



## مدیریت آب و آبیاری

(نشریه علمی)

دوره ۱۰ ■ شماره ۲ ■ پاییز ۱۳۹۹

صفحه‌های ۱۸۹-۲۰۲

مقاله پژوهشی:

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

پریا راشکی<sup>۱</sup>، حلیمه پیری<sup>۲</sup>، عیسی خمیری<sup>۳</sup>

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 به صورت کرت‌های یک‌بار خردشده در قالب طرح بلوک کامل تصادفی در مزرعه تحقیقاتی چاه‌نیمه زهک روی گیاه چای‌ترش اجرا گردید. تیمارها شامل چهار سطح آب‌آبیاری ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۴۰ 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 ۱/۴ و برای حداکثر عمق آب ۰/۸۶- 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 ۱۳/۱ و ۱۴/۳۴ 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<sup>1</sup>, Halimeh Piri<sup>2\*</sup>, Eisa Khamari<sup>3</sup>

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.

## مقدمه

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 به صورت 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 به دلیل تعیین رابطه مستقیم عملکرد- آب بر روش‌های نظری و تجربی که بر پایه فرضیات متعدد استوار هستند، ترجیح داده می‌شود (۱۲). با برآورد تابع تولید می‌توان به طور کمی تأثیر نسبی هر یک از متغیرهای یادشده را بر روی تغییرات تولید و درآمد محصول، محاسبه و تعیین نمود (۱۴). تابع تولید محصول و آب مصرفی در تجزیه و تحلیل اقتصادی و یافتن شیوه‌هایی برای بهینه‌سازی مصرف آب کاربردهای فراوانی دارد. در صورتی که 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 (۸) آب آبیاری چغندر قند پاییزه را با استفاده از توابع تولید در شمال خوزستان بهینه‌سازی کردند. تیمارهای آبیاری در مطالعات آن‌ها سطوح ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه بود. نتایج مطالعه نشان داد از لحاظ اقتصادی کم‌آبیاری چغندر قند 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

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 (۱۴). مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی می‌تواند تأثیر قابل توجهی در کاهش مصرف منابع آب داشته باشد (۲۴). اعمال مدیریت صحیح آبیاری و کاشت گیاهان مقاوم به خشکی، به منظور حفظ ذخیره رطوبتی خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک از جمله 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 آفریقا بوده، در تمام مناطق استوایی و گرم کشت می‌شود و به عنوان گیاهی دارویی مورد توجه است (۲۰). کم‌آبیاری تنظیم‌شده یکی دیگر از راه‌های افزایش کارایی مصرف آب است. در این روش، کاهش عملکرد در مقایسه صرفه‌جویی در مصرف آب ناچیز است (۵). هدف از کم‌آبیاری تنظیم‌شده بهینه‌ساختن کارایی مصرف آب و به حداکثر رساندن عملکرد به ازای 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 (۱۰). 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. به منظور 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

شهرستان دزفول معرفی نمودند. حوری (۷) پنج تابع تولید شوری آب آبیاری به صورت 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 به جز 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 کارایی 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 چای ترش 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 چای ترش 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

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 ۲۶). هنگامی که 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 (۱۶) عملکرد چای ترش 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 چای ترش 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 چای ترش می‌گردد. موسوی‌فضل و همکاران (۱۷) با هدف تعیین تابع تولید و عمق بهینه آب و کود، اثر کود پتاسیم را در شرایط کم آبی 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 کم آبی بهتر برآورد می‌کند. جوورونی و همکاران (۴) تابع خطی را به‌عنوان تابع برتر تولید برای گیاه ذرت در شرایط کم آبی در

قبل از مراحل آماده‌سازی زمین نمونه‌های خاک از اعماق ۰-۳۰ سانتی‌متر و ۳۰-۶۰ 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 به صورت بلوک کامل تصادفی در سه تکرار اجرا گردید. تیمارها شامل چهار سطح عمق آب آبیاری  $I_1$ ،  $I_2$ ،  $I_3$  و  $I_4$  به ترتیب معادل ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد و سه سطح کود پتاسیم  $K_1$ ،  $K_2$  و  $K_3$  به ترتیب معادل ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز کودی پتاسیم به عنوان کرت فرعی انجام شد. ابعاد کرت‌ها  $3 \times 4$  (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 به صورت 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 به ترتیب 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.

