

بررسی اثر متقابل آب و نیتروژن بر عملکرد و بازده مصرف آب در ذرت با استفاده از تئوری الاستیسیته

فرزانه شعاری آزاد^۱، علی رحیمی خوب^{۲*}، مجید قربانی^۳، محمدهادی نظری فر^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲. استاد، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۳. استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۴. کارشناس پژوهشی، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۸/۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۳/۱۷)

چکیده

آب و کود نیتروژن دو نهاده اصلی تولید محصولات کشاورزی‌اند و کمبود هر یک باعث کاهش عملکرد محصول می‌گردد. کم‌آبیاری یکی از راه‌کارهای مدیریت آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک بوده ولی بر روی نیاز نیتروژن اثرگذار است. استفاده از نیتروژن بیشتر از نیاز گیاه، باعث اتلاف سرمایه و آلودگی محیط‌زیست خواهد شد. در این پژوهش اثر متقابل آب و کود نیتروژن بر روی حداکثر عملکرد محصول و حداکثر بازده مصرف آب در محصول ذرت با استفاده از تئوری الاستیسیته بررسی شد. آزمایش‌ها در تابستان ۱۳۹۳ در مزرعه تحقیقاتی پردیس ابوریحان واقع در منطقه پاکدشت، جنوب شرق تهران اجرا شد. کرت‌های خردشده به‌صورت طرح بلوک-های کامل تصادفی با چهار تیمار آب و چهار تیمار کود نیتروژن در سه تکرار پیاده شد. حداکثر عملکرد محصول بدون اعمال کم‌آبی و حداکثر بازده مصرف آب با اعمال کم‌آبیاری با استفاده معادلات حاکم بر تئوری الاستیسیته محاسبه گردید. نتایج نشان داد، حداکثر عملکرد محصول به میزان ۲۷۴۶۷ کیلوگرم در هکتار با مصرف ۱۰۱۱ میلی‌متر آب و ۳۰۰ کیلوگرم کود ازت به دست می‌آید و بازده مصرف آب برابر با ۲/۷۵ کیلوگرم در مترمکعب برآورد شد. حداکثر بازده مصرف آب برابر با ۳/۰۲ کیلوگرم در مترمکعب با اعمال کم‌آبیاری به میزان ۸۷ درصد نیاز آبی ذرت و مصرف ۳۷۵ کیلوگرم کود ازت در هکتار برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: کم‌آبیاری، کود، اقتصاد، رابطه آب و گیاه، تابع عملکرد

مقدمه

افزایش جمعیت و به دنبال آن مصرف آب بیشتر در سایر بخش‌ها مثل صنعت و شهر، ضرورت ارتقاء بازده مصرف آب^۱ (WUE) در بخش کشاورزی را نشان می‌دهد (Rahimikhoob and Sotoodenia, 2014). تحقیقات زیادی نشان داده، اعمال کم‌آبیاری یکی از راه‌کارهای افزایش WUE است (Rahimikhoob and Sotoodenia, 2014; Farre and Faci, 2009; Debaek and Aboudrare, 2004; Fereres and Soriano, 2007; Blum, 2009; Geerts and Raes, 2009). با اعمال کم‌آبیاری، آب کمتر از آب موردنیاز در طی دوره رشد به گیاه داده می‌شود و لذا موجب تنش به گیاه شده و محصول کمتری برداشت می‌شود. ولی در یک سطحی از کم‌آبیاری، بیشترین محصول به ازای آب مصرفی برداشت می‌شود و بازده

مصرف آب در این سطح بیشترین مقدار را دارد (Blum, 2009; Geerts and Raes, 2009).

اخیراً بر اساس تئوری الاستیسیته معادلاتی برای تعیین حد بهینه کم‌آبیاری ارائه شده است (Liu and Zhang, 2007; Fathi and Soltani, 2013). این شاخص در علم اقتصاد، نسبت تغییرات متغیر وابسته به تغییرات متغیر مستقل (Liu and Zhang, 2007) و در مقوله رابطه آب و گیاه، نسبت تغییرات عملکرد محصول به تغییرات تبخیر و تعرق تعریف شده است. Liu and Zhang (2007) نشان دادند وقتی تابع عملکرد محصول و آب از نوع درجه ۲ و تقعر آن به سمت پایین باشد، نقطه بهینه بهره‌وری آب از یک رابطه جبری ساده محاسبه می‌شود. این شاخص در ایران برای بهینه‌سازی بهره‌وری آب سه محصول سیب‌زمینی، ذرت و گیاه ریحان مورد استفاده قرار گرفته است (Rahimikhoob and Sotoodenia, 2014; Fathi and Soltani, 2013; Hamzezadeh et al., 2011)

* نویسنده مسئول: akhob@ut.ac.ir

1. water use efficiency

هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثر متقابل آب و کود بر حداکثر عملکرد محصول و بازده مصرف آب است. در این پژوهش، نیاز کودی ازت برای حصول به حداکثر عملکرد محصول بدون تنش آبی و حصول به حداکثر بازده مصرف آب با استفاده از معادلات تئوری الاستیسیته تعیین شده است.

