

شاخص کارایی مصرف عناصر غذایی ذرت در واکنش به مقادیر متفاوت کودهای نیتروژن و فسفر در رژیم های مختلف آبیاری

Nutrient efficiency index of maize in response to varying rates of nitrogen and phosphorus fertilizers under different irrigation water regimes

علی مومن^۱، علیرضا کوچکی^{۲*}، مهدی نصیری محلاتی^۳

۱. دانشجوی دکتری اگرواکولوژی گروه زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد
۲. استاد گروه اگروتکنولوژی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد. (نگارنده مسئول)
۳. استاد گروه اگروتکنولوژی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد.

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۰۸

چکیده

مومن، ع.، کوچکی، ع.، نصیری محلاتی، م.، شاخص کارایی مصرف عناصر غذایی ذرت در واکنش به مقادیر متفاوت کودهای نیتروژن و فسفر در رژیم های مختلف آبیاری
نشریه پژوهش های کاربردی زراعی دوره ۳۱ - شماره ۱ - پایبند ۱۱۸ بهار ۹۷: ۵۲-۷۷

به منظور درک اثر متقابل آب، نیتروژن و فسفر بر عملکرد و کارایی مصرف عناصر غذایی ذرت آزمایشی به صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در دوسال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد اجرا شد. آبیاری در سه سطح ETc_{80} ، ETc_{100} ، و ETc_{120} درصد نیاز آبی گیاه به عنوان کرت اصلی و ترکیب فاکتوریل سه سطح صفر (N_0)، 200 (N_{200}) و 400 (N_{400}) کیلوگرم نیتروژن در هکتار با صفر (P_0)، 100 (P_{100}) و 200 (P_{200}) کیلوگرم فسفر در هکتار در کرت های فرعی در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که با افزایش هر یک از نهاده ها عملکرد دانه ذرت بهبود یافت. روند تاثیر هر یک از این نهاده ها بر عملکرد دانه به ترتیب $N > ETc > P$ بود. اثر متقابل مصرف آب و نیتروژن نشان داد که عملکرد و کارایی مصرف نیتروژن و فسفر در سطح N_0 با افزایش ETc بطور نسبتا خطی افزایش یافت، اما این صفات در تیمارهای N_{200} و N_{400} با افزایش آبیاری بیش از ETc_{100} به ترتیب بدون تغییر بودند و حتی کاهش یافتند. بنابراین بر اساس نتایج حاصل از این آزمایش، $ETc_{100}N_{200}$ بهینه ترین تیمار در افزایش عملکرد و کارایی مصرف نیتروژن به طور همزمان بودند. اثر متقابل نیتروژن و فسفر بر عملکرد و جذب عناصر غذایی مثبت و به صورت هم افزایی بود. نتایج آنالیز مسیر مشخص نمود که در اغلب تیمارهای آزمایش تاثیر کارایی جذب نیتروژن و فسفر در مقایسه با کارایی تبدیل آنها بر کارایی مصرف هر یک از این عناصر غذایی بارزتر بود.

واژه های کلیدی: بهینه سازی، کارایی تبدیل، کارایی جذب، نیاز آبی گیاه

آدرس پست الکترونیکی نگارنده مسئول: akooch@um.ac.ir

مقدمه

با توجه به محدودیت منابع آب و همچنین عدم امکان توسعه بیشتر سطح زیر کشت، تامین نیاز روزافزون غذایی جهان مستلزم نوعی فشرده سازی¹ در سیستم های کشاورزی است (Mueller et al., 2012). سیستم هایی با مدیریت فشرده و عملکرد بالا با استفاده از آبیاری و کود دهی، نیاز گیاهان را تامین می کنند، اما کارایی استفاده از نهاده ها به دلیل افزایش بیش از حد نیاز گیاه کاهش می یابد (Bai & Tao, 2017; Teixeira et al., 2014). ضمن اینکه مازاد استفاد از کودهای شیمیایی مشکلات زیست محیطی متعددی از قبیل آلودگی هوا، خاک، آب های سطحی و زیرزمینی و افزایش گازهای گلخانه ای را ایجاد می کند (Maris et al., 2015; Loick et al., 2016). از این رو بهینه سازی مصرف آب و عناصر غذایی راهکار موثری در حفاظت از منابع و کاهش مشکلات زیستی محیطی است (Koocheki et al., 2014). بنابراین برای رسیدن به این اهداف ضروری است که بر روی افزایش کارایی مصرف نهاده ها تمرکز بیشتری صورت گیرد (Quemada & Gabriel, 2016).

کارایی مصرف عناصر غذایی را می توان در مقیاس های متفاوت از سطح برگ تا پوشش گیاهی (کانوپی) بررسی نمود (Quemada & Gabriel, 2016). در سطح محصول کارایی مصرف عناصر غذایی به صورت مقدار عملکرد تولید شده به ازای عناصر غذایی موجود در خاک تعریف می شود که این شاخص خود از دو مولفه کارایی جذب و کارایی تبدیل عناصر غذایی تشکیل می شود (Moll et al., 1982; Sandana, 2010).

کمبود آب اغلب پتانسیل رشد و تولید اکوسیستم های کشاورزی را در مناطق خشک و نیمه خشک محدود می کند (Cao et al., 2007). با این وجود آب تنها عامل محدود کننده رشد در این مناطق نیست و گیاهان اغلب با کمبود عناصر غذایی نیز مواجه هستند (Maestre et al., 2005). نیتروژن و فسفر عموماً از طریق محدودیت رشد و عملکرد گیاهان، مهمترین عناصر غذایی در تعیین ساختار، فرایندها و کارکردهای اکوسیستم های کشاورزی محسوب می شوند (Hu & Schmidhalter, 2005). علاوه بر این تنش خشکی نه تنها رشد گیاهان را به طور مستقیم تحت تاثیر قرار می دهد، بلکه به طور غیر مستقیم روی پاسخ گیاهان در ارتباط با مواد غذایی نیز موثر است (Zobel, 2004). به عنوان مثال در مطالعه ای که Suja et al. (2003) انجام دادند ملاحظه کردند که فراهمی آب، کارایی استفاده از نیتروژن در تولید زیست توده گیاهی را بهبود داد. کاربرد نیتروژن نیز باعث تحریک رشد، بهبود کارایی آب و دیگر منابع و همچنین کاهش اثرات تنش خشکی می شود (Saneoka et al., 2004). از این رو ممکن است در عمل نتایج آزمایشات ساده کاربرد نیتروژن، فسفر و آبیاری به تنهایی گمراه کننده باشند، چراکه این آزمایشات اثرات متقابل پیچیده این فاکتورها را نشان نمی دهند (Song et al., 2010). بنابراین مطالعه اثر متقابل آب و عناصر غذایی خاک بر روی رشد گیاهان بویژه در محیط های خشک ضروری به نظر می رسد (Song et al., 2010).

1- Intensification

در تعیین بهره وری نیتروژن ذرت دارد (Woku et al., 2007). همچنین گزارش شده است که کارایی مصرف نیتروژن در سطوح پایین آن عمدتاً در نتیجه کارایی جذب نیتروژن تعیین می شود و در سطوح بالای نهاده نقش کارایی تبدیل نیتروژن بیشتر می شود (Pask et al., 2012). به طور کلی مشخص شده که نقش هر یک از این مولفه ها در تعیین کارایی مصرف عناصر غذایی به ژنوتیپ، شرایط محیطی و سطح نهاده مورده استفاده بستگی دارد (Dordas, 2011).

هدف این مطالعه ارزیابی اثر سطوح مختلف مصرف آب، نیتروژن و فسفر به همراه اثر متقابل آنها بر عملکرد دانه ذرت، کارایی جذب، کارایی تبدیل و کارایی مصرف عناصر غذایی نیتروژن و فسفر است. علاوه بر این به منظور درک بهتر تغییرات کارایی مصرف عناصر غذایی، اهمیت نقش هر یک از مولفه های تشکیل دهنده آن در سطوح مختلف مصرف نهاده ها با استفاده از تجزیه مسیر^۳ بررسی شده است.

مواد و روش ها

این مطالعه در دو سال زراعی ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد واقع در ۱۰ کیلومتری شرق مشهد با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی و طول ۵۹ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی و ارتفاع ۹۸۵ متری از سطح دریا انجام شد. آزمایش به صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. سه سطح (ETc_{80}) ، (ETc_{100}) و (ETc_{120}) درصد نیاز آبی

کارایی جذب نیتروژن و فسفر به مقدار عنصر جذب شده توسط گیاه مرتبط است (Sandana, 2016). گزارش شده که در شرایط فراهمی بالای نیتروژن در خاک جذب نیتروژن عمدتاً به رشد و نیاز گیاه به نیتروژن وابسته است، در حالی که در شرایط محدودیت این عناصر کارایی جذب به خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی ریشه گیاه بستگی دارد (Engels & Marschner, 1995). کارایی تبدیل نیتروژن و فسفر نیز بوسیله مقدار عملکرد دانه تولید شده به ازای نیتروژن و فسفر جذب شده تعریف می شود که به انتقال، تخصیص و حرکت مجدد این عناصر درون گیاه و همچنین به فرایندهای متابولیکی خاص در سطح سلول وابسته است (Engels & Marschner, 1995; Gemenet et al., 2015). Moll et al. (1982) به منظور تعیین سهم کارایی جذب و تبدیل در کارایی مصرف نیتروژن ذرت از روش آنالیز جزء^۲ استفاده نمودند و بیان داشتند که کارایی جذب نسبت به کارایی تبدیل سهم بیشتری در کارایی مصرف نیتروژن دارد. مشابه همین یافته ها در مورد فسفر گزارش شد که تحت شرایط محدودیت فسفر کارایی جذب نسبت به کارایی تبدیل فسفر نقش مهمتری در تولید عملکرد دانه داشت (Gemenet et al., 2015). برخلاف نتایج این مطالعات گزارش شده است که در کلزا کارایی تبدیل سهم بیشتری در کارایی مصرف نیتروژن در اغلب شرایط آزمایش نشان داد (Dordas, 2011). در مطالعه ای دیگری مشخص شد که کارایی جذب و مصرف نیتروژن نقش یکسانی

درصد و دور آبیاری نیز طبق عرف منطقه ۷ روز در نظر گرفته شد. بر این اساس تیمارهای ETc_{80} ، ETc_{100} و ETc_{120} به ترتیب معادل $۷۳۹۹/۲$ ، ۹۲۴۹ و $۱۱۰۹۸/۸$ متر مکعب در هکتار در سال ۱۳۹۳ و ۸۱۴۵ ، $۱۰۱۸۱/۲$ و $۱۲۲۱۷/۴$ متر مکعب در هکتار در سال ۱۳۹۴ آبیاری شدند.

عملیات خاک‌ورزی اولیه شامل شخم، لولر برای تسطیح زمین و ایجاد شیارهای ۷۰ سانتی متری به وسیله فاروئر در اوایل اردیبهشت هر سال انجام شد. پس از آن نقشه طرح پیاده و کرت‌هایی به ابعاد ۴ در ۳/۵ متر ایجاد گردید. هر کرت شامل ۵ ردیف بود که بذرهای ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ بر روی پشته‌ها به فاصله ۲۰ سانتی متری کشت شدند. تیمارهای کود فسفر به صورت نواری در زیر ناحیه ریشه در تمامی کرت‌های مربوطه به صورت یکنواخت قرار داده شد. کود شیمیایی نیتروژن (اوره) در سه مرحله، هنگام کاشت، مرحله سه برگی و در زمان گلدهی به خاک اضافه شد. عملیات کاشت به ترتیب در ۱۴ و ۱۸ اردیبهشت سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ انجام شد. وجین علف‌های هرز در دو نوبت به صورت دستی انجام گرفت.

