعالی	(۲) ۶/۶۶۶	(۲) ۰/۵۸۳	(۲) -/۹۷۰	(۲) ۰/۹۷۶	(۲) ۰/۹۷۱	۲
وزن خشک ریشه	خطی ساده	(۴) ۱۰/۰۰۹	(۴) ۲/۲۸۳	(۴) -/۸۲۹	(۴) ۰/۹۰۵	(۴) ۰/۸۲۹	۴
	کاب داگلاس	(۳) ۶/۲۰۰	(۳) ۱/۴۱۱	(۳) -/۹۳۵	(۳) ۰/۹۵۴	(۳) ۰/۹۳۵	۳
وزن خشک اندام هوایی	درجه دوم	(۱) ۳/۵۷۷	(۱) ۰/۸۰۳	(۱) ۰/۹۷۸	(۱) ۰/۹۸۲	(۱) ۰/۹۷۸	۱
	متعالی	(۲) ۵/۱۹۶	(۲) ۱/۰۶۶	(۲) -/۹۵۴	(۲) ۰/۹۶۵	(۲) ۰/۹۵۵	۲
وزن خشک ریشه	خطی ساده	(۴) ۴/۳۰۲	(۴) ۰/۲۴۷	(۴) -/۸۵۲	(۴) ۰/۹۱۱	(۴) ۰/۹۰۴	۴
	کاب داگلاس	(۳) ۴/۱۴۱	(۳) ۰/۲۳۵	(۳) -/۸۶۳	(۳) ۰/۹۲۰	(۳) ۰/۸۶۷	۳
نسب	درجه دوم	(۱) ۱/۶۵۷	(۱) ۰/۰۸۵	(۱) ۰/۹۷۸	(۱) ۰/۹۸۲	(۱) ۰/۹۷۸	۱
	متعالی	(۲) ۲/۰۸۲	(۲) ۰/۱۱۵	(۲) -/۹۶۵	(۲) ۰/۹۷۳	(۲) ۰/۹۶۶	۲
نسب	خطی ساده	(۴) ۲۹/۴۷۳	(۴) ۲/۵۹۸	(۴) -/۸۱۲	(۴) ۰/۹۰۰	(۴) ۰/۸۱۲	۴
	کاب داگلاس	(۳) ۱۵/۰۴۴	(۳) ۱/۴۰۳	(۳) -/۹۵۱	(۳) ۰/۹۶۵	(۳) ۰/۹۵۱	۳
نسب	درجه دوم	(۱) ۱۰/۸۶۰	(۱) ۰/۹۸۶	(۱) ۰/۹۷۵	(۱) ۰/۹۸۰	(۱) ۰/۹۷۴	۱
	متعالی	(۲) ۱۱۷/۴۸۲	(۲) ۱/۲۱۲	(۲) -/۹۳۴	(۲) ۰/۹۵۶	(۲) ۰/۹۳۴	۳

* اعداد داخل پرانتز درجه بندی مدل در شاخص آماری مربوطه است

تبعیت می‌کند؛ بنابراین تابع تولید درجه دوم برای گوجه فرنگی به عنوان تابع بهینه در منطقه کرج معرفی شد. در استان گلستان، تابع درجه دوم در مقایسه با سایر توابع به عنوان بهترین تابع پیش‌بینی کننده عملکرد محصول کوشیا در شرایط خشکی و کاربرد آب شور معرفی شد (صالحی و همکاران، ۱۳۹۵). نتایج مطالعه کیانی و همکاران (۱۳۸۴) در منطقه شمال گرگان نشان داد در پیش‌بینی تغییرات عملکرد گندم، به واسطه تغییرات رطوبت و شوری خاک توابع تولید متعالی و درجه دوم نسبت به توابع خطی قابلیت بهتری دارند. براساس مطالعه دیگری در پیش‌بینی عملکرد ذرت دانه‌ای در اثر تغییرات شوری آب و کم‌آبایی، تابع