مواد و روش‌ها

تئوری الاستیسیته

تئوری الاستیسیته در واقع استفاده از مشتقات تابع تولید و استفاده از دو مفهوم بازده مصرف آب حاشیه‌ای^۱ (MWUE) و شاخص الاستیسیته^۲ (EI) است. از این تئوری می‌توان در شرایط کم‌آبیری برای تعیین شرایط بهینه اقتصادی و مدیریتی محصولات آبی استفاده نمود (Liu et al., 2002). روابط مربوط به تئوری الاستیسیته در معادلات ۱ تا ۹ ارائه شده است Liu and Zhang (2007). وقتی عملکرد محصول (Y) تابعی از آب مصرفی (CU) باشد، بازده مصرف آب عبارت خواهد بود:

$$WUE = \frac{Y}{CU} \quad (\text{رابطه ۱})$$

نسبت تغییرات عملکرد محصول به تغییرات آب مصرفی را بازده مصرف آب حاشیه‌ای (MWUE) می‌نامند:

$$MWUE = \frac{dY}{dCU} \quad (\text{رابطه ۲})$$

شاخص الاستیسیته نسبت درصد تغییرات عملکرد محصول به درصد تغییرات آب مصرفی است:

$$EI = \frac{dY/Y}{dCU/CU} \quad (\text{رابطه ۳})$$

با توجه به رابطه بالا، در صورتی که عملکرد محصول فقط تابع آب مصرفی باشد و از معادله درجه دو پیروی کند، عملکرد محصول در دامنه‌های پایین مصرف آب روند افزایشی داشته و شاخص EI بزرگتر از صفر است و در نقطه عطف تابع (dY=0) به بیشترین مقدار می‌رسد و شاخص EI برابر صفر می‌شود. پس از نقطه عطف با افزایش آب مصرفی، عملکرد محصول کاهش یافته و شاخص EI منفی می‌گردد. رابطه (۳) را می‌توان با در نظر گرفتن روابط (۱) و (۲) به صورت زیر نوشت:

$$EI = \frac{MWUE}{WUE} \quad (\text{رابطه ۴})$$

با مشتق‌گیری WUE نسبت به CU و جایگذاری روابط (۱) تا (۴)، معادله زیر به دست می‌آید:

$$\frac{dWUE}{dCU} = (EI - 1) \left(\frac{WUE}{CU} \right) \quad (\text{رابطه ۵})$$

رابطه (۵) نشان می‌دهد، وقتی شاخص EI بزرگتر از یک

نیترژن نیز یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد گیاهان است (Lemaire et al., 2008). گیاهی که این عنصر را به اندازه لازم نداشته باشد، رشد آن کاهش یافته و به شدت بر روی عملکردش تأثیر می‌گذارد. معمولاً کمتر خاکی است که مقدار کافی نیترژن به فرم قابل‌استفاده گیاه (نیترات یا آمونیوم) داشته باشد و لذا این کمبود به صورت کود به زمین داده می‌شود. ولی به دلیل اثر مثبت نیترژن بر روی عملکرد گیاه، کود-های شیمیایی بی‌رویه به خاک داده می‌شود. مقدار کود نیترژن باید بر اساس مقدار آن در خاک و نیاز گیاه در طول دوره رشد به زمین داده شود. مصرف بی‌رویه و بی‌برنامه باعث آنبویبی نیترات به زیر عمق توسعه ریشه شده و با آلوده کردن آب‌های زیرزمینی به سلامت انسان‌ها لطمه وارد می‌سازد. به همین دلیل طی سالیان گذشته مطالعات گسترده‌ای به منظور افزایش راندمان مصرف کود و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی آن، انجام شده است (Pl'enet and Lemaire, 2000; Doltra and Mu~noz, 2010). تحقیقات زیادی اثر متقابل آب و نیترژن بر عملکرد محصول را بررسی نمودند (Fooladmand et al., 2006; Zabet et al., 2014). Gheysari et al. (2009) اثر متقابل آب و نیترژن را بر روی عملکرد ذرت علوفه‌ای در منطقه ورامین مورد بررسی قرار دادند. بر اساس تحقیقات آنها، هر دو عامل آب و نیترژن بر روی عملکرد محصول تأثیر معنی‌داری داشت. آنها با استفاده از نتایج سه تیمار کود ازت و چهار تیمار آب نشان دادند، مقدار بهینه کود نیترژن تابعی از مقدار آبیاری است و مقدار آن با افزایش آب آبیاری، افزایش می‌یابد و سرانجام ۲۸۵ کیلوگرم کود نیترژن با مقدار آبیاری برابر با ۰/۸۵ آبیاری کامل برای حصول به بیشترین عملکرد محصول توصیه شد. Liu and Zhang (2007) کود نیترژن و آب را برای محصول ذرت در منطقه‌ای از چین بهینه‌سازی کردند. آب موردنیاز ذرت در منطقه مورد مطالعه آنها، بیشتر از بارندگی تأمین می‌شود و آبیاری به صورت تکمیل‌کننده باران صورت می‌گیرد. آنها نشان دادند، واکنش عملکرد ذرت به ورودی‌های آب و کود نیترژن از نوع تابع درجه دو سهمی است و با افزایش آب آبیاری، بازده مصرف آب قبل از اینکه عملکرد محصول به بیشترین مقدار برسد، به بیشترین حد خود می‌رسد. آنها با استفاده از شاخص الاستیسیته، یک دامنه بهینه کود نیترژن برای منطقه مورد مطالعه تعیین کردند و بر اساس مقدار آبی که در اختیار داشتند، مقدار بهینه کود برآورد شد. آنها نشان دادند، مقدار بهینه کود برای هر مقدار آب در دسترس، بین دو مقدار کود لازم برای کسب بیشترین بازده مصرف آب و عملکرد محصول قرار می‌گیرد.

