مدیریت آب و آبیاری
(نشریه علمی)
دوره ۱۰ ■ شماره ۲ ■ پاییز ۱۳۹۹
صفحه‌های ۲۰۲-۱۸۹

مقاله پژوهشی:

تعیین تابع تولید و عمق بهینه آبیاری گیاه دارویی چای‌ترش در شرایط کم‌آبی و استفاده از کود پتاسیم

پریا راشکی[۱]، حلیمه پیری[۲*]، عیسی خمری[۳]
۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
۲. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
۳. استادیار، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۰۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۰۶

چکیده
این آزمایش به‌صورت کرت‌های یک‌بار خردشده در قالب طرح بلوک کامل تصادفی در مزرعه تحقیقاتی چاه‌نیمه زهک روی گیاه چای‌ترش اجرا گردید. تیمارها شامل چهار سطح آب آبیاری ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ٤٠ درصد نیاز آبی گیاه و سه سطح کود پتاسیم ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد پتاسیم بود. هدف اصلی پژوهش، برآورد تابع تولید، محاسبه عمق‌های شاخص و بهینه آب مصرفی بود. بهترین تابع تولید چای‌ترش از بین چهار تابع تولید (خطی، لگاریتمی، درجه دوم و متعالی) انتخاب شد. شاخص‌های تولید نهایی نسبت به عمق آب و کود پتاسیم، نسبت نهایی نرخ جایگزین فنی برای کود پتاسیم و عمق آب، ارزش تولید نهایی نسبت به عمق آب و کود پتاسیم محاسبه شد. نتایج نشان داد تابع درجه دوم به‌عنوان تابع برتر انتخاب شد. شاخص تولید نهایی نسبت به حداقل عمق آب ۱/٤ و برای حداکثر عمق آب ۰/۸٦- کیلوگرم به‌ازای هر یک سانتی‌متر عمق آب بود. شاخص تولید نهایی نسبت به حداقل و حداکثر مصرف کود پتاسیم به‌ترتیب ۳/۹۲ کیلوگرم و ۳/۷۷ کیلوگرم محاسبه شد. هم‌چنین نتایج نشان داد با اعمال کم‌آبیاری در شرایط محدودیت آب، عمق بهینه آب مصرفی نسبت به عمق بیشینه در سطوح ۷۵، ۱۱۲/۵ و ۱۵۰ کیلوگرم کود پتاسیم در هکتار به‌ترتیب ۱۳/۲۹، ۱٤/۳٤ و ۱۳/۱ سانتی‌متر کاهش مصرف آب داشته است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، افزایش کود پتاسیم تا سطح ۷۵ درصد باعث صرفه‌جویی بیش‌تری در مصرف آب گردید. استفاده از کود پتاسیم می‌تواند باعث تعدیل خسارات ناشی از تنش خشکی در چای ترش شود.

کلیدواژه‌ها: ارزش نهایی تولید، شاخص تولید نهایی، کم‌آبیاری، نسبت نرخ جایگزینی.

Determination of Production Function and Optimal Depth of Irrigation of roselle under Deficit Irrigation and Potassium Fertilizer

Paria Rashki[1], Halimeh Piri[2*], Eisa Khamari[3]
1. M. Sc. Student, Department of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran
2. Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran
3. Assistant Professor, Department of Agriculture, College of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran
Received: February 28, 2020 Accepted: April 25, 2020

Abstract
Water restriction is one of the main inhibitors of crop production. Therefore, choosing a superior and superior strategy is essential for making water in its design. For this purpose, an experiment was conducted in a split plot in a randomized complete block design with three replications at the Semi-drainage Research Farm on roselle. Treatments included four levels of irrigation water (120, 100, 75 and 50% of plant water requirement) and three levels of potassium fertilizer (100, 75, 50 and 25% potassium). The purpose of this research is to estimate the production capacity, index calculations, and water intake. The best sour tea production function was selected from four production functions (linear, logarithmic, quadratic, and transcendental) based on the lowest error statistics. In order to investigate the separate and combined effects of potassium fertilizer and irrigation water depth from end production to depth of irrigation water (MPI), end production to potassium fertilizer (MPk), final ratio of technical alternative rate to potassium fertilizer and irrigation depth (MRTSI, k), final production value for irrigation water depth (VMPI) and final production value for potassium fertilizer (VMPk) were used. Final production index was 1.4 for water depth at minimum depth of irrigation water (MPI) and its value for maximum irrigation depth was -0.86 kg/cm depth. It was water. The final production index for minimum and maximum potassium fertilizer consumption was 3.92 kg and 3.77 kg, respectively. The results also showed that by applying irrigation under water limitation conditions, the optimum depth of water consumption compared to the maximum depth of water use at levels of 75, 121.5 and 150 kg potassium fertilizer were 13.29, 14.34 and 1.1, respectively. It has reduced water consumption by 13 cm. As can be seen, increasing the potassium fertilizer up to 75% resulted in more water savings. The use of potassium fertilizer can reduce the damage caused by drought stress in roselle.

Keywords: Deficit Irrigation, Final Production Index, Final Production Value, Replacement Rate Ratio.

* نویسنده مسئول Email: h_piri2880@uoz.ac.ir

مقدمه

در کشور ایران عامل اصلی محدودکننده تولیدات کشاورزی و افزایش تولیدات غذایی، محدودیت منابع آب و استفاده نامطلوب و غیراقتصادی از آن است، که این امر در مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کند (١٤). مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در کاهش مصرف منابع آب داشته باشد (٢٤). اعمال مدیریت صحیح آبیاری و کاشت گیاهان مقاوم به خشکی، به‌منظور حفظ ذخیره رطوبتی خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک ازجمله اقدام‌های مؤثر برای افزایش بازدهی مصرف آبیاری و در نتیجه بهبود بهره‌برداری از منابع محدود آب کشور می‌باشد. چای‌ترش یکی از گیاهان کم‌نیاز و مقاوم به خشکی است. چای‌ترش با نام علمی *Hibiscus sabdariffa* متعلق به خانواده *Malvaceae* و بومی افریقا بوده، در تمام مناطق استوایی و گرم کشت می‌شود و به‌عنوان گیاهی دارویی مورد توجه است (٢٠). کم‌آبیاری تنظیم‌شده یکی دیگر از راه‌های افزایش کارآیی مصرف آب است. در این روش، کاهش عملکرد در مقایسه صرفه‌جویی در مصرف آب ناچیز است (٥). هدف از کم‌آبیاری تنظیم‌شده بهینه‌ساختن کارآیی مصرف آب و به حداکثررساندن عملکرد به‌ازای یک واحد آب مصرفی است. هر افت کوچکی در عملکرد در نتیجه اجرای یک تنش ملایم رطوبتی تحت این استراتژی، با سود حاصل از کاهش مصرف آب که منجر به کاهش بیش از حد در رشد رویشی می‌شود، جبران می‌گردد (١٠). عمق بهینه آب آبیاری در شرایط مختلف متفاوت بوده و زمانی حاصل خواهد شد که در اثر آبیاری با این عمق، بتوان به درآمد خالص حداکثر دست یافت. به‌منظور تعیین عمق بهینه به ابزار مختلفی از جمله تابع تولید محصول نسبت به آب آبیاری و یا مشتقات آن، هزینه‌های ثابت و متغیر، قیمت محصول و اطلاعات مربوط به محدودیت‌های آب و زمین نیاز است. در منابع دو روش برای برآورد توابع تولید آب- عملکرد ذکر شده است. روش اول براساس مدل‌های نظری و تجربی رابطه آب- عملکرد را به‌صورت کمی بیان می‌کند. در روش دوم، توابع تولید در اثر مقادیر مختلف آب بر عملکرد گیاهان، ناشی از مشاهدات مزرعه‌ای و با استفاده از تحلیل آماری برآورد می‌گردند. برآورد تابع تولید براساس روش آماری به‌دلیل تعیین رابطه مستقیم عملکرد- آب بر روش‌های نظری و تجربی که بر پایه فرضیات متعدد استوار هستند، ترجیح داده می‌شود (١٢). با برآورد تابع تولید می‌توان به‌طور کمی تأثیر نسبی هر یک از متغیرهای یادشده را بر روی تغییرات تولید و درآمد محصول، محاسبه و تعیین نمود (١٤). تابع تولید محصول و آب مصرفی در تجزیه و تحلیل اقتصادی و یافتن شیوه‌هایی برای بهینه‌سازی مصرف آب کاربردهای فراوانی دارد. درصورتی‌که میزان آب قابل دسترس مشخص باشد، با محاسبه عمق بهینه آب آبیاری می‌توان سطح زیر کشت بهینه را نیز تعیین نمود. تهیه این اطلاعات به تصمیم‌گیری در بخش مدیریت آبیاری کمک بزرگی خواهد کرد. خرمیان و حسین‌پور (٨) آب آبیاری چغندرقند پاییزه را با استفاده از توابع تولید در شمال خوزستان بهینه‌سازی کردند. تیمارهای آبیاری در مطالعات آن‌ها سطوح ٢٥، ٥٠، ٧٥، ١٠٠ و ١٢٥ درصد نیاز آبی گیاه بود. نتایج مطالعه نشان داد از لحاظ اقتصادی کم‌آبیاری چغندرقند در شرایط اقلیمی شمال خوزستان امکان‌پذیر است.