گیاه در کرت‌های اصلی و ترکیب فاکتوریل سه سطح نیتروژن (۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار) از منبع اوره و سه سطح فسفر (۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) از منبع سوپرفسفات تریپل در کرت‌های فرعی در نظر گرفته شدند. خصوصیات خاک محل آزمایش در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری طی دو سال در جدول ۱ نشان داده شده است.

نیاز آبی گیاه با استفاده از تشتک تبخیر کلاس A محاسبه شد. سپس بر اساس ضریب تشتک و ضریب گیاهی، حجم آب مصرفی مورد نیاز در هر مرحله از آبیاری با استفاده از معادله ۱ تعیین شد (Allen et al., 1998).

$$ETc = E_{pan} \times K_p \times K_c \quad (1) \text{ معادله}$$

که در آن E_{pan} : تبخیر از تشتک (میلی متر)، K_p : ضریب تشتک (۰/۶) و K_c : ضریب گیاهی ذرت است. ضریب گیاهی در طول دوره رشد متفاوت بود که براساس نشریه فائو ۵۶ این ضرایب در هر مرحله تعیین و تصحیح شد (Allen et al., 1998). آبیاری کرت‌ها بوسیله لوله‌های پلی اتیلن و حجم آب ورودی به کرت با کنتور کنترل شد. بازده آبیاری در این شرایط ۹۰

جدول ۱. خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک محل آزمایش در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری خاک در دو سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴.

Table 1. Soil physico-chemical properties of the experimental site at 0-30 cm depth during 2014 and 2015

بافت خاک Soil texture	نیتروژن کل Total N (%)	فسفر و پتاسیم در دسترس Available		کربن آلی OC (%)	ماده آلی OM (%)	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	جرم مخصوص ظاهری B.D (g cm ⁻³)	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC (meq lit ⁻¹)	اسیدیته pH
		P (ppm)	K (ppm)						
2014 Loam	0.09	13.1	134.6	0.19	0.33	1.3	1.28	13.4	7.4
2015 Silt loam	0.084	10.3	112.7	0.16	0.27	1.2	1.33	12.2	7.2

$$NU_tE = \frac{YGY}{N \text{ uptake}} \quad (2)$$

$$PU_tE = \frac{YGY}{P \text{ uptake}} \quad (3)$$

$$NU_pE = \frac{N \text{ uptake}}{N \text{ soil}} \quad (4)$$

$$PU_pE = \frac{P \text{ uptake}}{P \text{ soil}} \quad (5)$$

تجزیه مرکب داده ها پس از آزمون یکنواختی واریانس خطا در دوسال آزمایش به وسیله نرم افزار SAS 9.4 انجام شد. میانگین تیمارهای مختلف توسط آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد مقایسه گردیدند. به منظور ارزیابی اثر مستقیم کارایی جذب و تبدیل بر کارایی مصرف نیتروژن و فسفر در تجزیه مسیر ابتدا داده ها استاندارد شد، سپس با استفاده از نرم افزار Minitab 17.1 و رابطه رگرسیونی اثر مستقیم هر یک از مولفه ها بر کارایی کل تعیین شد.

نتایج و بحث

عملکرد دانه

نتایج تجزیه مرکب داده ها در دو سال آزمایش نشان داد که اثر اصلی تمامی فاکتورهای آزمایشی به همراه اثر متقابل نیتروژن در فسفر و آب بر عملکرد دانه ذرت معنی دار بود، درحالیکه اثر تصادفی سال و سال در تیمارهای آزمایش اختلاف معنی داری از این نظر نشان ندادند (جدول ۲). با افزایش کاربرد هر یک از نهاده ها عملکرد دانه ذرت افزایش یافت، اگرچه تاثیر نیتروژن بر تغییرات عملکرد دانه بیشتر از سایر فاکتور ها بود و تیمارهای N_{200} و N_{400} عملکرد دانه را در مقایسه با شاهد به ترتیب ۲۴ و ۳۸ درصد بهبود دادند (جدول ۳).

برای اندازه گیری عملکرد دانه (رطوبت پایه ۱۴ درصد) و بیولوژیک هر کرت در زمان رسیدگی (۲۷ شهریور سال ۱۳۹۳ و ۲۱ شهریور سال ۱۳۹۴) تمامی بوته ها از مساحت دو متر مربع برداشت شدند و بوته های برداشت شده به مدت یک هفته در سایه و دمای معمولی قرار گرفتند و پس از توزین، عملکرد هر کرت مشخص شد. درصد نیتروژن و فسفر دانه و کاه و کلش ذرت به صورت جداگانه در انتهای رشد گیاهان تیمارهای مختلف به ترتیب به وسیله ی دستگاه میکروکجلدال و اسپکتروفتومتر تعیین شد.

کارایی تبدیل نیتروژن (fNU_pE) و فسفر (gPU_pE) بر اساس نسبت عملکرد دانه (Y_{GY}) به نیتروژن (N_{uptake}) و فسفر جذب شده (P_{uptake}) در اندام هوایی ذرت بر اساس معادلات ۲ و ۳ محاسبه شد (Lo 'pez-Bellido & Lo 'pez-Bellido, 2001). کارایی جذب نیتروژن (fNU_pE) و فسفر (gPU_pE) بر اساس نیتروژن و فسفر جذب شده در اندام هوایی ذرت به نیتروژن و فسفر موجود در خاک که شامل مجموع نیتروژن و فسفر معدنی خاک و کود مورد استفاده بود بر اساس معادلات ۴ و ۵ محاسبه شد (Lo 'pez-Bellido & Lo 'pez-Bellido, 2001). کارایی مصرف نیتروژن (NUE) و فسفر (PUE) نیز از حاصل ضرب کارایی جذب در کارایی مصرف نیتروژن و فسفر بدست آمد.

-
- 4- N utilization efficiency
 - 5- P utilization efficiency
 - 6- N uptake efficiency
 - 7- P uptake efficiency

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) عملکرد دانه، محتوی نیتروژن جذب شده، کارایی جذب، کارایی تبدیل و کارایی مصرف نیتروژن ذرت تحت تاثیر تیمارهای مختلف نیتروژن، فسفر و آب.

Table 2. Results of variance analysis (mean of squares) for grain yield, N uptake, NU_{pE} , NU_{tE} and NUE of maize under different treatments of nitrogen, phosphorous and water

منابع تغییر Sources of variation	df	عملکرد دانه Grain yield	محتوی نیتروژن جذب شده N uptake	کارایی جذب نیتروژن NU_{pE}	کارایی تبدیل نیتروژن NU_{tE}	کارایی مصرف نیتروژن NUE
سال (Year)	1	8416210.4 ^{ns}	18630.2 ^{ns}	820.5 ^{ns}	89.1 ^{ns}	40.1 ^{ns}
REP (Year)	4	4290556.3	2842.3	192.9	19.4	44.8
تبخیر و تعرق گیاه (ETc)	2	21212904.8*	35216.1**	2789.7**	123.1 ^{ns}	208*
Year × ETc	2	1071536.7 ^{ns}	215.8 ^{ns}	21.5 ^{ns}	21.1 ^{ns}	8.3 ^{ns}
REP × ETc (Year)	8	269093.8	866.8	72.9	17.3	2.2
نیتروژن (N)	2	82138900.0**	158734*	25070.3***	1006.8*	6944.9***
فسفر (P)	2	6267253.5*	26612.8*	2243.6*	306.1*	49.5*
N × P	4	501775.1*	1285**	37**	10.3 ^{ns}	1.5 ^{ns}
ETc × N	4	1510430.2*	3966.6***	202.7**	17.1 ^{ns}	21.5**
ETc × P	4	80901.5 ^{ns}	178.1 ^{ns}	24.2 ^{ns}	5.2 ^{ns}	0.6 ^{ns}
ETc × N × P	8	170997.7 ^{ns}	41.6 ^{ns}	11.5 ^{ns}	6.7 ^{ns}	1.1 ^{ns}
Year × N	2	28965.3 ^{ns}	1733.2 ^{ns}	21.6 ^{ns}	19.5 ^{ns}	1.5 ^{ns}
Year × P	2	234812.1 ^{ns}	747.2 ^{ns}	52.8 ^{ns}	5.8 ^{ns}	1.8 ^{ns}
Year × N × P	4	57082.9 ^{ns}	59.9 ^{ns}	2.2 ^{ns}	1.7 ^{ns}	0.3 ^{ns}
Year × ETc × N	4	113851.6 ^{ns}	46.2 ^{ns}	7.1 ^{ns}	9.4 ^{ns}	1 ^{ns}
Year × ETc × P	4	84304.7 ^{ns}	64.8 ^{ns}	7.3 ^{ns}	8.1 ^{ns}	1 ^{ns}
Year × ETc × N × P	8	191857.4 ^{ns}	82.5 ^{ns}	8.6 ^{ns}	3.8 ^{ns}	2.2 ^{ns}

ns، * و **: به ترتیب نشانگر عدم معنی داری و معنی داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می باشد.
ns, * and ** are non-significant and significant at 5 and 1% probability levels, respectively.

جدول ۳. اثر سطوح مختلف مصرف آب، نیتروژن و فسفر بر عملکرد دانه، محتوی نیتروژن جذب شده، کارایی جذب، کارایی تبدیل و کارایی مصرف نیتروژن ذرت.

Table 3. Effect of different levels of water, nitrogen and phosphorus on grain yield, N uptake, NU_{pE} , NU_tE and NUE of maize

تیمارها	عملکرد دانه	محتوی نیتروژن جذب شده	کارایی جذب نیتروژن	کارایی تبدیل نیتروژن	کارایی مصرف نیتروژن	
Treatments	Grain yield (kg ha ⁻¹)	N uptake (Kg N ha ⁻¹)	NU_{pE} (%)	NU_tE (kg GY Kg ⁻¹ N uptake)	NUE (kg GY kg ⁻¹ N _{soil})	
ETc ₈₀	6962.4 ± 158 [†]	177.0 ± 6.4	55.1 ± 2.7	40.5 ± 0.8	22.5 ± 1.2	
ETc	ETc ₁₀₀	8038.1 ± 217.8	223.3 ± 10	66.9 ± 2.7	37.8 ± 0.9	25.5 ± 1.3
	ETc ₁₂₀	8057.6 ± 164.6	218.9 ± 8.1	68.0 ± 3.3	38.1 ± 0.8	26.2 ± 1.5
	HSD	1173.4	16.7	5.3	5.2	3.3
Nitrogen (kg ha ⁻¹)	N ₀	6357.9 ± 101.7	148.0 ± 3.6	86.9 ± 2.1	43.6 ± 0.7	37.4 ± 0.6
	N ₂₀₀	7905.1 ± 154.3	216.0 ± 6.5	58.3 ± 1.7	37.4 ± 0.7	21.4 ± 0.4
	N ₄₀₀	8795.2 ± 151	255.2 ± 8	44.7 ± 1.4	35.3 ± 0.6	15.4 ± 0.3
	HSD	192.9	47.2	5.3	5	1.4
Phosphorus (kg ha ⁻¹)	P ₀	7330.9 ± 175.8	183.0 ± 7.1	56.5 ± 2.6	41.4 ± 0.8	23.4 ± 1.3
	P ₁₀₀	7717.1 ± 197.6	209.0 ± 8.6	64.2 ± 3	38.3 ± 0.7	24.8 ± 1.3
	P ₂₀₀	8010.1 ± 200.1	227.2 ± 9.3	69.3 ± 3.1	36.7 ± 0.8	25.6 ± 1.4
	HSD	549.3	31	8.2	2.7	1.5

[†]Standard error.