¹ - Marginal Water Use Efficiency

² - Elasticity Index

است که محصولات مهم زراعی آن شامل گندم، جو، یونجه و ذرت می‌باشد. آب‌های زیرزمینی از منابع اصلی تأمین آب کشاورزی این منطقه است ولی برای ۳۳ هزار هکتار اراضی مستعد کشاورزی آن کافی نیست. پاکدشت مطابق طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن جزو مناطق خشک محسوب می‌شود که در آن میانگین بارندگی سالانه ۱۴۱ میلی‌متر، دمای متوسط سالانه ۱۵/۶ سانتی‌گراد و تبخیر و تعرق سالانه ۱۳۹۰ میلی‌متر است. پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران در منطقه پاکدشت قرار گرفته و این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی آن بر روی گیاه ذرت رقم سینگل کراس-۷۰۴ در سال ۱۳۹۳ انجام شد. این مزرعه در

$$WUE = \frac{a}{CU} + b + c CU \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$MWUE = b + 2c CU \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$EI = \frac{bCU + 2cCU^2}{a + bCU + cCU^2} \quad (\text{رابطه ۹})$$

طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۰۲۷ متر واقع است. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و آب محل آزمایش در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است.

باشد، نرخ بازده مصرف آب با افزایش آب مصرفی (CU) روند افزایشی دارد و برعکس وقتی EI کمتر از یک باشد، نرخ بازده مصرف آب با افزایش آب مصرفی (CU) روند کاهشی پیدا می‌کند. اگر EI برابر یک گردد، به حداکثر بازده مصرف آب حاصل خواهد شد. با توجه به ثابت بودن مقدار کود مصرفی برای هر تیمار اصلی، لذا عملکرد محصول در این تیمارها تابع آب مصرفی است و از تابع درجه دو به صورت زیر پیروی می‌کند:

$$Y = a + bCU + cCU^2 \quad (\text{رابطه ۶})$$

توابع WUE، MWUE و EI (روابط ۱، ۲ و ۴) برای رابطه

(۶) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

حداکثر عملکرد محصول در نقطه‌ای به دست می‌آید که مقدار MWUE برابر صفر گردد که در این صورت مقدار آب مصرفی (CU) برابر با $-b/2c$ خواهد بود. همچنین حداکثر بازده مصرف آب در شرایطی به دست می‌آید که شاخص EI برابر یک شود که مقدار CU با توجه به معادله (۱۰) برابر با $(a/c)^{0.5}$ خواهد بود.

مشخصات محل آزمایش

این پژوهش در منطقه پاکدشت واقع در جنوب شرقی شهر تهران انجام شد. پاکدشت یکی از مهم‌ترین قطب‌های کشاورزی استان

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی شیمیایی خاک

EC (ds/m)	رطوبت اشباع (درصد)	جرم مخصوص ظاهری خاک خشک (gr/cm ³)	رطوبت نقطه پژمردگی (cm ³ /cm ³)	رطوبت ظرفیت مزرعه (cm ³ /cm ³)	بافت خاک	ضخامت لایه (m)
۳/۵۵	۴۴/۶۴	۱/۳۶	۱۰/۰۱	۲۰/۱۵	Silt loam	۰/۲
۴/۶۹	۴۳/۵۸	۱/۲۳	۱۰/۲۲	۲۰/۴۵	Sandy loam	۰/۲
۴/۰۰۶	۴۰/۸۶	۱/۳۲	۱۰/۶۵	۲۱/۴۵	Sandy loam	۰/۲
۱/۵۵	۴۸/۵۷	۱/۳۳	۹/۶۰	۱۸/۸۲	Sandy loam	۰/۶

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی آب

EC (ds/m)	PH	Na (meq/lit)	Ca+Mg (meq/lit)	پارامتر
۱/۴	۷/۲	۲/۹	۱۶	مقدار

کرت‌های فرعی نیز با چهار مقدار کود نیتروژن به صورت کود اوره به زمین داده شد. در این پژوهش مقدار کود تیمارها به صورتی انتخاب شد که بر روی عملکرد محصول تفاوت معنی‌دار ایجاد گردد و با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه این تحقیق، کود ازت بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار مصرف می‌شود، لذا تیمارهای کودی با مقادیر صفر، ۲۲۵، ۳۰۰ و ۳۷۵ کیلوگرم در هکتار (به ترتیب با نمادهای N0، N225، N300 و N375) انتخاب شدند. کرت‌ها به ابعاد ۳×۳/۷۵ (متر×متر) بودند

مشخصات تیمارها و اندازه‌گیری‌ها

آزمایش‌ها در قالب طرح کرت‌های خردشده به صورت بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. کرت‌های اصلی برای مقادیر مختلف آبیاری و کرت‌های فرعی برای مقادیر مختلف نیتروژن اجرا شدند. کرت‌های اصلی با چهار مقدار آب آبیاری عبارت بودند از: (۱) آبیاری کامل با ۱۰۰ درصد نیاز آبی (I100)، (۲) آبیاری با ۱۲۵ درصد نیاز آبی (I125)، (۳) آبیاری با ۷۵ درصد نیاز آبی (I75) و (۴) آبیاری با ۵۰ درصد نیاز آبی (I50).

مقادیر و تقویم آبیاری در تیمارها در جدول (۳) ارائه شده است. جدول ۳- تقویم و مقدار آبیاری تیمارها برحسب میلی‌متر

تیمارهای آبیاری				تاریخ
I50	I75	I125	I100	
۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۱۳۹۳/۰۳/۲۵
۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۱۳۹۳/۰۳/۳۰
۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۱۳۹۳/۰۴/۰۴
۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۱۳۹۳/۰۴/۰۹
۳۰	۴۵	۷۵	۶۰	۱۳۹۳/۰۴/۱۴
۳۰	۴۵	۷۵	۶۰	۱۳۹۳/۰۴/۱۹
۳۰	۴۵	۷۵	۶۰	۱۳۹۳/۰۴/۲۴
۳۰	۴۵	۷۵	۶۰	۱۳۹۳/۰۴/۲۹
۳۰	۴۵	۷۵	۶۰	۱۳۹۳/۰۵/۰۳
۳۰	۴۵	۷۵	۶۰	۱۳۹۳/۰۵/۰۸
۳۰	۴۵	۷۵	۶۰	۱۳۹۳/۰۵/۱۳
۳۰	۴۵	۷۵	۶۰	۱۳۹۳/۰۵/۱۸
۳۰	۴۵	۷۵	۶۰	۱۳۹۳/۰۵/۲۴
۳۰	۴۵	۷۵	۶۰	۱۳۹۳/۰۵/۳۱
۳۰	۴۵	۷۵	۶۰	۱۳۹۳/۰۶/۰۶
۳۰	۴۵	۷۵	۶۰	۱۳۹۳/۰۶/۱۴
۶۰۰	۷۸۰	۱۱۴۰	۹۶۰	جمع

