

تخمین تابع تولید آب-نیتروژن دانه سویا

چکیده

با توجه به محدودیت منابع آب، کم‌آبیاری می‌تواند یکی از روش‌های مناسب در این شرایط باشد. هدف این پژوهش بهینه‌سازی مصرف آب و تعیین حد بهینه نیتروژن به صورت همزمان می‌باشد. در این پژوهش دو راهبرد کم‌آبیاری ۷۵ (I₂)، ۵۰ (I₃) و ۲۵ (I₄) درصد آب مورد نیاز و آبیاری کامل (I₁) و تیمارهای مختلف نیتروژن با کاربرد ۱۵۰ (N₁)، ۱۱۲/۵ (N₂) و ۷۵ (N₃) کیلوگرم در هکتار مورد استفاده قرار گرفت. بهینه‌سازی آب و نیتروژن نشان داد که از میان توابع تولید خطی ساده، کاب داگلاس، درجه دوم و متعالی، تابع تولید مناسب سویا، مدل متعالی می‌باشد. میزان بهینه آب و نیتروژن تحت شرایط تنش آب-نیتروژن برای گیاه سویا در دو سال به ترتیب ۲۳۰ و ۲۱۶/۵ میلی‌متر آب و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن برآورد شد. نتایج نشان داد، تیمار N₃ در روش کم‌آبیاری (I₂) نسبت به روش آبیاری کامل، ۳۳/۲۸٪ افزایش تولید داشته است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، عملکرد، کم‌آبیاری، مدل متعالی.

مقدمه

محدودیت منابع آب، افزایش جمعیت و تلاش در راستای حذف و یا بهبود کشاورزی کم‌بازده و رشد کشاورزی نوین، سبب شده است تا ارزش نهاده‌های تولید و جایگاه تحقیقات بهینه‌سازی مصرف آب و کود، رشد بهتری داشته باشد. تدوین و تبیین الگوی بهینه مصرف آب و کود در کشاورزی، برای رسیدن به بهره‌برداری پایدار از منابع آب و خاک، بسیار مهم و موثر است. هر گونه کمبود در مقدار آب یا نیتروژن سبب کاهش محصول می‌شود (Sepaskhah et al., 2006). کم‌آبیاری توأم با بهینه‌سازی مصرف کود، یک راهکار مناسب برای دستیابی به تولید مناسب تحت شرایط محدودیت منابع آب است. هدف اصلی کم‌آبیاری، افزایش راندمان کاربرد آب از طریق کاهش میزان آب آبیاری در هر نوبت و یا حذف آبیاری‌هایی است که کم‌ترین بازدهی را دارند (Kheyraie et al., 1996). گیاهانی که برای کم‌آبیاری انتخاب می‌شوند، باید مقاوم به تنش آبی باشند و خاک نیز عمیق و ظرفیت نگهداری رطوبت آن، زیاد باشد. اعمال مدیریت کم‌آبیاری سبب کاهش مصرف کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها می‌شود، ضمن این‌که برای کاهش رقابت گیاهان در جذب آب، تراکم بوته در واحد سطح کاهش می‌یابد (English et al., 1990).

نیتروژن هم یکی از عوامل مهم تولید محصول در کشاورزی است. نیتروژن نقش کلیدی در تغذیه گیاهی دارد و از عناصر غذایی ضروری برای گیاهان به‌شمار می‌آید. نیتروژن جزئی از پروتئین و اسید نوکلئیک بوده که اگر مقدار آن در خاک بهینه نباشد، باعث کاهش رشد گیاه می‌شود. افزایش بازده مصرف آب آبیاری و باران متأثر از کاربرد صحیح کود شیمیایی به‌ویژه نیتروژن می‌باشد. کمبود نیتروژن پس از کمبود آب از مهم‌ترین عامل کاهش‌دهنده تولید محصولات زراعی به‌ویژه غلات می‌باشد. همان‌طور که تاثیر نیتروژن مستقیماً به‌میزان باران بستگی دارد، نیاز به نیتروژن نیز با کاربرد آب آبیاری افزایش می‌یابد (Oweis et al., 1998).

برای تعیین حد بهینه آب آبیاری، استفاده از مدل‌ها، روابط تجربی-ریاضی و توابع تغییرات مصرف آب-عملکرد، امری اجتناب‌ناپذیر است (Sepaskhah et al., 2006). تحقیقات گسترده‌ای در خصوص تعیین تابع تولید بر اساس میزان آب

آبیاری، کود و دیگر نهاده‌های تولید صورت گرفته است. استفاده از برنامه‌ریزی خطی و تحلیل رگرسیون (Wagner, 1959)، برنامه‌ریزی بر مبنای حداقل انحرافات مطلق (Fisher, 1961)، برنامه‌ریزی بر اساس حداقل مربعات (Heady and Dillon, 1988) و نیز مدل برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی در تعیین ضرایب تابع تولید از جمله این تحقیقات است. آنچه که در کم‌آبیاری همراه با مقادیر نیتروژن مورد توجه قرار می‌گیرد بهینه‌سازی مصرف آب و تعیین حد بهینه نیتروژن به صورت دوجانبه است که در این پژوهش مد نظر قرار گرفته و از آنجا که مهم‌ترین عامل محدودکننده آب است، لذا کاربرد نتایج کم‌آبیاری، می‌تواند در اقتصاد کشور اهمیت فراوانی داشته باشد.