میانگین عملکرد ذرت در شرایط آبیاری کامل در مقایسه با کمبود آب ۲۳٪ افزایش یافت و حدود ۱۰۰٪ افزایش زمانی حاصل شد که نیتروژن کافی در اختیار گیاه قرار داشت. در آزمایش دیگری کاربرد نیتروژن در شرایط محدودیت آب عملکرد ذرت را بطور جزئی افزایش داد در حالی که تحت آبیاری کامل این افزایش بیشتر بود (Goh & Haynes, 1986).

اثر متقابل نیتروژن و فسفر نیز نشان داد که در شرایط عدم کاربرد نیتروژن، اثر سطوح مختلف فسفر بر عملکرد دانه ذرت معنی دار

اثر متقابل مصرف آب و نیتروژن نشان داد که در تمامی سطوح نیتروژن اعمال شده با افزایش مصرف آب تا ETc₁₀₀ عملکرد دانه افزایش یافت، اما در تیمار N₄₀₀ برخلاف N₀ و N₂₀₀ با مصرف بیشتر آب تا ETc₁₂₀، عملکرد دانه ذرت کاهش یافت (جدول ۴). به نظر می رسد که تحت این شرایط آبشویی نیتروژن افزایش می یابد که در نهایت باعث کاهش عملکرد دانه ذرت شد که با نتایج محتوی نیتروژن جذب شده در این تیمارها مطابقت دارد (جدول ۴). به عبارت دیگر نتایج نشان داد که واکنش عملکرد دانه ذرت به تیمارهای نیتروژن در سطح ETc₁₀₀ بیشترین افزایش را نشان داد (جدول ۴). O'Neill et al. (2004) نیز گزارش نمودند که

جدول ۴. اثر متقابل مصرف آب و نیتروژن بر عملکرد دانه، محتوی نیتروژن جذب شده، کارایی جذب، کارایی تبدیل و کارایی مصرف نیتروژن ذرت

Table 4. Interaction effect of water use and nitrogen on grain yield, N uptake, NU_pE , NU_tE and NUE of maize

تیمارها	محتوی نیتروژن جذب شده	کارایی جذب نیتروژن	کارایی تبدیل نیتروژن	کارایی مصرف نیتروژن		
Treatments	عملکرد دانه	کارایی جذب نیتروژن	کارایی تبدیل نیتروژن	کارایی مصرف نیتروژن		
ETc	Nitrogen (kg ha ⁻¹)	N uptake (Kg N ha ⁻¹)	NU_pE (%)	NU_tE (kg GY Kg ⁻¹ N _{uptake})	NUE (kg GY kg ⁻¹ N _{soil})	
ETc ₈₀	N ₀	5836.4 ± 161 [†]	132.5 ± 5.1	77.9 ± 3	44.5 ± 1.1	34.3 ± 0.9
	N ₂₀₀	7111.2 ± 214.2	184.3 ± 9	49.8 ± 2.4	39.4 ± 1.3	19.2 ± 0.6
	N ₄₀₀	7939.6 ± 172.6	214.2 ± 8.7	37.6 ± 1.5	37.7 ± 1	13.9 ± 0.3
ETc ₁₀₀	N ₀	6408.4 ± 140.6	148.7 ± 6	87.4 ± 3.5	43.9 ± 1.3	37.6 ± 0.8
	N ₂₀₀	8219.0 ± 269.6	233.0 ± 10.5	62.9 ± 2.8	35.8 ± 1	22.2 ± 0.7
	N ₄₀₀	9486.8 ± 264.4	288.1 ± 14.2	50.5 ± 2.5	33.6 ± 1	16.6 ± 0.5
ETc ₁₂₀	N ₀	6828.9 ± 147.9	162.8 ± 5.8	95.6 ± 3.4	42.5 ± 1.2	40.1 ± 0.8
	N ₂₀₀	8385.0 ± 218.7	230.6 ± 10.6	62.3 ± 2.8	37.0 ± 1	22.6 ± 0.6
	N ₄₀₀	8959.0 ± 202.3	263.2 ± 12.3	46.2 ± 2.1	34.8 ± 1	15.7 ± 0.3
HSD	604.4	12.2	4.8	5.5	1.8	

[†]Standard error.

نیز بهبود می دهد اما غلظت فسفر در گیاه رقیق می شود (Coblentz et al., 2004). به طور مشابه اثر متقابل هم افزایی نیتروژن و فسفر بر جذب عناصر غذایی و عملکرد گیاهان به طور گسترده در مناطق خشک گزارش شده است (Warren et al., 1996; James et al., 2005; Graciano et al., 2006).

نمود، در حالی که در سطوح N_{200} و N_{400} کاربرد فسفر به طور معنی داری عملکرد دانه ذرت را افزایش داد (جدول ۵). این یافته ها نشان می دهد که اثر متقابل نیتروژن و فسفر بر عملکرد دانه به صورت هم افزایی^۸ است. کاربرد فسفر رشد ریشه گیاه را بهبود می دهد و از این طریق باعث افزایش جذب نیتروژن نیز از خاک می شود و بالعکس گزارش شده است که کاربرد نیتروژن با افزایش ماده خشک جذب فسفر را

8- Synergistic

جدول ۵. اثر متقابل نیتروژن و فسفر بر عملکرد دانه، محتوی نیتروژن جذب شده، کارایی جذب، کارایی تبدیل و کارایی مصرف نیتروژن ذرت

Table 5. Interaction effect of nitrogen and phosphorus on grain yield, N uptake, NU_pE , NU_tE and NUE of maize

تیمارها		محتوی	کارایی جذب	کارایی تبدیل	کارایی مصرف	
Treatments		عملکرد دانه	نیتروژن جذب شده	نیتروژن	نیتروژن	
Nitrogen	Phosphorus	Grain yield	N uptake	NU_pE	NU_tE	NUE
(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(Kg N ha ⁻¹)	(Kg N uptake kg ⁻¹ N _{soil})	(kg GY Kg ⁻¹ N uptake)	(kg GY kg ⁻¹ N _{soil})
	P ₀	6202.6 ±163.4 [†]	133.9 ±4.7	78.6 ±2.7	46.7 ±1	36.4 ±0.9
N ₀	P ₁₀₀	6317.2 ±177.5	151.0 ±6.3	88.7 ±3.7	42.4 ±1.1	37.1 ±1
	P ₂₀₀	6553.8 ±186.5	159.2 ±6.5	93.5 ±3.8	41.8 ±1.2	38.5 ±1.1
N ₂₀₀	P ₀	7461.0 ±246.3	190.4 ±8.9	51.4 ±2.4	39.8 ±1.2	20.2 ±0.7
	P ₁₀₀	8035.1 ±256.2	216.8 ±10.8	58.5 ±2.9	37.8 ±1	21.7 ±0.7
	P ₂₀₀	8219.1 ±279.5	240.7 ±11.1	65.0 ±2.9	34.7 ±1	22.2 ±0.7
N ₄₀₀	P ₀	8329.0 ±259.2	224.7 ±11.2	39.4 ±1.9	37.6 ±0.8	14.6 ±0.5
	P ₁₀₀	8799.1 ±279.3	259.1 ±13.8	45.4 ±2.4	34.7 ±0.9	15.4 ±0.5
	P ₂₀₀	9257.4 ±207.1	281.7 ±13.6	49.4 ±2.4	33.7 ±1.2	16.2 ±0.4
HSD		428.0	13.9	2.6	2.4	1.0

[†]Standard error.

کارایی جذب نیتروژن

N_{200} و N_{400} در مقایسه با N_0 به ترتیب به میزان ۳۳ و ۴۹ درصد کاهش پیدا کرد (جدول ۳). دلیل این موضوع هدرروی نیتروژن به اشکال مختلف در مزرعه و عدم افزایش خطی عملکرد و جذب نیتروژن در گیاه متناسب با افزایش کاربرد نیتروژن در خاک است. این یافته مطابق با نتایج Lopez-Bellido & Lopez-Bellido (2001) بر روی گندم بود که بیان داشتند با افزایش

کارایی جذب نیتروژن ذرت به طور معنی داری بین سطوح مختلف مصرف آب ($p \leq 0/01$)، نیتروژن ($p \leq 0/001$) و فسفر ($0/05$) ($p \leq 0/001$) متفاوت بود (جدول ۲). با افزایش مصرف آب و کاربرد فسفر متناسب با تغییرات عملکرد گیاه، کارایی جذب نیتروژن افزایش یافت. اما کارایی جذب نیتروژن در تیمارهای

باشند (Gonzalez-Dugo et al., 2010). از این رو به طور کلی می توان افزایش جذب نیتروژن تحت تاثیر سطوح بالاتر مصرف آب را به بهبود شرایط رطوبتی خاک نسبت داد. با اینحال، در تیمارهایی که نیتروژن مصرف شده بود با افزایش آبیاری تا ETc_{100} جذب نیتروژن افزایش یافت، اما با آبیاری بیشتر تا ETc_{120} جذب نیتروژن در تیمارهای N_{200} و N_{400} در مقایسه با ETc_{100} به ترتیب بدون تغییر و کاهش یافت (جدول ۴). به نظر می رسد با افزایش آبیاری هدرروی و آبشویی مانع جذب بیشتر نیتروژن در این تیمارها شده باشد. مشابه با این یافته ها گزارش شده است که افزایش آبیاری بیش از نیاز گیاه، آبشویی نیتروژن در خاک را افزایش می دهد (Gheysari et al., 2004; Cameira et al., 2003). روند تغییرات کارایی جذب نیتروژن تحت تاثیر اثر متقابل مصرف آب و نیتروژن نیز مشابه با محتوی نیتروژن جذب شده بود با این تفاوت که حداکثر کارایی جذب در شرایط عدم کاربرد نیتروژن حاصل شد و با افزایش آبیاری تا ETc_{120} میزان این کارایی تا ۹۵ درصد افزایش یافت.

اثر متقابل نیتروژن و فسفر بر محتوی نیتروژن جذب شده ($p \leq 0/01$) و کارایی جذب آن ($p \leq 0/01$) معنی دار بود (جدول ۲). نتایج نشان داد که با افزایش کاربرد فسفر، جذب نیتروژن در تیمارهای N_{200} و N_{400} در مقایسه با N_0 بیشتر افزایش یافت و بالاترین و پایین ترین محتوی نیتروژن جذب شده به ترتیب با ۱۳۴ و ۲۸۲ کیلوگرم در هکتار به ترتیب از تیمار N_0P_0 و $N_{400}P_{200}$ مشاهده شد (جدول ۵). این نتایج

کاربرد نیتروژن کارایی جذب آن کاهش می یابد. نتایج همچنین نشان داد که کارایی جذب نیتروژن تحت تاثیر تیمارهای نیتروژن در دامنه ۴۴/۷ تا ۸۶/۹٪ متفاوت بود که در مقایسه با میانگین جهانی ۳۰ تا ۵۰٪ در غلات (Raun & Johnson, 1999) نسبتاً بیشتر است (جدول ۳). علاوه بر این کارایی جذب بیش از ۱۰۰ درصد نیز در تیمارهای آزمایش مشاهده شد (داده ها گزارش نشده است). در توضیح این مطالب می توان به نتایج مطالعه ای اشاره نمود که کارایی جذب نیتروژن گندم را بین ۶۸ تا ۱۴۵ درصد به ترتیب در تیمار ۴۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و بدون استفاده از کود گزارش نمودند (Pask et al., 2012). این محققین بیان کردند که مقادیر بالاتر از واحد کارایی جذب نشان می دهند معدنی شدن نیتروژن به طور معنی داری در طول فصل رشد انجام می شود، درحالیکه کارایی جذب بر اساس نیتروژن اندازه گیری شده خاک در ابتدای آزمایش محاسبه می گردد.