کود اوره در نظر گرفته شده برای هر تیمار، در سه نوبت به زمین داده شد. در مرحله اول ۵-۷ برگی، مقدار ۱۶/۵ درصد از کود و ۱۹ روز پس از کاشت، در مرحله دوم در آغاز مرحله زایشی (مرحله تاسل‌دهی)، مقدار ۳۳/۵ درصد و ۶۰ روز پس از کاشت و در مرحله سوم در آغاز مرحله شیری بلال، مقدار ۵۰ درصد و ۷۷ روز بعد از کاشت بذر، کود اوره به زمین داده شد. پس از رسیدگی کامل محصول در تاریخ اول مهر، کل قسمت اندام هوایی از سطح خاک به بالا از وسط هر کرت به ابعاد ۲/۲۵ متر در ۲ متر برداشت شد. نمونه‌ها به مدت ۱۴ روز در هوا خشک و به مدت ۳ روز در دستگاه آون با درجه حرارت ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند و سپس عملکرد کل محصول برای هر تیمار توزین شد. داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از نرم‌افزار SAS تحلیل آماری شدند. در این پژوهش برای بررسی اثر کود نیتروژن بر بازده مصرف آب، تیمارهایی با آب مصرفی متغیر ولی با کوددهی ثابت به‌عنوان تیمار اصلی در نظر گرفته شد که مشخصات آنها در جدول (۴) ملاحظه می‌شود. عملکرد محصول در تیمارهای اصلی فقط تابع آب مصرفی است زیرا که مقدار کود مصرفی در هر یک از این تیمارها یکسان است و حداکثر بازده مصرف آب در تیمارهای اصلی با استفاده از شاخص الاستیسیته تعیین خواهد شد.

که به پشته‌هایی به عرض ۰/۵ متر بسته می‌شدند. به‌منظور مستقل بودن تیمارها نسبت به هم یک متر بین کرت‌ها فاصله گذاشته شد. چهار شیار آبیاری در داخل هر کرت حفاری شد و در هر شیار با فاصله ۲۰ سانتی‌متر، تعداد ۴-۵ بذر کاشته شد و بوته‌های اضافه در مرحله ۶-۸ برگی تنک شدند. کاشت بذر در تاریخ ۱۳۹۳/۰۳/۱۶ انجام گرفت و تمامی کرت‌ها تا ۲۴ روز پس از کاشت با دور آبیاری پنج روز و بدون اعمال تنش آبیاری شدند. تیمارهای آبیاری بعد از تنک‌سازی اعمال شدند.

جهت تعیین رطوبت خاک و زمان آبیاری از دستگاه رطوبت‌سنج^۱ TDR که معادله واسنجی آن، قبلاً توسط کارشناسان گروه آبیاری تعیین شده بود، استفاده شد. لوله اندازه‌گیری این دستگاه رطوبت خاک را در اعماق ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری می‌کند. بعد از آماده‌سازی زمین، لوله مخصوص دستگاه TDR (probe) در یکی از کرت‌های آبیاری کامل نصب شد (تیمار شاهد) و رطوبت خاک در عمق‌های فوق به‌طور روزانه صبح زود قبل از آبیاری اندازه‌گیری می‌شد. زمان آبیاری به صورتی تعیین می‌شد که کمبود رطوبت خاک تا عمق توسعه ریشه بیشتر از ۵۰ درصد کل رطوبت در دسترس گیاه نگردد. کل رطوبت قابل‌استفاده در خاک از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\text{TAW} = \left(\sum_{i=1}^n (\theta_{fci} - \theta_{wpi}) \times D_i \right) \times 1000 \quad (\text{رابطه } 10)$$

در رابطه فوق، TAW کل رطوبت خاک تا عمق توسعه ریشه برحسب میلی‌متر، n تعداد لایه خاک تا عمق توسعه ریشه، θ_{fci} رطوبت ظرفیت مزرعه در لایه i ام، θ_{wpi} رطوبت نقطه پژمردگی در لایه i ام و D_i ضخامت خاک در لایه i ام برحسب متر. در این تحقیق، عمق ریشه در مرحله اول رشد به میزان ۰/۲ متر و در مرحله میانی و رسیدگی ۱/۲ متر در نظر گرفته شد و برای مرحله توسعه، به‌صورت درون‌یابی خطی بین رشد اولیه و رشد کامل محاسبه گردید. در زمان آبیاری تیمار شاهد، حجم آب آبیاری بر اساس کمبود رطوبت خاک، عمق توسعه ریشه و مساحت کرت تعیین می‌شد و با استفاده از کنتور آب وارد کرت می‌شد. حجم آب سایر تیمارهای آبیاری بر اساس درصدی از آب داده‌شده به تیمار شاهد برآورد و تمامی تیمارها در یک روز آبیاری می‌شدند. به علت کوچک و محصور بودن کرت‌های آبیاری، تلفات آبیاری ناچیز و لذا آب ذخیره‌شده در خاک صرف تبخیر و تعرق و آب مصرفی گیاه (CU) خواهد شد.