گیاهان مقاوم به تنش آبی و مدیریت آبیاری آن به گونه‌ای 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 ۶۱ درجه و ۶۷ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۸۹ دقیقه عرض شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۴۸۰ متر انجام گرفت. منطقه مطالعاتی براساس اقلیم‌نمای دومارتن دارای اقلیم گرم و خشک بوده، میزان بارندگی آن در سال کم‌تر از ۶۰ 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 ۴۲ درجه سانتی‌گراد) و کم‌ترین مقدار دما در ماه دی (میانگین ۱۸/۳ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. مجموع تبخیر و تعرق گیاه مرجع  $3563/24$  میلی‌متر در طول سال می‌باشد. به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

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

| Depth of sampling | P (ppm) | Organic carbon (ppm) | K (ppm) | EC (dSm <sup>-1</sup> ) | 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 <sup>-1</sup> ) |     |                   | Cations (meqlit <sup>-1</sup> ) |     |     |     | SAR | EC (dSm <sup>-1</sup> ) | pH  |
|--------------|--------------------------------|-----|-------------------|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-------------------------|-----|
|              | So <sup>4+</sup>               | Cl  | HCO <sup>3-</sup> | 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 |

تعیین تابع تولید و عمق بهینه آبیاری گیاه دارویی چای ترش در شرایط کم آبی و استفاده از کود پتاسیم

### محاسبات آبیاری

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

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

در این معادله:  $d$  عمق آبیاری (متر)،  $\theta_{Fci}$  و  $\theta_i$  به ترتیب رطوبت حجمی خاک در حالت ظرفیت زراعی و قبل از آبیاری در لایه  $i=1$  ضخامت لایه (متر) و  $n$  شماره لایه خاک می باشد.

با به دست آوردن عمق آب آبیاری در هر نوبت با استفاده از رابطه (۱)، حجم آب مورد نیاز برای هر کرت از ضرب کردن عمق به دست آمده در مساحت کرت محاسبه شد و با استفاده از کتورهای نصب شده روی هر یک از لوله های آبرسان اندازه گیری 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 به عنوان متغیر وابسته و مقادیر مختلف آب آبیاری و کود پتاسیم به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شد. شکل کلی تابع تولید به صورت رابطه (۲) بیان گردید.

$$Y = f(I, K) \quad (2)$$

در این رابطه،  $Y$  عملکرد (تن در هکتار) است که تابعی از مقدار آب آبیاری ( $I$ ، سانتی متر) و مقدار کود پتاسیم ( $K$ ، کیلوگرم در هکتار) می باشد.

جهت اندازه گیری 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. کپسول های چای ترش از بوته ها چیده و گلبرگ ها جدا شدند. سپس به مدت دو هفته در هوای آزاد قرار گرفتند. سپس با

خشک شدن کامل گلبرگ ها، وزن خشک آنها به عنوان عملکرد برای هر تیمار محاسبه شد.

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

خطی ساده:

$$Y = \alpha + \beta_1 I + \beta_2 K \quad (3)$$

مدل لگاریتمی:

$$Y = \alpha I^{\beta_1} K^{\beta_2} \quad (4)$$

مدل درجه دوم:

$$Y = \alpha + \beta_1 I + \beta_2 K + \beta_3 I^2 + \beta_4 K^2 + \beta_5 I \cdot K \quad (5)$$

مدل متعالی:

$$Y = \alpha I^{\beta_1} K^{\beta_2} \exp(\beta_3 I + \beta_4 K) \quad (6)$$

در این روابط،  $I$  مقدار آب آبیاری (سانتی متر)،  $K$  مقدار کود پتاسیم (کیلوگرم در هکتار)،  $\alpha$  مقدار ثابت،  $\beta$  پارامترهای رگرسیون که بایستی محاسبه شوند،  $Y$  مقدار عملکرد خشک چای ترش (کیلوگرم در هکتار) می باشد.