جذب نیتروژن ($p \leq 0/01$) و کارایی جذب آن ($p \leq 0/01$) به طور معنی داری تحت تاثیر اثر متقابل مصرف آب و نیتروژن قرار گرفت (جدول ۲). به طوری که کمترین میزان نیتروژن جذب شده با ۱۳۲ کیلوگرم در هکتار در شرایط عدم کاربرد نیتروژن در تیمار ETc_{80} بدست آمد و ETc_{100} و ETc_{120} جذب نیتروژن را به ترتیب تا ۱۴۸/۷ و ۱۶۲/۸ کیلوگرم در هکتار افزایش دادند (جدول ۴). در همین رابطه گزارش شده است که جذب نیتروژن به فراهمی آن در خاک و رشد گیاه (نیاز گیاه) وابسته است که خود این دو تحت تاثیر محتوای رطوبتی خاک می

بین سطوح بالا و پایین هریک از این نهاده ها اختلاف معنی دار مشاهده شد (جدول ۳). در بسیاری از مطالعات دیگر نیز گزارش شده است کارایی مصرف نیتروژن به طور مثبت و معنی دار به مصرف آب وابسته است (Ladha et al., 2005; Dalal et al., 2013). نتایج همچنین نشان داد که حداکثر کارایی مصرف نیتروژن با $37/4$ کیلوگرم دانه به ازای هر کیلوگرم نیتروژن در خاک در شرایط عدم کاربرد نیتروژن مشاهده شد و با افزایش مصرف نیتروژن تا N_{400} ، میزان این کارایی به $15/4$ کیلوگرم دانه به ازای کیلوگرم نیتروژن خاک کاهش یافت (جدول ۳). این نتایج مطابق با یافته های بسیاری از مطالعات است (Latiri-Souki et al., 1998; Raun & Johnson, 1999; López-Bellido et al., 2005). اگرچه، کمترین میزان نیتروژن با افزایش کارایی مصرف نیتروژن همراه بود ولی این امر ممکن است گمراه کننده به نظر برسد چون تحت این شرایط عملکرد ذرت کاهش یافت (جدول ۳) که همین امر ضرورت بهینه سازی مصرف کودهای شیمیایی در سیستم های کشاورزی را مشخص می کند (Sadras, 2004).

هر دو جزء تشکیل دهنده کارایی مصرف نیتروژن در پاسخ به افزایش کاربرد نیتروژن مشابه با سایر مطالعات (Delogu et al., 1998; López-Bellido & López-Bellido, 2001) به طور معنی داری کاهش یافت (جدول ۳). با اینحال، نقش هریک از این اجزاء در تغییرات کارایی مصرف نیتروژن متفاوت بود. نتایج آنالیز مسیر نشان داد که به طور کلی در اغلب تیمارهای آزمایش کارایی جذب نقش بیشتری

حاکمی از آن است که کاربرد نیتروژن و فسفر جذب یکدیگر را بهبود می دهند. Graciano et al. (2006) نیز مشاهده کردند که افزایش کاربرد فسفر، جذب نیتروژن را افزایش می دهد.

کارایی تبدیل نیتروژن

نتایج تجزیه مرکب دادهای دو سال آزمایش نشان داد که کارایی تبدیل نیتروژن به طور معنی داری تحت تاثیر سطوح مختلف نیتروژن ($p \leq 0/05$) و فسفر ($p \leq 0/05$) قرار گرفت. اما اثر متقابل کلیه تیمارهای آزمایش بر کارایی تبدیل نیتروژن معنی دار نبود (جدول ۲). کارایی تبدیل نیتروژن در تیمارهای P_{100} و P_{200} در مقایسه با P_0 به ترتیب ۱۲ و ۱۴ درصد کاهش یافت و در تیمارهای N_{200} و N_{400} نسبت به N_0 به ترتیب به میزان ۱۴ و ۱۹ درصد کاهش نشان داد (جدول ۳). در همین رابطه گزارش شده است که سطوح بالای کاربرد نیتروژن کارایی تبدیل نیتروژن گندم را به طور معنی داری کاهش داد (Lopez-Bellido & Lopez-Bellido, 2001). این محققین دلیل این موضوع را به واکنش بیشتر گیاه به افزایش جذب نیتروژن نسبت به عملکرد گیاه نسبت دادند.

کارایی مصرف نیتروژن

میانگین کارایی مصرف نیتروژن ذرت در این آزمایش $24/71$ کیلوگرم دانه به ازای هر کیلوگرم نیتروژن بود (جدول ۳) که مشابه یافته های (Di Paolo & Ma et al., 1999) و (Rinaldi, 2008) به ترتیب حدود ۲۰ و ۲۶ کیلوگرم عملکرد دانه به ازای هر کیلوگرم نیتروژن بود. با افزایش مصرف آب و فسفر کارایی مصرف نیتروژن افزایش یافت و تنها

جدول ۶. اثر مستقیم کارایی جذب و تبدیل نیتروژن بر کارایی مصرف نیتروژن و کارایی جذب و تبدیل فسفر بر کارایی مصرف فسفر در آنالیز مسیر.

Table 6. Direct effect of NU_{pE} and NU_{tE} on NUE and PU_{pE} and PU_{tE} on PUE in path analysis

Treatments	NUE vs NU_{pE} and NU_{tE}				PUE vs PU_{pE} and PU_{tE}				
			Path coefficient				Path coefficient		
	N	P	NU_{pE}	NU_{tE}	R^2 (%)	PU_{pE}	PU_{tE}	R^2 (%)	
ETc	(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)							
ETc	N ₀	P ₀	1.33	0.62	99.4	1.34	0.52	99.9	
		P ₁₀₀	1.36	0.6	99.6	1.42	0.63	99.8	
		P ₂₀₀	1.25	0.98	99	1.55	1.72	98.2	
	ETc ₈₀	N ₂₀₀	P ₀	1.4	0.95	97.7	1.1	0.71	99.1
			P ₁₀₀	1.62	0.92	98	1.96	1.18	95.9
			P ₂₀₀	1.22	0.81	99.3	1.16	0.69	99.8
ETc ₈₀	N ₄₀₀	P ₀	1.4	0.96	99.3	1.35	0.52	99.8	
		P ₁₀₀	1.74	0.86	99.5	1.72	0.78	98.9	
		P ₂₀₀	2.58	2.03	91.3	1.97	1.33	96.6	
ETc ₁₀ 0	N ₀	P ₀	0.77	0.70	99.9	1.32	0.64	99.9	
		P ₁₀₀	2.37	2	97.8	1.08	1	99.9	
		P ₂₀₀	1.96	1.96	92.8	2.2	2.19	93.3	
	ETc ₁₀ 0	N ₂₀₀	P ₀	1.98	1.49	95.1	2.85	2.07	88.6
			P ₁₀₀	1.22	0.40	99.6	1.05	0.48	99.9
			P ₂₀₀	1.15	0.78	99.9	1.22	0.56	99.8
ETc ₁₀ 0	N ₄₀₀	P ₀	1.67	0.79	99.1	2.01	1.26	97.5	
		P ₁₀₀	1.17	0.50	99.4	1.27	0.69	98.6	
		P ₂₀₀	1.99	1.50	95.7	2.22	1.37	97.4	
ETc ₁₂ 0	N ₀	P ₀	2.19	2.30	94.5	1.47	1.04	99.2	
		P ₁₀₀	1.41	0.04	99.7	1.29	0.88	99.9	
		P ₂₀₀	1.33	0.64	99.6	1.40	0.78	99.8	
	ETc ₁₂ 0	N ₂₀₀	P ₀	0.98	0.59	99.8	1.15	0.66	99.8
			P ₁₀₀	1.63	0.81	99.1	1.61	0.69	99.5
			P ₂₀₀	2.08	1.55	97.6	1.89	1.12	98.6
ETc ₁₂ 0	N ₄₀₀	P ₀	1.83	0.88	99.2	1.32	0.44	99.8	
		P ₁₀₀	1.90	0.99	97.8	2.09	1.23	96.8	
		P ₂₀₀	1.98	1.26	97.7	1.97	1.28	99.5	

مصرف نیتروژن تا N_{200} اثر هر دو جزء موثر بر کارایی مصرف نیتروژن کاهش یافت، سپس با مصرف بیشتر نیتروژن تا N_{400} اثر هر دو جزء بیشتر شد. (Dhugga & Waines 1989) پس از ارزیابی ۱۲ رقم گندم نان و دو رقم گندم دوروم در سه سطح نیتروژن گزارش نمودند که در همه سطوح سهم کارایی جذب از کارایی مصرف نیتروژن در مقایسه با کارایی تبدیل بیشتر بود. همچنین با افزایش سطوح نیتروژن سهم نسبی کارایی جذب افزایش یافت. Moll et

در کارایی مصرف نیتروژن داشت (جدول ۶). با این وجود میانگین اثر هر یک از سطوح نهاده‌ها نشان داد که با افزایش سطوح آبیاری و کاربرد فسفر تاثیر کارایی جذب بر کارایی مصرف نیتروژن بیشتر شد، اما روند مشخصی در تغییر کارایی تبدیل نیتروژن مشاهده نگردید (جدول ۶). در هر یک از سطوح کاربرد نیتروژن نیز، همواره کارایی جذب نیتروژن در مقایسه با کارایی تبدیل نیتروژن نقش بیشتری در تعیین کارایی مصرف نیتروژن داشت و با افزایش

نیتروژن جذب آب را بهبود می دهد و کارایی مصرف هر یک از این نهاده ها زمانی که هر دو فاکتور در سطح کفایت هستند حداکثر خواهد بود (Di Paolo and Rinaldi, 2008).

