



مدیریت آب و آبیاری

(نشریه علمی)

دوره ۱۱ ■ شماره ۲ ■ تابستان ۱۴۰۰

صفحه‌های ۳۱۵-۳۲۴

DOI: 10.22059/jwim.2021.312061.834

مقاله پژوهشی:

تعیین کارایی مصرف آب و تابع تولید آب-نیترژن برای گیاه تربچه

سلیمان خیام^۱، محمود مشعل^۲، ساسان علی نیائی‌فرد^۳، مریم وراوی‌پور^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران.

۳. استادیار، گروه علوم باغبانی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۹

چکیده

بحران آب یکی از مهم‌ترین مشکلات در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران می‌باشد. هم‌چنین در این مناطق مصرف بی‌رویه کود عواقب زیست‌محیطی شدیدی را ایجاد نموده است. در چنین شرایطی ارزیابی واکنش گیاهان به تنش آبی و مقدار کود و تخمین تابع تولید جهت مصرف بهینه آب و کود اجتناب‌ناپذیر است. هدف از پژوهش حاضر تعیین ارتباط عملکرد، عمق آبیاری و کود نیترژن گیاه تربچه می‌باشد. بدین منظور یک پژوهش در سال ۹۸ در یکی از گلخانه‌های تحقیقاتی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، به اجرا در آمد. آزمایش در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی با دو تیمار عمق آبیاری و کود نیترژن در سه تکرار انجام گرفت. در این پژوهش، چهار سطح آبیاری شامل ۱۲۰ (I₁)، ۱۰۰ (I₂)، ۸۰ (I₃) و ۶۰ (I₄) درصد آب موردنیاز گیاه تربچه استفاده شد. سطوح کود نیترژن شامل ۱۲۰ (N₁)، ۱۰۰ (N₂)، ۸۰ (N₃) و ۶۰ (N₄) درصد نیاز کودی گیاه تربچه بود. در این پژوهش از چهار تابع خطی ساده، کاب داگلاس، درجه دوم و متعالی برای تعیین تابع تولید آب-نیترژن گیاه تربچه استفاده شد. نتایج نشان داد که تابع تولید درجه دوم عملکرد خشک تربچه را با دقت بالاتری برآورد می‌نماید. هم‌چنین نتایج نشان داد که با کاربرد تیمارهای آبیاری I₃ (۱۴۲ میلی‌متر) و کود نیترژنی N₂ (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) بیش‌ترین عملکرد و کارایی مصرف آب به‌دست آمد.

کلیدواژه‌ها: اجزای عملکرد، تابع تولید، تنش آبی، کارایی مصرف آب.

Determination of water use efficiency and water-nitrogen production function for Radish crop

Soleiman Khayyam¹, Mahmoud Mashal^{2*}, Sassan Ali Niaiefard³, Maryam Vravipour²

1. M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Aburairhan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Associate Professor, Department of Water Engineering, Aburairhan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.

3. Assistant Professor, Department of Horticultural, Aburairhan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.

Received: November, 09, 2020

Accepted: August, 14, 2021

Abstract

Water crisis is one of the most important problems in arid and semi-arid areas such as Iran. Also, in these areas indiscriminate use of nitrogen fertilizer has had severe environmental consequences. Thus, assessment of plant responses to water stress, the amount of nitrogen and, estimation of production function for determining optimal use of water and fertilizer is inevitable. The objective of this study was to investigate the interrelations of yield, irrigation depth and, applied nitrogen fertilizer of Radish (*Raphanus sativus* L.). For this purpose, the study was conducted in the College of Aburairhan (Southeast Tehran, Pakdasht, Iran) in 2020. Experiment was arranged based on randomized complete block design with two treatments of nitrogen fertilizer and irrigation water depths with three replications. In this study the Levels of irrigation depth were 120% (I₁), 100% (I₂), 80% (I₃) and 60% (I₄) of irrigation requirement the levels of applied nitrogen fertilizer were 120% (N₁), 100% (N₂), 80% (N₃) and, 60% (N₄) of nitrogen use requirement. In this study four equations of linear, Cobb-Douglas, quadratic and transcendental were used to determine the water-nitrogen production function production. The results showed that the quadratic equation simulates the dry yield of radish with a higher accuracy. The results showed also, the I₃ (142 mm) and N₂ nitrogen (150 Kg per hectare) treatments, were yielded the highest yield and irrigation water use efficiency.

Keywords: Production function, Water stress, Water use efficiency, Yield components.

مقدمه

آب مهم‌ترین منبع مورد نیاز جامعه بشری است و موضوع چگونگی حفظ این منبع حیاتی و بهره‌برداری بهینه از آن به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن حاضر است (Brevedan & Egli, 2003). بخش کشاورزی با مصرف ۸۰ تا ۸۵ درصد از منابع آب در مقایسه با متوسط مصرف جهانی که حدود ۷۰ درصد می‌باشد، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب است. بنابراین مصرف بهینه و افزایش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی به‌عنوان مهم‌ترین بخش مصرف‌کننده آب حائز اهمیت می‌باشد (Esmaili et al., 2019). در کشور ایران اقلیم خشک و نیمه‌خشک بیش‌تر مناطق را تحت تأثیر قرار داده و به‌خصوص خشکسالی‌های اخیر بر مشکل کم‌آبی افزوده است. بهبود کارایی مصرف و استفاده بهینه از منابع آب به‌عنوان یکی از محورهای اصلی کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک مطرح است (Ahmadi & Saraeilani et al., 2020). یکی از شاخص‌های مورد استفاده در مباحث عملکرد گیاه-آب مصرفی، افزایش بهره‌وری از آب است که به‌صورت نسبت عملکرد محصول به مقدار آب مصرفی تعریف می‌شود (Fathi & Soltani, 2012). در شرایط بحران کمبود آب، افزایش بهره‌وری آب مصرفی گیاه و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی کاربرد کودهای نیتروژنه، کلیدی‌ترین راه‌کار برای تأمین نیاز غذایی جمعیت در حال رشد جهان است (Bastiaanssen & Steduto, 2017). برای مصرف بهینه و سازگاری با کمبود منابع آبی، کاربرد روش‌های مدیریتی نوین و استراتژی‌های آبیاری مناسب از اهمیت زیادی برخوردار است. به‌طورکلی، کمبود منابع آبی در جهان، نیاز به تغییر نگرش از بیشینه‌سازی تولید در واحد سطح به بیشینه‌سازی تولید در واحد آب مصرفی را بیش از پیش نمایان نموده است (Evans & Sadler, 2008).