سویا یکی از گیاهان زراعی قدیمی و بومی شرق آسیا است که حداقل از ۲۸۰۰ سال قبل میلاد در چین کشت می‌شد (MirAkhori et al., 2010). سویا گیاهی است که منبع اصلی پروتئین و روغن خوراکی در جهان بوده و در سطح وسیعی در مناطق مختلف کاشته می‌شود. بیش‌ترین سهم تولید در بین دانه‌های روغنی (۵۳ درصد) مربوط به سویا است. حدود ۶۷ درصد پروتئین و ۲۸ درصد روغن مصرفی جهان از سویا تامین می‌شود (Draper and Smith, 1981).

سطح زیر کشت سویای جهان در سال ۲۰۱۶ حدود ۱۲۰ میلیون هکتار بوده است (USDA, 2017). در سال ۱۳۵۵ سطح زیر کشت سویا در ایران حدود ۶۰ هکتار بوده که در سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳ به ۶۰ هزار هکتار رسیده که به‌نظر می‌رسد روند افزایش کشت سویا به دلیل فواید آن به شدت توسعه یابد (Shams Beyranvand et al., 2014).

براساس آمار وزارت جهاد کشاورزی در سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳، استان گلستان با ۴۲۰۰۰ هکتار کشت سالانه سویا، بیش‌ترین سهم در کشت و تولید این محصول را دارد. میزان تولید سویا در کشور سالانه حدود ۱۴۰۰۰۰ تن است که حدود ۶۹ درصد آن تنها در استان گلستان تولید می‌شود (Ahmadi et al., 2016). عملکرد سویا در کشور در کشت آبی و دیم به ترتیب برابر ۲۴۸۶ و ۱۸۳۳ کیلوگرم در هکتار و در استان گلستان به ترتیب ۲۴۷۰ و ۱۵۰۳ کیلوگرم در هکتار می‌باشد (Ghajar Sepanloo and Bahmanyar, 2004). با توجه به سرآمد بودن استان گلستان در کشور در رابطه با کشت سویا، در این استان ۴ کارخانه روغن‌کشی وجود دارد که روزانه توان استحصال ۲۰۰۰ تن روغن را دارند و گلستان مقام نخست تولید سویا را به خود اختصاص داده است (Ahmadi et al., 2016).

سویا گیاهی روزکوتاه است که بیش از هر محصول زراعی دیگر نسبت به طول روز حساسیت نشان می‌دهد. اما میزان حساسیت به طول روز در ارقام مختلف بسیار متفاوت می‌باشد و هم‌چنین در گروه گیاهان گرمادوست قرار دارد. حداکثر عملکرد سویا هنگامی به دست می‌آید که رطوبت خاک طی تمامی فصل رشد از ۵۰ درصد حد ظرفیت مزرعه پایین‌تر نرود. بذر سویا در مرحله سبز شدن به **ماندابی شدن** حساس است و مقدار آب موردنیاز (تبخیر و تعرق) برای رشد سویا را بین ۴۵۰۰ تا ۸۲۵۰ مترمکعب در هکتار تخمین زده‌اند. سویا، برخلاف تصور، مقاومت زیادی به خشکی هوا دارد (Khajepoor, 2006).

Ghajar Sepanloo and Bahmanyar (2004) در پژوهشی بر روی سه رقم سویا در منطقه مازندران به این نتیجه رسیدند که تنش آب بر عملکرد دانه اثر معنی‌دار نداشت و با افزایش میزان آبیاری عملکرد دانه افزایش یافت. هم‌چنین در آن پژوهش، تیمارهای مختلف آبیاری تاثیر معنی‌دار بر درصد روغن و درصد پروتئین نداشتند.

Kirnak et al. (2010) با بررسی بر روی گیاه سویا در ترکیه و اعمال پنج تیمار آبیاری کامل، ۷۵، ۵۰، ۲۵ درصد نیاز آبی و بدون آبیاری نشان دادند که با کاهش میزان آب مصرفی، عملکرد دانه به‌طور معنی‌دار از ۲۶۷ تا ۳۹۵۲ کیلوگرم

در هکتار کاهش یافته است. آن‌ها اظهار داشتند که با افزایش تنش خشکی میزان روغن دانه از ۱۶/۴ تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد، در حالی که با افزایش شدت تنش، میزان پروتئین دانه سویا افزایش می‌یابد.

نتایج بررسی Garcia et al. (2010) که ۴ رقم سویا را تحت رژیم‌های مختلف آبیاری قرار دادند، نشان داده است که در بین همه ارقام، رابطه قوی بین مقدار آب کاربردی (مجموع باران و آبیاری) و عملکرد دانه وجود دارد. به طور کلی در این بررسی متوسط کارایی مصرف آب سویا را ۰/۷۴ کیلوگرم دانه به‌ازای مصرف هر مترمکعب آب در هکتار به‌دست آوردند. آن‌ها هم‌چنین نشان دادند که کارایی مصرف آب سویا تابع نوع رقم می‌باشد، به‌طوری که کارایی مصرف آب در دامنه ۱/۱۴ - ۰/۵۵ کیلوگرم دانه به‌ازای هر مترمکعب آب در ارقام مختلف سویا در نوسان بود. جمع‌بندی نتایج آن‌ها بیانگر این نکته کلیدی است که به‌دلیل اختلاف ارقام مختلف سویا در کارایی استفاده از آب، می‌توان رقم مناسب برای دریافت عملکرد بهینه در شرایط کمبود آب را انتخاب نمود.