I100-N375 (صد درصد نیاز آبی گیاه همراه با ۳۷۵ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن) برابر با مقدار ۲۶۵۳۳ کیلوگرم در هکتار و کمترین مقدار آن برابر ۹۱۰۳ کیلوگرم در هکتار و متعلق به تیمار I50-N0 (پنجاه درصد نیاز آبی گیاه و بدون کود) بوده است. همان‌طور که از جدول (۶) ملاحظه می‌شود، برای عملکرد بین تکرارها اختلاف معنی‌داری وجود نداشت اما تنش خشکی و کود نیتروژن هر یک به‌تنهایی به‌طور معنی‌داری بر مقادیر عملکرد محصول تأثیر داشتند. هم‌چنین در مورد برهم‌کنش تنش خشکی و نیتروژن بر مقادیر عملکرد محصول، اثر معنی‌داری مشاهده شد. بنابراین هر دو عامل تنش خشکی و کود نیتروژن هم به‌طور مستقل و هم به‌صورت توأمان بر عملکرد محصول تأثیرگذار بودند.

جدول ۴- مشخصات تیمارهای اصلی

تیمار اصلی	T1	T2	T3	T4
مشخصات	(I100-N0)	(I100-N225)	(I100-N300)	(I100-N375)
تیمار	(I125-N0)	(I125-N225)	(I125-N300)	(I125-N375)
	(I75-N0)	(I75-N225)	(I75-N300)	(I75-N375)
	(I50-N0)	(I50-N225)	(I50-N300)	(I50-N375)

نتایج و بحث

خلاصه نتایج میانگین عملکرد ذرت در تیمارهای مختلف در جدول (۵) و نتایج تجزیه واریانس عملکرد برای تعیین اثر سطوح تنش خشکی و کود نیتروژن در جدول (۶) ارائه شده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری عملکرد در انتهای فصل رشد گیاه نشان داد (جدول ۵) که بیشترین عملکرد برای تیمار

جدول ۵- میانگین عملکرد کل اندازه‌گیری شده برای تیمارهای مختلف

تیمار اصلی T4		تیمار اصلی T3		تیمار اصلی T2		تیمار اصلی T1	
عملکرد Kg ha ⁻¹	تیمار فرعی	عملکرد Kg ha ⁻¹	تیمار فرعی	عملکرد Kg ha ⁻¹	تیمار فرعی	عملکرد Kg ha ⁻¹	تیمار فرعی
۲۶۵۳۳	I100-N375	۲۶۳۷۴	I100-N300	۲۴۲۶۴	I100-N225	۲۳۰۰۳	I100-N0
۲۴۲۱۶	I125-N375	۲۶۰۸۰	I125-N300	۲۴۲۳۹	I125-N225	۲۳۰۲۰	I125-N0
۲۴۰۱۶	I75-N375	۲۳۲۳۷	I75-N300	۱۸۱۵۳	I75-N225	۱۵۹۸۲	I75-N0
۱۱۳۷۷	I50-N375	۱۱۱۰۲	I50-N300	۱۰۷۱۰	I50-N225	۹۱۰۳	I50-N0

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس عملکرد کل گیاه ذرت برای تعیین اثر سطوح تنش خشکی و کود نیتروژن

عملکرد (kg ha ⁻¹)	درجه آزادی (DF)	منابع تغییرات (SOV)
۶۷۲۵۱۵ ^{ns}	۲	تکرار
۵۳۴۶۳۶۲۳۴ ^{**}	۳	سطوح تنش خشکی (فاکتور I)
۴۰۲۵۱۶ ^{ns}	۶	خطای آزمایش I
۴۲۳۵۸۹۶۰ ^{**}	۳	سطوح کود نیتروژن (فاکتور N)
۶۶۶۳۱۹۳ ^{**}	۹	اثر متقابل IN (خشکی × نیتروژن)
۴۸۸۱۹۳ ^{ns}	۶	خطای آزمایش N
۲/۹۸۸۲۶۸	-	ضریب تغییرات (CV/%)

ns و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح یک درصد

باشد، عملکرد محصول تا بیش از ۹۸ درصد تابع آب مصرفی است و از معادله درجه ۲ پیروی می‌کند. توابع عملکرد و ضرایب آن در جدول (۷) ارائه شده‌اند.

تغییرات Y، WUE، MWUE و EI با استفاده از معادلات مندرج در جدول (۷) و معادلات (۷) تا (۹) برای تیمارهای اصلی در شکل (۲) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشترین عملکرد محصول برای هر چهار تیمار اصلی، در شرایطی به‌دست‌آمده که شاخص الاستیسیته برابر صفر گردید.

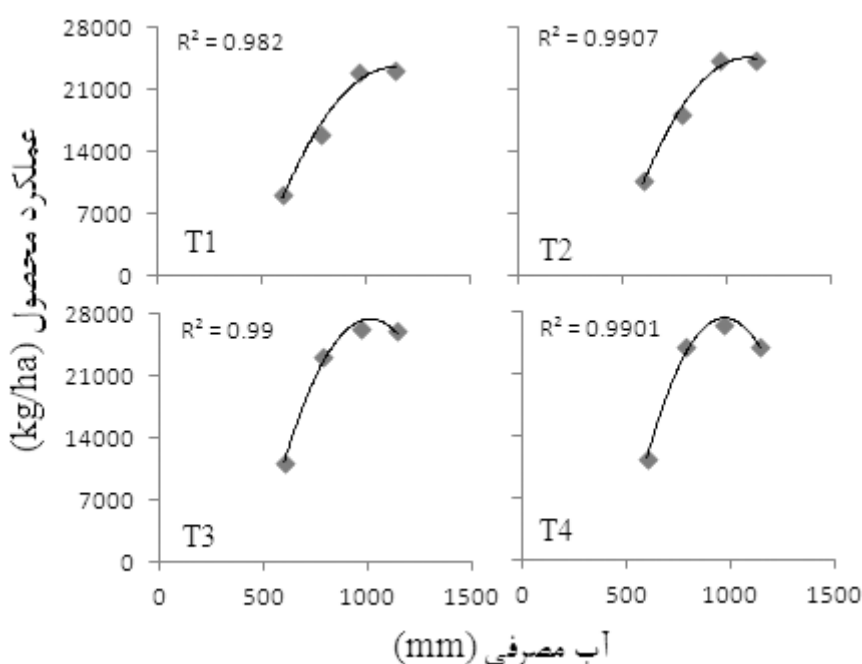
پراکنش نقاط و معادله درجه ۲ برازش شده به داده‌های آب مصرفی و عملکرد محصول برای تیمارهای اصلی (سطوح کود نیتروژن صفر، ۲۲۵، ۳۰۰ و ۳۷۵ کیلوگرم در هکتار) در شکل (۱) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود منحنی درجه ۲ برازش شده به نقاط برای هر چهار تیمار اصلی از ضریب تعیین بالایی ($R^2 > 0.98$) برخوردار است و اختلاف بین کمترین و بیشترین ضریب تعیین ناچیز است و می‌توان نتیجه گرفت، وقتی سایر عوامل مؤثر بر عملکرد به‌غیر از آب مصرفی گیاه ثابت