در زمینه آب مصرفی و توابع تولید، هدف اساسی حصول حداکثر عملکرد در واحد سطح و حداکثر بهره‌وری از آب مصرفی است تا به حداکثر سود و درآمد خالص نهایی رسید. تابع تولید یک مفهوم کلی و کاربردی است که رابطه‌ای بین واکنش گیاه به پارامترها و نهاده‌های مختلف تولید مانند آب، کود و سایر شرایط و عوامل

زراعی را نشان می‌دهد. در واقع، تابع تولید رابطه‌ای ریاضی بین میزان آب، کود مصرفی و کل محصول تولیدشده یا میزان آب و کود مصرفی در طول فصل زراعی می‌باشد که راه را برای برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری تولیدات کشاورزی هموار می‌کند. پژوهش‌های مختلف نشان داده است کاربرد کود پتاسیم در شرایط تنش آبی می‌تواند بخشی از تنش آبی وارده به گیاه را جبران نماید (۲۱ و ۲٦). هنگامی‌که در مصرف آب و کود صرفه‌جویی شده باشد ولی با روش‌های مختلف آب در اختیار گیاه قرار گیرد، عملکرد اقتصادی قابل قبولی به‌دست می‌آید (۲۲). گنجعلی و همکاران (١٦) عملکرد چای‌ترش را در سطوح مختلف کود پتاسیم به‌عنوان فاکتور اصلی و کود فسفر و نیتروژن به‌عنوان فاکتور فرعی در منطقه سراوان مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که کود فسفر و پتاسیم می‌تواند نقش مؤثری در جلوگیری از کاهش عملکرد چای‌ترش در شرایط آب‌وهوایی سراوان داشته باشد. اکنبی و همکاران (۱۹) نشان دادند که مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن و فسفر و پتاس ۱۰-۱۰-۲۰ به‌همراه ۵ تن در هکتار کمپوست باعث افزایش عملکرد کمی و کیفی چای‌ترش می‌گردد. موسوی‌فضل و همکاران (۱۷) با هدف تعیین تابع تولید و عمق بهینه آب و کود، اثر کود پتاسیم را در شرایط کم‌آبی بر گیاه سورگوم علوفه‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد بهترین عملکرد از تیمار آبی و کودی با سطح ۱۰۰ درصد به‌دست آمد که با سطح آبی ۷۵ درصد تفاوت معنی‌دار نداشت. هم‌چنین در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که از بین چهار تابع مورد مطالعه، تابع درجه دوم عملکرد سورگوم را در شرایط توأم کود پتاسیم و کم‌آبی بهتر برآورد می‌کند. جورونی و همکاران (٤) تابع خطی را به‌عنوان تابع برتر تولید برای گیاه ذرت در شرایط کم‌آبی در شهرستان دزفول معرفی نمودند. حوری (۷) پنج تابع تولید شوری آب آبیاری به‌صورت معادلات خطی، درجه دوم، درجه سوم، لگاریتمی و نمایی را بر گیاه کنار موریتانی مورد بررسی قرار داد. مقایسه معادلات تابع تولید شوری نشان داد که تمام معادلات به‌جز معادله نمایی، میزان ماده خشک اندام هوایی را بیش از میزان واقعی برآورد می‌کند و معادله درجه سوم بیش‌ترین دقت برازش را داشت. پیری (۲) تابع تولید آب- کود نیتروژن را برای گیاه پیاز در سه روش آبیاری سطحی، قطره‌ای سطحی و قطره‌ای زیرسطحی در استان سیستان و بلوچستان مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد از بین چهار تابع تولید خطی، لگاریتمی، نمایی و درجه دوم در هر سه روش آبیاری تابع درجه دوم به‌عنوان تابع برتر تولید انتخاب شد. عبدزاد گوهری و همکاران (۱۳) تخمین تابع تولید و کارآیی مصرف آب در گیاه بادمجان تحت شرایط آبیاری قطره‌ای و کود نیتروژن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد آبیاری قطره‌ای با ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه و مصرف ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن بیش‌ترین تأثیر را در عملکرد داشت.

در حال حاضر بیش‌ترین سطح زیر کشت چای‌ترش مربوط به استان سیستان و بلوچستان، با سطح زیر کشت ۳۰۰ هکتار و تولید سالانه ۲۹۰ تن می‌باشد. منطقه سیستان در شمال استان سیستان و بلوچستان یکی از مناطق مهم استان در تولید چای‌ترش می‌باشد. در منطقه سیستان کمبود آب، یک مسأله جدی و دارای اهمیت است. در این منطقه اراضی زیادی وجود دارد که قابل زرع می‌باشد، اما به‌خاطر کمبود منابع آب به‌صورت بایر رها شده‌اند. بنابراین باید دنبال راه‌کاری بود که با حفظ شرایط پایدار در منابع آب و خاک منطقه از لحاظ اقتصادی موجب توسعه کشاورزی شود. تدوین برنامه آبیاری و اعمال مدیریت صحیح آبیاری در این منطقه می‌تواند از زیان‌های ناشی از کمبود منابع آب در منطقه بکاهد. لذا با توجه به کمبود آب در منطقه، کشت

گیاهان مقاوم به تنش آبی و مدیریت آبیاری آن به‌گونه‌ای که تأثیری در عملکرد کمی و کیفی گیاه نداشته باشد و تعیین عمق بهینه آبیاری از مهم‌ترین مسائل می‌باشد. هدف از این پژوهش، تعیین بهترین تابع تولید در سطوح مختلف آبیاری و مصرف کود پتاسیم، تعیین عمق بهینه آبیاری از طریق تابع تولید و شاخص‌های ارزیابی تولید گیاه چای‌ترش در منطقه سیستان می‌باشد تا بتوان با تعیین عمق بهینه آبیاری، ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب، کاهش محصول را به کم‌ترین مقدار رساند.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در سال ۱۳۹۸ در مزرعه تحقیقات کشاورزی چاه‌نیمه واقع در شهر زهک در استان سیستان و بلوچستان در ٦١ درجه و ٦٧ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۸۹ دقیقه عرض شمالی و ارتفاع از سطح دریا ٤٨٠ متر انجام گرفت. منطقه مطالعاتی براساس اقلیم‌نمای دومارتن دارای اقلیم گرم و خشک بوده، میزان بارندگی آن در سال کم‌تر از ٦٠ میلی‌متر می‌باشد، که آن هم در همه ماه‌های سال نمی‌بارد و فقط در ماه‌های خاصی از سال (ماه‌های دی، بهمن، اسفند و فروردین) بارندگی در منطقه وجود دارد که متوسط ماهانه آن ۵/۸۷ میلی‌متر می‌باشد. بیش‌ترین مقدار دما در ماه تیر (میانگین ٤٢ درجه سانتی‌گراد) و کم‌ترین مقدار دما در ماه دی (میانگین ۱۸/۳ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. مجموع تبخیر و تعرق گیاه مرجع ٣٥٦٣/٢٤ میلی‌متر در طول سال می‌باشد.