کارایی جذب فسفر

اثر سطوح مختلف مصرف آب ($p \leq 0/05$)، نیتروژن ($p \leq 0/01$) و فسفر ($p \leq 0/05$) بر کارایی جذب فسفر معنی دار بود (جدول ۷). کارایی جذب فسفر متناسب با عملکرد در پاسخ به افزایش آب مصرفی و نیتروژن افزایش نشان داد (جدول ۸). به طور کلی کارایی جذب فسفر به طور مثبتی به کل فسفر جذب شده مرتبط است و جذب فسفر نیز به کل عملکرد ماده خشک گیاه وابسته است، بنابراین اولین راهکار بهبود کارایی جذب فسفر در شرایط محدودیت آن افزایش کل عملکرد ماده خشک گیاه می باشد (Sandana, 2016). نتایج این مطالعه نیز نشان داد که افزایش آب مصرفی و نیتروژن به طور معنی داری عملکرد ماده خشک ذرت را افزایش دادند (داده ها گزارش نشده است) و از این طریق کارایی جذب فسفر بهبود یافت. با این وجود، تیمارهای P_{100} و P_{200} در مقایسه با عدم کاربرد فسفر کارایی جذب آن را به شدت به ترتیب به میزان ۶۴ و ۷۵ درصد کاهش دادند (جدول ۸). مطابق با این نتایج گزارش شده است که تنها حدود ۱۰ تا ۲۵ درصد از کود فسفر داده شده به خاک جذب گیاه می شود (Syers et al. 2008) و ۷۰ تا ۹۰ درصد فسفر به کاربرده شده بوسیله کاتیون های مختلف در خاک های اسیدی و آهکی تثبیت می شود (Manschadi et al., 2014). از این رو عملکرد گیاه و محتوی

al(1982) نیز بیان داشتند که کارایی جذب در مقایسه با کارایی تبدیل نقش بیشتری در تعیین کارایی مصرف نیتروژن داشت و با افزایش مصرف نیتروژن نیز همین رابطه مشاهده شد. در آزمایش دیگری سهم کارایی جذب (۵۴٪) و کارایی تبدیل نیتروژن (۴۶ درصد) در گندم تقریباً یکسان بود (Van Sanford & MacKown, 1987). همچنین در آزمایشی کارایی جذب ۶۴ درصد تغییرات کارایی مصرف نیتروژن در سطح بدون کود را نشان داد و با افزایش نیتروژن تا ۱۷۰ کیلوگرم در هکتار سهم آن به ۳۰ درصد کاهش یافت (Le Gouis et al., 2000).

اثر متقابل مصرف آب و نیتروژن بر کارایی مصرف نیتروژن معنی دار بود ($p \leq 0/01$) (جدول ۲). بیشترین و کمترین میزان این کارایی به ترتیب با ۴۰/۱ و ۱۳/۹ کیلوگرم دانه به ازای هر کیلوگرم نیتروژن خاک به ترتیب در تیمارهای $ETc_{120}N_0$ و $ETc_{80}N_{400}$ مشاهده شد (جدول ۴). همچنین مشخص شد که در شرایط عدم کاربرد نیتروژن افزایش آبیاری به صورت خطی کارایی مصرف نیتروژن را افزایش داد، اما در تیمارهای N_{200} و N_{400} با افزایش آبیاری تا ETc_{100} ابتدا این کارایی افزایش یافت سپس با مصرف بیشتر آب میزان این کارایی در تیمار N_{400} کاهش اندکی نشان داد (جدول ۴). صرف نظر از اینکه بیشترین میزان کارایی مصرف نیتروژن در شرایط عدم کاربرد آن مشاهده شد، یافته ها نشان می دهد بیشترین میزان کارایی مصرف نیتروژن در شرایط بهینه هریک از نهاده و در تیمار $ETc_{100}N_{200}$ مشاهده شد. گزارش شده است که اثر آبیاری بر جذب نیتروژن مثبت است و برعکس فراهمی

جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) محتوی فسفر جذب شده، کارایی جذب، کارایی تبدیل و کارایی مصرف فسفر ذرت تحت تاثیر تیمارهای مختلف نیتروژن، فسفر و آب.

Table 7. Results of variance analysis (mean of squares) for P uptake, PUP_E, PUT_E and PUE of maize under different treatments of nitrogen, phosphorous and water

منابع تغییر Sources of variation	df	محتوی فسفر جذب شده P uptake	کارایی جذب فسفر PUP _E	کارایی تبدیل فسفر PUT _E	کارایی مصرف فسفر PUE
سال (Year)	1	270.8 ^{ns}	428.2 ^{ns}	149.8 ^{ns}	2142.1 ^{ns}
REP(Year)	4	86.4	63.2	780.0	309.7
ETC (تبخیر و تعرق گیاه)	2	937.9*	900.2*	3856.8 ^{ns}	2595.1*
Year × ETC	2	20.5 ^{ns}	15.1 ^{ns}	652.3 ^{ns}	104.5 ^{ns}
REP × ETC (Year)	8	23.7	20.0	617.6	51.7
نیتروژن (N)	2	553.1*	494.1**	5698.1 ^{ns}	8608.4**
فسفر (P)	2	1451.0*	41302.2*	25189.2*	259287.8**
N × P	4	11.2 ^{ns}	68.3*	105.0 ^{ns}	1688.5**
ETC × N	4	39.9*	54.9*	302.7 ^{ns}	267.1*
ETC × P	4	11.6 ^{ns}	144.3**	302.7 ^{ns}	743.7**
ETC × N × P	8	1.3 ^{ns}	19.1**	115.7 ^{ns}	57.7 ^{ns}
Year × N	2	21.3 ^{ns}	2.3 ^{ns}	544.9 ^{ns}	39.9 ^{ns}
Year × P	2	26.4 ^{ns}	598.8 ^{ns}	791.3 ^{ns}	110.9 ^{ns}
Year × N × P	4	8.7 ^{ns}	6.2 ^{ns}	144.8 ^{ns}	39.8 ^{ns}
Year × ETC × N	4	5.8 ^{ns}	5.1 ^{ns}	230.9 ^{ns}	26.4 ^{ns}
Year × ETC × P	4	2.5 ^{ns}	4.8 ^{ns}	285.5 ^{ns}	46.0 ^{ns}
Year × ETC × N × P	8	4.4 ^{ns}	2.9 ^{ns}	194.0 ^{ns}	27.2 ^{ns}

ns، * و **: به ترتیب نشانگر عدم معنی داری و معنی داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می باشد.

ns, * and ** are non-significant and significant at 5 and 1% probability levels, respectively.

۲۹/۸٪ نشان داد و با افزایش آبیاری تا ETC₁₂₀ میزان این کارایی افزایش یافت (جدول ۹). با اینحال، تیمارهای N₂₀₀ و N₄₀₀ بیشترین میزان کارایی جذب فسفر را به ترتیب با ۳۹/۷ و ۴۳/۳٪ در ETC₁₀₀ نشان دادند و آبیاری کمتر و بیشتر از آن کارایی جذب فسفر را کاهش داد (جدول ۹). به طور کلی تنش خشکی تجمع و

فسفر جذب شده به صورت خطی و متناسب با افزایش فسفر اعمال شده بهبود نیافت، در نتیجه کارایی جذب آن در تیمارهای دارای کود فسفر در مقایسه با شاهد کاهش نشان داد. اثر متقابل مصرف آب و نیتروژن بر کارایی جذب فسفر معنی دار بود (p ≤ ۰/۰۵) (جدول ۷). در شرایط عدم کاربرد نیتروژن (N₀)، ETC₈₀ کمترین میزان کارایی جذب فسفر را با

جدول ۸. اثر سطوح مختلف مصرف آب، نیتروژن و فسفر بر محتوی فسفر جذب شده، کارایی جذب، کارایی تبدیل و کارایی مصرف فسفر ذرت.

Table 8. Effect of different levels of water, nitrogen and phosphorus on P uptake, PU_pE , PU_tE and PUE of maize

تیمارها	محتوی فسفر جذب شده	کارایی جذب فسفر	کارایی تبدیل فسفر	کارایی مصرف فسفر	
Treatments	P uptake (Kg P ha ⁻¹)	PU_pE (Kg P uptake kg ⁻¹ N _{soil})	PU_tE (kg GY Kg ⁻¹ P uptake)	PUE (kg GY kg ⁻¹ P _{soil})	
ETc ₈₀	31.1 ± 0.9 [†]	31.7 ± 2.9	229.8 ± 4.5	74.4 ± 7.3	
ETc	ETc ₁₀₀	38.7 ± 1.2	39.2 ± 3.5	215.3 ± 4.4	86.4 ± 8.6
	ETc ₁₂₀	38.2 ± 1	38.6 ± 3.4	219.4 ± 3.8	86.4 ± 8.4
HSD	5.1	4.4	29	11.6	
Nitrogen (kg ha ⁻¹)	N ₀	30.0 ± 0.8	30.6 ± 3	218.6 ± 3.5	68.8 ± 6.8
	N ₂₀₀	36.8 ± 1.1	37.2 ± 3.3	223.4 ± 4.2	84.3 ± 8.1
	N ₄₀₀	41.1 ± 1.2	41.7 ± 3.5	222.5 ± 4.1	93.9 ± 9.1
HSD	5.2	1.7	26.5	7.2	
Phosphorus (kg ha ⁻¹)	P ₀	30.9 ± 0.8	68.2 ± 1.8	240.3 ± 3.7	161.5 ± 4
	P ₁₀₀	35.7 ± 1	24.5 ± 0.7	226.9 ± 3.8	53.0 ± 1.4
	P ₂₀₀	41.3 ± 1.1	16.8 ± 0.4	197.3 ± 3.4	32.6 ± 0.8
HSD	5.8	27.7	31.9	52.1	

[†]Standard error.

در شرایط عدم کاربرد فسفر کارایی جذب فسفر بیشترین میزان را نشان داد و با افزایش آبیاری تا ETc_{100} و ETc_{120} به طور معنی داری به ترتیب به میزان ۲۲ و ۲۰ درصد افزایش یافت (جدول ۱۰) که نشان می دهد در این شرایط، آبیاری کارایی جذب فسفر را محدود می کند. نتایج همچنین مشخص نمود که بین تیمارهای P_{100} و P_{200} با افزایش سطوح آب مصرفی کارایی جذب فسفر افزایش اندکی نشان داد (جدول ۱۰). از این رو به نظر می رسد در این شرایط رطوبت، محدود کننده جذب فسفر از خاک نیست و کاربرد فسفر

کارایی جذب فسفر را کاهش می دهد (Wu et al., 2009)، اما کاهش کارایی جذب فسفر در سطوح بالای مصرف آب در تیمارهای کود نیتروژن مصرف شده را می توان به کاهش عملکرد گیاه به واسطه آیشویی نیتروژن نسبت داد. در همین رابطه گزارش شده است که تغییرات هر یک از مولفه های کارایی مصرف فسفر به طور معنی داری به عملکرد گیاه وابسته است (Fageria et al., 2014).

اثر متقابل مصرف آب و فسفر نیز بر کارایی جذب فسفر معنی دار بود ($p \leq 0.01$) (جدول ۷).

جدول ۹. اثر متقابل مصرف آب و نیتروژن بر محتوی فسفر جذب شده، کارایی جذب، کارایی تبدیل و کارایی مصرف فسفر ذرت.
Table 9. Interaction effect of water use and nitrogen on P uptake, PU_pE , PU_tE and PUE of maize

تیمارها	محتوی فسفر جذب شده	کارایی جذب فسفر	کارایی تبدیل فسفر	کارایی مصرف فسفر	
Treatments	P uptake	PU_pE	PU_tE	PUE	
ETc	Nitrogen (kg ha ⁻¹)	(Kg P ha ⁻¹)	(Kg P uptake kg ⁻¹ N _{soil})	(kg GY Kg ⁻¹ P _{uptake})	
				(kg GY kg ⁻¹ P _{soil})	
ETc ₈₀	N ₀	28.9 ± 1.3	29.8 ± 4.9	206.2 ± 6.2	63.4 ± 11.1
	N ₂₀₀	31.4 ± 1.7	32.1 ± 5.2	231.8 ± 7.9	75.7 ± 12.8
	N ₄₀₀	32.5 ± 1.4	32.9 ± 5.2	248.6 ± 6	83.9 ± 13.9
ETc ₁₀₀	N ₀	33.1 ± 1.4	33.6 ± 5.1	197.0 ± 6	68.9 ± 11.7
	N ₂₀₀	39.4 ± 2	39.7 ± 6.2	213.1 ± 7	87.6 ± 14.7
	N ₄₀₀	42.5 ± 2.2	43.3 ± 7	229.2 ± 7.9	102.6 ± 17.7
ETc ₁₂₀	N ₀	34.5 ± 1.3	35.5 ± 5.7	201.0 ± 6	74.2 ± 12.9
	N ₂₀₀	39.2 ± 1.8	39.4 ± 6	218.0 ± 6.3	89.6 ± 15.2
	N ₄₀₀	40.1 ± 1.9	40.3 ± 6.2	228.2 ± 6.3	95.3 ± 15.9
HSD		4.3	4.1	27.2	9.2

†Standard error.