کم‌آبیاری یک راهبرد بهینه‌سازی است که در آن آگاهانه به گیاهان اجازه داده می‌شود با دریافت آب کم‌تر از نیاز، محصول خود را کاهش دهند (Mashal et al., 2008; Fathi & Soltani, 2012). کم‌آبیاری، کاربرد عامدانه آب آبیاری به میزانی کم‌تر از مقدار تبخیر-تعرق پتانسیلی است که برای حصول عملکرد حداکثر، مورد نیاز گیاه می‌باشد (English et al., 2002) که موجب افزایش کارایی مصرف آب می‌شود، زیرا در این حالت آب آبیاری مصرف‌شده کم‌تر از آب تخلیه‌شده از خاک توسط فرایند تبخیر-تعرق است و در نتیجه تمام آب آبیاری در ناحیه ریشه باقی می‌ماند (Feres et al., 2007; Mashal et al., 2008).

در مناطق خشک و نیمه‌خشک مقدار رطوبت و مواد غذایی خاک از عوامل اصلی محدودکننده عملکرد گیاه هستند، به‌همین دلیل باید بین مصرف کود مورد نیاز گیاه و آب کاربردی، تعادل برقرار باشد. نیتروژن یکی از مهم‌ترین مواد مغذی در سامانه‌های تولید گیاهی است (Shapiro et al., 2003). نیاز گیاه به نیتروژن در طول فصل رشد متفاوت است. گیاهی که این عنصر را به اندازه کافی نداشته باشد، رشد آن کاهش یافته و به‌شدت روی عملکردش تأثیر می‌گذارد (Asadi et al., 2018). به‌طورکلی تأثیر آب و کود نیتروژن بر رشد گیاه به‌صورت هم‌سازگار می‌باشد. از یک‌سو راندمان پایین آبیاری تأثیر مصرف کود بر افزایش عملکرد گیاهان را محدود می‌کند، به‌طوری‌که مصرف بیش از حد آب منجر به کاهش عملکرد و آبشویی نترات به خارج از ناحیه ریشه می‌شود (Fu et al., 2014). از سوی دیگر اعمال مقادیر بیش از حد نیاز نیتروژن و یا کم‌تر از آن از طریق ایجاد تأخیر در بلوغ یا افزایش شیوع بیماری‌ها و اختلالات فیزیولوژیکی موجب کاهش محصول شده و کارایی مصرف آب را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Zhai & Li, 2003; Rahn, 2000).

ناکافی کود استفاده می‌کنند که منجر به کاهش محصول به‌دلیل بیماری و حمله آفت و حشرات می‌شود (Alam et al., 2013). نیترژن در ارتباط با دیگر ورودی‌ها و شرایط، برای رشد تربچه بسیار مهم است (Sawyer et al., 2015) و بازده تربچه را افزایش می‌دهد (Jawad et al., 2015). نتایج یک پژوهش حاکی از آن است که افزایش سطح نیترژن از ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار، بر پارامترهای رشد و عملکرد تربچه تأثیر مثبت می‌گذارد. هم‌چنین عملکرد غده برای سه تیمار نیترژن صفر، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب ۴۵/۶۴، ۶۴/۰۰ و ۷۲/۶۰ تن در هکتار به‌دست آمد (Baloch et al., 2014). در پژوهشی، Ghanti et al. (1997) عملکرد تربچه در سطوح مختلف نیترژن را موردبررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که نیترژن به‌طور قابل‌توجهی بر عملکرد تربچه، طول برگ و ریشه، قطر غده و تعداد غده در هکتار تأثیر می‌گذارد. بیش‌ترین عملکرد تربچه (۳۶۹/۴۰ کیلوگرم در هکتار) با مصرف ۱۰۰ کیلوگرم نیترژن حاصل شد (Jilani et al., 1997). نتایج مطالعه اثرات کم‌آبیاری تنظیم‌شده و سطوح مختلف کود نیترژنی بر چغندر قند نشان داد که تأثیر تیمارهای آبیاری و کودی بر عملکرد ریشه و درصد قند معنی‌دار بوده و بیش‌ترین عملکرد ریشه در تیمار آبیاری بدون تنش با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیترژن حاصل شد (Esmaeili & Yaseri, 2011). به‌منظور تعیین تابع تولید آب و کود نیترژن برای گیاه پیاز در سه روش آبیاری (جوی و پشته، قطره‌ای سطحی و زیرسطحی) پژوهشی در مزرعه تحقیقاتی در زهک سیستان و بلوچستان انجام گرفت. در این پژوهش تابع درجه دوم، به‌عنوان بهترین تابع تولید برای پیاز از بین چهار تابع تولید (خطی، لگاریتمی، درجه دوم و متعالی) در هر سه روش آبیاری انتخاب شد (Piri, 2017).

هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثرات آب و نیترژن بر عملکرد گیاه تربچه و برآورد تابع تولید آب-نیترژن با

برای تعیین شاخص بهره‌وری آب از تابع عملکرد استفاده می‌شود. این تابع رابطه بین محصول قابل‌فروش در مقابل آب مصرفی در طی فصل آبیاری را نشان می‌دهد. تابع تولید به‌عنوان یک مفهوم کلی و کاربردی، رابطه‌ای بین واکنش (کمی یا کیفی) گیاه به پارامترها و نهاده‌های مختلف تولید (آب، کود، خاک، انرژی و سایر شرایط و عوامل زراعی) است. می‌توان، تابع تولید را رابطه‌ای ریاضی بین میزان آب مصرفی و کل تولید ماده خشک در نظر گرفت (Sohrabi et al., 2006).

از اهداف توسعه کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک دستیابی به عملکرد و کارایی مصرف آب بالا می‌باشد. از این‌رو، تحلیل و ارزیابی مقادیر بهینه آب و کود مصرفی از طریق توابع تولید آب-نیترژن، به‌منظور افزایش عملکرد و کارایی مصرف آب، موضوعی با اهمیت در صرفه‌جویی آب کشاورزی قلمداد می‌شود (Liu & Zhang, 2007). آنچه در کم‌آبیاری همراه با مقادیر متفاوت نیترژن حائز اهمیت است، بهینه‌سازی مصرف آب و تعیین حد بهینه نیترژن به‌صورت هم‌زمان است که در این پژوهش موردبررسی قرار می‌گیرد.

سبزیجات از تولیدات کشاورزی مهم می‌باشند که مصرف آن برای مردم ضروری است و صنایع مربوط به سبزیجات از مهم‌ترین صنایع مرتبط با اقتصاد ملی و معیشت مردم هستند (Yousaf et al., 2021). تربچه (*Raphanus sativus* L.) یک سبزی غده‌ای متعلق به خانواده *Brassicaceae* است. تربچه یک گیاه علفی است که ممکن است به ریشه تغییر یافته زیرزمینی منسوب باشد و به شکل فوزیفرم^۱ است. تولید جهانی تربچه حدود ۷ میلیون تن در سال تخمین زده می‌شود که تنها دو درصد آن در میان سبزیجات است. مقدار کافی کود نیترژنه برای کشت بهتر، واکنش آن به نهاده‌ها و نیز اثرات زیست‌محیطی موردنیاز است (Davidson et al., 2015). معمولاً کشاورزان از مقدار

(N_1) ، 100 ، (N_2) ، 80 ، (N_3) و 60 (N_4) درصد نیاز کودی به صورت تصادفی در داخل هر تیمار آبیاری توزیع شدند. براساس نتایج حاصله از پژوهش‌های انجام گرفته، کاربرد 150 کیلوگرم در هکتار کود نیتروژنی حد مناسبی برای رشد تربچه است (Jawad et al., 2015; Guvenc, 2002).

کشت نشا در تاریخ $98/10/16$ در سینی کشت با بستر کوکوپیت پرلیت انجام گرفت. برای انتخاب نشا سالم، 10 درصد بذر بیش تر کشت شد. بذرها بعد از 8 روز، شروع به جوانه زنی کردند. برای بهبود وضعیت نشا، دو بار از محلول هوگلند^۲ (نخست با غلظت $0/5$ و بار دوم با غلظت کامل) استفاده شد. نشاها بعد از رسیدن به مرحله چهاربرگی، در $98/11/09$ به گلدان منتقل شدند.

از آنجاکه این پژوهش شامل چهار تیمار آبیاری و چهار تیمار کودی در سه تکرار بود، لذا 48 گلدان تهیه شد. پس از آماده سازی گلدان‌ها، در هر گلدان تعداد شش نشا در عمق پنج سانتی متر و فواصل هشت سانتی متری قرار داده شد. با استفاده از برچسب، گلدان‌ها تیمار بندی شدند. دور آبیاری ثابت و برابر سه روز در نظر گرفته شد.

آب مورد نیاز هر گلدان در هر نوبت آبیاری برای رساندن رطوبت خاک به حد ظرفیت زراعی از رابطه زیر محاسبه شد:

$$W_{aw} = W_d \times \left(\theta_{fc} - \frac{W_{ty} - W_t}{W_d} \right) \quad (1)$$

که در آن W_d وزن خاک خشک درون گلدان در ابتدای آزمایش (kg)، θ_{fc} رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت زراعی (gg^{-1})، W_t وزن گلدان و محتویات آن قبل از آبیاری (kg)، W_{ty} وزن گلدان و محتویات آن بعد از آبیاری قبلی (kg) و W_{aw} مقدار آب قابل استفاده (kg) می‌باشند. با توجه به چگالی یک گرم در سانتی متر مکعب آب، هر گرم آب معادل رطوبت یک سانتی متر یا ده میلی متر عمق آبیاری است.

شکل‌های تابعی مختلف می‌باشد. همچنین تعیین بهترین برازش تابع بروی داده‌ها و در نهایت مقایسه دو راهبرد کم‌آبیاری و آبیاری کامل برای تیمارهای مختلف نیتروژن و نقش آن در افزایش تولید محصول نیز از اهداف دیگر این پژوهش است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه تحقیقاتی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران در سال زراعی 1398 انجام شد. این گلخانه در طول جغرافیایی 51 درجه و 48 دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی 35 درجه و 28 دقیقه شمالی ($51^\circ 48'E$ ، $35^\circ 28'N$) و ارتفاع از سطح دریا 1021 متر واقع است. این پژوهش روی گیاه تربچه در یک فصل کشت اجرا شد.