به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از مراحل آماده‌سازی زمین نمونه‌های خاک از اعماق ۳۰-۰ سانتی‌متر و ٦٠-۳۰ سانتی‌متری خاک برداشت و برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آنها تعیین شد (جدول ۱). مقادیر متوسط برخی خصوصیات آب آبیاری در تیمارهای مختلف نیز در جدول (۲) آورده شده است.

پژوهش حاضر در قالب طرح کرت‌های یک‌بار خردشده به‌صورت بلوک کامل تصادفی در سه تکرار اجرا گردید. تیمارها شامل چهار سطح عمق آب آبیاری I_1، I_2، I_3 و I_4 به‌ترتیب معادل ٤٠، ٦٠، ٨٠ و ١٠٠ درصد و سه سطح کود پتاسیم K_1، K_2 و K_3 به‌ترتیب معادل ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز کودی پتاسیم به‌عنوان کرت فرعی انجام شد. ابعاد کرت‌ها ٤×۳ (متر در متر) و فاصله کرت‌ها از یکدیگر یک متر در نظر گرفته شد. در هر کرت تعداد پنج جوی و پشته احداث و بذرها در عمق سه سانتی‌متری از خاک و به فاصله ۲۵ سانتی‌متر از یکدیگر روی ردیف‌ها کشت شدند. فاصله بین ردیف‌های گیاهی ۷۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. کود نیتروژن از منبع اوره به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار به‌صورت سرک در سه مرحله یک‌سوم همزمان با کاشت، یک‌سوم مرحله رویشی (شاخه‌دهی) و یک‌سوم زمان گلدهی (۵۰ درصد گلدهی گیاه)، کود پتاسیم از نوع سولفات پتاسیم همزمان با کاشت در سه سطح ۷۵، ۱۱۲/۵ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب معادل ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز کودی پتاسیم و کود فسفر از نوع سوپرفسفات تریپل به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار همزمان با کاشت به خاک اضافه شد.

Table 1. Some Physical and Chemical Properties of Research Farm Soils

Depth of sampling	P (ppm)	Organic carbon (ppm)	K (ppm)	EC (dSm^{-1})	pH	Soil texture	Clay (%)	Sand (%)	Silt (%)
0-30	4.6	0.72	280	2.1	7.6	Sand lom	9	49	42
30-60	5.7	0.68	231	2.5	7.8	Sand lom	12	48	40

Table 2. Chemical Properties of Irrigation Water

Water sample	Anions ($meqlit^{-1}$)			Cations ($meqlit^{-1}$)				SAR	EC (dsm^{-1})	pH
	So^{4-}	Cl	HCO^{3-}	K	Na	Mg	Ca			
S1	1.6	0.6	4.1	0.06	2.6	1.2	1.8	2.1	0.7	7.6

محاسبات آبیاری

حجم آب آبیاری قبل از هر نوبت آبیاری با استفاده از رابطه (۱) تعیین شد (۲۵).

$$d = \sum_{i=1}^{n}(\theta_{Fci} - \theta_i)\,\Delta z \qquad (۱)$$

در این معادله: d عمق آبیاری (متر)، θ_{Fci} و θ_i به‌ترتیب رطوبت حجمی خاک در حالت ظرفیت زراعی و قبل از آبیاری در لایه i=1، Δz ضخامت لایه (متر) و n شماره لایه خاک می‌باشد.

با به‌دست‌آوردن عمق آب آبیاری در هر نوبت با استفاده از رابطه (۱)، حجم آب موردنیاز برای هر کرت از ضرب‌کردن عمق به‌دست‌آمده در مساحت کرت محاسبه شد و با استفاده از کنتورهای نصب‌شده روی هر یک از لوله‌های آبرسان اندازه‌گیری و در اختیار گیاه قرار گرفت. حجم آب سایر تیمارها براساس این حجم تعیین و اعمال گردید.

توابع تولید

تابع تولید رابطه بین ورودی و خروجی در یک سیستم است. در این پژوهش، عملکرد خشک به‌عنوان متغیر وابسته و مقادیر مختلف آب آبیاری و کود پتاسیم به‌عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شد. شکل کلی تابع تولید به‌صورت رابطه (۲) بیان گردید.

$$Y = f(I, K) \qquad (۲)$$

در این رابطه،Y عملکرد (تن در هکتار) است که تابعی از مقدار آب آبیاری (I، سانتی‌متر) و مقدار کود پتاسیم (K، کیلوگرم در هکتار) می‌باشد.

جهت اندازه‌گیری عملکرد، از هر کرت پس از پایان دوره رشد گیاه (۷ آذرماه ۱۳۹۸)، سه ردیف گیاه از وسط هر کرت با حذف اثر حاشیه برداشت شد. کپسول‌های چای‌ترش از بوته‌ها چیده و گلبرگ‌ها جدا شدند. سپس به‌مدت دو هفته در هوای آزاد قرار گرفتند. سپس با خشک‌شدن کامل گلبرگ‌ها، وزن خشک آنها به‌عنوان عملکرد برای هر تیمار محاسبه شد.

شکل توابع عملکرد- آب آبیاری- کود به فرم‌های خطی ساده، لگاریتمی، درجه دوم و تابع متعالی بودند که برای هر روش آبیاری به‌صورت جداگانه به‌دست آمد (۱۱).

خطی ساده:

$$Y = \alpha + \beta_1 I + \beta_2 K \qquad (۳)$$

مدل لگاریتمی:

$$Y = \alpha\, I^{\beta_1} K^{\beta_2} \qquad (٤)$$

مدل درجه دوم:

$$Y = \alpha + \beta_1 I + \beta_2 K + \beta_3 I^2 + \beta_4 K^2 + \beta_5 . I . K \qquad (۵)$$

مدل متعالی:

$$Y = \alpha I^{\beta_1} K^{\beta_2} \exp(\beta_3 I + \beta_4 K) \qquad (٦)$$

در این روابط، I مقدار آب آبیاری (سانتی‌متر)، K مقدار کود پتاسیم (کیلوگرم در هکتار)، α مقدار ثابت، β پارامترهای رگرسیون که بایستی محاسبه شوند، Y مقدار عملکرد خشک چای‌ترش (کیلوگرم در هکتار) می‌باشد.

پس از تعیین ضرایب مورد نیاز، به‌منظور مقایسه و ارزیابی این مدل‌ها از پنج شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، بازده مدل (EF)، خطای بیشینه (ME)، ضریب مقدار باقیمانده (CRM) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد که از معادله‌های (۷) تا (۱۰) به دست می‌آیند (۱۱).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})(P_i-\bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{P})^2}} \qquad (۷)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}\right)^{1/2} \times \left(\frac{100}{\bar{o}}\right) \qquad (۸)$$

$$EF = \frac{(\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{o})^2 - \sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2)}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{o})^2} \qquad (۹)$$

$$ME = MAX_{i=1}^{n}|O_i - P_i| \qquad (۱۰)$$

$$CRM = \frac{(\sum_{i=1}^{n}(O_i) - \sum_{i=1}^{n}(P_i))}{(\sum_{i=1}^{n}(O_i))} \qquad (۱۱)$$

در این روابط، O و P به‌ترتیب مقدار عملکرد مشاهدهشده و پیش‌بینی‌شده، $\overline{O}$ و $\bar{P}$ میانگین عملکرد مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده و n تعداد مشاهدات می‌باشد.