پس از تعیین ضرایب مورد نیاز، به منظور مقایسه و ارزیابی این مدل ها 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 معادله های (۷) تا (۱۰) به دست می آیند (۱۱).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (7)$$

$$RMSE = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right)^{1/2} \times \left( \frac{100}{\bar{O}} \right) \quad (8)$$

$$EF = \quad (9)$$

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

$$CRM = \quad (11)$$

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

### 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).

$$MP_I = \frac{dY}{dI} \quad (13)$$

$$MP_K = \frac{dY}{dK} \quad (14)$$

$$MRTS_{I,K} = \frac{MP_K}{MP_I} \quad (15)$$

$$VMP_I = P_c \times MP_I \quad (16)$$

$$VMP_K = P_c \times MP_K \quad (17)$$

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:

$$Y_w = a_1 + (b_1 \times I) + (c_1 \times I^2) \quad (18)$$

با فرض خطی بودن تابع هزینه خواهیم داشت:

$$c(w) = a_2 + (b_2 \times I) \quad (19)$$

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

در این روابط،  $O$  و  $P$  به‌ترتیب مقدار عملکرد مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده،  $\bar{O}$  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  $RMSE$ ،  $EF$ ،  $R^2$  و  $ME$  و  $CRM$  به‌ترتیب برابر صفر، یک، یک، صفر و صفر خواهد بود (۲۳).

### تعیین فاکتور حساسیت محصول ( $K_y$ ) 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  $K_y$  به هم مرتبط می‌کند. این رابطه به شکل زیر می‌باشد (۹):

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_{max}}\right) = K_y \times \left(1 - \frac{ET_a}{ET_{max}}\right) \quad (12)$$

در این رابطه  $Y_{max}$  حداکثر مقدار محصول تولیدی بدون محدودیت آب (کیلوگرم)،  $Y_a$  مقدار واقعی محصول تولیدشده (کیلوگرم)،  $ET$  تبخیر و تعرق واقعی (میلی‌متر)،  $ET_{max}$  حداکثر مقدار تبخیر و تعرق (میلی‌متر) و  $K_y$  ضریب حساسیت می‌باشد.

تعیین تابع تولید و عمق بهینه آبیاری گیاه دارویی چای ترش در شرایط کم آبی و استفاده از کود پتاسیم

### نتایج و بحث

نمودار رگرسیون مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در شکل (۱) و پارامترهای آماری مورد نیاز ارزیابی اعتبار توابع به دست آمده در مورد عملکرد در جدول (۳) ارائه شده است. برای تعیین معنی داری از آماره  $f$  استفاده شد. آماره  $f$  نشان‌دهنده معنی‌دار بودن کلی تابع می‌باشد. چنانچه آزمون  $f$  معنی‌دار باشد، نشان‌دهنده این است که برازش کلی مدل رگرسیونی و میزان باقیمانده‌های مدل در حد قابل قبولی است (۱۵). بررسی ضرایب تعیین معادلات خط رگرسیون رسم شده نشان می‌دهند که کلیه توابع مورد مطالعه توانسته‌اند، برآورد قابل قبولی از عملکرد خشک چای ترش داشته باشند. همان‌طور که از جدول (۴) مشاهده می‌گردد، براساس رتبه‌بندی نهایی تابع درجه دوم به‌عنوان تابع برتر نسبت به سایر توابع شناخته شد. توابع متعالی، لگاریتمی و خطی به ترتیب 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  $ME$  (۲۶/۲) 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 کارایی مدل  $EF$  (۰/۶۴) نیز بیان‌گر قاطعیت و کارایی بالای تابع درجه دوم در برآورد مقادیر مورد نظر می‌باشد. بنابراین با توجه به نتایج مذکور و در نظر گرفتن 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 چای ترش معرفی گردد. پیری و همکاران (۳) در بررسی تنش آبی بر

$c(w)$  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 به دست آمد (۱):

$$W_1 = \frac{b_2 - P_c \times b_1}{2P_c \times c_1} \quad (20)$$

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

$$W_w = \left( \frac{(P_c \times a_1) - a_2}{(P_c \times c_1)} \right)^{0.5} \quad (21)$$