ابتدا کشت به صورت نشا در سینی کشت با بستر کوکوپیت پرلیت انجام گرفت. سپس نشاها بعد از رسیدن به مرحله چهاربرگی به گلدان منتقل شدند. برای انتقال نشا، از گلدان با قطر 20 سانتی متر استفاده شد. گلدان‌ها از خاک مزرعه کنار گلخانه پر شدند. به منظور تعیین بافت خاکی که با آن گلدان‌ها پر می‌شد تا عمق 20 سانتی متری از خاک مزرعه نمونه برداری شد و میزان رس، سیلت و شن موجود در خاک به روش هیدرومتری اندازه گیری شد. سپس با استفاده از مثلث بافت خاک، نوع بافت خاک هر لایه تعیین شد، همچنین با استفاده از دستگاه صفحات فشاری رطوبت ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی تعیین و چگالی ظاهری آن‌ها نیز اندازه گیری شد که نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده است.

این پژوهش در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی با سه تکرار مورد ارزیابی قرار گرفت. تیمارهای آبیاری مورد بررسی در چهار سطح شامل 120 ، (I_1) ، 100 ، (I_2) ، 80 ، (I_3) و 60 درصد نیاز آبی اعمال شد و تیمارهای نیاز کود نیتروژنی گیاه تربچه نیز در چهار سطح شامل 120

Table 1. Physical properties of soil in the experimental site

Layer depth (cm)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Soil texture	FC weight (%)	PWP weight (%)	B ρ (g/cm ³)
0-10	15.2	26.6	58.2	Sandy Loam	21	10	1.56
10-20	12.4	25.4	62.2	Sandy Loam	22	11	1.46

شد. شاخص‌های آماری ضریب تعیین، ریشه میانگین مربعات خطای برآورد، خطای انحراف میانگین و بهترین تابع تولید از بین معادلات ۲ تا ۵، با استفاده از داده‌های این پژوهش تعیین شد. با بهینه‌سازی تابع منتخب برای گیاه تربچه، بهترین سطح کم‌آبیاری و کود نیتروژن برآورد شد.

ضرایب توابع تولید با استفاده از دستور Solver در نرم‌افزار Excel محاسبه شد. برای ارزیابی دقت مدل‌ها در تخمین و شبیه‌سازی عملکرد، شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای انحراف میانگین (MBE) به کار گرفته شد:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y - \bar{y})(\hat{y} - \bar{\hat{y}})}{\sum_{i=1}^N (y - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^N (\hat{y} - \bar{\hat{y}})^2} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y - \hat{y})^2} \quad (7)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y - \hat{y}) \quad (8)$$

در این رابطه‌ها، y و \bar{y} به ترتیب مقادیر عملکرد اندازه‌گیری شده و میانگین آن، \hat{y} و $\bar{\hat{y}}$ نیز به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد و میانگین آن برای تعداد N نمونه می‌باشند.

به منظور تجزیه و تحلیل‌های آماری در این پژوهش، از نرم‌افزار R استفاده شد.

نتایج و بحث

توابع تولید خطی، کاب داگلاس، درجه دوم و متعالی ماده خشک اندازه‌گیری شده، به ترتیب به صورت معادله‌های (۹)، (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) نمایش داده شده است:

مقدار آب آبیاری برای تیمار آبیاری کامل در جدول (۲) نمایش داده شده است.

Table 2. Irrigation rates in different days for full irrigation treatment (mm)

Irrigation depth	Irrigation event	Irrigation date	Days after displacement
15	1	29/01/2020	-
15	2	01/02/2020	3
15	3	04/02/2020	6
15	4	07/02/2020	9
16	5	10/02/2020	12
16	6	13/02/2020	15
16	7	16/02/2020	18
17	8	19/02/2020	21
17	9	22/02/2020	24

توابع تولید با استفاده از داده‌های آزمایشی با شکل‌های تابعی ساده، کاب-داگلاس، درجه دوم و متعالی به صورت زیر بیان می‌شود:

تابع خطی

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

تابع کاب-داگلاس

$$Y = a_0 I^{a_1} N^{a_2} \rightarrow \ln(Y) = \ln(a_0) + a_1 \ln(I) + a_2 \ln(N) \quad (3)$$

تابع درجه دوم

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

تابع متعالی

$$Y = a_0 I^{a_1} N^{a_2} \exp(a_3 I + a_4 N) \rightarrow \ln(Y) = \ln(a_0) + a_1 \ln(I) + a_2 \ln(N) + a_3 I + a_4 N \quad (5)$$

که a_i ضرایب تجربی، I میزان آب آبیاری (میلی‌متر)، N نیتروژن مصرف شده (کیلوگرم در هکتار) و Y میزان عملکرد (کیلوگرم در هکتار) است.

تفاوت بین تیمارهای کم‌آبیاری و کود نیتروژن از نظر معنی‌دار بودن یا نبودن با انجام آزمایش‌های آماری بررسی

درجه دوم، نسبت به توابع تولید خطی، کاب-داگلاس و متعالی مقدار عملکرد خشک محصول تربچه با متغیرهای عمق آب آبیاری و مقدار کود نیتروژن را با دقت بالاتر برآورد می‌نماید. در پژوهشی Bahramloo & Nseri (2010) با بهره‌گیری از رگرسیون چندگانه و روش حداقل مربعات خطا، تابع تولید محصول سیب‌زمینی به‌ازای آب مصرفی به‌صورت تابع درجه دوم به‌دست آوردند. هم‌چنین نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب تبیین (R^2) تابع تولید تعیین‌شده، بیش از ۹۹ درصد بوده است که نشان داد مدل تابع برازش داده‌شده آن‌ها، تغییرات عملکرد را توسط آب مصرفی توجیه می‌کند. نتایج بررسی‌ها نشان داده که در حالت تابع تولید درجه دوم، حساسیت گیاه نسبت به آب مصرفی بیش‌تر بوده و جزییات بیش‌تری از روابط تبخیر-تعرق، کارایی مصرف آب و عملکرد را به‌دست می‌دهد، لذا این تابع معرف بهتری از رابطه مقدار محصول تولیدی و تبخیر-تعرق گیاه می‌باشد. هم‌چنین شکل درجه دوم تابع تولید دارای ضریب همبستگی بالاتری می‌باشد (Hamzehzade et al., 2011). به‌نظر می‌آید توابع خطی، کاب-داگلاس و متعالی قادر به توجیه رفتار پیچیده تابع تولید نبوده و توانایی مدل نمودن تأثیر متقابل آب و نیتروژن به‌عنوان ورودی در تغییرات عملکرد را ندارند.