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نشان‌دهنده این است که چه مقدار از شبیه‌سازی‌ها بیش‌تر یا کم‌تر از مقادیر متناظر اندازه‌گیری‌شده می‌باشد. خطای حداکثر (ME) نشان‌دهنده چگونگی اجرای مدل بوده و مقدار زیاد آن بیانگر کاربرد ضعیف مدل می‌باشد. ضریب تعیین R^2 بیانگر نسبت پراکندگی مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده می‌باشد. آماره EF مقادیر پیش‌بینی‌شده را با میانگین اندازه‌گیری‌شده مقایسه می‌کند و ضریب مقدار باقیمانده (CRM) نیز تمایل مدل در برآورد بیش‌تر یا کم‌تر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده را نشان می‌دهد. مقدار منفی این آماره بیانگر برآورد بیشینه مدل می‌باشد. چنان‌چه تمام مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده برابر گردند، آن‌گاه شاخص‌های RMSE، R^2، EF، ME و CRM به‌ترتیب برابر صفر، یک، یک، صفر و صفر خواهد بود (۲۳).

تعیین فاکتور حساسیت محصول (Ky) بر اساس مدل دورنباس و کاسام

این مدل تغییرات افت نسبی عملکرد را نسبت به تغییرات نسبی تبخیر و تعرق سنجیده و آنها را توسط ضریبی با نام Ky به هم مرتبط می‌کند. این رابطه به شکل زیر می‌باشد (۹):

$$\left(1-\frac{Y_a}{Y_{max}}\right)=K_y\times\left(1-\frac{ET_a}{ET_{max}}\right) \qquad (۱۲)$$

در این رابطه Ymax حداکثر مقدار محصول تولیدی بدون محدودیت آب (کیلوگرم)، Ya مقدار واقعی محصول تولیدشده (کیلوگرم)، ET تبخیر و تعرق واقعی (میلی‌متر)، ETmax حداکثر مقدار تبخیر و تعرق (میلی‌متر) و Ky ضریب حساسیت می‌باشد.

بررسی شاخص‌های ارزیابی عملکرد

پس از تعیین تابع تولید برتر، جهت بررسی اثرات جداگانه و توأم کود و سطوح آبیاری بر عملکرد از شاخص‌های تولید نهایی نسبت به عمق آب آبیاری (MP_I)، تولید نهایی نسبت به کود (MP_K)، نسبت نهایی نرخ جایگزین فنی برای کود و عمق آب آبیاری ($MRTS_{I,K}$)، ارزش تولید نهایی نسبت به عمق آب آبیاری (VMP_I) و ارزش تولید نهایی نسبت به کود پتاسیم (VMP_K) استفاده گردید. این شاخص‌ها با استفاده از روابط (۱۳) تا (۱۷) تعیین شدند (۹).

$$MP_I=\frac{dY}{dI} \qquad (۱۳)$$

$$MP_K=\frac{dY}{dK} \qquad (۱٤)$$

$$MRTS_{I,K}=\frac{MP_K}{MP_I} \qquad (۱۵)$$

$$VPM_I=P_c\times MP_I \qquad (۱٦)$$

$$VMP_K=P_c\times MP_K \qquad (۱۷)$$

در این روابط، P_c قیمت واحد وزن محصول (۵۰۰۰۰۰ ریال به‌ازای هر کیلوگرم براساس قیمت ارائه‌شده از جهاد کشاورزی منطقه در سال ۱۳۹۸ و Y تابع تولید برتر می‌باشد.

تعیین عمق‌های بهینه

در ادامه با استفاده از تابع برتر انتخاب‌شده (تابع درجه دوم) عمق‌های بهینه آبیاری محاسبه شد. برای این کار، در تابع تولید به‌دست‌آمده مقدار مصرف کود پتاسیم ثابت در نظر گرفته می‌شود و معادله فوق به یک معادله درجه دوم از میزان آب آبیاری به‌صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$Y_w=a_1+(b_1\times I)+(c_1\times I^2) \qquad (۱۸)$$

با فرض خطی‌بودن تابع هزینه خواهیم داشت:

$$c(w)=a_2+(b_2\times I) \qquad (۱۹)$$

در این معادلات Yw تابع عملکرد برحسب کیلوگرم در هکتار، I عمق آب آبیاری بر حسب سانتی‌متر،

c(w)تابع هزینه نسبت به عمق آب آبیاری برحسب ریال در هکتار، a_1، b_1، c_1، a_2، b_2 ضرایب ثابتی هستند که براساس نوع محصول، عمق آب آبیاری و درآمد و هزینه‌ها تعیین می‌گردد.

محاسبه عمق‌های شاخص آبیاری

عمق آب مصرفی در شرایط محدودیت زمین از رابطه زیر به‌دست آمد (۱):

$$W_l = \frac{b_2 - P_c \times b_1}{2P_c \times c_1} \quad (۲۰)$$

برای محاسبه عمق آب مصرفی گیاه در شرایط محدودیت آب از رابطه زیر استفاده شد (۱):

$$W_w = \left(\frac{(P_c \times a_1) - a_2}{(P_c \times c_1)}\right)^{0.5} \quad (۲۱)$$

برای به‌دست‌آوردن عمق معادل آبیاری بیشینه در ابتدا باید مقدار Z_l از رابطه زیر تعیین شود (۱):

$$Z_l = \left[(P_c b_1 - b_2)^2 - 4P_c c_1 \left(\frac{P_c b_1}{4c_1} - \frac{b_1 b_2}{2c_1}\right)\right]^{0.5} \quad (۲۲)$$

با توجه به مقدار Z_l عمق آب مصرفی که سود ناشی از آن برابر کاربرد ماکزیم عمق آب مصرفی گیاه است، نیز با توجه به معادله زیر محاسبه شد (۱):

$$W_{cl} = \frac{b_2 - P_c b_1 + Z_l}{2P_c c_1} \quad (۲۳)$$

علاوه بر این چون عمق آبیاری کامل با مشتق‌گیری از تابع تولید بر حسب عمق آب مصرفی (W) و مساوی صفر قراردادن آن به‌دست می‌آید، در نتیجه داریم (۱):

$$W_{max} = -\frac{b_1}{2c_1} \quad (۲٤)$$

در تمامی روابط ذکرشده a_1، a_2، b_1، b_2، c_1 ضرایب ثابتی هستند که براساس عمق آب آبیاری و درآمد و هزینه‌ها تعیین می‌گردد. P_C قیمت محصول برحسب ریال به‌ازای هر کیلوگرم می‌باشد که براساس قیمت جهاد کشاورزی در سال ۱۳۹۸ مقدار آن برای هر کیلوگرم چای‌ترش ۵۰۰۰۰۰ ریال درنظر گرفته شد.

