

برآورد بهره‌وری و بازده مصرف آب گندم (رقم شیراز) در مقادیر مختلف کم آبیاری و کمبود نیتروژن

شاهرخ زند پارسا^{۱*}، فاطمه قاسمی سعادت‌آبادی^۱، مهدی مهدی^۲ و علیرضا سپاسخواه^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۸/۱۱)

چکیده

با توجه به محدودیت منابع آب و رشد روزافزون جمعیت، حفظ امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست به یک معضل جهانی تبدیل شده که یکی از راهکارهای پیشنهاد شده برای آن، افزایش بهره‌وری آب محصولات کشاورزی است. با بهینه‌سازی مصرف آب و کود می‌توان آلودگی آب‌های زیرزمینی را کاهش و بهره‌وری آب و نیتروژن را افزایش داد. در این تحقیق، هدف بررسی ارتباط میان بهره‌وری و بازده مصرف آب در مقادیر مختلف آب آبیاری و کود نیتروژن بود. مطالعه انجام شده برای محصول گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم شیراز در دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز بر پایه طرح آماری کرت‌های یک‌بار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال‌های زراعی ۱۳۸۸-۱۳۸۹ و ۱۳۸۹-۱۳۹۰ بود. تیمارهای آبیاری از صفر تا ۱۲۰ درصد عمق آبیاری کامل و تیمارهای کودی از صفر تا ۱۳۸ کیلوگرم بر هکتار نیتروژن در نظر گرفته شد. همبستگی بین بهره‌وری آب و بازده مصرف آب با مجموع آب آبیاری و باران، تبخیر-تعرق و مقدار نیتروژن موجود در خاک بررسی شد. از داده‌های سال اول زراعی برای واسنجی معادلات و داده‌های سال دوم زراعی برای اعتبارسنجی آنها استفاده شد. از بین معادله‌های ارائه شده در این پژوهش معادله‌های واسنجی شده از طریق نسبت‌های بدون بعد مجموع آب آبیاری و بارندگی، تبخیر-تعرق و مجموع نیتروژن به کار رفته و باقی‌مانده در خاک نسبت به مقادیر آنها در آبیاری کامل و کود نیتروژن حداکثر برای محاسبه بهره‌وری مجموع آب آبیاری و بارندگی و بازده مصرف آب به‌عنوان مناسب‌ترین روش پیشنهاد شد، و ضریب تعیین (R^2) برای آنها به‌ترتیب برابر ۰/۸۸ و ۰/۹۳ و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) برابر ۰/۲ و ۰/۱۳ بود که دقت خوبی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری بهینه، تبخیر-تعرق، کود نیتروژن، واسنجی

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۲. گروه مهندسی علوم آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: zandparsa@yahoo.com

مقدمه

خطر کمبود آب یک مسئله جهانی است اما این مسئله در کشورهای خشک و نیمه خشک مانند ایران بیشتر حائز اهمیت است. با توجه به افزایش جمعیت، تغییرات آب و هوایی، محیط زیست آسیب دیده و افزایش رقابت برای آب بعید است که کشاورزی بتواند سهم بیشتری از منابع آب شیرین را در اختیار بگیرد. بنابراین برای تحقق اهداف مربوط به دو مقوله امنیت غذایی و زیست محیطی، افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی ضروری است. تعاریف مختلفی از بهره‌وری آب وجود دارد که به زمینه کاری پژوهشگر بستگی دارد. بهره‌وری آب بر اساس مجموع آب آبیاری و باران (Irrigation+Rain Water Productivity) میزان محصول برای هر متر مکعب مجموع آب آبیاری و بارندگی تعریف می‌شود. این آب شامل آب باران برای مناطق دیم و مجموع آب باران و آب آبیاری برای مناطق آبیاری شده است. مجموع آب آبیاری و باران شامل مصرف مفید و مصرف غیرمفید آب است که مصرف مفید به صورت مستقیم روی رشد گیاه اثر می‌گذارد و مصرف غیرمفید به صورت تبخیر از سطح خاک و نفوذ عمقی تلف می‌شود. مقدار IRWP معیار مهمی برای مدیریت منابع آب است، اما در مقیاس‌های مختلف قابل مقایسه نیست و لزوماً به بهبود بهره‌وری آب آبیاری در حوضه‌های بزرگ‌تر منجر نمی‌شود. بازده مصرف آب (WUE (Water Use Efficiency) میزان محصول برای هر متر مکعب آب تبخیر- تعرق شده تعریف می‌شود، و اولین بار توسط دویتس مطرح شد. این اصطلاح به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است تا نسبت محصول (به صورت محصول فتوسنتز، محصول بیولوژیک، یا محصول اقتصادی) بر واحد حجم آب مصرفی (به صورت حجم آب تعرق شده، تبخیر- تعرق، و یا حجم آب کاربردی) را بیان کند (۱۳). امروزه بیشتر از واژه شاخص بهره‌وری آب به‌ویژه در مقیاس‌های بزرگ و کشوری استفاده می‌شود (۱ و ۲).

گندم یکی از غلات اصلی و محصولات اساسی در تأمین امنیت غذایی در سراسر دنیا است و رتبه اول در تأمین پروتئین در غذای انسان را دارد. بنابراین افزایش بهره‌وری آن از اهمیت بسزایی برخوردار است. کاربرد ۷۵ و ۵۰ درصد آبیاری گندم، میزان محصول را تنها به میزان ۱۲ و ۲۰ درصد کاهش می‌دهد، در صورتی که ارزش آب صرفه‌جویی شده قابل مقایسه با میزان محصول کاهش یافته نیست (۱۶). آریا و همکاران در سال ۲۰۱۹ با استفاده از مدل (DSSAT-CSM) تولید محصول گندم زمستانه، سورگوم دانه‌ای و ذرت را در تیمارهای مختلف آبیاری مورد بررسی قرار دادند، و نشان دادند گندم زمستانه و سورگوم دانه‌ای در تیمارهای پایین‌تر بهترین محصول را دارند. البته در هنگام اعمال کم آبیاری باید حساس‌ترین دوره‌های رشد گیاه در نظر گرفته شود. در گیاه ذرت بهترین محصول در تیمار آبیاری بیشتر مشاهده شد (۴). در شرایط وجود تنش شوری نیز دو اثر تنش آبی و شوری روی تابع تولید گیاه گندم مورد بررسی قرار گرفته تا با انتخاب حالت بهینه، سود حاصل به حداکثر رسانده شود (۱۲).

نیتروژن مهم‌ترین عنصر غذایی در تولید گندم محسوب شده و برآورد شده است که ۶۷ درصد از کل کود مصرفی غلات در سطح جهان مربوط به کودهای نیتروژن است (۲۰). در شرایطی که آب کافی در اختیار نباشد، مدیریت شرایط مطلوب عملی نبوده و باعث به هدر رفتن منابع و کاهش بهره‌وری آب آبیاری و نیتروژن می‌شود (۷). پژوهشگران زیادی (۳، ۶، ۸ و ۱۸) تأثیر مثبت کود نیتروژن را بر مقدار نیتروژن دانه غلات بیان کرده‌اند. کارایی جذب نیتروژن (NUE (Nitrogen Uptake Efficiency) که نشان‌دهنده نسبت نیتروژن جذب شده به نیتروژن کاربردی است (۱۰). برای غلات حدود ۳۳ درصد است و مابقی آن به صورت تجمع نیتروژن در خاک و هدر رفت نیتروژن (تصعید، آبشویی و ...) است (۲۰). افزایش مصرف نیتروژن به همراه افزایش سرعت از دست رفتن نیتروژن از طریق آبشویی و تصعید و یا عدم جذب مؤثر آن توسط گیاه منجر به کاهش بهره‌وری مصرف نیتروژن