کارایی جذب فسفر به طور معنی داری بهبود یافت، اما در تیمارهای P₁₀₀ و P₂₀₀ تاثیر سطوح مختلف نیتروژن بر کارایی جذب فسفر معنی دار نبود (جدول ۱۱). با توجه به این نتایج به نظر می رسد با افزایش کاربرد فسفر در نتیجه اثر هم افزایی در جذب نیتروژن، محدودیت نیتروژن بر رشد و عملکرد ذرت را کاهش داده است و در نتیجه کارایی جذب فسفر به تیمارهای نیتروژن واکنش کمتری نشان داد.

کارایی تبدیل فسفر

میانگین کارایی تبدیل نیتروژن در دوسال آزمایش ۲۱۹/۲ کیلوگرم دانه به ازای کیلوگرم فسفر جذب شده بود (جدول ۷). نتایج تجزیه مرکب داده ها نشان داد که در بین فاکتورهای

تا حدودی توانسته است اثر محدودیت آب را جبران کند. در همین رابطه مشاهده شده است که بخشی از نقش آبیاری را می توان بوسیله کاربرد فسفر در نتیجه افزایش رشد و توسعه ریشه جایگزین نمود (Wang et al., 2013). He et al. (2002) نیز گزارش نمودند که جذب فسفر در گندم زمانی که هیچ کود فسفوری به خاک افزوده نشد با افزایش ظرفیت نگهداری آب از ۳۰ به ۷۵٪ افزایش یافت، درحالی که با کاربرد فسفر پاسخ نسبی جذب فسفر به افزایش آبیاری کاهش یافت.

اثر متقابل نیتروژن و فسفر بر کارایی جذب فسفر معنی دار بود ($p \leq 0.05$) (جدول ۷). در تیمار عدم کاربرد فسفر با افزایش سطوح نیتروژن

جدول ۱۰. اثر متقابل مصرف آب و فسفر بر محتوی فسفر جذب شده، کارایی جذب، کارایی تبدیل و کارایی مصرف فسفر ذرت.

Table 10. Interaction effect of water use and phosphorus on P uptake, PU_{pE} , PU_{tE} and PUE of maize

تیمارها	محتوی فسفر جذب شده	کارایی جذب فسفر	کارایی تبدیل فسفر	کارایی مصرف فسفر	
Treatments	P uptake	PU_{pE}	PU_{tE}	PUE	
ETc	Phosphorus (kg ha ⁻¹)	(Kg P uptake kg ⁻¹ N _{soil})	(kg GY Kg ⁻¹ P _{uptake})	(kg GY kg ⁻¹ P _{soil})	
ETc ₈₀	P ₀	27.0 ±1.1	59.6 ±2.6	245.2 ±6.9	145.0 ±6.1
	P ₁₀₀	30.2 ±1.3	20.7 ±0.8	236.0 ±6.8	48.5 ±1.9
	P ₂₀₀	35.6 ±1.4	14.5 ±0.5	205.5 ±6.9	29.6 ±1.2
ETc ₁₀₀	P ₀	33.0 ±1.6	72.8 ±3.5	236.0 ±7	170.1 ±7.5
	P ₁₀₀	37.8 ±1.8	25.9 ±1.2	212.1 ±6.1	54.8 ±2.8
	P ₂₀₀	44.2 ±2	18.0 ±0.8	191.2 ±5.6	34.1 ±1.5
ETc ₁₂₀	P ₀	32.4 ±0.9	71.5 ±2.9	238.1 ±5.2	169.5 ±6
	P ₁₀₀	37.9 ±1.6	26.0 ±1.1	215.6 ±5.5	55.6 ±2
	P ₂₀₀	43.6 ±1.7	17.7 ±0.7	193.4 ±4.9	34.1 ±1.2
HSD	2.8	3.9	30.3	12.1	

†Standard error.

مقایسه با ETc₈₀ کارایی مصرف فسفر حدود ۱۶ درصد بهبود یافت (جدول ۸). مطابق با این یافته ها مشاهده شد که کل فسفر جذب شده و کارایی مصرف آن در گندم متناسب با فراهمی آب و به طور معنی داری همراه با تجمع ماده خشک افزایش یافت (Clarke et al., 1990). با توجه به اینکه کارایی تبدیل فسفر تحت تاثیر سطوح مختلف مصرف آب قرار نگرفت، از این رو به نظر می رسد که افزایش کارایی جذب فسفر نقش اصلی را در تعیین کارایی مصرف فسفر نشان می دهد. نتایج آنالیز مسیر نیز تایید نمود که در اغلب تیمارهای آزمایش اثر کارایی جذب در مقایسه با کارایی تبدیل بر کارایی

آزمایش و اثر متقابل بین آنها تنها تاثیر فسفر بر کارایی تبدیل آن معنی دار بود ($p \leq 0/05$) (جدول ۷). کارایی تبدیل فسفر در تیمارهای P₂₀₀ و P₁₀₀ در مقایسه با P₀ ۶ و ۱۸ درصد کاهش یافت (جدول ۸). این نتایج مطابق با یافته های Rose et al.(2011) و Gemenet et al.(2015) است که بیان داشتند با افزایش کاربرد فسفر کارایی تبدیل کاهش می یابد.

کارایی مصرف فسفر

اثر سطوح مختلف مصرف آب ($p \leq 0/05$)، نیتروژن و فسفر ($p \leq 0/01$) بر کارایی مصرف فسفر در ذرت معنی دار بود (جدول ۷). با افزایش مصرف آب در تیمارهای ETc₁₀₀ و ETc₁₂₀ در

جدول ۱۱. اثر متقابل نیتروژن و فسفر بر محتوی فسفر جذب شده، کارایی جذب، کارایی تبدیل و کارایی مصرف فسفر ذرت.
Table 11. Interaction effect of nitrogen and phosphorus on P uptake, PU_pE , PU_tE and PUE of maize

تیمارها		محتوی	کارایی جذب فسفر	کارایی تبدیل فسفر	کارایی مصرف فسفر
Treatments		فسفر جذب شده	PU_pE	PU_tE	PUE
Nitrogen	Phosphorus	P uptake	(Kg P uptake kg^{-1} N_{soil})	(kg GY kg^{-1} P_{uptake})	(kg GY kg^{-1} P_{soil})
(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(Kg P ha ⁻¹)			
N ₀	P ₀	28.2 ±0.9	62.2 ±2.3	221.1 ±3.9	136.6 ±3.9
N ₂₀₀	P ₁₀₀	31.6 ±1.1	21.7 ±0.7	201.4 ±3.6	43.4 ±1.2
N ₄₀₀	P ₂₀₀	36.8 ±1.5	15.0 ±0.6	181.6 ±6.3	26.7 ±0.7
N ₀	P ₀	31.3 ±1.4	69.0 ±3.2	241.4 ±6.8	164.3 ±5.7
N ₂₀₀	P ₁₀₀	36.4 ±1.8	25.0 ±1.2	225.2 ±6	55.2 ±1.8
N ₄₀₀	P ₂₀₀	42.4 ±1.9	17.2 ±0.8	196.2 ±4.2	33.4 ±1.1
N ₀	P ₀	32.9 ±1.6	72.5 ±3.6	256.8 ±5.2	183.6 ±6.3
N ₂₀₀	P ₁₀₀	37.9 ±2	26.0 ±1.4	237.0 ±6.7	60.4 ±1.9
N ₄₀₀	P ₂₀₀	44.3 ±1.9	18.0 ±0.7	212.2 ±4.9	37.7 ±0.8
HSD		5.3	4.5	21.6	11.3

†Standard error.

فسفر مشاهده شده و با افزایش مصرف آن تا P_{200} میزان این کارایی به شدت تا $32/6$ کیلوگرم دانه به ازای هر کیلوگرم فسفر خاک کاهش یافت (جدول ۸). بسیاری از مطالعات دیگر نیز به طور مشابه گزارش کردند که با افزایش کاربرد فسفر کارایی مصرف آن کاهش می یابد (Ros et al., 2011; Bayuelo-Jiménez & Ochoa-Cadavid, 2014; Leiser et al., 2014; Gemenet et al., 2015). نتایج همچنین نشان داد که در تمامی سطوح فسفر استفاده شده کارایی جذب فسفر نقش بیشتری در تعیین کارایی مصرف فسفر نشان داد (جدول ۶). مطابق با نتایج این مطالعه در آزمایشی در خاک اسیدی در شرایط کاربرد

مصرف فسفر بیشتر بود (جدول ۶). مطابق با این نتایج در مطالعه ای کارایی مصرف فسفر همبستگی بالا و معنی داری با محتوی فسفر جذب شده و کارایی جذب فسفر نشان داد، اما با کارایی تبدیل فسفر همبستگی نشان نداد (Sandana, 2016).

تیمارهای N_{200} و N_{400} در مقایسه با N_0 نیز کارایی مصرف فسفر را ۲۲ و ۳۶ درصد افزایش دادند که دلیل اصلی این امر نیز بهبود کارایی جذب فسفر تحت تاثیر این تیمارها بود (جدول ۶ و ۸). همچنین بیشترین میزان کارایی مصرف فسفر با $161/5$ کیلوگرم دانه به ازای هر کیلوگرم فسفر خاک در شرایط عدم کاربرد

مصرف آب می شود (Jones et al., 2005). از این رو، به نظر می رسد با افزایش کاربرد فسفر نقش آبیاری در بهره وری گیاه در جذب و کارایی مصرف فسفر کمتر می شود. در همین رابطه مشخص شده است که کاربرد فسفر نه تنها دسترسی گیاه به فسفر را افزایش می دهد بلکه باعث بهبود تحمل گیاه به شرایط تنش نیز می شود (Cortina et al., 2013).

نتیجه گیری

افزایش مصرف هر یک از نهاده ها عملکرد دانه ذرت را بهبود داد. باینحال، تاثیر نیتروژن بر تغییرات عملکرد در مقایسه با سایر نهاده ها بیشتر بود. اثر متقابل فاکتورهای آزمایش نشان داد که اثر هم افزایی معنی داری بین سطوح مختلف مصرف آب و نیتروژن تا سطح ETc_{100} بر عملکرد و کارایی مصرف نیتروژن و فسفر مشاهده شد ولی با افزایش آبیاری بیش از نیاز گیاه (ETc_{120}) در سطوح بالای نیتروژن عملکرد و کارایی مصرف عناصر غذایی با وجود عدم اختلاف معنی دار در مقایسه با ETc_{100} کاهش یافت. اثر متقابل نیتروژن و فسفر بر عملکرد و جذب عناصر غذایی همواره مثبت بود. با افزایش مصرف آب و فسفر، محتوی نیتروژن جذب شده، کارایی جذب و مصرف نیتروژن افزایش یافت، درحالیکه کارایی مصرف فسفر و هر دو اجزای تشکیل دهنده آن در پاسخ به کاربرد فسفر کاهش نشان دادند. همچنین با افزایش مصرف آب و نیتروژن، محتوی فسفر جذب شده، کارایی جذب و مصرف فسفر افزایش پیدا کرد، درحالیکه کارایی مصرف نیتروژن و هر دو مولفه تشکیل دهنده آن در

کود فسفر و عدم کاربرد آن و همچنین در خاک آهکی در شرایط عدم استفاده از کود فسفر کارایی جذب آن ۷۱ تا ۱۰۰ درصد تغییرات عملکرد دانه گندم را نشان داد (Manske et al., 2001).