باید توجه داشت که عملکرد تحت تأثیر عوامل متعددی نظیر اقلیم، نوع سامانه آبیاری، آرایش کاشت، تاریخ کاشت و رقم می‌باشد. در نتیجه توابع تولید معرفی‌شده در این پژوهش فقط یک برآورد از رابطه واقعی است. از این‌رو، لازم است تابع تولید با توجه به شرایط اقلیمی خاص منطقه محاسبه شود.

نتایج تجزیه واریانس عملکرد و اجزای عملکرد تربچه در جدول (۴) ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود اثر سطوح مختلف آب و نیتروژن بر اجزای عملکرد، قطر غده و کارایی مصرف آب تربچه در سطح ۱ درصد معنی‌دار شده است.

$$Y = 475.805 + 2.416 I + 10.245 N \quad (9)$$

$$Y = 48.025 I^{0.168} N^{0.614}$$

$$\rightarrow \ln(Y) = \ln(48.025) + 0.168 \ln(I) + 0.614 \ln(N) \quad (10)$$

$$Y = 9460.97 + 92.827 I - 0.352 I^2 + 81.508 N - 0.263 N^2 - 0.003 IN \quad (11)$$

$$Y = 52.533 I^{0.867} N^{-0.064} \text{Exp}(-0.006 I + 0.005 N)$$

$$\rightarrow \ln(Y) = \ln(52.533) + 0.867 \ln(I) - 0.064 \ln(N) - 0.006 I + 0.005 N \quad (12)$$

که در آن که a_i ضرایب تجربی، I میزان آب آبیاری برحسب میلی‌متر، N نیتروژن مصرف‌شده برحسب کیلوگرم در هکتار و Y میزان عملکرد خشک محصول برحسب کیلوگرم در هکتار است.

در جدول (۳)، مقادیر شاخص‌های آماری میانگین مربعات خطا (MBE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) برای توابع تولید عملکرد خشک زیست‌توده ارائه شده است.

Table 3. Statistical indices of MBE, RMSE and R^2 for dry biomass yield production functions

Production function	RMSE (kg/ha)	MBE (kg/ha)	R^2
Linear	454.27	-5.67	0.37
Cobb-Douglas	443.78	-3.25	0.41
Quadratic	264.88	5.09	0.79
Transcendent	438.71	-10.70	0.43

نتایج جدول (۳) بیانگر این مطلب است که تابع تولید درجه دوم، مقدار عملکرد محصول را با دقت بالاتری تخمین می‌زند. همان‌طور که مشاهده می‌شود میانگین خطای اریب (MBE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به‌عنوان شاخص‌های خطا در تابع تولید متعالی نسبت به سایر توابع کم‌تر است. هم‌چنین ضریب تبیین (R^2) که بیانگر ارتباط میان مقادیر اندازه‌گیری‌شده و مقادیر مدل‌سازی‌شده است در تابع درجه دوم، بیش‌تر از سایر توابع می‌باشد. با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده می‌توان استنباط کرد که تابع تولید

تعیین کارایی مصرف آب و تابع تولید آب-نیتروژن برای گیاه تربچه

مشاهده جدول (۵) نشان می‌دهد که در شرایط کم‌آبیاری، افزایش مصرف کود نیتروژنی تأثیر معنی‌داری بر قطر غده و کارایی مصرف آب ندارد که احتمالاً به دلیل تأثیر منفی نیتروژن اضافی بر عملکرد باشد (Badr *et al.*, 2012). در شرایط تنش آبی شدید، با افزایش مصرف نیتروژن، بازدهی مصرف آن کاهش می‌یابد (Darwish *et al.*, 2006). مشاهده شده است که کارایی مصرف آب حداکثر به میزان ۲۷۶ (کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر) در مقدار آب آبیاری برابر ۴۰ درصد نیاز آبی محصول سیب‌زمینی و مصرف ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژنی حاصل می‌شود و بیش‌آبیاری منتج به حصول کم‌ترین مقادیر کارایی مصرف آب می‌شود (Fathi & Soltani, 2012). نتایج آزمایشی دو ساله روی سویا به‌منظور صرفه‌جویی در مصرف آب، حاکی از افزایش راندمان استفاده از آب و داشتن عملکرد بالاتر با مقدار آب یکسان در تیمار آبیاری ۷۵ درصد آبیاری کامل بود (Gercak *et al.*, 2009)، که این نتیجه با نتایج این پژوهش مشابهت دارد.

Table 5. Comparison of average gland diameter and water use efficiency of radish in different irrigation and nitrogen treatments

Nitrogen treatment	Irrigation treatment	Water use efficiency (Kg/m ³)	Gland diameter (mm)
N ₁	I ₁	1.273 fg	24.8 efgh
	I ₂	1.706 cd	26.9 def
	I ₃	2.349 b	31.4 b
	I ₄	2.256 b	21.3 j
N ₂	I ₁	1.581 de	25.5 efgh
	I ₂	2.136 c	27.7 cde
	I ₃	2.987 a	34.4 a
	I ₄	2.685 ab	22.9 ij
N ₃	I ₁	1.098 gh	24.4 ghi
	I ₂	1.464 de	26.4 defg
	I ₃	2.092 c	29.8 bc
	I ₄	1.763cd	19.0 k
N ₄	I ₁	0.861 h	23.9 hi
	I ₂	1.171 g	26 defgh
	I ₃	1.746 c	28.2 cd
	I ₄	1.364 ef	15.6 l

Different letters in each row indicate values significantly different at $P < 0.01$ according to a Tukey test. N₁, N₂, N₃ and N₄ represent 120, 100, 80 and 60 percent of nitrogen requirement. I₁, I₂, I₃ and I₄ represent 120, 100, 80 and 60 of irrigation requirement.