زمستانه (*Triticum aestivum*) رقم شیراز در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام گرفت که در آن سطوح آبیاری عامل اصلی و مقادیر کود نیتروژن عامل فرعی بودند. محل آزمایش در دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز (طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۵ دقیقه شرقی و عرض ۲۹ درجه و ۵۶ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۸۱۰ متری از سطح دریا) در سال‌های زراعی ۱۳۸۹-۱۳۸۸ و ۱۳۹۰-۱۳۸۹ اجرا شد. قبل از کاشت ۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار کود سوپرفسفات تریپل به زمین داده شد و مقدار ۲۵۰ کیلوگرم بر هکتار بذر گندم در تاریخ ۱۹ آبان ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹ در عمق ۰/۰۳ متر و با فاصله خطوط ۰/۱۲۵ متر کاشته شد. زمین زراعی پس از کاشت به کرت‌هایی با ابعاد ۴×۴ متر تقسیم‌بندی شد. مقادیر مختلف آب آبیاری در تیمارهای مختلف به صورت کسری از آبیاری کامل و به ترتیب برابر صفر، ۵۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد عمق آبیاری کامل در نظر گرفته شد که به ترتیب تیمارهای I₁، I₂، I₃، I₄ و I₅ نامگذاری شدند. مقدار نیتروژن اضافه شده به زمین به صورت کود اوره و طبق توصیه محلی در تیمارهای مختلف مقادیر صفر، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار اضافه شد که مقدار نیتروژن در تیمارهای مختلف برابر با صفر، ۴۶، ۹۲ و ۱۳۸ کیلوگرم بر هکتار بود و به ترتیب تیمارهای N₁، N₂، N₃ و N₄ نامگذاری شدند. عوامل هواشناسی در ایستگاه هواشناسی مجاور مزارع آزمایشی به صورت روزانه اندازه‌گیری شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول (۱) آورده شده است.

قبل از هر آبیاری از کرت‌های I₄N₃ در سه تکرار در اعماق ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲ متری از سطح، رطوبت خاک با استفاده از نوترون متر اندازه‌گیری شد و عمق آب آبیاری برای تیمار I₄ با استفاده از معادله زیر محاسبه شد:

$$D = \sum_{i=1}^n (\theta_{FCi} - \theta_i) \Delta Z_i \quad (1)$$

که در آن D عمق آب آبیاری (mm)، i شماره لایه، n تعداد لایه‌های خاک، θ_{FCi} رطوبت حجمی خاک در حالت ظرفیت مزرعه cm^3 در لایه i ام خاک، θ_i رطوبت حجمی خاک قبل از آبیاری cm^3 در لایه i ام خاک، ΔZ_i ضخامت

می‌شود (۵). با استفاده بیشتر از نیتروژن منجر به افزایش ماده خشک و محصول دانه می‌شود. علاوه بر آن باعث تسریع رشد سبزینه‌ای، افزایش بخش هوایی گیاه و افزایش تبخیر- تعرق می‌شود (۹). استفاده از نیتروژن به مقدار کافی موجب افزایش رشد ریشه‌ها شده که در شرایط تنش خشکی منجر به بیشتر شدن توان جذب آب از اعماق خاک می‌شود (۲۴).

با توجه به پژوهش‌های انجام شده، آب و نیتروژن دو عامل مهم و تأثیرگذار روی محصول و در نتیجه بهره‌وری آب هستند. نیتروژن در مناطق خشک و نیمه‌خشک نقش بسزایی در افزایش محصول دارد. آب آبیاری عامل انتقال نیتروژن و سایر عناصر غذایی است و میزان شستشوی نیتروژن خاک کاملاً به میزان آب آبیاری و میزان کود نیتروژن وابسته است، بررسی برهم کنش آب و نیتروژن از اهمیت بالایی برخوردار است و با بهینه‌سازی مصرف آب و کود نیتروژن می‌توان از آلودگی آب‌های زیرزمینی کاست و همچنین بهره‌وری آب و نیتروژن را افزایش داد. جذب نیتروژن خاک توسط گیاه، فرایند پیچیده‌ای است که با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی می‌توان آن را برآورد کرد. مدل WSM (Wheat Simulation Model) یک مدل پویا برای این منظور است که در سال ۲۰۱۵ توسط مهبد و همکاران (۱۵) ارائه شد. این مدل اصلاح شده مدل MSM (۲۶) برای گیاه گندم است، که رشد و تولید محصول گیاه را تحت تأثیر مقادیر مختلف آب و کود نیتروژن شبیه‌سازی می‌کند.

از آنجایی که تنش آبی، جذب عناصر غذایی به خصوص نیتروژن را تحت تأثیر قرار می‌دهد، برقراری تناسب میان نیتروژن مصرفی و میزان آب در خاک ضروری است (۲۲) و (۲۵). هدف از این مطالعه بررسی روند تغییرات WUE و IRWP با مقادیر مختلف آب و کود نیتروژن و به دست آوردن معادله‌ای برای برآورد WUE و IRWP به وسیله کل نیتروژن موجود در خاک، آب آبیاری و بارندگی، تبخیر- تعرق، برای مدیریت آبیاری و مصرف نیتروژن است.

مواد و روش‌ها

این آزمایش با طرح آماری کرت‌های یک‌بار خرد شده روی گندم

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در سال‌های ۱۳۸۸-۱۳۸۹ و ۱۳۸۹-۱۳۹۰

عمق (m)	سال	ماده آلی (%)	pH	EC (dS m ⁻¹)	یون‌های موجود (mg kg ⁻¹)		چگالی ظاهری (kg m ⁻³)	توزیع ذرات خاک(%)		
					P	K		رس	سیلت	شن
۰-۰/۳	۱۳۸۸-۱۳۸۹	۱/۳	۷/۸	۰/۳۸	۱۸/۲۷	۴۳۸/۶	۱۴۱۳	۲۹/۹	۴۸/۸	۲۱/۲
	۱۳۸۹-۱۳۹۰	۰/۸۱	۷/۷	۰/۳۵	۲۰/۴	۳۹۷/۳				
۰/۳-۰/۶	۱۳۸۸-۱۳۸۹	۱/۳۸	۷/۶	۰/۴۱	۱۴/۶۶	۳۷۷/۳	۱۶۰۳	۲۳/۹	۴۸/۸	۲۷/۲
	۱۳۸۹-۱۳۹۰	۰/۹۱	۷/۸	۰/۳۳	۱۲/۲۳	۴۷۵/۳				

* مقدار آن در سال ۱۳۸۸-۱۳۸۹ مشابه ۱۳۸۹-۱۳۹۰ است.

جدول ۲. عمق آب آبیاری در تیمارهای مختلف آبیاری در روزهای مختلف پس از کاشت (۱۴)

۱۳۸۸-۱۳۸۹						۱۳۸۹-۱۳۹۰					
DAP	Rain-fed	IR _{۰/۵}	IR _{۰/۸}	IR _۱	IR _{۱/۲}	DAP	Rain-fed	IR _{۰/۵}	IR _{۰/۸}	IR _۱	IR _{۱/۲}
*۱	۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱	۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲۸	۰	۳۰	۴۸	۶۰	۷۲	۱۲	۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
۱۳۷	۰	۲۰	۳۲	۴۰	۴۸	۴۲	۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
۱۴۹	۰	۳۰	۴۸	۶۰	۷۲	۱۳۶	۰	۲۵	۴۰	۵۰	۶۰
۱۶۳	۰	۳۰	۴۸	۶۰	۷۲	۱۴۸	۰	۲۰	۳۲	۴۰	۴۸
۱۷۷	۰	۳۵	۵۶	۷۰	۸۴	۱۶۰	۰	۳۰	۴۸	۶۰	۷۲
۱۸۸	۰	۳۵	۵۶	۷۰	۸۴	۱۷۲	۰	۳۵	۵۶	۷۰	۸۴
۱۹۸	۰	۳۵	۵۶	۷۰	۸۴	۱۸۲	۰	۴۰	۶۴	۸۰	۹۶
۲۰۹	۰	۲۰	۳۲	۴۰	۴۸	۱۹۴	۰	۴۰	۶۴	۸۰	۹۶
						۲۰۵	۰	۳۵	۵۶	۷۰	۸۴
مجموع	۰	۳۳۵	۴۷۶	۵۷۰	۶۶۴		۰	۳۸۵	۵۲۰	۶۱۰	۷۰۰

*۱۹ آبان، DAP: روز بعد از کاشت

بهره‌وری آب در واحد مجموع حجم آب آبیاری و بارندگی IRR (kg m⁻³)، حجم آب آبیاری (m³ ha⁻¹) و Rain حجم بارندگی (m³ ha⁻¹) است. داده‌های مورد نیاز برای انجام محاسبات در جدول‌های (۳) و (۴) ارائه شده است.