Das (2003) با بررسی کارایی مصرف آب سویا در ۴ منطقه نیمه‌خشک هندوستان بیان نمود که کارایی مصرف آب در سویا از یک منطقه به منطقه دیگر به‌دلیل تغییر شرایط اقلیمی، نوع خاک و هم‌چنین، با نوع رقم متفاوت خواهد بود. Abayomi (2008) با اعمال تنش در مراحل مختلف رشد سویا به این نتیجه رسید که تنش در هر مرحله رشد باعث کاهش معنی‌دار عملکرد محصول شده است. از طرفی رابطه میزان مصرف آب و تبخیر-تعرق با عملکرد محصول جهت مدیریت آب مناسب می‌باشد.

Kipkorir et al (2002) بیان نمودند که تابع تولید رابطه بین عملکرد محصول و آب مصرف شده را نشان می‌دهد و اظهار داشتند به‌واسطه نفوذ عمقی آب تابع تولید به‌صورت غیرخطی می‌باشد.

Liu and Li (2010) به بررسی شاخص بهره‌وری عوامل و برآورد تابع تولید سویا پرداختند. بر اساس نتایج آن مطالعه میانگین شاخص بهره‌وری در طول دوره ۲۰۰۷-۱۹۹۰ برابر ۴۲ درصد و عامل زمین بیشترین تأثیر را در تولید سویا دارد.

هدف این پژوهش بررسی اثرات مهم آب و نیتروژن بر عملکرد گیاه سویا و برآورد تابع تولید آب-نیتروژن با شکل‌های تابعی مختلف است. هم‌چنین تعیین بهترین برآزش تابع بر روی داده‌ها، و نهایتاً 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 به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی با دو عامل میزان آب آبیاری و نیتروژن در دو فصل کشت سویا (سال‌های زراعی ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰) به‌صورت آبیاری بارانی تک‌شاخه‌ای اجرا شد. محل اجرای پژوهش، ایستگاه تحقیقات کشاورزی گرگان در ۶ کیلومتری شمال شهر گرگان به طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی و با ارتفاع ۵/۵ متر از سطح دریا بوده است.

به‌منظور تعیین بافت خاک، از عمق‌های مختلف خاک نمونه‌برداری شد و میزان رس، سیلت و شن موجود در خاک به‌روش هیدرومتری اندازه‌گیری شد؛ سپس با استفاده از مثلث بافت خاک، نوع بافت خاک هر لایه تعیین شد که نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک محل اجرای آزمایش

عمق (سانتی‌متر)	بافت خاک	رس	سیلت	شن	FC	PWP	ρ_b
(سانتی‌متر)		(درصد)	(درصد)	(درصد)	(درصد وزنی)	(گرم بر سانتی‌متر مکعب)	
۰-۲۰	لومی رسی	۲۷/۴	۳۱/۶	۴۱	۲۸	۱۵	۱/۳۳
۲۰-۴۰	لومی رسی	۲۷/۴	۳۵/۵	۳۷/۱	۲۷	۱۴	۱/۳۷
۴۰-۶۰	لومی رسی	۳۱	۳۷	۳۲	۲۷	۱۵	۱/۴۱
۶۰-۸۰	لومی رسی	۳۵	۳۸/۲	۲۶/۸	۲۶	۱۴	۱/۳۵

این پژوهش تحت یک آزمایش در قالب طرح کرت‌های خردشده با چهار تکرار مورد ارزیابی قرار گرفت. چهار سطح آب آبیاری شامل ۱۰۰٪ (I_1)، ۷۵٪ (I_2)، ۵۰٪ (I_3) و ۲۵٪ (I_4) آب مورد نیاز گیاه به‌عنوان عامل اصلی، ثابت بوده و سه تیمار نیتروژن (N_1 ، N_2 و N_3) به‌صورت تصادفی در داخل هر تیمار آبیاری توزیع شده‌اند. در تیمارهای N_1 ، N_2 و N_3 به‌ترتیب ۱۵۰، ۱۱۲/۵ و ۷۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن به‌کار رفت. بعد از آماده‌سازی زمین، سیستم آبیاری بارانی تک‌شاخه‌ای اجرا گردید. برای هر تیمار گیاه سویا رقم DPX در یک کرت به ابعاد ۲ در ۳ متر کشت شد. عملیات کاشت با ردیف‌کار سویا صورت گرفت و آرایش کاشت ۱۲ در ۵۰ سانتی‌متر با تراکم ۱۶۶۶۶۷ بوته در هکتار بوده است.