نتایج و بحث

نمودار رگرسیون مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده در شکل (۱) و پارامترهای آماری موردنیاز ارزیابی اعتبار توابع به‌دست‌آمده در مورد عملکرد در جدول (۳) ارائه شده است. برای تعیین معنی‌داری از آماره f استفاده شد. آماره f نشان‌دهنده معنی‌داربودن کلی تابع می‌باشد. چنان‌چه آزمون f معنی‌دار باشد، نشان‌دهنده این است که برازش کلی مدل رگرسیونی و میزان باقیمانده‌های مدل در حد قابل‌قبولی است (۱۵). بررسی ضرایب تعیین معادلات خط رگرسیون رسم‌شده نشان می‌دهند که کلیه توابع مورد مطالعه توانسته‌اند، برآورد قابل‌قبولی از عملکرد خشک چای‌ترش داشته باشند. همان‌طورکه از جدول (٤) مشاهده می‌گردد، براساس رتبه‌بندی نهایی تابع درجه دوم به‌عنوان تابع برتر نسبت به سایر توابع شناخته شد. توابع متعالی، لگاریتمی و خطی به‌ترتیب در رتبه‌های دوم تا چهارم قرار گرفتند. با توجه به این‌که هرچه مقادیر ME بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده عملکرد ضعیف‌تر مدل در برآورد مقدار عملکرد محصول است، بنابراین از جدول می‌توان دریافت که تابع درجه دوم با داشتن کم‌ترین ME (۲٦/۲) بهترین برآورد را از عملکرد محصول داشته است. حداقل مقدار عددی شاخص RMSE (۲/۷) نیز مربوط به تابع درجه دوم می‌باشد و نشان‌دهنده این است که این تابع با کم‌ترین اختلاف، عملکرد را نسبت به مقدار واقعی آن برآورد کرده است. هم‌چنین مقادیر بالای ضریب تعیین R^2(۰/۹۷) و کارآیی مدل EF(۰/٦٤) نیز بیان‌گر قاطعیت و کارآیی بالای تابع درجه دوم در برآورد مقادیر موردنظر می‌باشد. بنابراین با توجه به نتایج مذکور و درنظرگرفتن رتبه نهایی می‌توان گفت، تابع درجه دوم می‌تواند به‌عنوان تابع برتر تولید در شرایط توأم مصرف کود پتاسیم و کم‌آبیاری در منطقه سیستان برای گیاه چای‌ترش معرفی گردد. پیری و همکاران (۳) در بررسی تنش آبی بر

محصول سورگوم تابع درجه دوم را به‌عنوان تابع عملکرد- عمق آبیاری در منطقه سیستان معرفی نمودند. موسوی فضل و همکاران (۱۷) نیز در پژوهش خود راجع به تعیین تابع برتر تولید عملکرد- آب- کود برای گیاه سورگوم به نتایج مشابهی دست یافتند و تابع درجه دوم را به‌عنوان تابع برتر انتخاب نمودند.

همان‌طورکه گفته شد جهت تعیین ضریب حساسیت عملکرد، از مدل حساسیت دورنباس و کاسام استفاده شد. شکل (۲) این مدل را نشان می‌دهد. ضریب حساسیت برای عملکرد خشک چای‌ترش ۱/۱۸ به‌دست آمد. مقدار فاکتور حساسیت عملکرد محصول بستگی به شرایط محلی، اقلیم، خاک، محصول، مدیریت زراعی و برنامه آبیاری متفاوت است. به‌طوری‌که فائو مقدار آن را بین ۰/۲ تا ۱/۱۵ و آژانس بین‌المللی انرژی اتمی بین ۰/۰۸ تا ۱/۷۵ بیان نموده‌اند (۲۷).

نتایج برآورد ضرایب توابع تولید برای تابع تولید برتر (تابع درجه دوم) در جدول (٤) آورده شده است.

شاخص‌های تولید نهایی آب آبیاری و کود پتاسیم

شاخص‌های تولید نهایی (MP) و نسبت نهایی نرخ فنی (MRTS) نسبت به دو عامل کمیت آب آبیاری و کود پتاسیم در جدول (۵) نشان شده است.

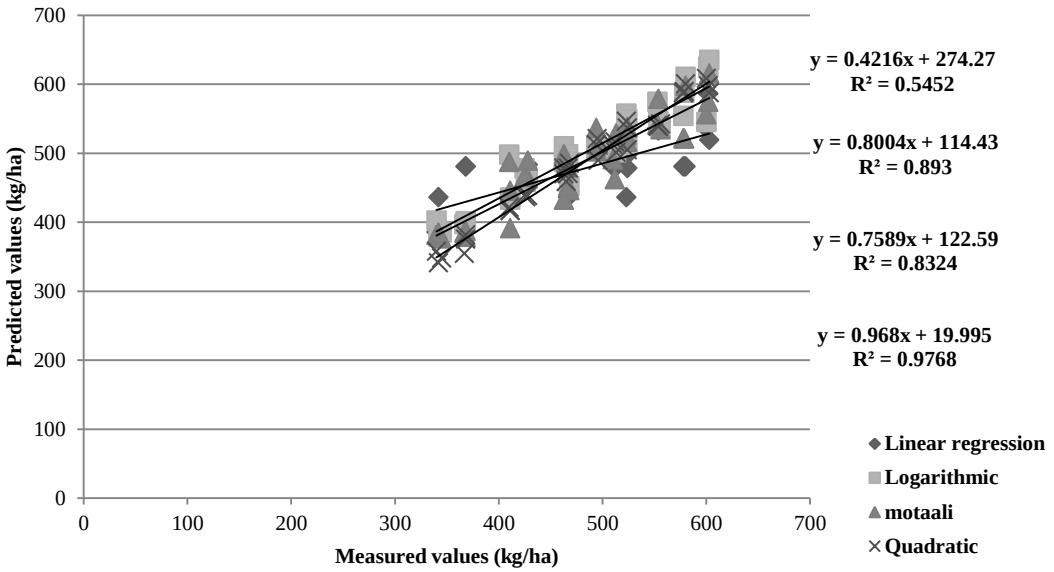

Figure 1. Chart of regression of measured and predicted values of roselle performance

Table 3. Calculated statistical parameters for evaluating the validity of water-fertilizer-yield functions

Function type	RMSE	EF	ME	CRM	R^2	Average rank	Final rank
Linear	11.49 (4)	0.22(4)	112.5(4)	0.05(4)	0.54(4)	4	4
Logarithmic	6.91(2)	0.29(3)	88.4(3)	-0.04(3)	0.89(2)	2.6	3
Motaali	7.05(3)	0.33(2)	77.2(2)	-0.01(2)	0.83(3)	2.4	2
Quadratic function	2.7(1)	0.67(1)	26.2(1)	-0.009(1)	0.97(1)	1	1

Table 4. Coefficients of water production, fertilizer, yield functions

Production Function Parameters	α	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	Statistics f
Amounts	38.3	1.1	2.2	-0.01	-0.001	0.015	63.12^{**}

****: The significant of the function at the level of one percent**

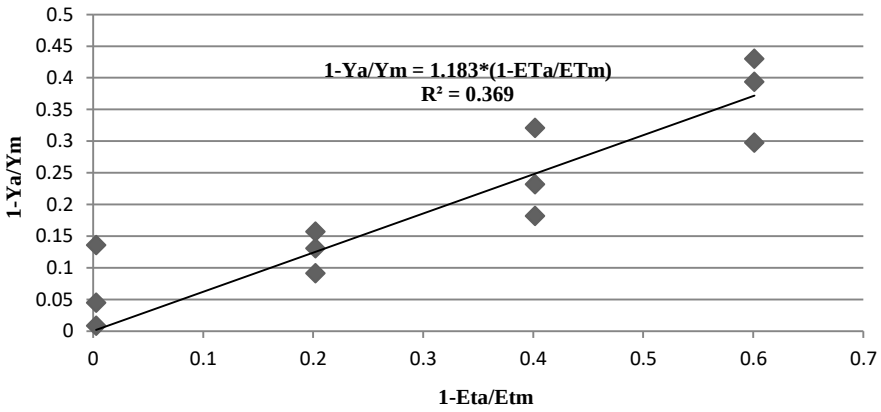

Figure 2. Changes in the relative loss of dry performance of roselle versus relative loss of water consumption

Table 5. Final yield indicators roselle performance

Variable	Input Domain Changes	Index	Dry performance of roselle
I(cm)	Min= 72.8 Max= 182	MPI(kg/cm)	1.4 -0.86
K(kg/ha)	Min=75 Max=150	MPK (kg/kg)	3.92 3.77

نتایج جدول (۵) نشان داد، شاخص تولید نهایی نسبت به کود پتاسیم با فرض ثابت‌بودن عمق آب آبیاری به‌ازای ۷۵ کیلوگرم در هکتار کود پتاسیم ۳/۹۲ کیلوگرم و به‌ازای ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود پتاسیم ۳/۷۷ کیلوگرم می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مصرف کود پتاسیم در سطح کامل در شرایط کم‌آبی باعث کاهش محصول شده است.