با استفاده از مدل WSM مقدار محصول دانه، تبخیر-تعرق واقعی، هر دو سال زراعی برای محاسبه WUE و IRWP شبیه‌سازی شد و در آخر با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده دقت آن مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی ارتباط میان بهره‌وری آب و بازده مصرف آب در مقادیر مختلف آب آبیاری و نیتروژن موجود در خاک از داده‌های اندازه‌گیری شده در سال

هر لایه mm و آبیاری نیز به صورت کرتی انجام شد. عمق آبیاری اندازه‌گیری شده در روزهای مختلف بعد از کشت در جدول (۲) ارائه شده است.

بازده مصرف آب بر اساس تبخیر-تعرق واقعی و بهره‌وری آب آبیاری و باران به ترتیب از معادله‌های (۲) و (۳) محاسبه شد (۱۳):

$$WUE = \frac{GY}{ET_a} \quad (۲)$$

$$IRWP = \frac{GY}{IRR + Rain} \quad (۳)$$

که در آنها WUE بازده مصرف آب (kg m⁻³)، GY محصول دانه (kg ha⁻¹)، ET_a تبخیر-تعرق واقعی (m³ ha⁻¹)، IRWP

جدول ۳. اطلاعات مربوط به مقدار محصول دانه، تبخیر- تعرق و نیترات موجود در خاک تا عمق ۰/۶ متر در تیمارهای مختلف (۱۴)

۱۳۸۸-۱۳۸۹			۱۳۸۹-۱۳۹۰			Treatment
Nitrate*	ET	GY	Nitrate	ET	GY	
kg ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹	mg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹	mg ha ⁻¹	
۱۱۱/۴۳	۲۳۰۵/۳۳	۰/۲	۱۴۴/۷	۳۲۹۸/۴۷	۰/۵	Rain-fedN1
۱۴۷/۱۸	۲۳۱۵/۱۷	۰/۲۸	۱۸۳/۹	۳۳۱۴/۵	۰/۷۶	Rain-fedN2
۱۴۸/۸۸	۲۳۲۱/۲۷	۰/۲۷	۲۱۰	۳۳۲۴/۷۲	۰/۸۷	Rain-fedN3
۲۰۶/۶۵	۲۳۲۵/۱۴	۰/۳۲	۲۰۸/۷	۳۳۳۰/۳	۰/۹۷	Rain-fedN4
۷۴/۷۵	۵۴۴۷/۶۶	۲/۲۵	۷۸/۱	۵۴۴۱/۲۴	۱/۹۲	IRN1۰,۵
۱۲۶/۹۲	۵۴۷۴/۱۲	۲/۸۳	۱۳۵/۵	۵۴۹۳/۲۱	۲/۵	IRN2۰,۵
۱۱۲/۸۹	۵۴۹۸/۳۴	۳/۰۵	۱۵۰/۶	۵۵۴۴/۸۵	۲/۷۱	IRN3۰,۵
۲۰۰/۳۶	۵۵۱۵/۰۸	۳/۱۲	۱۳۹/۸	۵۵۸۲/۹۸	۲/۹	IRN4۰,۵
۴۰/۹۹	۷۰۸۲/۷۸	۳/۹	۲۹/۱	۶۴۶۵/۰۷	۳/۲۶	IRN1۰,۸
۴۷/۳۹	۷۲۰۵/۴۱	۴/۴	۶۰/۷	۶۵۷۳/۶۴	۴/۱۹	IRN2۰,۸
۵۵/۱۸	۷۳۳۹/۸۴	۴/۷۷	۶۷/۶	۶۶۹۰/۰۳	۴/۸۳	IRN3۰,۸
۸۴/۳۵	۷۴۶۲/۲	۶/۹	۷۲/۷	۶۷۸۴/۶۹	۵/۵۵	IRN4۰,۸
۳۶/۹۵	۷۳۱۵/۳۹	۴/۰۱	۳۷/۶	۶۷۳۲/۲۴	۳/۷۹	IRN1۱,۰
۴۵/۰۲	۷۴۴۱/۷۹	۴/۹۲	۶۴	۶۸۴۸/۲	۴/۸۵	IRN2۱,۰
۴۴/۵۹	۷۵۷۳/۱۴	۵/۴۲	۶۷/۱	۶۹۷۶/۴۴	۵/۵۹	IRN3۱,۰
۵۳/۰۸	۷۶۷۷/۸۷	۶/۴۵	۸۲/۸	۷۰۸۶/۷۱	۶/۳	IRN4۱,۰
۴۶/۹	۷۳۹۲/۸۹	۳/۸۶	۴۶/۹	۶۸۳۱/۴۷	۳/۵۸	IRN1۱,۲
۲۳/۰۵	۷۵۳۰/۴	۵/۱۸	۴۹/۳	۶۹۵۱/۱۳	۴/۷۹	IRN2۱,۲
۳۸/۵۸	۷۶۶۳/۵۴	۵/۵۷	۷۹/۷	۷۰۷۷/۲۹	۵/۷	IRN3۱,۲
۴۶/۳۲	۷۷۶۹/۶۹	۶/۳۹	۶۵/۳	۷۱۹۰/۴۳	۶/۰۴	IRN4۱,۲

جدول ۴. اطلاعات مربوط به مقدار آمونیوم موجود در خاک در هر دو سال زراعی (۱۴)

NH ₄ -N(mg kg ⁻¹)	سال	عمق (m)
۱۹/۴۲	۱۳۸۹-۱۳۸۸	۰/۳-۰
۲۴/۴۲	۱۳۹۰-۱۳۸۹	
۱۷/۵۷	۱۳۸۹-۱۳۸۸	۰/۶-۰/۳
۱۹/۵۷	۱۳۹۰-۱۳۸۹	

$$R^2 = \frac{[\sum (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum (P_i - \bar{P})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (۴)$$

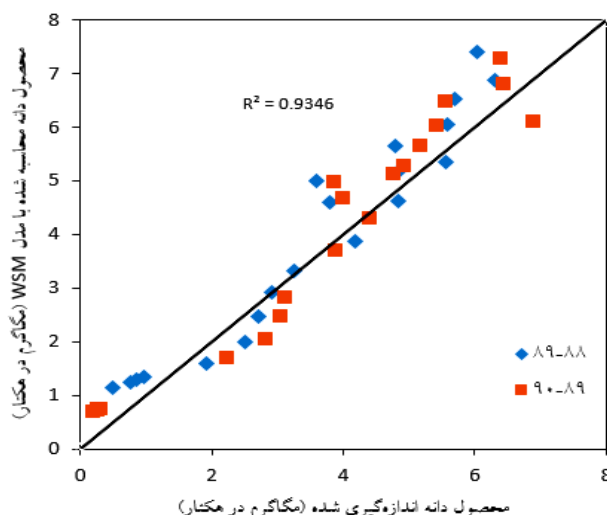
$$NRMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n\bar{O}^2} \right]^{0.5} \quad (۵)$$

که در آنها، P_i مقادیر برآورد شده به وسیله معادلات به دست

اول زراعی استفاده شد و برای اعتبارسنجی معادلات حاصل از داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه در سال دوم استفاده شد.

برای اعتبارسنجی معادله‌های به دست آمده از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده NRMSE و

ضریب تعیین R^2 به شرح زیر استفاده شد:



شکل ۱. ارزیابی دقت مدل WSM در شبیه‌سازی محصول دانه با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در سال‌های ۱۳۸۸-۱۳۸۹ و ۱۳۸۹-۱۳۹۰

به گیاه و اصلاح شده با دمای هوا و جذب نیتروژن خاک شبیه‌سازی شد. مقدار محصول دانه بر اساس مقدار نیتروژن انتقال یافته به دانه و غلظت آن شبیه‌سازی شد. در شکل (۱) دقت مدل WSM در پیش‌بینی محصول دانه نشان داده شده است.