نتایج مطالعه حاضر با نتایج سایر پژوهش‌های انجام شده در زمینه بهترین تابع تولید در شرایط خشکی و کاربرد آب شور مطابقت دارد. نتایج مطالعه علی‌حوری (۱۳۹۶) نشان داد که تیمارهای میزان آب آبیاری، شوری آب آبیاری و اثرات متقابل میزان آبیاری و شوری آب اثر معنی‌دار بر تمام صفات رویشی نهال‌های خرما به جز مقدار نسبی آب اندام هوایی داشتند و معادله درجه دوم بهترین تابع تولید آب- شوری- عملکرد ماده خشک گیاه می‌باشد. محمدی و همکاران (۱۳۸۹) با آنالیز حساسیت توابع مختلف دریافتند که تغییرات عملکرد گوجه فرنگی نسبت به دو عامل کمیت و کیفیت آب آبیاری از فرم درجه دوم

عملکرد و اجزای عملکرد گیاه اسفناج بهره گرفته شد. نتایج نشان داد در شرایط اقلیمی شهرستان کاشمر در شرایط خشکی و کاربرد آب شور، تابع تولید آب- شوری- عملکرد و اجزای عملکرد از شکل درجه دوم تبعیت می- کند. لذا پیشنهاد می-گردد با توجه با شوری بالای آب زیرزمینی منطقه (که منبع اصلی آب کشاورزی می-باشد)، در راستای بهینه‌سازی مصرف آب کشاورزی برای گیاه اسفناج، از تابع تولید درجه دوم بدست آمده در این منطقه استفاده گردد. همچنین پیشنهاد می-گردد مطالعات تکمیلی دیگری برای سایر گیاهان اصلی منطقه از جمله، زعفران، طالبی، گندم و جو، شلغم و هویج علوفه‌ای و خیار انجام شود تا بتوان راهنمای مناسبی جهت برآورد عملکرد محصولات مختلف را در یک تناوب زراعی تهیه کرد. از توابع تولید بدست آمده در این مطالعه می-توان به عنوان ابزاری برای ارزیابی و راهنمای مدیریت آبیاری در گیاه اسفناج برای شرایط مختلف شوری و کم آبیاری استفاده کرد.

درجه دوم نسبت به سایر توابع، دقت بهتری دارد (شیرمحمدی و همکاران، ۱۳۹۲). یزدانی و همکاران (۱۳۹۳) در ارزیابی عملکرد کلزا نسبت به شوری و آب آبیاری تابع درجه دوم را با داشتن بالاترین ضریب تعیین و کمترین میزان خطا به عنوان تابع برتر در نظر گرفتند. همچنین پیری و همکاران (۱۳۹۷) تابع درجه دوم را به عنوان بهترین تابع تولید آب- شوری- عملکرد با در نظر گرفتن زمان برداشت علوفه در گیاه ذرت خوشه‌ای در منطقه سیستان معرفی کردند.

نتیجه گیری

تنش‌های خشکی و شوری دو فاکتور اصلی محدودکننده محصولات کشاورزی بخصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک (اکثر مناطق ایران) می‌باشند. لذا در این مطالعه از توابع تولید مختلف برای بررسی نرخ تغییرات

فهرست منابع

۱. بی‌نام. ۱۳۹۷. سیمای آب استان خراسان رضوی. شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، معاونت برنامه‌ریزی، دفتر برنامه‌ریزی و بررسی‌های اقتصادی، گروه آمار، ۲۹ صفحه.
۲. پیری، ح.، انصاری، ح و م. پارسا. ۱۳۹۷. تعیین تابع تولید آب- شوری- عملکرد با در نظر گرفتن زمان برداشت علوفه و ارزیابی شاخص‌های تولید در ذرت خوشه‌ای. مجله‌ی مهندسی منابع آب. ۱۱: ۲۶-۱۵.
۳. پوزشیرازی، م و م. رخشنده رو. ۱۳۸۷. بررسی اثرات رژیم آبیاری، تراکم بوته و روش کشت بر عملکرد گیاه اسفناج (*Spinacia Oleracea L.*). (مطالعه موردی: استان بوشهر). مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۲ (۲): ۱۹۸-۱۸۷.
۴. توکلی، ح.، توکلی، ن.، کلاتر احمدی، س. ا و ا. یوسفی کردلر. ۱۳۹۴. تأثیر آرایش کشت بر کارایی استفاده از تشعشع در چند رقم آفتابگردان. مجله پژوهش در اکوسیستم‌های زراعی. ۲ (۳): ۲۱-۱۳.
۵. شیخی، ج و ع. رونقی. ۱۳۹۲. اثر شوری و کاربرد ورمی‌کمپوست بر غلظت عناصر غذایی و عملکرد اسفناج (رقم ویروفلی) در یک خاک آهکی. مجله علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای. ۴ (۱۳): ۹۲-۸۱.
۶. شیرمحمدی علی اکبر خانی، ز.، انصاری، ح.، علیزاده، ا و م. کافی. ۱۳۹۲. ارزیابی توابع تولید آب- شوری- عملکرد در ذرت علوفه‌ای در استان خراسان رضوی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۴ (۷): ۵۴۳-۵۳۵.
۷. صالحی، م.، کافی، م و ع. کیانی. ۱۳۹۵. تعیین بهترین تابع آب- شوری کوشیا در اراضی شمال گلستان. نشریه آب و خاک. ۲۵ (۶): ۱۴۰۳-۱۳۹۵.
۸. علی حوری، م. ۱۳۹۶. تعیین تابع تولید برتر آب- شوری- عملکرد ماده خشک در دوره رشد رویشی خرما. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۴ (۳): ۲۶۶-۲۵۱.