بازده مصرف آب با افزایش مصرف کود بین تیمارهای T1 تا T3 افزایش می‌یابد ولی با افزایش مصرف کود از تیمار T3 به T4 اندک می‌باشد.

جدول ۷- توابع عملکرد محصول برای تیمارهای اصلی

تیمار اصلی	تابع
T1	$Y = -43007 + 117.09CU - 0.0515CU^2$
T2	$Y = -4409 + 126.02CU - 0.0575CU^2$
T3	$Y = -70243 + 193.3CU - 0.0956CU^2$
T4	$Y = -80978 + 223.28CU - 0.0115CU^2$

حداکثر عملکرد در بین چهار تیمار اصلی با افزایش مصرف کود، افزایش می‌یابد ولی همین افزایش حداکثر عملکرد بین تیمارهای T3 و T4 قابل‌ملاحظه نیست و نشان‌دهنده این است که تا حدی با افزایش مصرف کود، عملکرد محصول افزایش قابل‌توجهی دارد ولی پس‌از آن حد، تغییری در افزایش عملکرد پیش نمی‌آید. در شکل (۲) دیده می‌شود زمانی که شاخص الاستیسیته برابر یک گردد، بیشترین بازده مصرف آب به دست می‌آید. همچنین بیشترین بازده مصرف آب در محل تلاقی دو منحنی WUE و MWUE است. عملکرد محصول و حداکثر



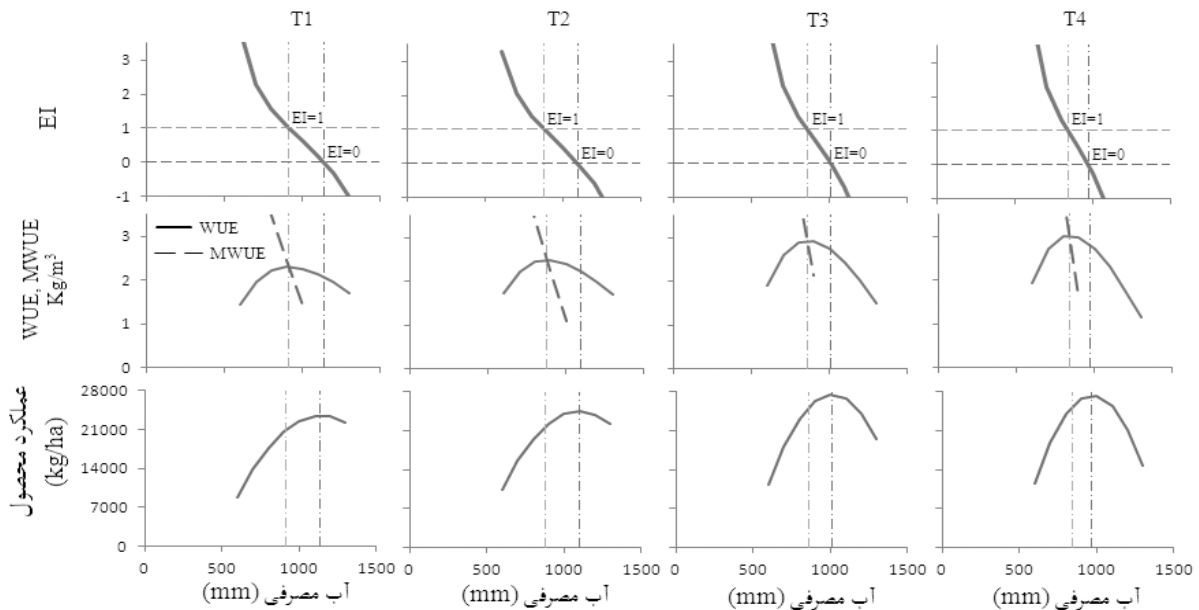
شکل ۱- پراکنش داده‌های آب مصرفی و عملکرد محصول در تیمارهای اصلی (T1 تا T4)