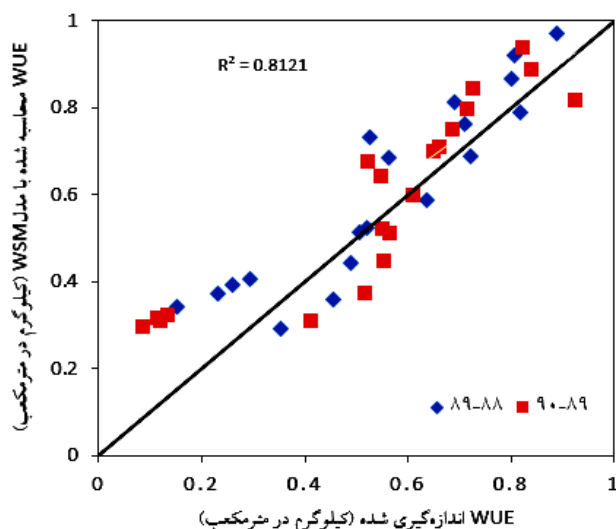
با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده محصول دانه که نشان‌دهنده اثرات مقادیر بارندگی، آبیاری، کود نیتروژن و مقدار نیترات و آمونیوم باقی‌مانده در عمق ریشه خاک است می‌توان مقادیر WUE و IRWP را شبیه‌سازی کرد. در شکل‌های (۲) و (۳) مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده WUE و IRWP در مقادیر مختلف آبیاری و کود نیتروژن در دو سال آزمایش با استفاده از مدل WSM نشان داده می‌شود. شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE) محاسبه شده برای تطابق بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده WUE به ترتیب برابر ۰/۸۱ و ۰/۲ و برای تطابق بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده IRWP، ۰/۷۹ و ۰/۲۱ است که نشان‌دهنده دقت خوب مدل است.

در مدل WSM، با جداسازی تبخیر از تعرق گیاه، عوامل جریان آب خاک، انتقال گرما در خاک، انتقال نیتروژن محلول در آب خاک (به شکل اوره و نیترات)، تغییر شکل نیتروژن و جذب آن به وسیله گیاه به صورت عددی شبیه‌سازی می‌شود و

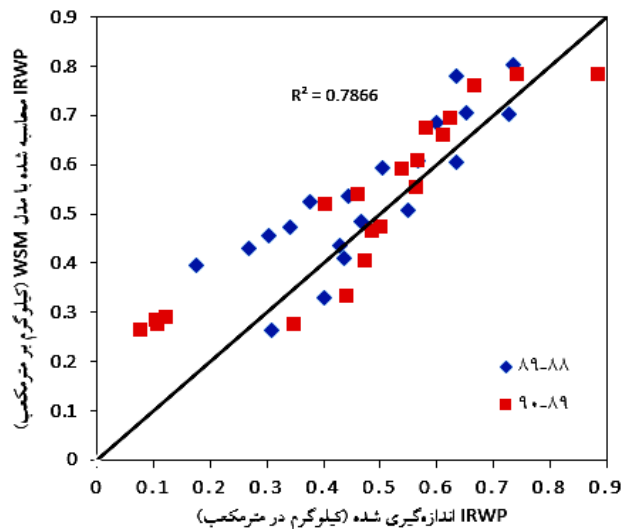
آمده، \bar{P} میانگین مقادیر برآورد شده، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n تعداد اندازه‌گیری‌ها است.

نتایج و بحث

نتایج پژوهش‌های انجام شده گویای این است که مدیریت مناسب آبیاری و نیتروژن، عامل اصلی افزایش محصول دانه و بهره‌وری آب هستند. استفاده از آزمایش‌های میدانی برای بررسی سناریوهای مختلف آب و کود نیتروژن روی بهره‌وری آب بسیار زمان‌بر و هزینه‌بر است. بنابراین با استفاده از مدل شبیه‌سازی رشد و محصول گیاه گندم (WSM) می‌توان تأثیر مقادیر مختلف آب و کود را بر محصول گیاه و در نتیجه WUE و IRWP را بررسی کرد. در این مدل حرکت آب، نیتروژن و گرما در خاک به صورت پویا و ناپایدار شبیه‌سازی شده است. زمان جوانه‌زنی دانه بر اساس رطوبت خاک، دمای خاک، عمق کاشت بذر و بافت خاک با استفاده از تابع بتا شبیه‌سازی شد. زمان گلدهی بر اساس ساعات آفتابی روزانه، ورنالیزاسیون و دمای هوا و زمان رسیدگی گیاه بر اساس دمای هوا شبیه‌سازی شد. مقادیر تبخیر-تعرق واقعی گیاه به‌طور مستقیم با استفاده از معادله پنمن مانیتث و پارامترهای جوی و رطوبت خاک شبیه‌سازی شد. ماده خشک تولیدی بر اساس تابش ساعتی رسیده



شکل ۳. بازده مصرف آب (WUE) اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با مدل WSM بر اساس مجموع آب آبیاری و باران در مقادیر مختلف نیتروژن خاک در سال‌های ۱۳۸۸-۱۳۸۹ و ۱۳۸۹-۱۳۹۰



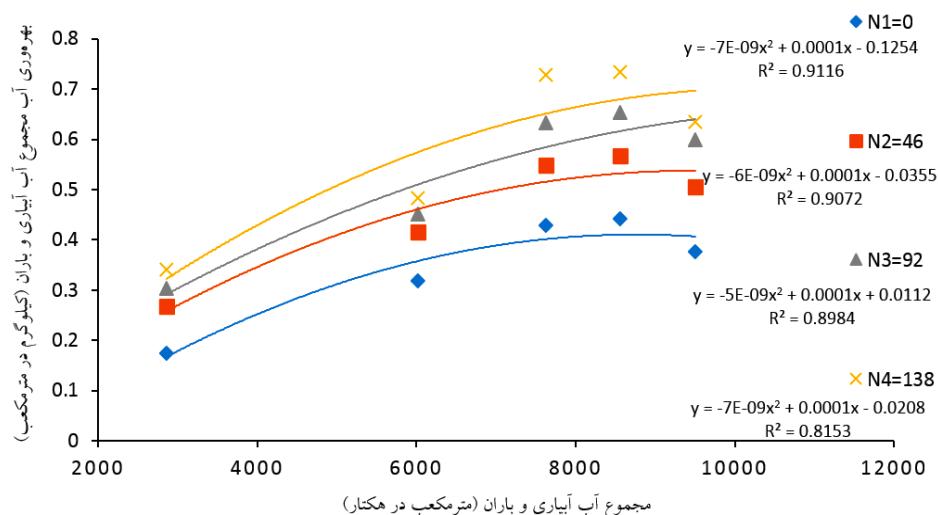
شکل ۲. بهره‌وری آب (IRWP) اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با مدل WSM بر اساس مجموع آب آبیاری و باران در مقادیر مختلف نیتروژن خاک در سال‌های ۱۳۸۸-۱۳۸۹ و ۱۳۸۹-۱۳۹۰

و IRWP با مقادیر مختلف آب و کود نیتروژن است، این معادله‌ها برای برآورد WUE و IRWP مناسب نیستند.