برای به دست آوردن عمق معادل آبیاری بیشینه در ابتدا باید مقدار  $Z_1$  از رابطه زیر تعیین شود (۱):

$$Z_1 = \left[ (P_c b_1 - b_2)^2 - 4P_c c_1 \left( \frac{P_c b_1}{4c_1} - \frac{b_1 b_2}{2c_1} \right) \right]^{0.5} \quad (22)$$

با توجه به مقدار  $Z_1$  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):

$$W_{cl} = \frac{b_2 - P_c b_1 + Z_1}{2P_c c_1} \quad (23)$$

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

$$W_{max} = -\frac{b_1}{2c_1} \quad (24)$$

در تمامی روابط ذکر شده  $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2$  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 چای ترش ۵۰۰۰۰۰ ریال در نظر گرفته شد.

محلی، اقلیم، خاک، محصول، مدیریت زراعی و برنامه آبیاری متفاوت است. به طوری که فائو مقدار آن را بین ۰/۲ تا ۱/۱۵ و آژانس بین المللی انرژی اتمی بین ۰/۰۸ تا ۱/۷۵ بیان نموده اند (۲۷).  
نتایج برآورد ضرایب توابع تولید برای تابع تولید برتر (تابع درجه دوم) در جدول (۴) آورده شده است.

**شاخص های تولید نهایی آب آبیاری و کود پتاسیم**  
شاخص های 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.

محصول سورگوم تابع درجه دوم را به عنوان 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 به عنوان تابع برتر انتخاب نمودند.  
همان طور که گفته شد جهت تعیین ضریب حساسیت عملکرد، از مدل حساسیت دورنباس و کاسام استفاده شد. شکل (۲) این مدل را نشان می دهد. ضریب حساسیت برای عملکرد خشک چای ترش ۱/۱۸ به دست آمد. مقدار فاکتور حساسیت عملکرد محصول بستگی به شرایط

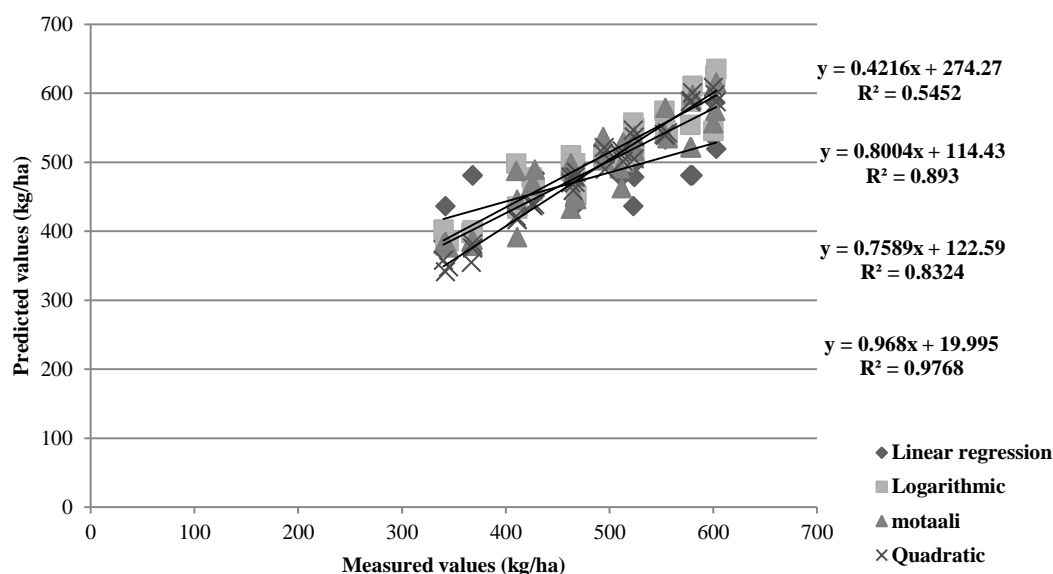


Figure 1. Chart of regression of measured and predicted values of roselle performance