حدود ۱۶ درصد افزایش عملکرد پیش‌آمده و از آن‌طرف مصرف آب هم حدود ۱۵ درصد کاهش یافته است. لذا در شرایطی که از نظر منابع آب محدودیتی نباشد و هدف حصول به حداکثر عملکرد باشد، بهترین مقادیر مصرف آب و کود به ترتیب ۱۰۱۱ میلی‌متر و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار است. همین نتایج بر روی حداکثر بهره‌وری آب نیز مشاهده می‌شود. قابل‌ذکر است حداکثر بازده مصرف آب، نقطه بهینه کم‌آبی است که در آن بازده مصرف آب به حداکثر رسیده است. در شکل (۳-ب) ملاحظه می‌شود، بازده مصرف آب رابطه مستقیم با مصرف کود و رابطه معکوس با مصرف آب دارد. به عبارتی با مصرف کود تا میزان ۳۷۵ کیلوگرم در هکتار، بازده مصرف آب افزایش و نیاز آبی گیاه کمتر می‌گردد. با افزایش مصرف کود از صفر به ۳۷۵ کیلوگرم در هکتار، بازده مصرف آب از ۲/۳۰ به ۳/۰۲ کیلوگرم در هکتار افزایش یافته است به عبارتی حدود ۳۱ درصد بر بازده مصرف

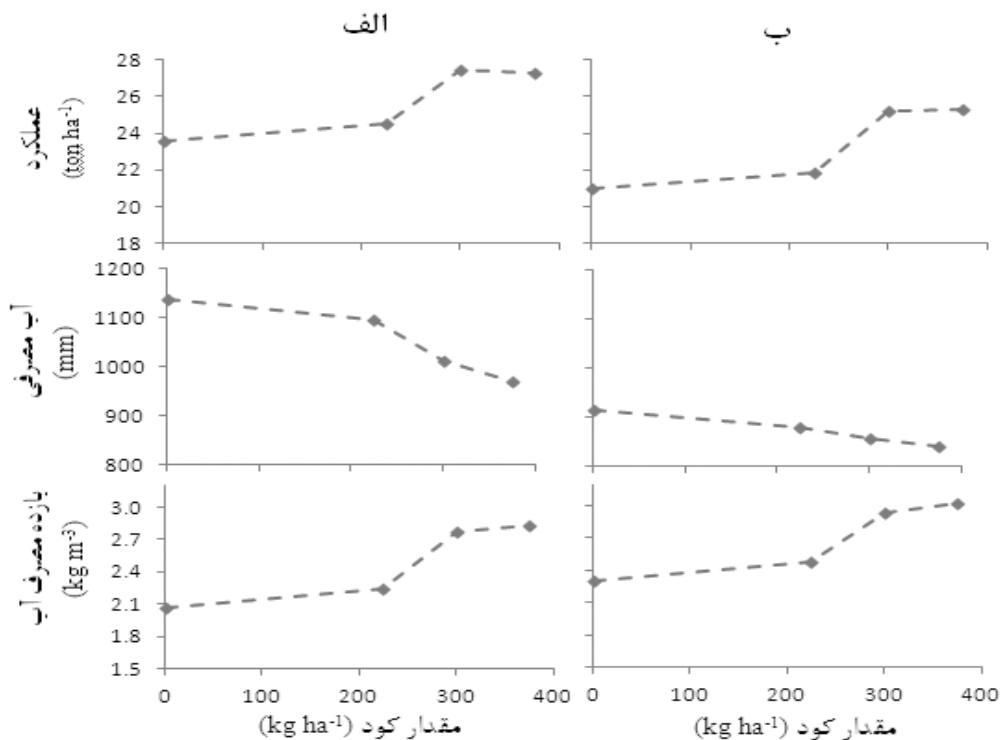
آب مصرفی (CU) حداکثر عملکرد و حداکثر بهره‌وری آب به ترتیب با استفاده از روابط $-b/2c$ و $(a/c)^{0.5}$ برای تیمارهای اصلی تعیین و با جایگذاری آنها در معادلات (۶) و (۷) حداکثر عملکرد و حداکثر بازده مصرف آب محاسبه شدند که نتایج در جدول (۸) و شکل (۳) ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد، حداکثر عملکرد محصول که بدون تنش آبی به دست آمده (شکل ۳-الف)، با افزایش مصرف کود از صفر تا ۳۷۵ کیلوگرم در هکتار روندی افزایشی داشته ولی در مقادیر بالای کود (بیش از ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار) این افزایش ناچیز است. همچنین بازده مصرف آب با افزایش مصرف کود، افزایش می‌یابد. نکته قابل‌توجه این است که مصرف آبی گیاه با افزایش مصرف کود کمتر شده است (شکل ۳-الف). ملاحظه می‌شود وقتی مصرف کود از صفر به ۳۷۵ کیلوگرم در هکتار برسد، حداکثر عملکرد محصول از ۲۳۵۴۶ به ۲۷۳۰۶ کیلوگرم در هکتار رسیده یعنی

تنش (۹۶۹ میلی‌متر)، درصد کم آبیاری برابر ۸۷ درصد خواهد بود. نیاز کود ازت برای ۸۷ درصد کم آبیاری برابر با ۳۷۵ کیلوگرم در هکتار که با این مصارف عملکرد محصول و بازده مصرف آب به ترتیب ۲۵ تن در هکتار و ۳/۰۲ کیلوگرم در هکتار برآورد می‌شود.

آب افزوده شده است. همین مقدار افزایش کود باعث شده، مصرف آب از ۹۱۴ به ۸۳۹ میلی‌متر رسیده که حدود ۸ درصد کاهش در مصرف آب است. نتایج جدول (۸) و شکل (۳-ب) نشان می‌دهد، در شرایط اعمال کم آبیاری، بهترین مقدار مصرف آب ۸۳۹ میلی‌متر است و با توجه به نیاز آبی در شرایط بدون



شکل ۲- منحنی تغییرات Y ، WUE ، $MWUE$ و EI برای تیمارهای اصلی T1 الی T4



شکل ۳- منحنی تغییرات عملکرد، آب مصرفی و بازده مصرف آب در مقادیر مختلف کود ازت. الف) منحنی تغییرات برای حصول به حداکثر عملکرد، ب) تغییرات برای حصول به حداکثر بازده مصرف آب