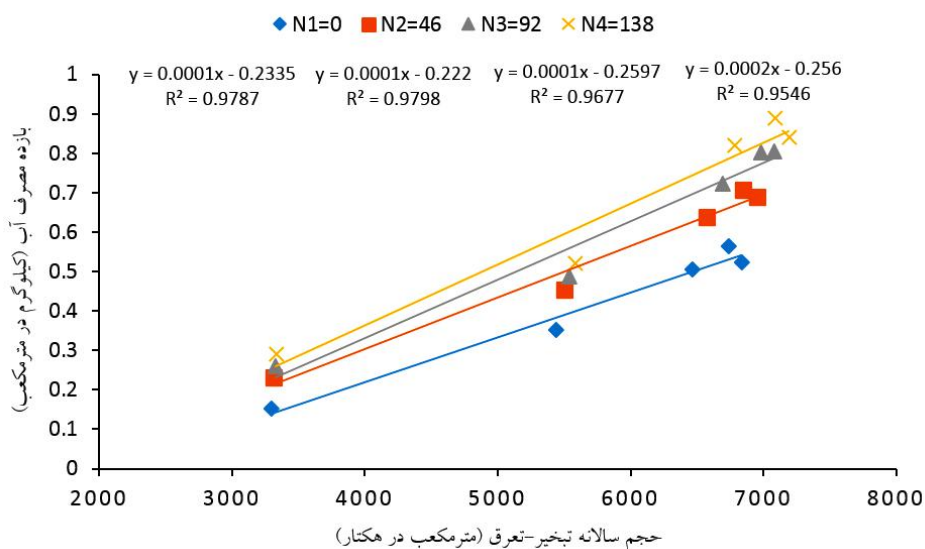
در مطالعه‌ای پرادهام و همکاران برای مدیریت مقادیر مختلف آب و کود نیتروژن روی WP و WUE گیاه گندم آزمایش‌های میدانی متعددی در طول سال‌های ۲۰۰۹-۲۰۱۱ انجام گرفت، و بیان کردند که تأمین ۶۰ درصد ظرفیت زراعی و استفاده از کود نیتروژن به مقدار ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار از بیشترین بهره‌وری آب برخوردار است (۱۷). زند پارسا و همکاران معادله‌ای برای برآورد مقدار محصول ذرت با استفاده از عمق آب آبیاری و کل نیتروژن موجود در خاک ارائه کردند (۲۵). سپاسخواه و همکاران نیز برای بررسی همزمان تأثیر مقادیر مختلف مجموع آب آبیاری و بارندگی و کل نیتروژن موجود در خاک برای محصول دانه گندم زمستانه معادله‌ای ارائه کردند (۲۲).

در این مطالعه نتیجه حاصل از برقراری ارتباط میان IRWP با مجموع آب آبیاری و باران و کل نیتروژن موجود در خاک، و WUE با مقدار تبخیر-تعرق و کل نیتروژن موجود در خاک معادله‌هایی به‌صورت زیر هستند:

با شبیه‌سازی تبخیر-تعرق واقعی گیاه در نهایت تولید ماده خشک و محصول دانه شبیه‌سازی می‌شود (۱۵). گرچه با استفاده از مدل WSM رابطه بین بهره‌وری آب و بازده مصرف آب در مقادیر مختلف کود نیتروژن، مجموع آب آبیاری و بارندگی و تبخیر-تعرق مناسب است ولی برای تعیین آنها لازم است تا این مدل اجرا شود که برای همگان میسر نیست. به همین علت همبستگی بین IRWP و مجموع آب آبیاری و باران و کل نیتروژن موجود در خاک (مجموع نیترات و آمونیوم موجود در خاک تا عمق ۰/۶ متر و مقدار کود نیتروژن داده شده) و WUE با مقدار تبخیر-تعرق و کل نیتروژن موجود در خاک بررسی شد. با برقراری همبستگی بین IRWP و مقادیر مختلف مجموع آب آبیاری و بارندگی و همچنین WUE مقادیر مختلف تبخیر-تعرق، همان‌طور که در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است، با افزایش مقدار کود نیتروژن، مقادیر IRWP و WUE افزایش یافته است، و برای هر مقدار نیتروژن به ترتیب یک معادله درجه دو و درجه یک مجزا وجود دارد، اما از آنجایی که هدف از این مطالعه بررسی روند تغییرات WUE



شکل ۴. رابطه بین بهره‌وری آب بر اساس مجموع آب آبیاری و باران و مجموع آب آبیاری و باران در مقادیر مختلف نیتروژن کاربردی



شکل ۵. رابطه بین بازده مصرف آب و مقادیر مختلف تبخیر- تعرق واقعی در مقادیر مختلف نیتروژن کاربردی

که در آنها IRWP بهره‌وری آب در واحد مجموع حجم آب آبیاری و بارندگی (کیلوگرم بر متر مکعب) و WUE بازده مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب) است. نتایج واسنجی معادله‌های به‌دست آمده در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است.

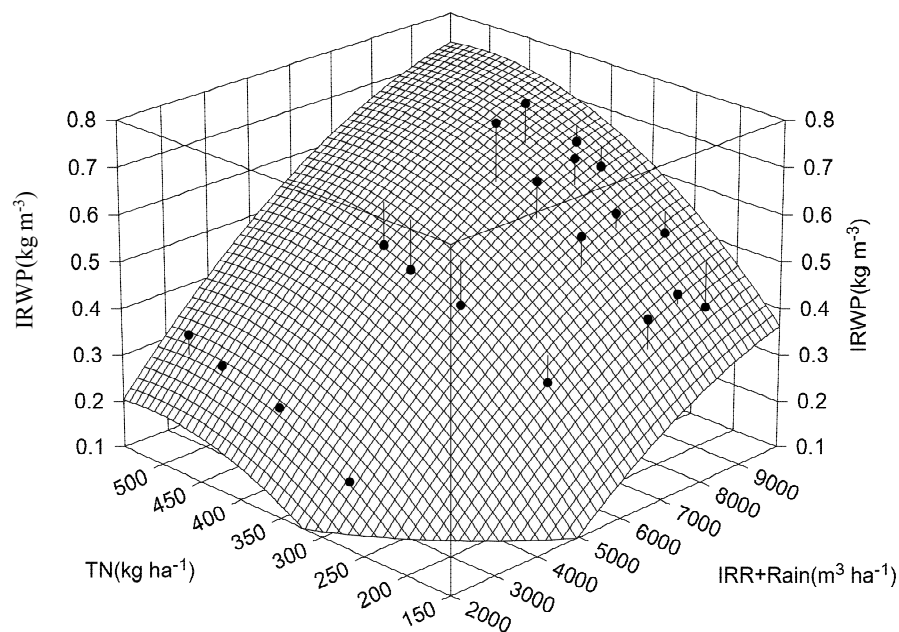
نتایج حاصل از اعتبارسنجی معادله‌های به‌دست آمده با استفاده از داده‌های سال دوم زراعی در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE) محاسبه شد،

$$\begin{aligned} \text{IRWP} = & -0.82 + 0.00013(\text{IRR} + \text{Rain}) - \\ & 5.4910^{-9}(\text{IRR} + \text{Rain})^2 + \\ & 0.003\text{TN} - 2.9510^{-6}\text{TN}^2 - \\ & 4.1510^{-9}(\text{IRR} + \text{Rain})\text{TN} \end{aligned} \quad (6)$$

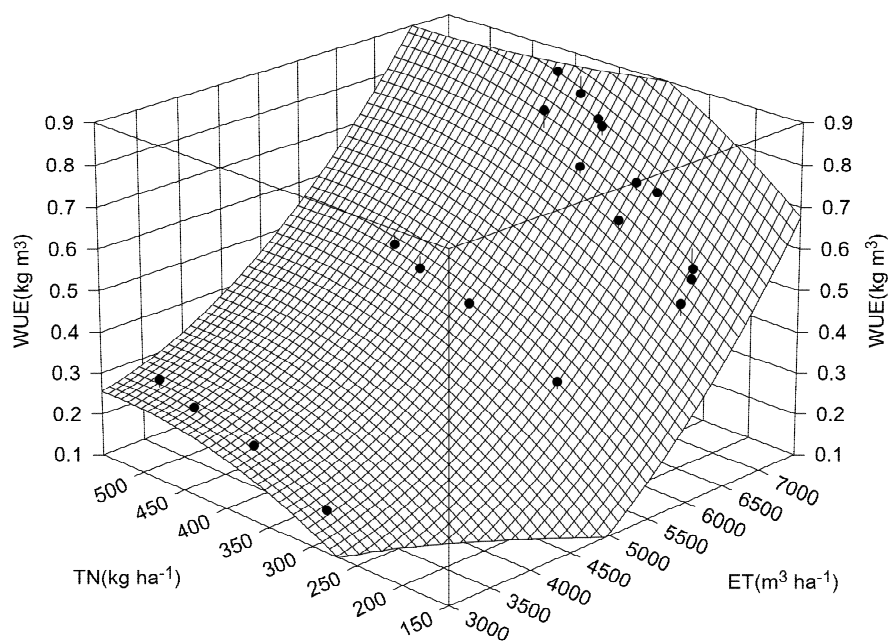
$R^2 = 0.87$, $\text{SE} = 0.05$, $n = 20$,
 $P = 1.912\text{E}-09$, $\text{NRMSE} = 0.21$

$$\begin{aligned} \text{WUE} = & -0.24169 - 0.00014\text{ET} + 2.9510^{-8}\text{ET}^2 + \\ & 0.002468\text{TN} - 2.3910^{-6}\text{TN}^2 + \\ & 1.7410^{-8}\text{ET TN} \end{aligned} \quad (7)$$