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

| Function type      | RMSE      | EF      | ME       | CRM       | R <sup>2</sup> | 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 | $\alpha$ | $\beta_1$ | $\beta_2$ | $\beta_3$ | $\beta_4$ | $\beta_5$ | 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



تعیین تابع تولید و عمق بهینه آبیاری گیاه دارویی چای ترش در شرایط کم آبی و استفاده از کود پتاسیم

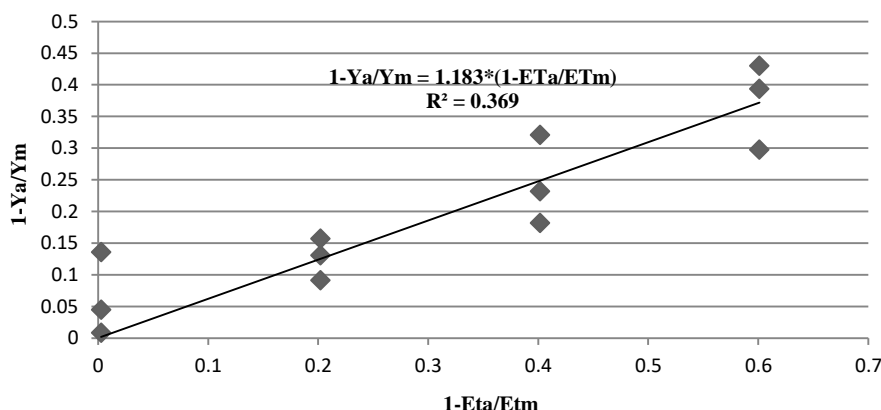


Figure 2. Changes in the relative loss of dry performance of roselle versus relative loss of water consumption

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 گلدھی در بوته را به‌همراه دارد. هم‌چنین در این شرایط برگ‌ها و گل‌ها ریزش می‌کنند (۶). 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 چای ترش را نسبت به سطوح مختلف آب آبیاری و کود پتاسیم نشان می‌دهد. همان‌طورکه در شکل نمایان است با کاهش مقدار کود

Table 5. Final yield indicators roselle performance

| Variable | Input Domain Changes  | Index       | Dry performance of roselle |
|----------|-----------------------|-------------|----------------------------|
| I(cm)    | Min= 72.8<br>Max= 182 | MPI(kg/cm)  | 1.4<br>-0.86               |
| K(kg/ha) | Min=75<br>Max=150     | MPK (kg/kg) | 3.92<br>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 چای ترش نسبت به عمق آب آبیاری (MP<sub>I</sub>) با فرض ثابت‌بودن کود پتاسیم برای حداقل عمق آب آبیاری (۷۲/۸ سانتی‌متر) معادل ۱/۴ کیلوگرم به‌ازای هر یک سانتی‌متر عمق آب می‌باشد، یعنی به‌ازای هر یک سانتی‌متر افزایش عمق آب آبیاری، ۱/۴ کیلوگرم افزایش تولید خواهیم داشت. مقدار این شاخص برای حداکثر عمق آب آبیاری (۱۸۲/۰ سانتی‌متر) معادل ۰/۸۶- کیلوگرم به‌ازای هر یک سانتی‌متر عمق آب بود. منفی‌بودن این شاخص برای حداکثر عمق آب آبیاری نسبت به حداقل عمق آب، نشان‌دهنده کاهش عملکرد

برسد که در شرایط خشکی قرار دارد، افزایش عملکرد بیش تر خواهد بود. موسوی فضل و همکاران (۱۷) در پژوهش خود راجع به تأثیر کود پتاسیم در کم آبیاری‌ها به این نتیجه رسیدند که کاهش عملکرد در اثر کاهش عمق آب آبیاری را می‌توان با افزایش مقدار کود پتاسیم جبران نمود.

در جدول (۶) 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 ثابت ماندن 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 ثابت ماندن عمق آب آبیاری (۱۲۴/۷ سانتی‌متر)، به‌طور متوسط عملکرد ۳/۱ کیلوگرم افزایش می‌یابد.