عمق آبیاری با هدف جایگزین نمودن رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه تا حد ظرفیت زراعی (FC) برای تیمار آبیاری کامل (I_1) محاسبه و دیگر تیمارهای آبیاری، ضریبی از عمق آبیاری تیمار I_1 را دریافت می‌کردند. عمق آب آبیاری در تیمار آبیاری کامل با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد. برای محاسبه نفوذ عمقی آب یا محاسبه میزان فرونشست عمقی (آب زهکشی) از روش موازنه جرم به شرح زیر استفاده شد:

$$I_r = \left(\sum_{i=1}^m (W_{FCi} - W_{Bii}) \times \rho_w \times D_i \right) / 100 \quad (1)$$

$$DP = I_r - \left(\sum_{i=1}^m (W_{FCi} - W_{Bii}) \times \rho_w \times D_i \right) / 100 \quad (2)$$

$$I_g = \frac{I_r}{E_a} \quad (3)$$

که در آن:

DP : نفوذ عمقی آب بر حسب میلی‌متر در دوره اندازه‌گیری، I_r : عمق آب آبیاری بر حسب میلی‌متر در دوره اندازه‌گیری، W_{FCi} : رطوبت وزنی خاک در ظرفیت زراعی در لایه i ام بر حسب درصد، W_{Bii} : رطوبت وزنی خاک پیش از آبیاری یا بارندگی در لایه i ام بر حسب درصد، ρ_w : جرم مخصوص ظاهری خاک در لایه i ام بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، D_i : عمق لایه خاک بر حسب میلی‌متر، m : تعداد لایه‌های خاک تا عمقی که تغییرات رطوبت مشاهده شده است، n : تعداد لایه‌های خاک در عمق توسعه ریشه، E_a : راندمان آبیاری و I_g : عمق ناخالص آبیاری برای تیمار آبیاری کامل بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

میانگین عملکردهای دانه به وسیله آزمون دانکن^۱ با استفاده از نرم افزار SAS مقایسه شدند ($P < 0.05$) و سپس با استفاده از داده‌های به دست آمده از مزرعه آزمایشی، پاسخ گیاه به آب و نیتروژن با فرض این که گیاه فقط به این دو فاکتور واکنش نشان می‌دهد، بررسی شد.

توابع تولید با استفاده از داده‌های آزمایشی با شکل‌های تابعی خطی ساده^۲، کاب داگلاس^۳، درجه دوم^۴ و متعالی^۵ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Y = a_0 + a_1I + a_2N \quad \text{خطی} \quad (4)$$

$$Y = a_0I^{a_1}N^{a_2} \rightarrow \ln(Y) = \ln(a_0) + a_1\ln(I) + a_2\ln(N) \quad \text{کاب - داگلاس} \quad (5)$$

$$Y = a_0 + a_1I + a_2I^2 + a_3N + a_4N^2 + a_5IN \quad \text{درجه دوم} \quad (6)$$

$$Y = a_0I^{a_1}N^{a_2} \text{Exp}(a_3I + a_4N) \rightarrow \ln(Y) = \ln(a_0) + a_1\ln(I) + a_2\ln(N) + a_3I + a_4N \quad \text{متعالی} \quad (7)$$

که a_i : ضرایب متغیر، I : میزان آب آبیاری، N : نیتروژن مصرف شده و Y : میزان عملکرد است. ضرایب توابع تولید با استفاده از روش OLS^۶ نرم افزار SPSS 16 تخمین زده شد. ضرایب مدل برای تعیین عملکرد دانه، ضریب تعیین (R^2) و خطای استاندارد^۷ برای مقایسه توابع تولید تخمین زده شدند.

نتایج و بحث

مقایسه دو راهبرد کم آبیاری و آبیاری کامل

میزان عملکرد، آب کاربردی و کارایی مصرف آب سویا در تیمارهای مختلف نیتروژن و آب در سال اول و دوم در جدول (۲) ارائه شد و دو راهبرد کم آبیاری و آبیاری کامل برای تیمارهای مختلف نیتروژن در جدول (۳) مقایسه گردید؛ ملاحظه می‌شود که برای تمام تیمارهای نیتروژن، اگرچه روش کم آبیاری منجر به حصول حداکثر عملکرد در واحد سطح نمی‌شود، ولی برای مناطق مشابه استان گلستان که کم آبی عامل اصلی محدودکننده تولید است، قادر است تولید کل را افزایش دهد. مثلاً در تیمار N_1 به جای آبیاری کامل برای زمینی به مساحت یک هکتار، بهتر است مساحت زمین تحت آبیاری به $4/7$ هکتار افزایش یافته و در این شرایط مقدار آب مصرفی از $670/3$ میلی‌متر در آبیاری کامل به $181/1$ میلی‌متر در روش کم آبیاری کاهش و تولید کل از $6/872$ تن در هکتار در روش آبیاری کامل (مجموع تولید یک هکتار آبی و $3/7$ هکتار دیم) به $8/09$ تن در هکتار در روش کم آبیاری ($17/7$ درصد افزایش) در سطح جدید افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج جدول ۲ در هر سطح نیتروژن، مقایسه راهبردها نشان از افزایش مقدار عملکرد کل در تیمارهای مختلف کم آبیاری نسبت به آبیاری کامل می‌دهد. بیشترین مقدار عملکرد کل مربوط به آبیاری 75% مورد نیاز گیاه می‌باشد. این روند با نتایج مطلوب تری برای تیمارهای N_2 و N_3 وجود دارد. به طور کلی تیمار N_3 نسبت به بقیه تیمارها، در راهبرد کم آبیاری، نقش موثرتری در افزایش تولید کل داشته است. همان طور که در پژوهشی به منظور مطالعه تاثیر تنش خشکی و کود نیتروژن بر عملکرد، اجزای عملکرد و پروتئین دانه دو رقم جو در شهر زرقان نتیجه

¹ Duncan

² Linear

³ Cobb-Douglas

⁴ Quadratic

⁵ Transcendental

⁶ Ordinary Least Square

⁷ Standard Error

گرفته شد در شرایط آبیاری کامل، عملکرد دانه به‌طور معنی‌دار تا سطح ۱۲۰ کیلوگرم کود نیتروژن افزایش یافت اما، در سایر رژیم‌های آبیاری عملکرد دانه فقط تا سطح ۶۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار افزایش یافت (Barati and Ghadiri, 2016).