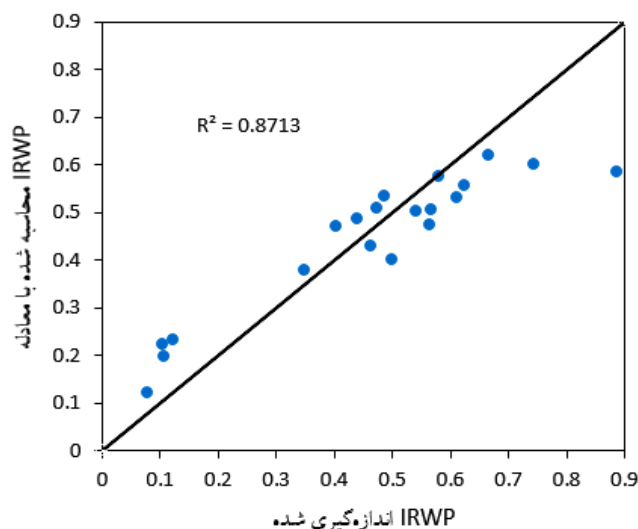
$R^2 = 0.89$, $\text{SE} = 0.1$, $n = 20$,
 $P = 3.56\text{E}-10$, $\text{NRMSE} = 0.32$



شکل ۶. واسنجی رابطه بین بهره‌وری آب بر اساس مجموع آب آبیاری و باران، مجموع آب آبیاری و باران و مقادیر کل نیتروژن موجود در خاک با استفاده از داده‌های سال ۱۳۸۸-۱۳۸۹

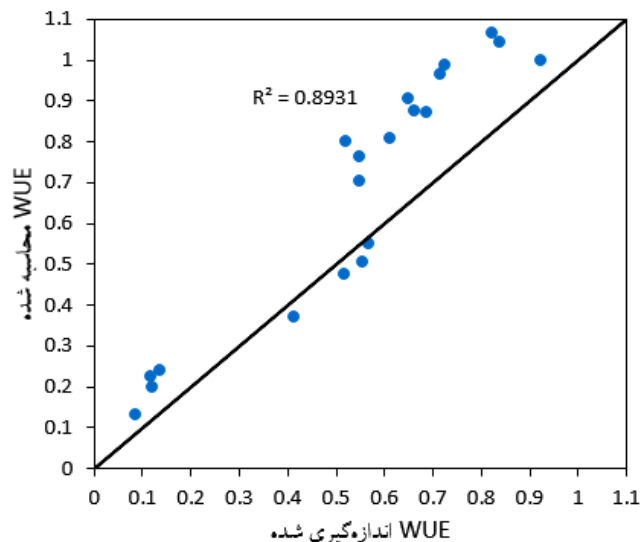


شکل ۷. واسنجی رابطه بین بازده مصرف آب، تبخیر-تعرق و مقدار کل نیتروژن موجود در خاک با استفاده از داده‌های سال ۱۳۸۸-۱۳۸۹



شکل ۹. بازده مصرف آب (WUE) اندازه گیری و شبیه سازی

شده با معادله (۷) در سال ۱۳۸۹-۱۳۹۰



شکل ۸. بهره‌وری آب (IRWP) اندازه گیری و شبیه سازی شده

با معادله (۶) در سال ۱۳۸۹-۱۳۹۰

بارندگی (kg m^{-3})، حجم آب آبیاری ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) و Rain حجم بارندگی ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)، TN مقدار کل نیتروژن (kg ha^{-1}) و برای هر تیمار از مجموع نیترات و آمونیوم موجود در خاک تا عمق ۰/۶ متر و مقدار کود نیتروژن داده شده محاسبه می‌شود، TN_p مقدار حداکثر مجموع کود نیتروژن و نیترات و آمونیوم باقی مانده در خاک (kg ha^{-1}) است. در معادله‌های (۸) و (۹) در شرایط نبودن تنش آبی و کمبود نیتروژن مقادیر IRWP به ترتیب برابر ۰/۶۶ و ۰/۸۲ کیلوگرم بر متر مکعب است. برای واسنجی معادله‌های بهره‌وری و بازده مصرف آب در نسبت‌های مختلف کود و نیتروژن خاک و آبیاری و بارندگی از داده‌های سال اول زراعی استفاده شد که نتایج حاصل از آنها در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده و نتایج حاصل از اعتبارسنجی آنها نیز در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است که شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE) محاسبه شده برای معادله (۸) ۰/۸۸ و ۰/۲ و معادله (۹) ۰/۹۳ و ۰/۱۳ است. از معادله (۸) می‌توان بهره‌وری آب را در مقادیر مختلف نهاده‌های کود نیتروژن و آب آبیاری فصلی برآورد کرد. همچنین از معادله (۹) با اندازه‌گیری

و برای معادله (۶) به ترتیب برابر ۰/۸۷ و ۰/۲۱، معادله (۷) ۰/۸۹ و ۰/۳۲ است. بنابراین معادله (۷) برای برآورد WUE از دقت چندان خوبی برخوردار نیست. زیرا مقدار (NRMSE) آن از ۰/۳ بیشتر است.

بنابراین روابطی دیگر بر اساس نسبت مجموع آب آبیاری و بارندگی به مقدار حداکثر آن در تیمار شاهد برای برآورد IRWP و تبخیر-تعرق به تبخیر-تعرق حداکثر برای برآورد WUE، با استفاده از داده‌های سال اول زراعی ارائه شد:

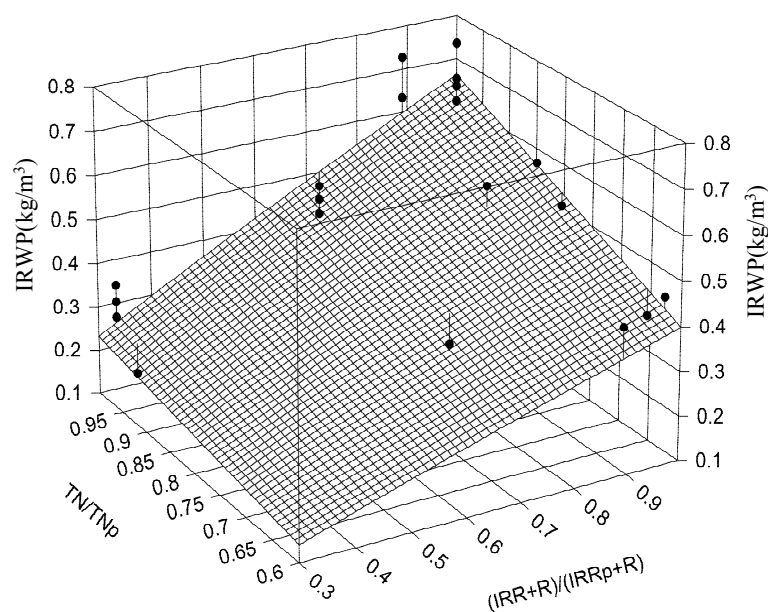
$$\text{IRWP} = 0.66 \left[\left(\frac{\text{IRR} + \text{RAIN}}{\text{IRR} + \text{RAIN}_p} \right)^{0.87} \times \left(\frac{\text{TN}}{\text{TN}_p} \right)^{0.9956} \right] \quad (۸)$$

$$R^2 = 0.88, \text{ SE} = 0.05, \\ n = 20, \text{ p} = 1.05\text{E-}09, \text{ NRMSE} = 0.2$$