شاخص تولید نهایی عملکرد چای‌ترش نسبت به عمق آب آبیاری (MP_I) با فرض ثابت‌بودن کود پتاسیم برای حداقل عمق آب آبیاری (۷۲/۸ سانتی‌متر) معادل ۱/٤ کیلوگرم به‌ازای هر یک سانتی‌متر عمق آب می‌باشد، یعنی به‌ازای هر یک سانتی‌متر افزایش عمق آب آبیاری، ۱/٤ کیلوگرم افزایش تولید خواهیم داشت. مقدار این شاخص برای حداکثر عمق آب آبیاری (۱۸۲/۰ سانتی‌متر) معادل ۰/۸٦- کیلوگرم به‌ازای هر یک سانتی‌متر عمق آب بود. منفی‌بودن این شاخص برای حداکثر عمق آب آبیاری نسبت به حداقل عمق آب، نشان‌دهنده کاهش عملکرد به‌ازای افزایش عمق آب آبیاری در سطوح بالای آبیاری می‌باشد و حاکی از آن است که شیب افزایش عملکرد در کم‌آبیاری بیش‌تر از پرآبیاری است و هم‌چنین آبیاری مازاد بر نیاز باعث کاهش محصول می‌گردد. محدودشدن تبادل هوای خاک بر اثر آبیاری سنگین، با کُندشدن جذب آب و مواد غذایی، تنفس ریشه را آسیب‌پذیر کرده و رشد ریشه را محدود و باعث تحریک مواد سمی و تخریب متابولیسم هورمون شده و کاهش رشد گیاه و در نهایت کاهش میزان گلدهی در بوته را به‌همراه دارد. هم‌چنین در این شرایط برگ‌ها و گل‌ها ریزش می‌کنند (٦). به‌همین علت تعداد کپسول‌ها در هر گیاه در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی کم‌تر از تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی بود که باعث کاهش عملکرد گردید. پیری و همکاران (۳) در پژوهش خود راجع به تابع تولید سورگوم در مقادیر بیش‌تر از نیاز آبی گیاه به نتایج مشابه دست یافتند. نادلر (۲۸) و نلسون و ویجیلی (۲۹) نیز در پژوهش‌های خود نتایج مشابهی ارائه کرده‌اند و اعلام نمودند آبیاری مازاد بر نیاز، باعث کاهش محصول می‌گردد.

شکل (۳) تغییرات عملکرد چای‌ترش را نسبت به سطوح مختلف آب آبیاری و کود پتاسیم نشان می‌دهد. همان‌طورکه در شکل نمایان است با کاهش مقدار کود

پتاسیم و عمق آب آبیاری مقدار عملکرد کاهش می‌یابد، اما می‌توان با افزایش کود پتاسیم در شرایط عمق‌های کم آب آبیاری مقداری از این کاهش عملکرد را جبران نمود. بنابراین می‌توان گفت در شرایط کم‌آبیاری می‌توان با افزایش مقدار کود پتاسیم، کاهش عملکرد کم‌تری داشت. البته همان‌طورکه از جدول (۵) مشاهده شد، مصرف کود پتاسیم نباید در این شرایط به‌صورت کامل باشد، بلکه افزایش کود پتاسیم در شرایط کم‌آبی تا یک سطح مشخص می‌تواند باعث کاهش خسارت‌های ناشی از تنش آبی شود. هم‌چنین شکل نشان می‌دهد که عملکرد در شرایط کم‌آبی با شیب تندتری واکنش نشان می‌دهد و با افزایش مقدار آب آبیاری، روند افزایش عملکرد کند می‌شود. بنابراین اگر در مناطقی که آبیاری کامل باشد، بخشی از آب صرفه‌جویی شود، عملکرد تغییر قابل‌توجهی نمی‌کند و اگر این مقدار آب صرفه‌جویی‌شده به گیاهی برسد که در شرایط خشکی قرار دارد، افزایش عملکرد بیش‌تر خواهد بود. موسوی‌فضل و همکاران (۱۷) در پژوهش خود راجع به تأثیر کود پتاسیم در کم‌آبیاری‌ها به این نتیجه رسیدند که کاهش عملکرد در اثر کاهش عمق آب آبیاری را می‌توان با افزایش مقدار کود پتاسیم جبران نمود.

در جدول (٦) شاخص تولید نهایی عملکرد نسبت به متوسط عمق آب آبیاری (MP_I) نشان داد که با افزایش یک سانتی‌متر عمق آب آبیاری نسبت به عمق میانگین با فرض ثابت‌ماندن کود پتاسیم (۱۱۲/۵ کیلوگرم در هکتار)، عملکرد خشک چای‌ترش به اندازه ۰/۹ کیلوگرم افزایش می‌یابد.

هم‌چنین با توجه به شاخص تولید نهایی عملکرد خشک چای‌ترش نسبت به کود پتاسیم (MP_K) با افزایش یک واحد کود پتاسیم از مقدار میانگین و با فرض ثابت‌ماندن عمق آب آبیاری (۱۲٤/۷سانتی‌متر)، به‌طور متوسط عملکرد ۳/۱ کیلوگرم افزایش می‌یابد.

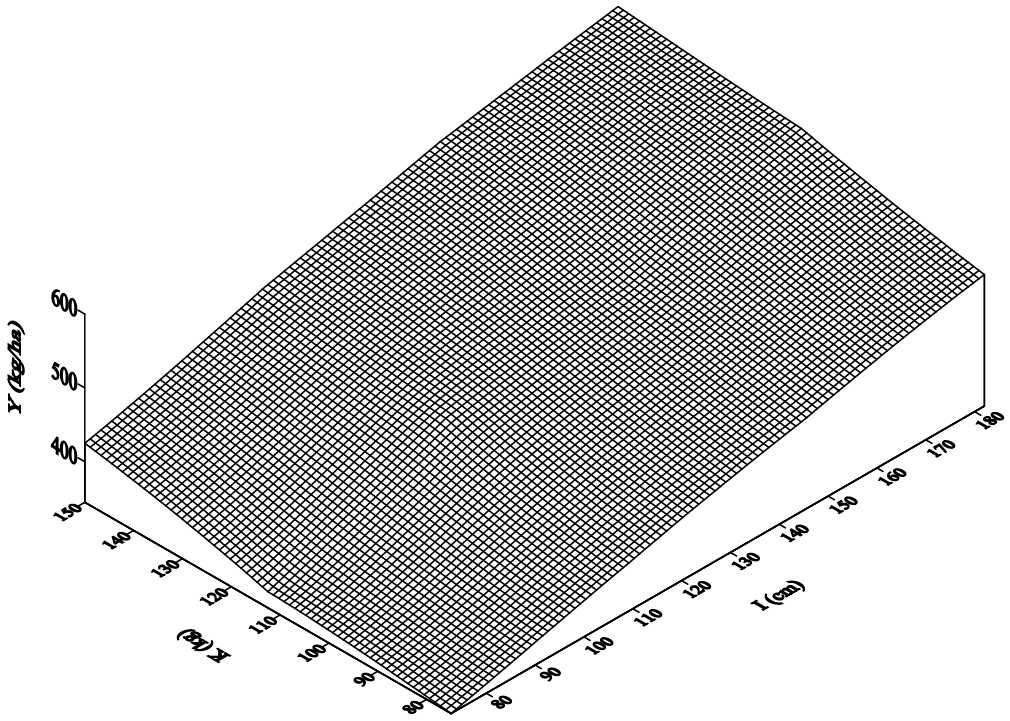

Figure 3. Changes in yield of roselle relative to the amount of irrigation water and potassium fertilizer