بر اساس جدول (۲) نتیجه‌گیری شد که در سال اول کشت، مقدار آب کاربردی ۲۳۰ و ۲۱۶/۵ میلی‌متر و مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، بیشترین کارایی مصرف آب را دارد. همچنین برای سال دوم کشت، به‌ترتیب مقدار آب کاربردی ۱۸۱/۱ و ۲۶۷/۱ میلی‌متر و مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، بیشترین کارایی مصرف آب را دارد. این نتایج با نتایج پژوهش (Azizian et al. 2007) در مورد گندم تا حدودی مشابهت داشته که اظهار داشتند با مصرف ۵۵۶ میلی‌متر آب و ۱۹۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن بیشینه سود به‌ازای واحد حجم آب مصرفی حاصل می‌شود. در پژوهش Kiani and Raeesi (2013) با عنوان بررسی کارایی مصرف آب چند رقم سویا تحت مقادیر مختلف آب آبیاری، رقم DPX در مقابل ۵۴۰ میلی‌متر مصرف آب، بالاترین عملکرد (۳/۷ تن در هکتار) را داشته، ولی کارایی مصرف آب رقم مذکور در این شرایط به ۰/۶ کیلوگرم به مترمکعب کاهش یافته است که این نتیجه با تیمار آبیاری I₂ در تیمار نیتروژن N₁ شباهت بالایی داشته است. نتایج آنالیز واریانس، معنی‌دار بودن اثرات مقدار آب (I) و نیتروژن (N) بر عملکرد به‌ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد در سال اول و ۱ و ۵ درصد در سال دوم را نشان داد و همچنین در هر دو سال اثر متقابل (I×N) بر عملکرد معنی‌دار نبود.

جدول ۲- میزان عملکرد، آب کاربردی و کارایی مصرف آب در تیمارهای مختلف نیتروژن و آب در سال اول و دوم

تیمار نیتروژن	تیمار آبیاری	عملکرد (تن در هکتار)		مقدار آب کاربردی (میلی‌متر)		کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	
		سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم
N ₁	I ₁	۴/۲۹ a	۵/۱۸ a	۴۰۴/۰ a	۶۷۰/۳ a	۱/۰۶ b	۰/۷۷ b
	I ₂	۳/۲۰ b	۳/۷۴ b	۳۰۲/۳ b	۴۹۷/۶ b	۱/۰۶ b	۰/۷۵ b
	I ₃	۲/۹۲ c	۲/۴۸ c	۲۳۰/۰ c	۲۶۷/۱ c	۱/۲۷ a	۰/۹۲ a
	I ₄	۲/۵۱ d	۱/۸۱ d	۲۱۶/۵ d	۱۸۱/۱ d	۱/۱۶ ab	۱/۰۰ a
N ₂	I ₁	۳/۴۴ a	۴/۳۴ a	۳۹۹/۴ a	۶۵۶/۳ a	۰/۸۶ c	۰/۶۶ b
	I ₂	۲/۷۴ b	۳/۳۶ b	۲۹۶/۱ b	۴۹۱/۳ b	۰/۹۳ bc	۰/۶۸ b
	I ₃	۲/۴۳ c	۲/۲۰ c	۲۲۳/۱ c	۲۶۷/۴ c	۱/۰۹ a	۰/۸۲ a
	I ₄	۱/۸۰ d	۱/۵۳ d	۱۸۲/۰ d	۱۷۵/۰ d	۰/۹۹ ab	۰/۸۷ a
N ₃	I ₁	۳/۲۵ a	۴/۰۲ a	۳۹۹/۷ a	۶۴۷/۹ a	۰/۸۱ c	۰/۶۲ b
	I ₂	۲/۵۳ b	۲/۹۶ b	۲۹۵/۱ b	۴۷۹/۸ b	۰/۸۶ bc	۰/۶۲ b
	I ₃	۲/۱۶ c	۱/۹۲ c	۲۲۷/۷ c	۲۴۸/۱ c	۰/۹۵ a	۰/۷۷ a
	I ₄	۱/۲۹ d	۱/۲۰ d	۱۴۰/۷ d	۱۴۳/۳ d	۰/۹۲ ab	۰/۸۴ a

جدول ۳- مقایسه کم آبیاری‌های مختلف و آبیاری کامل برای تولید سویا در تیمارهای مختلف نیتروژن در سال دوم

تیمار نیتروژن	تیمار آبیاری	مساحت (ha)			عملکرد (t)		درصد افزایش عملکرد نسبت به تیمار I ₁
		آبیاری شده	آبیاری نشده	کل	آبیاری شده	آبیاری نشده	
N ₁	I ₁	۱	۳/۷	۴/۷	۵/۱۵	۱/۷۲۲	۶/۸۷۲
	I ₂	۲/۳۴	۰	۲/۳۴	۸/۷۵	۰	۸/۷۵
	I ₃	۳/۵۱	۰	۳/۵۱	۸/۷۰	۰	۸/۷۰
	I ₄	۴/۷	۰	۴/۷	۸/۰۹	۰	۸/۰۹
N ₂	I ₁	۱	۳/۷۵	۴/۷۵	۴/۳۴۳	۱/۵۲۸	۵/۸۷۱
	I ₂	۲/۳۳	۰	۲/۳۳	۷/۸۲	۰	۷/۸۲
	I ₃	۳/۴۵	۰	۳/۴۵	۷/۵۹	۰	۷/۵۹
	I ₄	۴/۷۵	۰	۴/۷۵	۷/۲۵۸	۰	۷/۲۵۸
N ₃	I ₁	۱	۴/۵۲	۵/۵۲	۴/۰۲۳	۱/۱۹۶	۵/۲۱۹
	I ₂	۲/۳۵	۰	۲/۳۵	۶/۹۵۶	۰	۶/۹۵۶
	I ₃	۳/۶۱	۰	۳/۶۱	۶/۹۳۱	۰	۶/۹۳۱
	I ₄	۵/۵۲	۰	۵/۵۲	۶/۶۰۱	۰	۶/۶۰۱