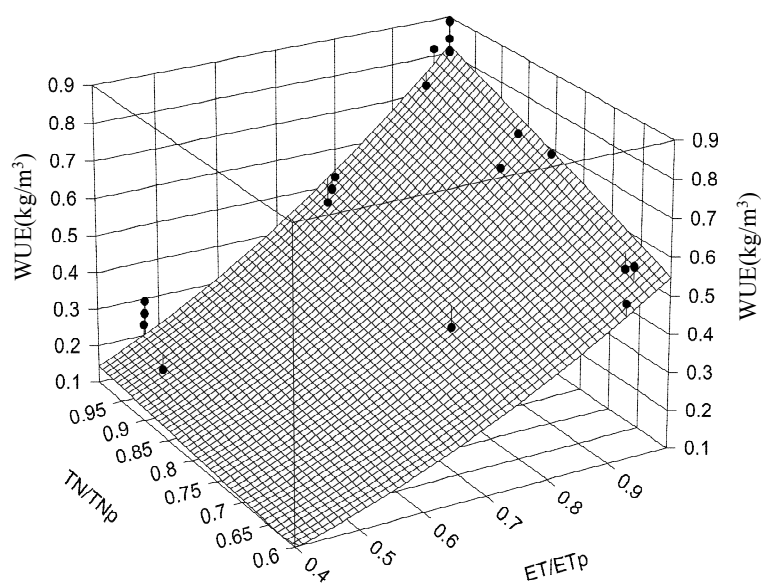
$$\text{WUE} = 0.82 \left[\left(\frac{\text{ET}}{\text{ET}_p} \right)^{1.89} \times \left(\frac{\text{TN}}{\text{TN}_p} \right)^{0.79} \right] \quad (۹)$$

$$R^2 = 0.93, \text{ SE} = 0.07, \\ n = 20, \text{ p} = 8.86\text{E-}12, \text{ NRMSE} = 0.13$$

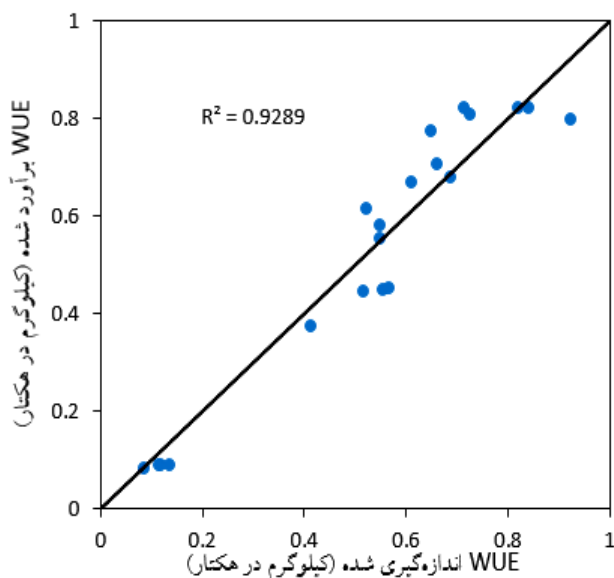
که در آنها WUE بازده مصرف آب (kg m^{-3})، ET_a تبخیر-تعرق واقعی ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)، ET_p تبخیر-تعرق پتانسیل ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)، IRWP بهره‌وری آب در واحد حجم آب آبیاری و IRR



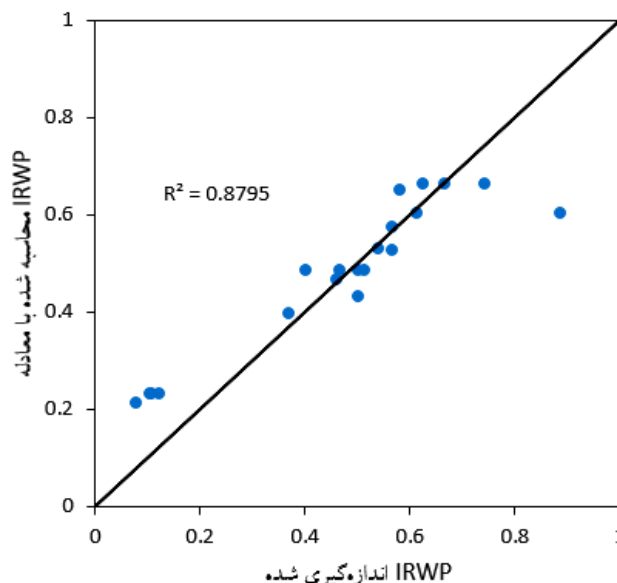
شکل ۱۰. واسنجی رابطه بین بهره‌وری آب مجموع آب آبیاری و بارندگی و مجموع آب آبیاری و بارندگی نسبی و نیتروژن نسبی موجود در ناحیه ریشه با استفاده از داده‌های سال ۱۳۸۸-۱۳۸۹



شکل ۱۱. واسنجی رابطه بین بازده مصرف آب و تبخیر-تعرق نسبی و نیتروژن نسبی موجود در ناحیه ریشه با استفاده از داده‌های سال ۱۳۸۸-۱۳۸۹



شکل ۱۳. بازده مصرف آب (WUE) اندازه گیری و شبیه سازی شده با معادله (۹) در سال ۱۳۸۹-۱۳۹۰



شکل ۱۲. بهره‌وری آب (IRWP) اندازه گیری و شبیه سازی شده با معادله (۸) برای سال ۱۳۸۹-۱۳۹۰

نیست. با برقراری ارتباط میان بهره‌وری آب آبیاری و باران با مقادیر مختلف آب آبیاری و باران و همچنین بازده مصرف آب با مقادیر مختلف تبخیر-تعرق برای هر مقدار نیتروژن یک معادله مجزا (مدل‌های تجربی ساده) حاصل شد، به همین علت با توجه به اثرات متقابل کود نیتروژن و آب آبیاری روی بهره‌وری آب و بازده مصرف آب، میان بهره‌وری آب آبیاری و باران با مجموع آب آبیاری و بارندگی و میزان کل نیتروژن موجود در خاک و همچنین بازده مصرف آب با تبخیر-تعرق و کل نیتروژن موجود در خاک ارتباط برقرار شد، که نتایج حاصل از آن معادله‌های درجه دو (۶) و (۷) و همچنین معادله‌های (۸) و (۹) که از نسبت‌های بدون بعد کود و مقدار نیتروژن باقی‌مانده در خاک به مقدار حداکثر آن در تیمار شاهد و همچنین مجموع آب آبیاری و بارندگی به مقدار حداکثر آن در تیمار شاهد، بازده مصرف آب و بهره‌وری آب آبیاری و بارندگی هستند، به دست آمدند که به جز معادله (۷)، با استفاده از آنها می‌توان مقدار بازده مصرف آب و بهره‌وری مجموع آب آبیاری و بارندگی را برآورد کرد.

نهاده کود نیتروژن و برآورد تبخیر-تعرق فصلی مزارع با سیستم آبیاری مشابه با روش به کار برده در این تحقیق می‌توان بازده مصرف آب را در مقادیر مختلف کمبود کود نیتروژن و تنش آبی برآورد کرد. در صورتی که ET/ET_p یا TN/TN_p بزرگ‌تر از یک بود باید آن را برابر یک فرض کرد و در معادله قرار داد.

نتیجه گیری

نتایج این بررسی‌ها نشان داد که بهره‌وری آب آبیاری و باران و بازده مصرف آب وابسته به مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن‌دار هستند. به منظور بررسی ارتباط میان بهره‌وری آب و بازده مصرف آب با مقادیر مختلف آب آبیاری و کود نیتروژن می‌توان با استفاده از مدل شبیه‌سازی رشد گیاهی WSM که دقت خوبی در شبیه‌سازی مقدار محصول دانه گندم در شرایط مختلف آب و کود نیتروژن دارد، مقدار بازده مصرف آب و بهره‌وری آب آبیاری و باران را با دقت خوبی برآورد کرد ولی برای تعیین آنها لازم است تا مدل WSM اجرا شود که برای همگان میسر

تقدیر و تشکر

مؤلف چهارم (علی‌رضا سپاسخواه) از تأمین امکانات پژوهش توسط صندوق حمایت از پژوهشگران معاونت محترم ریاست جمهوری قدردانی می‌کند.