اثر متقابل مصرف آب و نیتروژن به طور معنی داری کارایی مصرف فسفر را تحت تاثیر قرار داد ($p \leq 0/05$) (جدول ۷). نتایج نشان داد که بیشترین واکنش کارایی مصرف فسفر در پاسخ به افزایش سطوح نیتروژن در شرایط ETc_{100} مشاهده شد و تیمارهای N_{200} و N_{400} در مقایسه با N_0 کارایی جذب فسفر را به ترتیب ۲۷ و ۴۹ درصد بهبود دادند (جدول ۹). در شرایط ETc_{80} و ETc_{120} متناسب با عملکرد ذرت واکنش کارایی مصرف فسفر به افزایش نیتروژن کمتر بود.

اثر متقابل مصرف آب و فسفر بر کارایی مصرف فسفر معنی دار بود ($p \leq 0/01$) (جدول ۷). نتایج نشان داد که در شرایط عدم کاربرد فسفر با افزایش آبیاری تا ETc_{120} کارایی مصرف فسفر حدود ۱۷ درصد افزایش یافت، اما پاسخ تیمارهای P_{100} و P_{200} به افزایش آب مصرفی (به ترتیب با ۱۴ و ۱۵ درصد) اندکی کمتر بود (جدول ۱۰). به طور کلی کاربرد فسفر در نتیجه افزایش رشد ریشه (طول و افزایش سطح تماس ریشه) جذب آب و عناصر غذایی را بهبود می دهد و از این طریق باعث افزایش عملکرد گیاهان می شود (Song et al., 2010). مطالعات دیگر نیز نشان داده اند که کاربرد فسفر تحت شرایط تنش خشکی باعث بهبود رشد ریشه، هدایت هیدرولیکی آوند چوب و کارایی

پاسخ به کاربرد نیتروژن کاهش یافتند. کارایی تبدیل نیتروژن و فسفر در مقایسه با سایر شاخص های کارایی کمتر تحت تاثیر تمامی تیمارها قرار گرفت و غالباً با افزایش مصرف هر یک از نهاده ها کاهش یافت. همچنین در اغلب تیمارهای آزمایش کارایی جذب در مقایسه با کارایی تبدیل نیتروژن و فسفر نقش بیشتری در تغییرات کارایی مصرف هر یک از این عناصر نشان داد. به طور کلی نتایج نشان داد که مدیریت آب و عناصر غذایی بر اساس درک کمی اثر متقابل بین آنها به منظور افزایش کارایی و پایداری سیستم های تولید می تواند نتایج سودمندتری به همراه داشته باشد.

References

- Allen, R., Pereira, L., Dirksen, R., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Bai, H., and Tao, F. 2017. Sustainable intensification options to improve yield potential and eco-efficiency for rice-wheat rotation system in China. *Field Crops Research*, 211, 89-105. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.06.010>
- Bayuelo-Jiménez, J.S., and Ochoa-Cadavid, I. 2014. Phosphorus acquisition and internal utilization efficiency among maize landraces from the central Mexican highlands. *Field Crops Research*, 156, 123–134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.11.005>
- Cameira, M.R., Fernando, R.M., and Pereira, L.S. 2003. Monitoring water and NO₃-N in irrigated maize fields in the Sorraia watershed, Portugal. *Agricultural Water Management*, 60, 199–216. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00175-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00175-0)
- Cao, H.-X., Zhang, Z.-B., Xu, P., Chu, L.-Y., Shao, H.-B., Lu, Z.-H., and Liu, J.-H. 2007. Mutual physiological genetic mechanism of plant high water use efficiency and nutrition use efficiency. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 57: 1-7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2006.11.036>
- Clarke, J.M., Campbell, C.A., Cutforth, H.W., Dppauw, R.M. and Winkleman, G.E. 1990. Nitrogen and phosphorus uptake, translocation, and utilization efficiency of wheat in relation to environment and cultivar yield and protein levels. *Canadian Journal of Plant Science*, 70, 965-977. doi: <https://doi.org/10.4141/cjps90-119>
- Coblentz, W.K., Turner, J.E., Scarbrough, D.A., Humphry, J.B., Coffey, K.P., Daniels, M.B., Gunsaulis, J.L., Teague, K.A., Speight, J.D., and Moore, P.A. 2004. Effects of Nitrogen Fertilization on Phosphorus Uptake in Bermudagrass Forage Grown on High Soil-Test Phosphorus Sites. *The Professional Animal Scientist*, 20, 146-154. doi: [https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)31289-4](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)31289-4)
- Cortina, J., Vilagrosa, A., and Trubat, R. 2013. The role of nutrients for improving seedling quality in drylands. *New Forests*. 44, 719-732. doi:<https://doi.org/10.1007/s11056-013-9379-3>
- Dalal, R.C., Strong, W.M., Cooper, J.E., and King, A.J. 2013. Relationship between water use and nitrogen use efficiency discerned by 13C discrimination and 15N isotope ratio in bread wheat grown under no-till. *Soil & Tillage Research*, 128, 110–118. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.07.019>
- Delogu, G., Cattivelli, L., Pecchioni, N., De Falcis, D., Maggiore, T., and Stanca,

- A.M. 1998. Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 9, 11–20. doi: [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(98\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(98)00019-7)
- Dhugga, K.S., and Waines, J.G. 1989. Analysis of nitrogen accumulation and use in bread and durum wheat. *Crop Science*, 29, 1232–1239. doi: 10.2135/cropsci1989.0011183X002900050029x
- Di Paolo, E., and Rinaldi, M. 2008. Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. *Field Crops Research*, 105, 202–210. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.10.004>
- Dordas, C.A. 2011. Nitrogen nutrition index and its relationship to N use efficiency in linseed. *European Journal of Agronomy*, 34, 124-132. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.11.005>
- Engels, C., and Marschner, H. 1995: Plant uptake and utilization of nitrogen. In: P.E. Bacon (Eds). *Nitrogen Fertilization in the Environment*. Marcel Dekker Inc., New York. P. 41-81.
- Fageria, N.K. 2014. Yield and yield components and phosphorus use efficiency of lowland rice genotypes. *Journal of Plant Nutrition*, 37, 979–989. doi; <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.888735>
- Gemenet, D.C., Tom Hash, C., Sanogo, M.D., Sy, O., Zangre, R.G., Leiser, W.L., and Haussmann, B.I.G. 2015. Phosphorus uptake and utilization efficiency in West African pearl millet inbred lines. *Field Crops Research*, 171, 54–66. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.11.001>
- Gheysari, M., Mirlatifi, S.M., Homae, M., Asadi, M.E., and Hoogenboom, G. 2009. Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates. *Agricultural Water Management*. 96, 946-954. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.01.005>
- Goh, K.M., and Haynes, R.J. 1986. Nitrogen and agronomic practices. In: R.J. Haynes (Eds.). *Mineral Nitrogen in the Plant-Soil System*. Academic Press, London. p. 379–468.
- Gonzalez-Dugo, V., Durand, J.L., and Gastal, F. 2010. Water deficit and nitrogen nutrition of crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 529–544. doi: <http://dx.doi.org/10.1051/agro/2009059>
- Graciano, C., Goya, J.F., Frangi, J.L., and Guiamet, J.J. 2006. Fertilization with phosphorus increases soil nitrogen absorption in young plants of *Eucalyptus grandis*. *Forest Ecology and Management*, 236, 202-210. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.09.005>
- He, Y.Q., Zhu, Y.G., Smith, S.E., and Smith, F.A. 2002. Interactions between soil moisture content and phosphorus supply in spring wheat plants grown in pot

- culture. *Journal of Plant Nutrition*, 25, 913–925. doi: <https://doi.org/10.1081/PLN-120002969>
- Hu, Y.C., and Schmidhalter, U. 2005. Drought and salinity: a comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *Journal of Plant and Nutrition and Soil Science*, 168, 541-549. doi: 10.1002/jpln.200420516
- James, J.J., Tiller, R.L., and Richards, J.H. 2005. Multiple resources limit plant growth and function in a salinealkaline desert community. *Journal of Ecology*, 93, 113-126. doi: 10.1111/j.0022-0477.2004.00948.x
- Jones, C.A., Jacobsen, J.S., and Wraithl, J.M. 2005. Response of malt barley to phosphorus fertilization under drought conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 28, 1605-1617. doi: 10.1080/01904160500203531
- Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Moradi, R., and Mansoori, H. 2014. Optimizing water, nitrogen and crop density in canola cultivation using response surface methodology and central composite design. *Soil Science and Plant Nutrition*, 60, 286–298. doi: <https://doi.org/10.1080/00380768.2014.893535>
- Ladha, J.K., Pathak, H., Krupnik, T.J., Six, J., and van Kessel, C. 2005. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Advances in Agronomy*, 87, 85–156. doi: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)87003-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)87003-8)
- Latiri-Souki, K., Nortcliff, S., and Lawlor, D.W. 1998. Nitrogen fertilizer can increase dry matter, grain production and radiation and water use efficiencies for durum wheat under semi-arid conditions. *European Journal of Agronomy*, 9, 21–34. doi: [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(98\)00022-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(98)00022-7)
- Le Gouis, J., Beghin, D., Heumez, E., and Pluchard, P. 2000. Genetic differences for nitrogen uptake and nitrogen utilisation efficiencies in winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 12, 163–173. doi: [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00045-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00045-9)
- Leiser, W.L., Rattunde, H.F., Weltzien, E., and Haussmann, B.G. 2014. Phosphorus uptake and use efficiency of diverse West and Central African sorghum genotypes under field conditions in Mali. *Plant and Soil*, 377, 383–394. doi: <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1978-4>
- Loick, N., Dixon, E.R., Abalos, D., Vallejo, A., Matthews, G.P., McGeough, K.L., Well, R., Watson, C.J., Laughlin, R.J., and Cardenas, L.M. 2016. Denitrification as a source of nitric oxide emissions from incubated soil cores from a UK grassland soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 95, 1–7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.12.009>
- López-Bellido, L., López-Bellido, R.J., and Redondo, R. 2005. Nitrogen efficiency in wheat under rainfed Mediterranean conditions as affected by split nitrogen application. *Field Crops Research*, 94, 86-97. doi: <https://doi.org/10.1016/j>