در مورد آنالیز اقتصادی نیز می‌توان ذکر کرد که اگر قیمت سویا به‌ازای هر کیلوگرم معادل ۲۴،۰۰۰ ریال و هزینه تولید سویا برای هر هکتار کشت آبی برابر با ۲۸،۰۸۱،۷۵۲ ریال و هزینه تولید سویا برای هر هکتار کشت دیم برابر ۱۷،۹۳۹،۸۳۲ ریال باشد؛ به‌طور مثال اگر این قیمت‌ها برای تیمار N₁ به‌کار برده شود، برای آبیاری کامل، (یک هکتار آبیاری شده به‌علاوه ۳/۷ هکتار کشت دیم) و برای کشت دیم، ۸۴،۳۱۷،۲۱۰ ریال (۴/۷ هکتار) بابت هزینه تولید صرف خواهد شد. مقدار سرمایه به‌دست آمده از تولید کل برای حالت آبیاری کامل برابر ۱۶۴،۹۲۸،۰۰۰ ریال و برای کشت دیم برابر ۱۹۴،۱۶۰،۰۰۰ ریال می‌باشد. بنابراین مقدار سود بر اساس آبیاری کامل و کشت دیم، به‌ترتیب برابر ۷۰،۴۶۸،۸۷۰ و ۱۰۹،۸۴۲،۷۹۰ ریال خواهد بود.

بهینه‌سازی آب و نیتروژن

در ابتدا تجزیه واریانس داده‌ها اجرا و اثر فاکتورهای مهم و اثر متقابل آن‌ها به‌وسیله جدول ANOVA برای هر سال به‌طور جداگانه تعیین شد.

تابع تولید بهینه بر مبنای آنالیز آماری انتخاب شدند و نتایج تخمین تابع تولید آب-نیتروژن با شکل‌های تابعی خطی ساده، کاب داگلاس، درجه دوم و متعالی در جدول (۴) نشان داده شده است. ضریب تعیین این توابع برای متوسط دو سال و برای مقادیر اندازه‌گیری به‌ترتیب برابر ۰/۹۴۹، ۰/۹۶۵، ۰/۹۶۷ و ۰/۹۷۲۵ به‌دست آمد. با توجه به جدول (۴)، نتایج نشان داد که توابع تولید متعالی و درجه دوم برازش مناسبی بر داده‌ها دارند؛ هم‌چنین مشخص شد که مدل

متعالی، مقدار خطای استاندارد کمتری را در مقایسه با مدل درجه دوم دارد. با مقایسه ضرایب و خطای استاندارد مشخص شد که از نظر خوبی برازش، تابع متعالی نسبت به سایر توابع بهتر است. بنابراین در تحلیل نتایج از مدل متعالی به عنوان تابع تولید مناسب سویا تحت شرایط تنش آب-نیترژن استفاده شد.

جدول ۴- ضرایب تابع تولید آب-نیترژن سویا با استفاده از توابع خطی ساده، کاب داگلاس، درجه دوم و متعالی برای سال اول و دوم کشت