بدین‌وسیله از حمایت مالی شورای پژوهشی دانشگاه شیراز، مرکز مطالعات خشکسالی و قطب علمی مدیریت آب در مزرعه برای انجام این پژوهش نهایت تقدیر و تشکر را دارم، همچنین

منابع مورد استفاده

1. Abbasi, F., A. Naseri, F. Sohrab, J. Baghani, N. Abbasi and M. Akbari. 2016b. Promoting of agricultural water productivity. Technical Note No. K34/94. Agricultural Engineering Research Institute. Karaj, Iran. (In Farsi).
2. Abbasi, F., N. Abbasi and A. R. Tavakoli. 2017. Agricultural water productivity: Chalenges and visions. *Water and Sustainable Development* 4(1): 141-144. (In Farsi).
3. Albrizio, R., M. Todorovic, T. Matic and A. M. Stellacci. 2010. Comparing the interactive effects of water and nitrogen on durum wheat and barley grown in a Mediterranean environment. *Field Crops Research* 115(2): 179-190.
4. Araya, A., P. Gowda, B. Golden, A. Foster, J. Aguilar, R. Currie and P. Prasad. 2019. Economic value and water productivity of major irrigated crops in the Ogallala aquifer region. *Agricultural Water Management* 214: 55-63.
5. Doyle, A., and I. Holford. 1993. The uptake of nitrogen by wheat, its agronomic efficiency and their relationship to soil and fertilizer nitrogen. *Australian Journal of Agricultural Research* 44(6): 1245-1258.
6. Ercoli, L., L. Lulli, M. Mariotti, A. Masoni and I. Arduini. 2008. Post-anthesis dry matter and nitrogen dynamics in durum wheat as affected by nitrogen supply and soil water availability. *European Journal of Agronomy* 28(2): 138-147.
7. Fallahi, H., A. Nasserri and A. Siadat. 2008. Wheat yield components are positively influenced by nitrogen application under moisture deficit environments. *International Journal of Agriculture* 10(6): 673-676.
8. Farrer, D. C., R. Weisz, R. Heiniger, J. P. Murphy and J. G. White. 2006. Minimizing protein variability in soft red winter wheat. *Agronomy Journal* 98(4): 1137-1145.
9. Hopkins, W. G. and N. P. A. Huner. 2004. Introduction to Plant Physiology. John Wiley & Sons. Inc. USA, 3.
10. Huggins, D. and W. Pan. 1993. Nitrogen efficiency component analysis: an evaluation of cropping system differences in productivity. *Agronomy Journal* 85(4): 898-905.
11. Iqbal, M. A., Y. Shen, R. Stricevic, H. Pei, H. Sun, E. Amiri and S. del Rio. 2014. Evaluation of the FAO Aquacrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management* 135: 61-72.
12. Kiani, A. R. and F. Abbasi. 2012. Optimizing water consumption using crop water production functions. *Crop Production Technologies* 73-92.
13. Kijne, J. W., R. Barker and D. J. Molden. 2003. Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement. CAB International, Wallingford, UK: xi-ixx.
14. Mahbod, M. 2013. Modification of maize simulation model for predicting growth and yield of winter wheat under different applied water and nitrogen. Ph.D. dissertation, Shiraz University.
15. Mahbod, M., S. Zand-Parsa and A. R. Sepaskhah. 2015. Modification of maize simulation model for predicting growth and yield of winter wheat under different applied water and nitrogen. *Agricultural Water Management* 150: 18-34.
16. Mugabe, F. and E. Nyakatawa. 2000. Effect of deficit irrigation on wheat and opportunities of growing wheat on residual soil moisture in southeast Zimbabwe. *Agricultural Water Management* 46(2): 111-119.
17. Pradhan, S., U. K. Chopra, K. K. Bandyopadhyay, R. Singh, A. K. Jain and I. Chand. 2013. Effect of water and nitrogen management on water productivity and nitrogen use efficiency of wheat in a semi-arid environment. *International Journal of Agriculture and Food Science Technology* 4(7): 727-732.
18. Qi, J. -C., G. -P. Zhang and M. -X. Zhou. 2006. Protein and hordein content in barley seeds as affected by nitrogen level and their relationship to beta-amylase activity. *Journal of Cereal Science* 43(1): 102-107.
19. Raine, S., D. McClymont and R. Smith. 1997. The development of guidelines for surface irrigation in areas with variable infiltration. Paper presented at the Proceedings-Australian Society of Sugar Cane Technologists.
20. Raun, W. R., and G. V. Johnson. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agronomy Journal* 91(3): 357-363.
21. Razzaghi, F., and A. R. Sepaskhah. 2012. Calibration and validation of four common ET₀ estimation equations by lysimeter data in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management Soil Science* 58(3): 303-319.

22. Sepaskhah, A. R., A. Azizian and A. R. Tavakoli. 2006. Optimal applied water and nitrogen for winter wheat under variable seasonal rainfall and planning scenarios for consequent crops in a semi-arid region. *Agricultural Water Management* 84(1-2): 113-122.
23. Stockle, C., and G. Campbell. 1985. A simulation model for predicting effect of water stress on yield: An example using corn. *Advances in Irrigation* 3: 283-311.
24. Subedi, K., B. Ma and A. Xue. 2007. Planting date and nitrogen effects on grain yield and protein content of spring wheat. *Crop Science* 47(1): 36-44.
25. Zand-Parsa, S. and A. R. Sepaskhah. 2001. Optimal applied water and nitrogen for corn. *Agricultural Water Management* 52(1): 73-85.
26. Zand-Parsa, S., A. R. Sepaskhah and A. Ronaghi. 2006. Development and evaluation of integrated water and nitrogen model for maize. *Agricultural Water Management* 81(3): 227-256.

Estimation of Wheat Water Productivity and Water Use Efficiency (Shiraz Cultivar) under Different Amounts of Deficit Irrigation and Nitrogen Deficiencies

Sh. Zand-Parsa^{1*}, F. Ghasemi Saadat Abadi¹, M. Mahbod² and
A. R. Sepaskhah¹

(Received: March 16-2019; Accepted: November 2-2019)

Abstract

Due to the limited water resources and growing population, food security and environmental protection have become a global problem. Increasing water productivity of agricultural products is one of the main solutions to cope with the difficulties. By optimizing applied water and nitrogen fertilizer, the pollution of groundwater could be decreased and the water productivity could be increased. The aim of this research was to determine the relationships between water productivity (*IRWP*) and water use efficiency (*WUE*) and different amounts of applied water (irrigation + rain fed) and nitrogen (applied and residual). This study was conducted on wheat (*Triticum aestivum* L., cv. Shiraz) in Shiraz University School of Agriculture, based on a split-plot design with three replications, in 2009-2010 and 2010-2011 periods. Irrigation treatments varied from zero to 120% of full irrigation depth, and nitrogen fertilizer treatments varied from zero to 138 kg ha⁻¹ under basin irrigation system. The experimental data of the first and second years were used for the calibration and validation of the proposed relationships, respectively. The calibrated equations using the dimensionless ratios of irrigation depth plus rainfall, actual evapotranspiration and nitrogen fertilizer plus soil residual nitrogen to their amounts in full irrigation and maximum fertilizer amounts were appropriate for the estimation of water productivity and water use efficiency. The values of the determination coefficient (R^2) for water productivity and water use efficiency (0.88 and 0.93, respectively), and the values of their normalized root mean square error (NRMSE) (0.2 and 0.13, respectively) showed a good accuracy for the estimation of *IRWP* and *WUE*.

Keywords: Optimal applied water Evapotranspiration, Nitrogen fertilizer, Calibration.

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Shiraz University, Shiraz, Iran.

2. Department of Water Science Engineering, Faculty of Agriculture, Jahrom University, Jahrom, Iran.

*: Corresponding author, Email: zandparsa@yahoo.com