هم‌چنین گزارش شده است که مصرف ۹۰ کیلوگرم نیتروژن و آبیاری به مقدار ۷۵ درصد تبخیر-تعرق پتانسیل

Table 4. Results of analysis of variance for yield and yield components of radish

Variation resources	Freedom degree	Gland diameter	Water use efficiency
Irrigation	3	261.39**	2.72**
Nitrogen	3	37.83**	2.44**
Irrigation×Nitrogen	9	5.28**	0.05**
Measurement error	32	0.60	0.008

** : Significance at 1% of probability level, ns no significance.

مقایسه میانگین اندازه قطر غده و کارایی مصرف آب گیاه تربچه در تیمارهای مختلف آبیاری و نیتروژن در جدول (۵) آورده شده است. براساس نتایج حاصل از جدول (۵) بیش‌ترین و کم‌ترین قطر غده به‌ترتیب به تیمارهای I₃N₂ (۸۰ درصد نیاز آبی گیاه و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن) و I₄N₄ (۶۰ درصد نیاز آبی گیاه و ۹۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن) اختصاص داشت.

اثر سطوح آبیاری، نیتروژن و برهم‌کنش آن‌ها بر کارایی مصرف آب در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. با کاهش مصرف نیتروژن، از حد بالای نیاز (۱۰۰ درصد نیاز) کارایی مصرف آب کاهش یافت. می‌توان گفت با افزایش مصرف نیتروژن از ۶۰ درصد تا ۱۰۰ درصد نیاز نیتروژن کارایی مصرف آب افزایش می‌یابد. افزودن بیش از حد نیاز (۱۲۰ درصد) نه تنها کارایی مصرف آب را افزایش نداده که حتی باعث کاهش آن نیز می‌شود. در شرایط تنش ملایم خشکی، با افزایش کاربرد نیتروژن (I₃N₂) کارایی مصرف آب افزایش می‌یابد. مصرف بهینه آب و کود نیتروژن باعث افزایش عملکرد و در نتیجه کارایی مصرف آب می‌شود. نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۵) نشان داد که کارایی مصرف آب در شرایط آبیاری ۸۰ درصد نیاز آبی با مقدار کود مصرفی ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار با میانگین ۲/۹۸۷ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست آمد. نتایج بسیاری از مطالعات نشان داد که تنش آبی متوسط می‌تواند کارایی مصرف آب را بهبود ببخشد (Chen *et al.*, 2013; Dijkstra *et al.*, 2016; Tognetti *et al.*, 2004; Qiu *et al.*, 2015; Giuliani *et al.*, 2018).

مقایسه مقادیر کارایی مصرف آب حداکثر و کارایی مصرف آب در تیمار I_3N_2 و I_4N_2 نشان داد که با کاهش ۲۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی، میزان کارایی مصرف آب به ترتیب حدود ۴۰ و ۳۶ درصد افزایش نشان داد. میزان کاهش کارایی مصرف آب تیمار I_1N_2 نسبت به تیمارهای I_3N_2 و I_4N_2 به ترتیب حدود ۴۷ و ۴۱ درصد بود. پژوهشگران تأثیرات مثبت کاربرد نیتروژن بر عملکرد غده تربچه را به نقش حیاتی آن در بهبود فرایندهای فیزیولوژیکی گیاه مانند تقسیم سلولی، تطویل یا کشیدگی سلولی، فرایندهای متابولیکی و همچنین افزایش فتوسنتز از طریق افزایش تعداد برگها و همچنین افزایش اندازه گیاه نسبت داده‌اند (Satari et al., 2020; Tripathi et al., 2017).

نتیجه گیری

برای تعیین مقادیر بهینه آب و نیتروژن کاربردی جهت دستیابی به بهترین میزان کارایی مصرف آب گیاه تربچه پژوهشی در یکی از گلخانه‌های تحقیقاتی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران انجام شد. به منظور تعیین این مقادیر بهینه چهار تابع خطی، کاب-داگلاس، درجه دوم و متعالی بر نتایج به دست آمده برازش داده شد. بهینه‌سازی آب و نیتروژن نشان داد که تابع تولید مناسب برای شبیه‌سازی تأثیر آب و نیتروژن مصرفی بر عملکرد غده تربچه، مدل درجه دوم می‌باشد که مقدار خطای استاندارد کمتری در مقایسه با سایر مدل‌ها دارد. نتایج مدل درجه دوم تحت شرایط تنش آب-نیتروژن برای تربچه نشان داد که مقدار آب کاربردی ۱۴۲ میلی‌متر و مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، بیش‌ترین کارایی مصرف آب را دارد.

پی‌نوشت‌ها

1. Fusiform
2. Hoagland

باعث افزایش ۴ درصدی عملکرد سیر و افزایش ۳۰ درصدی کارایی مصرف آب شد (Tayel et al., 2010). برخی از گزارش‌ها حاکی از این است که صرف‌نظر از تیمار آبیاری، با افزایش مقدار نیتروژن به مقدار معین، عملکرد غده سیب‌زمینی شروع به کاهش نموده و با افزایش بیش‌تر این عملکرد ثابت مانده و یا دچار نوسان می‌شود (Ferreira & Goncalves, 2007).