متغیرها	تابع خطی ساده		تابع کاب داگلاس		تابع درجه دوم		تابع متعالی	
	سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم
ضریب ثابت	۱۲۶/۲۶۷ ^{ns}	-۱۳۸/۵۱۴ ^{ns}	۳/۳۵۷ ^{**}	۲/۵۳۳ ^{**}	۱۴۸۵/۲۲۲ ^{**}	۱۲۶۶/۱۲۵ ^{**}	۵/۱۸۱ ^{**}	۶/۱۴۸ ^{**}
SE	۱۱۸/۰۴۰	۱۲۶/۱۵۱	۰/۱۶۳	۰/۱۶۵	۳۵۱/۲۸۵	۳۵۵/۵۴۷	۰/۹۹۱	۰/۸۱۹
I	۷/۳۴۳ ^{**}	۶/۰۰۹ ^{**}	-	-	۴/۴۸۷ ^{**}	۰/۸۵۹ ^{ns}	۰/۰۱۰ [*]	۰/۰۰۶ ^{**}
SE	۰/۲۹۰	۰/۱۸۲	-	-	۱/۴۴۳	۰/۹۷۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲
N	۵/۲۲۵ ^{**}	۵/۴۲۵ ^{**}	-	-	-۱۵/۶۱۷ [*]	-۶/۲۱۵ ^{ns}	۰/۰۰۶ [*]	۰/۰۰۵ [*]
SE	۰/۸۲۴	۰/۹۲۵	-	-	۶/۴۴۵	۶/۸۲۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲
Ln (I)	-	-	۰/۶۸۰ ^{**}	۰/۷۷۶ ^{**}	-	-	۰/۵۳۰ ^{**}	۰/۳۴۵ ^{**}
SE	-	-	۰/۰۲۲	۰/۰۲۰	-	-	۰/۱۰۶	۰/۰۸۶
Ln (N)	-	-	۰/۱۶۱ ^{**}	۰/۱۷۰ ^{**}	-	-	-	-
SE	-	-	۰/۰۲۷	۰/۰۲۷	-	-	-	-
I ²	-	-	-	-	۰/۰۰۵ ^{ns}	۰/۰۰۵ ^{**}	-	-
SE	-	-	-	-	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	-	-
N ²	-	-	-	-	۰/۰۶۷ [*]	۰/۰۴۳ ^{ns}	-	-
SE	-	-	-	-	۰/۰۰۳	۰/۰۳۲	-	-
IN	-	-	-	-	۰/۰۲۷ ^{**}	۰/۰۰۷ ^{ns}	-	-
SE	-	-	-	-	۰/۰۰۷	۰/۰۰۴	-	-
R ²	۰/۹۳۷	۰/۹۶۱	۰/۹۵۸	۰/۹۷۲	۰/۹۵۷	۰/۹۷۷	۰/۹۶۲	۰/۹۸۳
SE	۲۱۳/۱۸۹	۲۳۹/۱۳۰	۰/۰۷۱	۰/۰۷۳	۱۷۵/۴۶۵	۱۸۵/۶۳۷	۰/۰۶۸	۰/۰۵۶

*معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، **معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، ns غیر معنی‌دار
I: آب آبیاری، N: نیترژن، SE: خطای استاندارد، R²: ضریب همبستگی، IN: اثر متقابل آب و نیترژن، Ln: لگاریتم

ضریب تعیین تابع متعالی که به عنوان مبنای تحلیل این پژوهش برگزیده شد، نشان می‌دهد که با ثابت نگه داشتن مقادیر سایر عوامل موثر بر تولید، ۹۷/۲۵ درصد تغییرات عملکرد سویا از تغییرات دو عامل مقدار آب و نیترژن ناشی می‌شود و باید مقدار مناسبی از آب و نیترژن را استفاده کرد. سایر ضرایب نیز نشان می‌دهد که تغییرات مقدار آب نسبت به نیترژن، عملکرد سویا را بیشتر تحت تاثیر قرار می‌دهد. همان‌طور که Ghobadi et al. (2015) در بررسی اثرات تنش خشکی و کود نیترژن بر عملکرد و کارایی مصرف آب و نیترژن گیاه ذرت نیز نتیجه گرفتند که با انتخاب ترکیب مناسب مقادیر آب آبیاری و نیترژن می‌توان شرایط مناسبی را برای بهبود عملکرد ذرت فراهم آورد.

توابع خطی ساده، کاب داگلاس، درجه دوم و متعالی برای کارایی مصرف آب نیز به کار برده شد؛ و نتایج نشان داد که ضریب تعیین این توابع برای متوسط دو سال و برای مقادیر اندازه‌گیری به ترتیب برابر ۰/۲۷، ۰/۱۸، ۰/۶۲ و ۰/۶۷ است و تابع متعالی برازش مناسبی بر داده‌ها دارد. بنابراین در تحلیل نتایج برای رسیدن به ماکزیمم کارایی مصرف، از مدل متعالی تحت شرایط تنش آب-نیترژن برای سویا استفاده شد.

نتیجه‌گیری کلی

بهینه‌سازی آب و نیترژن نشان داد که تابع تولید مناسب سویا مدل متعالی می‌باشد که مقدار خطای استاندارد کمتری در مقایسه با سایر مدل‌ها دارد.

نتایج مدل متعالی تحت شرایط تنش آب-نیترژن برای سویا نشان داد که در سال اول، مقدار آب کاربردی ۲۳۰ میلی‌متر و مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیترژن، بیشترین کارایی مصرف آب را داشته و برای سال دوم کشت مقدار آب کاربردی ۱۸۱/۱ میلی‌متر و مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیترژن، بیشترین کارایی مصرف آب را دارد. در مقایسه دو راهبرد کم‌آبیاری و آبیاری کامل و سطوح نیترژن ملاحظه می‌شود که تیمار N_3 مقدار ۲۶/۵٪ افزایش تولید در روش کم‌آبیاری نسبت به روش آبیاری کامل داشته است و نیترژن توانسته با وجود شرایط کم‌آبی تولید کل را افزایش دهد.