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 کم آبیاری می‌توان با افزایش مقدار کود پتاسیم، کاهش عملکرد کم‌تری داشت. البته همان‌طور که 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 صرفه‌جویی شده به گیاهی

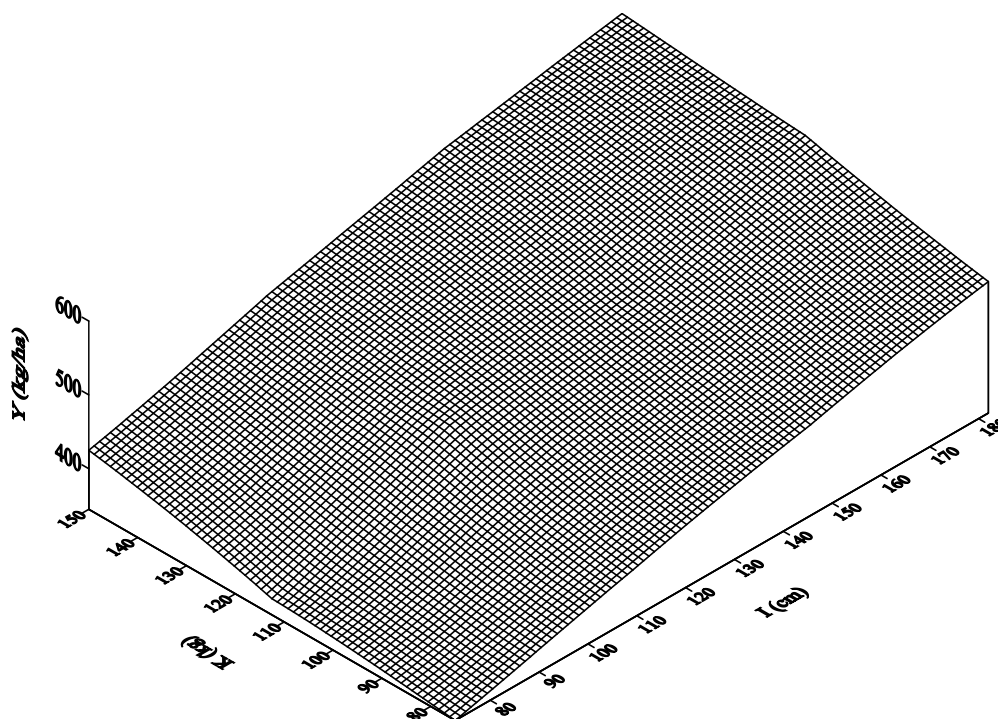


Figure 3. Changes in yield of roselle relative to the amount of irrigation water and potassium fertilizer

تعیین تابع تولید و عمق بهینه آبیاری گیاه دارویی چای ترش در شرایط کم آبی و استفاده از کود پتاسیم

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، به علت 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 به ترتیب ۲/۵، ۴/۵ و ۳/۵ سانتی‌متر کاهش مصرف آب و در شرایط محدودیت آب به ترتیب ۱۳/۲۹، ۱۴/۳۴ 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

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 ۳/۴ 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 ۴۵۰۰۰۰ 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 <sub>i</sub> (ton/cm)    | 0.9              |
| MP <sub>k</sub> (ton/kg)    | 3.1              |
| MRTS <sub>i,k</sub> (cm/kg) | 3.4              |
| VMP <sub>i</sub> (RLS)      | 450000           |
| VMP <sub>k</sub> (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)

### سپاسگزاری

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

می‌شود، که براساس مقدار عمق آب صرفه‌جویی‌شده، می‌توان سطح جدیدی را به زیر کشت برد و عملکرد کل را افزایش 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 به دلیل 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.