fcr.2004.11.004

- López-Bellido, R.J., and López-Bellido., L. 2001. Efficiency of nitrogen in wheat under Mediterranean conditions: Effect of tillage, crop rotation and N fertilization. *Field Crops Research*, 71, 31-46. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00146-0](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00146-0)
- Ma, B.L., Dwyer, L.M., and Gregorich, E.G. 1999. Soil nitrogen amendment effect on seasonal nitrogen mineralization and nitrogen cycling in maize production. *Agronomy Journal*, 91, 650–656. doi:10.2134/agronj1999.9161003x
- Maestre, F.T., Valladares, F., and Reynolds, J.F. 2005. Is the change of plant–plant interactions with abiotic stress predictable? A meta-analysis of field results in arid environments. *Journal of Ecology*, 93, 748–757. doi: 10.1111/j.1365-2745.2005.01017.x
- Manschadi, A.M., Kaul, H.-P., Vollmann, J., Eitzinger, J., and Wenzel, W. 2014. Reprint of developing phosphorus-efficient crop varieties—an interdisciplinary research framework. *Field Crops Research*, 165, 49–60. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.06.027>
- Manske, G.G.B., Ortiz-Monasterio, J.I., van Ginkel, M., González, R.M., Fischer, R.A., Rajaram, S., and Vlek, P.L.G. 2001. Importance of P uptake efficiency versus P utilization for wheat yield in acid and calcareous soils in Mexico. *European Journal of Agronomy*, 14, 261–274. doi: [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00099-X](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00099-X)
- Maris, S.C., Teira-Esmatges, M.R., Arbones, A., and Rufat, J. 2015. Effect of irrigation, nitrogen application, and a nitrification inhibitor on nitrous oxide, carbon dioxide and methane emissions from an olive (*Olea europaea* L.) orchard. *Science of the Total Environment*, 538, 966–978. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.040>
- Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, London.
- Moll, R.H., Kamprath, E.J., and Jackson, W.A. 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agronomy Journal*, 74, 562–564. doi:10.2134/agronj1982.00021962007400030037x
- Mueller, N.D., Gerber, J.S., Johnston, M., Ray, D.K., Ramankutty, N., and Foley, J.A. 2012. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 490, 254–257. doi: <https://doi.org/10.1038/nature11420>
- O’Neill, P.M., Shanahan, J.F., Schepers, J.S., and Caldwell, B. 2004. Agronomic responses of corn hybrids from different areas to deficit and adequate level of water and nitrogen. *Agronomy Journal*, 96, 1660–1667.
- Otsus, M., and Zobel, M. 2004. Moisture conditions and the presence of bryophytes determine fescue species abundance in a dry calcareous grassland. *Oecologia*,

- 138, 293-299. doi: 10.1007/s00442-003-1428-8
- Pask, A.J.D., Sylvester-Bradley, R., Jamieson, P.D., and Foulkes, M.J. 2012. Quantifying how winter wheat crops accumulate and use nitrogen reserves during growth. *Field Crops Research*, 126, 104-118. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.09.021>
- Quemada, M., and Gabriel, J.L. 2016. Approaches for increasing nitrogen and water use efficiency simultaneously. *Global Food Security*, 9, 29-35. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.05.004>
- Raun, W.R., and Johnson, G.V. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agronomy Journal*, 91, 357-363. doi: 10.2134/agronj1999.00021962009100030001x
- Rose, T.J., Rose, M.T., Pariasca-Tanaka, J., Heuer, S., and Wissuwa, M. 2011. The frustration with utilization: why have improvements in internal phosphorus utilization efficiency in crops remained so elusive? *Frontiers in Plant Science*, 73, 1-5. doi: <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2011.00073>
- Sadras, V.O. 2004. Yield and water-use efficiency of water- and nitrogen-stressed wheat crops increase with degree of co-limitation. *European Journal of Agronomy*, 21, 455-464. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.07.007>
- Sandana, P. 2016. Phosphorus uptake and utilization efficiency in response to potato genotype and phosphorus availability. *European Journal of Agronomy*, 76, 95-106. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.02.003>
- Saneoka, H., Moghaieb, R.E.A., Premachandra, G.S., and Fujita, K. 2004. Nitrogen nutrition and water stress effects on cell membrane stability and leaf water relations in *Agrostis palustris* Huds. *Environmental and Experimental Botany*, 52, 131-138. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.01.011>
- Song, C.J., Ma, K.M., Qu, L.Y., Liu, Y., Xu, X.L., Fu., B.J, and Zhong, J.F. 2010. Interactive effects of water, nitrogen and phosphorus on the growth, biomass partitioning and water-use efficiency of *Bauhinia faberi* seedlings. *Journal of Arid Environments*, 74, 1003-1012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.02.003>
- Suja, G., Nair, V.M., and Sreekumar, J. 2003. Influence of organic manures, nitrogen and potassium on nutrient uptake and nutrient-use efficiency of white yam (*Dioscorea rotundata*) intercropped in coconut (*Cocos nucifera*) garden. *Indian Journal of Agronomy*, 48 (3), 168-171.
- Syers, J.K., Johnston, A.E., and Curtin, D. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin*; 2008 18. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO),

Rome

- Teixeira, E.I., George, M., Herreman, T., Brown, H., Fletcher, A., Chakwizira, E., de Ruiter, J., Maley, S., and Noble, A. 2014. The impact of water and nitrogen limitation on maize biomass and resource-use efficiencies for radiation, water and nitrogen. *Field Crops Research*, 168, 109-118. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.08.002>
- Van Sanford, D.A., and MacKown, C.T. 1987. Cultivar differences in nitrogen remobilization during grain fill in soft red winter wheat. *Crop Science*, 27, 295–300. doi:10.2135/cropsci1987.0011183X002700020035x
- Wang, Y., Chi, S.-y., Ning, T.-y., Tian, S.-z., and Li, Z.-j. 2013. Coupling Effects of Irrigation and Phosphorus Fertilizer Applications on Phosphorus Uptake and Use Efficiency of Winter Wheat. *Journal of Integrative Agriculture*, 12, 263-272. doi: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60225-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60225-7)
- Warren, A., Sud, Y.C., and Rozanov, B. 1996. The future of deserts. *Journal of Arid Environments*, 32, 75-89. doi: <https://doi.org/10.1006/jare.1996.0007>
- Woku, M., Bänziger, M., Schulte auf'm Erley, G., Friesen, D., Diallo, A.O., and Horst, A. 2007. Nitrogen Uptake and Utilization in Contrasting Nitrogen Efficient Tropical Maize Hybrids, *Crop Science*, 47, 519-528. doi:10.2135/cropsci2005.05.0070
- Wu, F.Z., Bao, W.K., Zhou, Z.Q., and Wu, N. 2009. Carbon accumulation, nitrogen and phosphorus use efficiency of *Sophora davidii* seedlings in response to nitrogen supply and water stress. *Journal of Arid Environments*, 73, 1067–1073. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.06.007>

Nutrient efficiency index of maize in response to varying rates of nitrogen and phosphorus fertilizers under different irrigation water regimes

A. Momen¹, A. Koocheki^{2*}, M. Nassiri Mahallati³

1. Ph.D student in Agroecology, Agronomy Department, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad.
2. Professor, Agronomy Department, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad. (Corresponding author)
3. Professor, Agronomy Department, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad.

Received: March 2018 Accepted: July 2018

Extended Abstract

Momen, A. Koocheki, A. Nassiri Mahallati, M., Nutrient efficiency index of maize in response to varying rates of nitrogen and phosphorus fertilizers under different irrigation water regimes
Applied Research in Field Crops Vol 31, No. 1, 2018 10-12: 52-77(in Persian)

Introduction: Water and nutrient deficiency often restrict growth and production potentials of agricultural ecosystems in arid and semi-arid environments (Cao et al., 2007). It has been reported that the effects of nutrient supply and water regimes may interact significantly on plant growth (Hu and Schmidhalter, 2005). A simple assessment of the effect of each input may not show a complex interaction with the other inputs. Therefore, it is necessary to understand the interactive effects of soil water and nutrients on plant growth in the arid environments. Hence, the objectives of this study were to: (1) determine the interactive effects of ET_c, nitrogen and phosphorus on yield and N-P efficiency indicators in maize crop and (2) evaluate the importance of uptake efficiency versus utilization efficiency of nitrogen and phosphorus on NUE and PUE.

Materials and Methods: This study was carried out at the research farm of Ferdowsi University of Mashhad, Iran, located 10 km east of Mashhad at 36.16° North latitude, 59.36° East longitude, and height of 985 m above sea level in two growing years of 2014 and 2015. The experiment was conducted as split plot based on a randomized complete block design with three replications. The main plots consisted of three levels of 80 (ET_{c₈₀}), 100 (ET_{c₁₀₀}) and 120 percent (ET_{c₁₂₀}) of plant

Email address of the corresponding author: akooch@um.ac.ir

water requirement based on crop evapotranspiration, and the sub-plots included a factorial combination of three N levels (0, 200 and 400 kg ha⁻¹) and three P levels (0, 100 and 200 kg ha⁻¹). Combined analysis of variance was performed by SAS 9.4 software, and means of different treatments were compared by Tukey test at the probability level of 5%.

Results and Discussion: Maize grain yield increased significantly as a result of the increase in the all inputs. However, effect of nitrogen on grain yield was more pronounced than the others. Application of 200 and 400 kg ha⁻¹ N caused 24% and 38% increases in maize yield, respectively. The interaction effect of ETc and N for grain yield was significant, and the highest and the lowest maize yields of 9486.8 and 5836.4 kg ha⁻¹ were respectively obtained with ETc₁₀₀N₄₀₀ and ETc₈₀N₀. When the applied water increased up to ETc₁₀₀, all the nitrogen rates increased the maize yield but the use of water higher than this level resulted in the decreased grain yield in N₄₀₀. It appears that under these conditions, leaching increases, which ultimately leads to the reduction of yield. According to these findings, irrigation higher than ETc₁₀₀ decreased N uptake in this treatment. The trends of NUE and PUE in response to treatments were similar to that of grain yield. It has been reported that changes in each of the P use efficiency components are significantly dependent on plant yield (Fageria et al., 2014). The interaction of nitrogen and phosphorus showed that in N₀, the effect of different levels of phosphorus on grain yield was not significant, while phosphorus application at nitrogen levels of N₂₀₀ and N₄₀₀ significantly increased maize grain yield. These observations suggest that the interaction of nitrogen and phosphorus on grain yield and nutrient uptake is synergistic. The results of path analysis indicated that in most of the treatments, the effect of N and P uptake efficiency was more conspicuous on the NUE and PUE as compared to that of their utilization efficiency.

Conclusion: The results showed that maize grain yield improved with increasing the inputs. The magnitude of the effects of all inputs on yield was in the order of N > ETc > P. The interaction effect of ETc and N showed that ETc₁₀₀N₂₀₀ was the optimal treatment for the simultaneous improvement of maize yield and nitrogen efficiency. The interaction of N and P on the yield and nutrient uptake was found to be positive and synergistic. Overall, this study showed the importance of the interactive relationships between water and nutrients for achieving both the highest grain yields and nutrient use efficiency.

Keywords: Optimization; Resource limitation; Uptake efficiency; Utilization efficiency; Water requirement

References

Cao, H.-X., Zhang, Z.-B., Xu, P., Chu, L.-Y., Shao, H.-B., Lu, Z.-H., and Liu, J.-

- H. 2007. Mutual physiological genetic mechanism of plant high water use efficiency and nutrition use efficiency. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 57: 1-7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2006.11.036>
- Fageria, N.K. 2014. Yield and yield components and phosphorus use efficiency of lowland rice genotypes. *Journal of Plant Nutrition*, 37, 979–989. doi; <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.888735>
- Hu, Y.C., and Schmidhalter, U. 2005. Drought and salinity: a comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *Journal of Plant and Nutrition and Soil Science*, 168, 541-549. doi: [10.1002/jpln.200420516](https://doi.org/10.1002/jpln.200420516)