جدول ۸- نتایج حداکثر عملکرد محصول و حداکثر بازده مصرف آب در تیمارهای اصلی

حداکثر بهره‌وری آب			حداکثر عملکرد محصول			کود	
بازده مصرف آب	آب مصرفی	عملکرد	بازده مصرف آب	آب مصرفی	عملکرد	مصرفی	تیمار
Kg/m ³	mm	Kg/ha	Kg/m ³	mm	Kg/ha	Kg/ha	
۲/۳۰	۹۱۴	۲۰۹۸۶	۲/۰۷	۱۱۳۷	۲۳۵۴۶	۰	T1
۲/۴۸	۸۸۰	۲۱۸۵۶	۲/۲۴	۱۰۹۶	۲۴۵۳۹	۲۲۵	T2
۲/۹۴	۸۵۸	۲۵۲۰۷	۲/۷۵	۱۰۱۱	۲۷۴۶۸	۳۰۰	T3
۳/۰۲	۸۳۹	۲۵۳۲۶	۲/۸۲	۹۶۹	۲۷۳۰۶	۳۷۵	T4

نتیجه‌گیری کلی

برآورد شد. در این شرایط بازده مصرف آب و کود ازت مورد نیاز به ترتیب ۳/۰۲ کیلوگرم در هکتار و ۳۷۵ کیلوگرم در هکتار برآورد شد. Gheysari *et al.* (2009) بهترین درصد کم آبیاری برای گیاه ذرت در منطقه ورامین را ۸۵ درصد تعیین کردند که در این مورد تطابق نزدیکی با نتایج این پژوهش دارد. ولی آنها مقدار کود ازت را ۲۸۵ کیلوگرم در هکتار توصیه کردند که با نتایج این پژوهش اختلاف دارد. با توجه به اینکه داده‌های این تحقیق بر اساس یک سال داده بوده، لذا لازم است، آزمایش‌ها برای یک سال دیگر برای صحت سنجی تکرار گردد.

در این پژوهش اثر تیمارهای مختلف کود ازت بر حداکثر عملکرد محصول در شرایط بدون تنش آبی و حداکثر بازده مصرف آب در شرایط کم آبیاری با استفاده از تئوری الاستیسیته بررسی شد. نتایج نشان داد، حداکثر عملکرد محصول به میزان حدود ۲۷ تن با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم کود ازت در هکتار و مصرف آب حدود ۱۰۰۰ میلی‌متر به دست می‌آید و با این مصارف بازده مصرف آب ۲/۸۲ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد. در شرایط کم آبیاری، بهترین درصد اعمال کم آبیاری که بیشترین بازده مصرف آب را در پی داشته باشد، ۸۷ درصد

REFERENCES

- Blum, F.A. (2009). Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research*, 112(2-3), 119–123.
- Debaek, P. and Aboudrare, A. (2004). Adaptations of crop manage to water-limited environments. *European Journal of Agronomy*, 21(4), 433–446.
- Doltra, J. and Muñoz, P. (2010). Simulation of nitrogen leaching from a fertigated crop rotation in a Mediterranean climate using the EU-Rotate N and Hydrus-2D models. *Agricultural Water Management*, 97, 277–285.
- Farre, F. and Faci, J. M. (2009). Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*, 96, 384–394.
- Fathi, P. and Soltani, M. (2013). Optimization of water use efficiency and yield in potato using marginal analysis theory. *Journal of Conservation of Soil and Water*, 2(2), 85-93. (In Farsi)
- Fereres, E. M. and Soriano, A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147–159.
- Fooladmand, H. R., Nyazi, N. and Jokar, L. (2006). The effect of different amounts of water and nitrogen fertilizers on wheat yield. *Journal of Agricultural Sciences and Technology*, 4, 779-786. (In Farsi)
- Geerts, S. and Raes, D. (2009). Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96, 1275–1284.
- Gheysari, M., Mirlatifi, S. M., Bannayan, M., Homaei, M., Hoogenboom, G. (2009). Interaction of water and nitrogen on maize grown for silage. *agricultural water management*, 96, 809–821.
- Hamzezadeh, M., Fathi, P., Javadi, T. and Hassani, A. (2011). The effect of different irrigation water levels on Water Use Efficiency in Basil Plant (*Ocimum Basilicum var. Keshkeny Levelu*) Using Marginal Analysis Theory. *Journal of Water and Soil*, 25(5), 953-960. (In Farsi)
- Lemaire, G., Jeuffroy, M. H. and Gastal, F. (2008). Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy*, 28, 614–624.
- Liu W. Z., Hunsaker D.J., Li Y.S., Xie X.Q and Wall G.W. (2002). Interrelations of yield, evapotranspiration, and water use efficiency from marginal analysis of water production functions. *Agricultural Water Management*, 56, 143–151.
- Liu, W. Z. and Zhang, X. C. (2007). Optimizing water and fertilizer input using an elasticity index: A case study with maize in the loess plateau of china. *Field Crops Research*, 100, 302–310.
- Pl'enet, D. and Lemaire, G. (2000). Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. *Plant Soil*, 216, 65–82.

Rahimikhoob, H. Sotoodehnia, A. (2014). Optimizing Water Use Efficiency using Elasticity Index - A Case Study For Silage Maize in the Qazvin Region. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 2(8), 304-310. (In Farsi)

Rosegrant, M. W., Cai, X. and Cline, S. A. (2002). World Water and Food to 2025: Dealing with

Scarcity. *International Food Policy Research Institute*.

Zabet, M., Bahamin, S., Ghoreyshi, S., Sadeghi, H. and Moosavi, S. Gh. (2014). The effect of deficit irrigation and nitrogen fertilization on yield of the aerial parts of forage millet in Birjand. *Journal of Environmental Stresses on crop science*, 2, 187-194. (In Farsi)