۹. علی حوری، م. ۱۳۹۷. امکان‌سنجی مصرف آب‌های شور با تعیین تابع تولید شوری آب در کنار گونه *Ziziphus Spina-Christi*. نشریه علوم و مهندسی آبیاری. ۴۱ (۳): ۱۷۰-۱۵۹.
۱۰. عزیزاده. ۱۳۸۳. کیفیت آب در آبیاری، انتشارات آستان قدس رضوی، ۹۶ صفحه.
۱۱. فعالیان، ا.، انصاری، ح.، کافی، م.، عزیزاده، ا و م. مقدسی. ۱۳۹۴. اثر تنش‌های همزمان شوری و خشکی بر عملکرد گوجه فرنگی در کشت بدون خاک. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۲۹ (۴): ۴۶۳-۴۴۷.
۱۲. کیانی، ع. ر.، میرلطیفی، س. م.، همایی، م و ن. م. آبیاری. ۱۳۸۲. بررسی اقتصادی تولید گندم در شرایط شوری و کم‌آبی. مجله اقتصاد کشاورزی و توسعه. ۱۱ (۴۳ و ۴۴): ۱۸۰-۱۶۵.
۱۳. کیانی، ع. ر.، میرلطیفی، س. م.، همایی، م و ع. م. چراغی. ۱۳۸۴. تعیین بهترین تابع تولید آب- شوری گندم در منطقه شمال گرگان. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۶ (۲۵): ۱-۱۴.
۱۴. محمدی، م.، لیاقت، ع و ح. مولوی. ۱۳۸۹. بهینه‌سازی مصرف آب و تعیین ضرایب حساسیت گوجه فرنگی در شرایط توأمان تنش شوری و خشکی در منطقه کرج. نشریه آب و خاک. ۲۴ (۳): ۵۹۲-۵۸۳.
۱۵. نادریان‌فر، م. ۱۳۹۵. تعیین تابع تولید گیاه ریحان تحت شرایط کم‌آبیاری و استفاده از نانو کود. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۳ (۱۰): ۳۷۶-۳۶۵.
۱۶. نجفی مود، م. ح.، ش، ع و ع. خاشعی سیوکی. ۱۳۹۳. تعیین تابع برتر آب- شوری- اجزای کمی عملکرد ارقام پنبه ورامین و خرداد. مجله تنش‌های محیطی در علوم زراعی. ۷ (۲): ۱۳۶-۱۲۳.
۱۷. یزدانی، و.، داوری، ک.، قهرمان، ب و م. کافی. ۱۳۹۳. ارزیابی عملکرد کلزا به صورت تابعی از ارتفاع آب آبیاری و شوری در منطقه مشهد. ۵ (۱۸): ۵۳-۳۲.
18. Bhantana, P., & Lazarovitch, N. (2010). Evapotranspiration, crop coefficient and growth of two young pomegranate (*Punica granatum L.*) varieties under salt stress. *Agricultural water management*, 97(5), 715-722.
19. Datta, K. K., Sharma, V. P., & Sharma, D. P. (1998). Estimation of a production function for wheat under saline conditions. *Agricultural Water Management*, 36(1), 85-94.
20. Ji, J., Cai, H., He, J., & Wang, H. (2014). Performance evaluation of CERES-Wheat model in Guanzhong Plain of Northwest China. *Agricultural Water Management*, 144, 1-10.
21. Kiani, A. R., & Abbasi, F. (2009). Assessment of the water-salinity crop production function of wheat using experimental data of the Golestan Province, Iran. *Irrigation and Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*, 58(4), 445-455.
22. Kiani, A. R., & Mirlatifi, S. M. (2012). Effect of different quantities of supplemental irrigation and its salinity on yield and water use of winter wheat (*Triticum Aestivum*). *Irrigation and Drainage*, 61(1), 89-98.
23. Letey, J., Dinar, A., & Knapp, K. C. (1985). Crop-Water Production Function Model for Saline Irrigation Waters 1. *Soil Science Society of America Journal*, 49(4), 1005-1009.
24. Russo, D., & Bakker, D. (1987). Crop-water Production Functions for Sweet Corn and Cotton Irrigated with Saline Waters 1. *Soil Science Society of America Journal*, 51(6), 1554-1562.
25. Singh, R. B., Chauhan, C. P. S., & Minhas, P. S. (2009). Water production functions of wheat (*Triticum aestivum L.*) irrigated with saline and alkali waters using double-line source sprinkler system. *Agricultural Water Management*, 96(5), 736-744.
26. Singh, Y., Rao, S. S., & Regar, P. L. (2010). Deficit irrigation and nitrogen effects on seed cotton yield, water productivity and yield response factor in shallow soils of semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 97(7), 965-970.
27. Tarkalson, D. D., King, B. A., & Bjorneberg, D. L. (2018). Yield production functions of irrigated sugarbeet in an arid climate. *Agricultural water management*, 200, 1-9.