### منابع

- انصاری، ح. (۱۳۸۶). تعیین عمق شاخص و بهینه آبیاری در ذرت‌های زودرس با هدف احتساب حداکثر سود. آب و خاک. ۲۲(۲): ۱۱۵-۱۰۷.
- پیری، ح. (۱۳۹۶). تعیین تابع تولید آب- نیتروژن و ارزیابی شاخص‌های تولید پياز در منطقه زهک سیستان و بلوچستان. مدیریت آب و آبیاری. ۷(۲): ۳۰۳-۲۸۷.
- پیری، ح.، انصاری، ح. و پارسا، م. (۱۳۹۶) اثر شوری و مقدار آب آبیاری بر عملکرد سورگوم علوفه‌ای در دشت سیستان. پژوهش آب در کشاورزی. ۳۱(۱): ۲۸-۱۴.
- جورونی، ا.، عالی‌نژاد بیدآبادی، ا. و ملکی، ع. (۱۳۹۶). تعیین تابع تولید و پاسخ عملکرد ماده‌ی خشک و دانه به کم‌آبیاری در گیاه ذرت. مدیریت آب و آبیاری. ۷(۲): ۲۵۶-۲۴۱.
- 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.
- حسن‌زاده قورت‌تپه، ع. و قیاسی، م. (۱۳۸۷). تنش غرقابی و آثار آن بر اکوفیزیولوژی گیاهان. جهاد دانشگاهی واحد آذربایجان غربی، ۱۴۹ صفحه.
- 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. ۶(۱): ۱۷۳-۱۶۳.

۸. خرمیان، م.، حسین پور، م. (۱۳۹۵). بهینه سازی آب آبیاری کشت پاییزه چغندر قند بر اساس 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. و دانشور، م. (۱۳۹۴). تأثیر کم آبیاری بر عملکرد و برخی صفات دانه سه رقم سویا در منطقه خرم آباد. علوم و مهندسی آبیاری. ۳۸(۳): ۲۱-۱۳.
۱۱. شهیدی، ع. (۱۳۸۷). اثر برهم کنش کم آبیاری و شوری بر عملکرد و اجزای عملکرد ارقام گندم با تعیین تابع تولید آب و شوری در منطقه بیرجند. پایان نامه دکتری. دانشگاه شهید چمران اهواز.
۱۲. شیرمحمدی علی اکبرخانی، ز.، انصاری، ح.، عزیززاده، ا. و کافی، م. (۱۳۹۲). ارزیابی توابع تولید آب- شوری- عملکرد در ذرت علوفه ای در استان خراسان رضوی. آبیاری و زهکشی ایران. ۴(۷): ۵۴۳-۵۳۵.
۱۳. عبدزاهد گوهری، ع.، امیری، ا. و عزیززاده، ا. (۱۳۹۴). تخمین تابع تولید و کارایی مصرف آب در گیاه بادمجان تحت شرایط آبیاری قطره ای و کود نیتروژن. حفاظت منابع آب و خاک. ۵(۱): ۵۳-۴۲.
۱۴. کیانی، ع. و عباسی، ف. (۱۳۸۹). ارزیابی تابع تولید آب- شوری گندم در استان گلستان. آبیاری و زهکشی ایران، ۵۸: ۴۵۵-۴۴۵.
۱۵. کیانی، ع.، همایی، م. و میرلطیفی، م. (۱۳۸۵). ارزیابی توابع کاهش عملکرد گندم در شرایط توأم شوری و کم آبی. علوم آب و خاک. ۲۰(۱): ۸۳-۷۳.
۱۶. گنجعلی، ح.، کمالی جو، ا. و عزیزیان شرمه، ع. (۱۳۹۶). خصوصیات رشدی و عملکرد چای ترش در سطوح مختلف نیتروژن، فسفر و پتاسیم در شرایط آب و هوایی سراوان. بوم شناسی گیاهان زراعی. ۱۳(۱): ۳۷-۲۹.
۱۷. موسوی فضل، ح.، اخیانی، ا. و عطاردی، ا. (۱۳۹۶). اثر آب آبیاری و کود پتاسیم بر عملکرد سورگوم علوفه ای با هدف تعیین تابع تولید آب کود (رقم پگاه). علوم و مهندسی آبیاری اهواز، ویژه نامه بهار، ۴۰(۱-۱): ۹۷-۸۳.
۱۸. نادریان فر، م. (۱۳۹۵). تعیین تابع تولید گیاه ریحان تحت شرایط کم آبیاری و استفاده از نانو کود. آبیاری و زهکشی ایران. ۳(۱۰): ۳۷۶-۳۶۵.
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.). *American Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*, 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. Homae, 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 efficiency 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.