نرخ جایگزینی نهایی کود پتاسیم به‌جای آب آبیاری (MRTS) نسبت به عملکرد نشان داد، برای این‌که عملکرد با کاهش یک واحد آب آبیاری تغییر نکند، باید مقدار کود پتاسیم ۳/٤ کیلوگرم به‌ازای هر سانتی‌متر آب آبیاری افزایش یابد. با توجه به قیمت هر کیلو چای‌ترش در سال ۱۳۹۸ معادل ۵۰۰۰۰۰ ریال می‌توان ارزش تولید دو عامل عمق آب آبیاری و کود پتاسیم را به‌دست آورد. مقدار ارزش تولید نهایی نسبت به عمق آب آبیاری برای چای‌ترش ٤۵۰۰۰۰ ریال می‌باشد که بیان‌کننده درآمد حاصل از افزایش تولید در نتیجه افزایش هر سانتی‌متر عمق آب آبیاری نسبت به عمق متوسط آب آبیاری می‌باشد. هم‌چنین مقدار ارزش تولید نهایی نسبت به مقدار کود پتاسیم برای چای‌ترش ۱۵۵۰۰۰۰ ریال به‌دست آمد که بیان‌کننده درآمد حاصل از افزایش تولید در نتیجه افزایش هر واحد کود پتاسیم نسبت به مقدار متوسط کود پتاسیم مصرفی می‌باشد. نتایج نشان داد درآمد حاصل از افزایش کود پتاسیم بیش‌تر از درآمد حاصل از افزایش عمق آب آبیاری می‌باشد.

Table 6. Values of evaluation indices using experimental averages of irrigation water and potassium fertilizer

Type of index	Yield of roselle
MP_I(ton/cm)	0.9
MP_K (ton/kg)	3.1
$MRTS_{I,K}$ (cm/kg)	3.4
VMP_I (RLS)	450000
VMPK (RLS)	1550000

عمق بهینه آبیاری

با توجه به روابط ارائه‌شده در بخش مواد و روش‌ها ابتدا تابع تولید آب- محصول موردنیاز به‌منظور محاسبه عمق‌های شاخص به‌دست آمد. سپس با داشتن تابع آب- هزینه عمق‌های شاخص (عمق بهینه آبیاری در شرایط محدودیت زمین (Wl)، عمق بهینه آبیاری در شرایط محدودیت آب (Ww)، عمق معادل آبیاری بیشینه (Wcl) و بیشینه عمق آب مصرفی(Wm) محاسبه گردید که نتایج در جدول (۷) ارائه شده است.

Table 7. Optimal depths of index at different levels of potassium fertilizer

The amount of potassium fertilizer (kg/ha)	Optimal depths of index (cm)			
	Wl	Ww	Wcl	Wm
75	107.5	96.71	99.76	110
112.5	130.5	120.66	132.35	135
150	161.5	151.9	157.66	165

همان‌طورکه از جدول (۷) مشخص است، با افزایش مقدار کود پتاسیم در تیمارهای مختلف کم‌آبیاری، عمق بهینه آبیاری افزایش یافت. هم‌چنین با افزایش مقدار کود پتاسیم، اختلاف عمق بهینه آبیاری در شرایط محدودیت آب و محدودیت زمین کاهش یافت. علت این موضوع کاهش محصول در سطوح بالای کود پتاسیم است. در سطوح بالای مصرف کود، به‌علت کم‌آبی شدت تنش‌های وارده به گیاه بیش‌تر می‌شود، در نتیجه در سطوح بالای مصرف کود، کم‌آبیاری کارآمدی خود را از دست داده و اقتصادی نخواهد بود. هم‌چنین مشاهده می‌گردد با اعمال کم‌آبیاری در شرایط محدودیت زمین، عمق بهینه آب مصرفی نسبت به عمق معادل بیشینه مصرف در سطوح ۷۵، ۱۱۲/۵ و ۱۵۰ کیلوگرم کود پتاسیم در هکتار به‌ترتیب ۲/۵، ٤/۵ و ۳/۵ سانتی‌متر کاهش مصرف آب و در شرایط محدودیت آب به‌ترتیب ۱۳/۲۹، ۱٤/۳٤ و ۱۳/۱ سانتی‌متر کاهش مصرف آب داشته است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود افزایش کود پتاسیم تا سطح ۷۵ درصد باعث صرفه‌جویی بیش‌تری در مصرف آب گردید. نادریان‌فر (۱۸) در تحقیق خود راجع به تعیین تابع تولید گیاه ریحان در شرایط کم‌آبی و نانو کود نیز به نتایج مشابه رسید. ایشان بیان کردند با کم‌آبیاری در شرایط محدودیت آب، با هدف استفاده حداکثر از واحد حجم آب، عمق بهینه آب مصرفی نسبت به آبیاری بیشینه ۲۰ درصد کاهش خواهد یافت. بنابراین مشاهده شد در اثر کم‌آبیاری چای‌ترش نسبت به آبیاری بیشینه مقداری آب صرفه‌جویی

می‌شود، که براساس مقدار عمق آب صرفه‌جویی‌شده، می‌توان سطح جدیـدی را به زیر کشت برد و عملکرد کل را افـزایش داد و در نهایت باعث افزایش درآمد شد.

نتیجه‌گیری

با توجه به بحران آب در کشور و به‌منظور استفاده بهینه از آب در بخش کشاورزی، محاسبه عمق‌های شاخص آبیاری برای تمام محصولات زراعی و باغی کشور و اعمال کم‌آبیاری در شرایط محدودیت منابع آب امری ضروری است. کاهش مصرف آب در تیمارهای کم‌آبیاری نسبت به آبیاری کامل سبب صرفه‌جویی آب شد. به‌طوری‌که با آب صرفه‌جویی‌شده می‌توان تحت شرایط عدم محدودیت زمین، اراضی بیش‌تری را به عرصه تولید وارد ساخت. در شرایط محدودیت آب نیز با برداشت کم‌تر آب می‌توان مصرف منابع آب را کاهش داد. تعیین عمق بهینه آبیاری و رعایت اعمال این عمق نسبت به آبیاری کامل، می‌تواند به میزان قابل‌توجهی در مصرف آب آبیاری صرفه‌جویی کرده و از طرف دیگر به‌دلیل امکان افزایش سطح زیر کشت، میزان کل درآمد خالص زارع را تا حد زیادی افزایش دهد. با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان گفت در اثر تغییرات آب آبیاری و کود پتاسیم تابع درجه دوم نسبت به سایر توابع برآورد بهتری از عملکرد چای‌ترش دارد. برای این‌که مقدار عملکرد با کاهش عمق آب آبیاری کاهش پیدا نکند، باید مقدار کود پتاسیم مصرفی افزایش یابد. با افزایش مصرف کود پتاسیم در تیمارهای مختلف اعمال کم‌آبیاری، برای هر سه مرحله برداشت عمق بهینه آبیاری افزایش یافت. با افزایش مصرف کود پتاسیم، اختلاف عمق بهینه آبیاری در شرایط محدودیت آب و محدودیت زمین کاهش یافت. با توجه به کمبود آب در منطقه سیستان، تعیین عمق بهینه آبیاری می‌تواند کمک زیادی به صرفه‌جویی آب در این منطقه و افزایش سطح زیر کشت نماید.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه زابل انجام شده است. (کد پژوهانه ۵۸-۹۶۱۸ -UOZ-GR)

منابع

۱. انصاری، ح. (۱۳۸٦). تعیین عمق شاخص و بهینه آبیاری در ذرت‌های زودرس با هدف احتساب حداکثر سود. آب و خاک. ۲۲(۲):۱۱۵-۱۰۷.