مقایسه میانگین‌های قطر غده تربچه نشان داد که در اثر تنش ملایم آبیاری (۸۰ درصد نیاز آبی گیاه) نسبت به تیمار بدون تنش، قطر غده حدود ۲۱ درصد افزایش داشته است. این افزایش قطر ممکن است به علت رقابت بیش‌تر غده و اندام هوایی در جذب نیتروژن در شرایط محدودیت آب قابل‌دسترس نسبت به شرایط بدون تنش، جهت استفاده حداکثری و مطلوب از منابع موجود است. همچنین نتایج نشان داد که بین تیمارهای I_1N_1 (۱۲۰ درصد نیاز آبی و کاربرد ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن) و I_1N_2 (۱۲۰ درصد نیاز آبی و کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن) تفاوت معنی‌داری وجود ندارد.

در تمامی تیمارهای کودی، بالاترین میزان کارایی مصرف آب در تیمار I_3 به دست آمد و روند کلی تغییرات کارایی مصرف آب نزولی و کاهشی است. به‌طورکلی افزایش مصرف کود نیتروژن به بیش از میزان توصیه‌شده آن (تیمار شاهد، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) موجب افزایش کارایی مصرف آب نشد و به‌غیر از تیمار آبیاری I_1 که در آن مقادیر کارایی مصرف آب برای تیمارهای کودی N_1 و N_2 تقریباً مساوی است در سایر تیمارهای آبیاری، میزان کارایی مصرف آب با مصرف ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، کم‌تر از مقادیر متناظر آن برای مصرف کود نیتروژن کم‌تر از نیاز توصیه‌شده، بود. نتایج نشان داد که در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی تربچه، کارایی مصرف آب در تمام سطوح کودی بیش‌تر از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی با سطوح کودی متناظر است.

10. Darwish, T.M., Atallah, T.W., Hajhasan, S., & Haidar, A. (2006). Nitrogen and water use efficiency of fertigated processing potato. *Agricultural Water Management*, 85(1-2), 95–104.
11. Davidson, E.A., Suddick, E.C., Rice, C.W., & Prokopy, L.S. (2015). More food, low pollution (Mo Fo Lo Po): a grand challenge for the 21st century. *Journal of Environmental Quality*, 44(2), 305–311.
12. Dijkstra, F.A., Carrillo, Y., Aspinwall, M.J., Maier, C., Canarini, A., Tahaei, H., Choat, B., & Tissue, D.T. (2016). Water, nitrogen and phosphorus use efficiencies of four tree species in response to variable water and nutrient supply. *Plant and Soil*. 406(1/2), 187–199.
13. English, M.J., Solomon, K.H., & Hoffman, G. J. (2002). A paradigm shift in irrigation management. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(5), 267–277.
14. Esmaili, M.A., & Yaseri, E. (2011). Evaluation of the effects of water stress and different levels of nitrogen on sugar beet (*Beta Vulgaris*). *International Journal of Biology*, 3(2), 89–93.
15. Esmaili, M., Mashal, M., Alinaefard, S., & Azadegan, B. (2019). Effect of different light intensities on water use efficiency of lettuce under controlled conditions. *Journal of Water and Irrigation Management*, (9)1, 43–53. (In Persian).
16. Evans, R.G., & Sadler, E.J. (2008). Methods and technologies to improve efficiency of water use. *Water Resources Researches*, 44 (7), 1–15.
17. Fathi, P., & Soltani, M. (2012). Optimization of water use efficiency and yield in potato using marginal analysis theory. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 2(2), 85–93. (In Persian).
18. Fereres, E., & Soriano, M.A. (2007). Deficit irrigation for reducing agriculture water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147–159.
19. Ferreira, T.C., & Goncalves, D.A. (2007). Crop-yield/water-use production functions of potatoes (*Solanum tuberosum*, L.) grown under differential nitrogen and irrigation treatments in a hot, dry climate. *Agricultural water management*, 90(1-2), 45–55.
20. Fu, Q.P., Wang, Q. J, Shen X, L., & Fan, J. (2014). Optimizing water and nitrogen inputs for winter wheat cropping system on the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Land*. 6(2), 230–242.
21. Gercak, S., Boydak, E., Okant, M. & Dikilitas, M. (2009). Water pillow irrigation compared to furrow irrigation for soybean production in a semi-arid area. *Agricultural Water Management*, 96(1), 87–92.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Ahmadi Saraeilani, A., Mashal, M., Azadegan, B., & Kamali, P. (2020). Field evaluation of the effect of two superabsorbent polymers A200 and Stackosorb on hydraulic performance in furrow irrigation). *Journal of Water and Irrigation Management*, 10(2), 173–187. (In Persian).
2. Alam, M.M., Siwar, C., Jaafar, A.H., Talib B., & Salleh, K.B.O. (2013). Agricultural vulnerability and adaptation to climatic changes in Malaysia: Review on paddy sector. *Current World Environment*, 8(1), 1–12.
3. Asadi, L., Khoshravesh, M., PourGholam, M., Liaghat, A., & Youri, M. (2018). Estimation of soybean water-nitrogen production function. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 49(3), 672–665. (In Persian).
4. Badr, M.A., El-Tohamy, W.A., & Zaghloul, A.M. (2012). Yield and water use efficiency of potato grown under different irrigation and nitrogen levels in an arid region. *Agricultural Water Management*, 110, 9-15.
5. Bahramloo, R. & Naseri, A. (2010). Effect of deficit irrigation on yield and water use efficiency of potato cultivar santeh. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 4(10), 90–98. (In Persian).
6. Baloch, P.A., Riaz, U., Nizamani, F.K., Solangi, A.H., & Siddiqui, A.A. (2014). Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on growth and yield characteristics of radish (*Raphanus sativus* L.). *American-Eurasian Journal Agriculture and Environment Science*, 14 (6), 565–569.
7. Bastiaanssen, W. G. M., & Steduto, P. (2017). The water productivity score (WPS) at global and regional level: Methodology and first results from remote sensing measurements of wheat, rice and maize. *Science of Total Environment*, 75(1), 595–611
8. Brevedan, R. E., & Egli, D. B. (2003). Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence and yield of soybean. *Crop Science*, 43(6), 2083–2088
9. Chen, J.L., Kang, S.Z., Du, T.S., Qiu, R.J., Guo, P., & Chen, R.Q. (2013). Quantitative response of greenhouse tomato yield and quality to water deficit at different growth. Stages. *Agricultural Water Management*, 129, 152–162.