فهرست منابع

1. Abayomi A.Y. (2008) Comparative growth and grain yield response of early and late soybean maturity groups to induced soil moisture stress at different growth stage. *Word Journal of Agriculture science*. 4(1), 71-78.
2. Ahmadi, K., Gholizade, H., Ebadzade, H., Hatami, F., Fazli Estabragh, M., Hosseinpoor, R., Kazemian, A. and Rafi'ee, M. (2016) Agricultural Statistics. *Ministry of Agriculture Press*. Tehran. 163 p. (In Farsi)
3. Azizian, A., Sepaskhah, A. R., Tavakkoli, A.R. and Zibaie, M. (2007) Economic optimization of irrigation water and nitrogen fertilizer for wheat in different rainfall amounts (in Maragheh region). *Journal of Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*. 4 (1), 45-57. (In Farsi)
4. Barati, V. and Ghadiri, H. (2016) Effects of Drought Stress and Nitrogen Fertilizer on Yield, Yield Components and Protein Content of Two Barley Cultivars. *Journal of Crop Production and Processing*. 20, 191-206. (In Farsi)
5. Das, H.P. (2003) Water use efficiency of soybean and its yield response to evapotranspiration and rainfall. *Journal of Agriculture Physics*. 3: 1-2, 35-39.
6. Draper, N., and H. Smith. (1981) Applied regression analysis. *New York, J. Wiley and Sons*.
7. English, M.J., Musick, J.T. and Murty, V.N. (1990) Deficit irrigation. In: Hoffman, G.J., Howell, T.A., and Solomon, K.H. (Eds.). *Management of Farm Irrigation Systems. ASAE, St. Joseph, Michigan*. pp. 631-66
8. Fisher, W.D. (1961) A note on curve fitting with minimum deviations by linear programming. *Journal of the American Statistical Association*. 56:359-362.
9. Garcia, A., Persson, T., Guerra, L.C., and Hoogenboom, G. (2010) Response of soybean genotypes to different irrigation regimes in a humid region of the southeastern USA. *Agricultural Water Management*, 97: 981-987.

10. Ghajar Sepanloo, M. and Bahmanyar, M. A. (2004) Effect of irrigation in different stages of growth on yield, water use efficiency and harvest index of soybean cultivars in Mazandaran. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources of the Caspian Sea*. 2, 79-89. (In Farsi)
11. Ghobadi, R., Shirkhani, A. and Jalilian, A. (2015) Effects of Water stress and nitrogen fertilizer on yield, its components, water and nitrogen use efficiency of corn (*Zea mays* L.) cv. SC. 704. *Agronomy Journal (Pajouhesh & Sazandegi)*, 104, 79-87. (In Farsi)
12. Heady, E.O., and J.L., Dillon. (1988) *Agricultural production functions*. New Delhi, Ludhiana, Kalyani publishers, 667 pp.
13. Khajepoor, M. R. (2006) Industrial Plants. *Academic Center Of Education Culture and Research Press (Isfahan Branch)*. 564 p. (In Farsi)
14. Kheyraie, J., Tavakkoli, A.R., Entesari, M. R. and Salamat, M. R. (1996) Deficit irrigation Instructions. *IRNCID Press*. Tehran. 218 p. (In Farsi)
15. Kiani, A. and Raeesi, S. (2013) Investigating the water use efficiency of some soybean cultivars under different amounts of irrigation water. *Journal of Water and Soil Conservation*, Vol. 20(5), 2013, 79-89. (In Farsi)
16. Kipkorir KK, Reas D and Massawe B, (2002) Seasonal water production functions and yield response factors for maize and onion in perkerra, Kenya. *Agric. Water Manage.* 56:229-240.
17. Kirnak, H., Dogan, E. and H. Turkoglu. (2010) Effect of drip irrigation intensity on soybean seed yield and quality in the semi-arid Harran plain, Turkey. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(4):1208-1217.
18. Liu, M. and Li, D. (2010) An Analysis on Total Factor Productivity and Influencing Factors of Soybean in China. *Journal of Agricultural Science*, 2, 2: 158-163.
19. MirAkhori, M., Paknejad, F., Ardakani, M., Moradi, F., Nazeri, P. and Nasri, M. (2010) Effect of methanol spray on yield and soybean yield components. *Journal of Agroecology*. 2, 2, 236-244. (In Farsi)
20. United States Department of Agriculture. (2017) World Agricultural Production. Retrieved October 10, 2017, from <https://apps.fas.usda.gov>
21. Oweis, T., M., Pala, and J. Ryan. (1998) Stabilizing rainfed wheat yields with supplemental irrigation and nitrogen in a Mediterranean climate. *Agronomy Journal*. 90:672-681.
22. Sepaskhah, A. R., Tavakkoli, A.R. and Moosavi, F. (2006) Deficit irrigation. *IRNCID Press*. Tehran. 287 p. (In Farsi)
23. Shams Beyranvand, M., Boroomandnasab, S. and Maleki, A. (2014) Effect of Different Irrigation Regimes on Yield Water Use Efficiency and Harvest Index of Soybean Cultivars in Khorramabad. *Journal of Irrigation Science and Engineering*. 37, 3, 13-20. (In Farsi)
24. Wagner, H.M. (1959) Linear programming and regression analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 54.206212.

Estimation of soybean water-nitrogen production function

Abstract

Given the limited water resources available, the deficit irrigation would be one of the most relevant methods in this situation. The purpose of this study was to optimize the water consumption and nitrogen level simultaneously. In this research, two different irrigation strategies of 75% (I₂), 50% (I₃) and 25% (I₄) of water requirement and full irrigation (I₁) and different nitrogen treatments with application of 150 (N₁), 112.5 (N₂) and 75 (N₃) Kg/ha was investigated on yield production. Optimization of water and nitrogen showed that the proper yield function of soybean is the transcendental model among linear, Cobb-Douglas, quadratic and transcendental model models. The optimum water and nitrogen levels of soybeans under water-nitrogen stress conditions was estimated 230 and 216.5 mm of water and 150 kg of nitrogen in two years. The results showed that the yield production was increased by 26.5% in N₃ and deficit irrigation treatment as compared with full irrigation method.

Keywords: Optimization, Yield, Deficit Irrigation, Transcendental Model.