۲. پیری، ح. (۱۳۹٦). تعیین تابع تولید آب- نیتروژن و ارزیابی شاخص‌های تولید پیاز در منطقه زهک سیستان و بلوچستان. مدیریت آب و آبیاری. ۷(۲):۳۰۳-۲۸۷.

۳. پیری، ح.، انصاری، ح. و پارسا، م. (۱۳۹٦) اثر شوری و مقدار آب آبیاری بر عملکرد سورگوم علوفه‌ای در دشت سیستان. پژوهش آب در کشاورزی. ۳۱(۱):۲۸-۱٤.

٤. جورونی، ا.، عالی‌نژاد بیدآبادی، ا. و ملکی، ع. (۱۳۹٦). تعیین تابع تولید و پاسخ عملکرد ماده‌ی خشک و دانه به کم‌آبیاری در گیاه ذرت. مدیریت آب و آبیاری. ۷(۲): ۲۵٦-۲٤۱.

۵. حبیبی، م.، عبدی، م. و مهرپویان، م. (۱۳۹۲). مطالعه خصوصیات کیفی علوفه در دو رقم سورگوم علوفه‌ای اسپیدفید و پگاه تحت شرایط کم‌آبی. دومین همایش ملی مباحث کشاورزی نوین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه، ساوه، ایران.

٦. حسن‌زاده قورت‌تپه، ع. و قیاسی، م. (۱۳۸۷). تنش غرقابی و آثار آن بر اکوفیزیولوژی گیاهان. جهاد دانشگاهی واحد آذربایجان‌غربی، ۱٤۹ صفحه.

۷. حوری، م.ع. (۱۳۹۵). بررسی اثر شوری آب بر عملکرد ماده خشک کنار موریتانی با تعیین تابع تولید شوری (مطالعه‌ی موردی اهواز). مدیریت آب و آبیاری. ٦(۱): ۱۷۳-۱٦۳.

۸. خرمیان، م.، حسین‌پور، م. (۱۳۹۵). بهینه‌سازی آب آبیاری کشت پاییزه چغندرقند براساس توابع تولید و هزینه در شمال استان خوزستان. علوم و مهندسی آبیاری. ۳۹(۳):۱۰۶-۹۶.

۹. سپاسخواه ،ع.، توکلی، ع. و موسوی، ف. (۱۳۸۵). اصول و کاربرد کم آبیاری. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، تهران. ۲۸۸ صفحه.

۱۰. شمس بیرانوند، م.، برومند نسب، س.، ملکی، ع. ودانشور، م. (۱۳۹٤). تأثیر کم‌آبیاری بر عملکرد و برخی صفات دانه سه رقم سویا در منطقه خرم‌آباد. علوم و مهندسی آبیاری. ۳۸(۳): ۲۱-۱۳.

۱۱. شهیدی، ع. (۱۳۸۷). اثر برهم‌کنش کم آبیاری و شوری بر عملکرد و اجزای عملکرد ارقام گندم با تعیین تابع تولید آب و شوری در منطقه بیرجند. پایان‌نامه دکتری. دانشگاه شهید چمران اهواز.

۱۲. شیرمحمدی علی‌اکبرخانی، ز.، انصاری، ح.، علیزاده، ا. و کافی، م. (۱۳۹۲). ارزیابی توابع تولید آب- شوری- عملکرد در ذرت علوفه‌ای در استان خراسان رضوی. آبیاری و زهکشی ایران. ٤(۷): ٥٤۳-٥۳٥.

۱۳. عبدزاهد گوهری، ع.، امیری، ا. و علیزاده، ا. (۱۳۹٤). تخمین تابع تولید و کارآیی مصرف آب در گیاه بادمجان تحت شرایط آبیاری قطره‌ای و کود نیتروژن. حفاظت منابع آب و خاک. ۵(۱): ۵۳-٤۲.

۱٤. کیانی، ع. و عباسی، ف. (۱۳۸۹). ارزیابی تابع تولید آب- شوری گندم در استان گلستان. آبیاری و زهکشی ایران، ۵۸: ٤٥٥-٤٤٥.

۱۵. کیانی، ع.، همایی، م. و میرلطیفی، م. (۱۳۸۵). ارزیابی توابع کاهش عملکرد گندم در شرایط توأم شوری و کم‌آبی. علوم آب و خاک. ۲۰(۱):۸۳-۷۳.

۱٦. گنجعلی، ح.، کمالی‌جو، ا. و عزیزیان‌شرمه، ع. (۱۳۹٦). خصوصیات رشدی و عملکرد چای‌ترش در سطوح مختلف نیتروژن، فسفر و پتاسیم در شرایط آب‌وهوایی سراوان. بوم‌شناسی گیاهان زراعی. ۱۳(۱):۳۷-۲۹.

۱۷. موسوی‌فضل، ح.، اخیانی، ا. و عطاردی، ا. (۱۳۹٦). اثر آب آبیاری و کود پتاسیم بر عملکرد سورگوم علوفه‌ای با هدف تعیین تابع تولید آب کود (رقم پگاه). علوم و مهندسی آبیاری اهواز، ویژه‌نامه بهار، ٤۰(۱-۱):۹۷-۸۳.

۱۸. نادریان‌فر، م. (۱۳۹۵). تعیین تابع تولید گیاه ریحان تحت شرایط کم‌آبیاری و استفاده از نانو کود. آبیاری و زهکشی ایران. ۳(۱۰): ۳۷٦-۳٦٥.

19. Akanbi, W.B., Oaniyn, A.B., Togum, A.O., Ilupeju, A.E.O. & Olairan, O.A. (2009). The effect of organic fertilizer on growth, calyx yield and quality of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Amrican Eurasian Journal of Sustainable Agricalture*, 3(4), 652-657.
20. Aziz, E., Gad, N. & Badran, N.M. (2007). Effect of cobalt and nickel on plant growth, yield and flavonoids content of Hibiscus sabdariffa L. *Australian Journal of Basic Applied Sciences*, 1(2), 73-78.
21. Farooqi, A. A. & Bssreeramu, Kh. (2004). Cultivation of spice crops. Universities Press (India). 128-148.
22. Hassan, M.S. (2001) Effects of frequency of irrigation and fertilizer nitrogen on yield and quality of onion (*A. cepa*) in the arid tropics. *Act Horticulture African Symposium on Horticultural crops*, 143(8), 341-346.
23. Homaee, M., Feddes, R. A. & Direksen, C. (2002). Simulation of root and water uptake, II: Non – uniforme transient combined salinity and water stress using different macroscopic reduction function. *Agriculture Water Management*, 57(2), 127-144.
24. Li, X., Wan, S., Kang, Y., Chen, X. & Chu, L. (2016). Chinese rose growth and ion accumulation under irrigation with waters of different salt contents. *Agricultural Water Management*, 163, 180-189.
25. Liue, F., Savic, S., Jensen, C.R., Shahnazari, A., Jacobsen. S. Sticik, R. & Andersen, M. N. (2007). Water relations and yield of lysimeter-grown strawberries under limited irrigation. *Scientia Horticulture*, 111(2), 128-132.
26. Mohamed, M. & Ashok, K. (2014). Growth, yield and water Use effeciency of forage sorghum as affected by NPK fertilizer and deficit irrigation. *Plant Sciences*, 5, 2134-2140.

27. Moutonnet, P., Hera, C. & Nielsen, D. R. (2002). Crop Yield Response to Deficit Irrigation. *Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands*.
28. Nadler, A., Raveh, E., Yermiyahu, U. & Green, S. (2006). Stress included water content variations in mango stem by time domain reflectometry. *Soil Science Society of America*, 70(2), 510-520.
29. Neilsen, D. C. & Vigil, M. F. (2005). Legume green fallow effect on soil water content at wheat planting and wheat yield. *Agronomy*, 97(3), 684-689.