22. Giuliani, M.M., Carucci, F., Nardella, E., Francavilla, M., Ricciardi, L., Lotti, C., & Gatta, G. (2018). Combined effects of deficit irrigation and strobilurin application on gas exchange, yield and water use efficiency in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Scientia Horticulturae*, 233, 149–158.
23. Guvenc, I. (2002). Effect of nitrogen fertilization on growth, yield and nitrogen contents of radishes. *Gartenbauwissenschaft*, 67, 23–27.
24. Hamzehzadeh, M., Fathi, P., Javadi, T., & Hassani, A. (2011). The effect of different irrigation water levels on water use efficiency in basil plant (*Ocimum Basilicum* var. Keshkeny Levelu) using marginal analysis theory. *Journal of Water and Soil*, 25(5), 953–960. (In Persian).
25. Jawad, N., Nawaz, S., Hammad, H.M., Salik, M.R., & Farhad, W. (2015). Nitrogen and sowing method affect radish growth and yield under arid environments of Pakistan. *Science International*, 27(3), 2245–2250.
26. Jilani M.S., Burki T., & Waseem K. (2010). Effects of nitrogen on growth and yield of radish. *Journal of Agricultural Research*, 48(2), 219–225.
27. Liu, W. Z., & Zhang, X. C. (2007). Optimizing water and fertilizer input using elasticity index: A case study with Mize in the Loess plateau of china. *Field Crop Research*, 100, 302–310.
28. Mashal, M., Varavipour, M., Sadatnouri, S.A., & Zare-Zirak, E. (2008). Optimizing consumptive water depth for corn by deficit-irrigation (case study: Varamin area). *Agricultural research: Water, Soil and Plants in Agriculture*, 8 (4), 123–134. (In Persian).
29. Piri, H. (2017). Determination of water production function-nitrogen fertilizer and evaluation of indices of onion production in Zahak Sistan and Baluchestan region. *Journal of Water and Irrigation Management*, 7(2), 287–303. (In Persian).
30. Qiu, R.J., Du, T.S., Kang, S.Z., Chen, R.Q., & Wu, L.S. (2015). Influence of water and nitrogen stress on stem sap flow of tomato grown in a solar greenhouse. *Journal of American Society of Horticultural Science*, 140, 111–119.
31. Rahn, C.R. (2000). Nitrogen and field production of vegetable crops. *Acta Horticulturae*, 533, 361–370.
32. Satari, A.F., Srinivasa, V., Shivaprasad, M., & Ganapathi, M. (2020). Study on growth and root yield of radish (*Raphanus sativus* Lam.) as Influenced by nutrition. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(8), 2466–2471.
33. Sawyer, J., Nafziger, E., Randall, G., Bundy, L., Rehm, G., & Joern, B. (2015). Concepts and rationale for regional nitrogen rate guidelines for corn. Retrieved from www.extension.iastate.edu/Publications/2015.pdf
34. Shapiro, C.A., Ferguson, R.B., Ilergen, G.W., Dobcrmann, A.R., & Wortrann, C.S. (2003). Fertilizer suggestions for corn. University of Nebraska. NcbGuide 074-174-A. Lincoln,NE. <http://www.ianrpubs.unl.edu/sendlt/g174.pdf>
35. Sohrabi, Y., Shakiba, M. R., Abdollahian Noghabi, M., Rahimzadeh Khoii, F., Turchi, M., & Fotohi, K. (2006). Investigation of limited irrigation and root harvesting dates on yield and some of quality characteristics of sugar beet. *Pajouhesh-va-Sazandegi*, 70, 8–15. (In Persian).
36. Tayel, M.Y., EI- Dardiry, E.I., Shaaban, S.M., & Sabren, K.P. (2010). Effect of injector types and irrigation and nitrogen level On: III – cost analysis of garlic production. *Journal of Applied Science Research*, 6(7), 822–829.
37. Tognetti, R., d’Andria, R., Morelli, G., Calandrelli, D., & Fragnito, F. (2004). Irrigation effects on daily and seasonal variations of trunk sap flow and leaf water relations in olive trees. *Plant and Soil*, 263, 249–264.
38. Tripathi, A. K., Ram, R. B., Rout, S., Kumar, A., & Patra, S. S. (2017). Studies on the effect of nitrogen levels and spacing on quality traits of radish (*Raphanus ativus* L.) Cv. Kashi Sweta. *International Journal of Chemistry Studies*, 5(6), 537–540.
39. Yousaf, M., Bashir, S., Raza, H., Shah, A.N., Iqbal, J., Arif, M., Bukhari, M.A., Muhammad, S., Hashim, S., Alkahtani, J., Alwahibi, M.S., & Hu, C., (2021). Role of nitrogen and magnesium for growth, yield and nutritional quality of radish. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(5), 3021–3030.
40. Zhai, B. N., & Li, S. X. (2003). Effect of water and nitrogen cooperation on winter wheat yield and quality. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 9(1), 26–322.