28. Ünlü, M., Kanber, R., Koç, D. L., Tekin, S., & Kapur, B. (2011). Effects of deficit irrigation on the yield and yield components of drip irrigated cotton in a mediterranean environment. *Agricultural Water Management*, 98(4), 597-605.
29. Xin, H., Peiling, Y., Shumei, R., Yunkai, L., Guangyu, J., & Lianhao, L. (2016). Quantitative response of oil sunflower yield to evapotranspiration and soil salinity with saline water irrigation. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 9(2), 63-73.

Determination of Water-Salinity-Yield Production Function for Spinach Plant

H. Dehghan ^{1*}, M. Mokari, and M. Abedinpour

Assistant Professor, Water Science and Engineering Department, Kashmar Higher Education Institute.

h.dehghan@kashmar.ac.ir

Assistant Professor, Water Science and Engineering Department, Kashmar Higher Education Institute.

mehdimokari@gmail.com

Assistant Professor, Water Science and Engineering Department, Kashmar Higher Education Institute.

abedinpour_meysam@yahoo.com

Abstract

Due to the quantitative and qualitative decline of groundwater resources, it is essential to optimize the water use in agriculture. One of the methods to optimize water use in agriculture, especially in arid and semi-arid regions, is to use yield-water-salinity functions. Therefore, this study was performed for prediction of spinach yield and yield components and determination of optimal production function under salinity and water stress conditions in Kashmar region, Iran. A factorial experiment was performed in a completely randomized block design with four replications including three salinity levels (i.e. $S_1=0.75$, $S_2=4$, $S_3=8$ dS/m) and three levels of irrigation (including full irrigation (100% of water requirement)) = I_1 , $I_2=75\% I_1$, and $I_3=50\% I_1$). Yield and yield components data of spinach (including leaf area, plant height, stem height, root length, plant dry weight, and root dry weight) were fitted to different production functions including simple linear, Cobb-Douglas, quadratic, and transient models. Optimal production function of spinach was determined after determining the coefficients of different functions. To evaluate different functions, the statistical indices of normalized mean square error, mean absolute error, modeling efficiency, agreement index and explanation coefficient were used. The results showed that the coefficient of determination (R^2) for estimation of the biomass weight by quadratic, transcendental, simple linear, and Cobb-Douglas functions were 0.938, 0.890, 0.888 and 0.867, respectively. Most of the values of normalized mean square error and mean absolute error belonged to the simple linear functions and Cobb- Douglas. According to the results of this research, the quadratic production function is recommended as the optimal production function for yield and yield components of spinach.

Keywords: Cobb-Douglas, Quadratic model, Salinity Stress, Simple linear model, Transient model, Water Stress

1 - Corresponding author: Water Science and Engineering Department, Kashmar Higher Education Institute

* - Received: November 2019 and Accepted: June 2020