DOI: 10.22059/ijswr.2021.314850.668822

تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۲، شماره ۳، خرداد ۱۴۰۰ (ص ۶۲۰-۶۱۱)

Yield Reaction to Evapotranspiration of Maize, Under the Effect of Water Stress at Different Growth Stages (In Qazvin Plain)

REZA SAEIDI [1*], ABBAS SOTOODEHNIA[2]

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

(Received: Dec. 13, 2020- Revised: Jan. 2, 2021- Accepted: Feb. 13, 2021)

ABSTRACT

In this research, the yield and evapotranspiration of maize were investigated under water stress at different growth stages. The experiment was performed as factorial in a randomized complete block design. Treatments included m water stress at growth stages of 4-leaf, 12-leaf, flowering, grains doughing and a control treatment under full irrigation. Daily plant evapotranspiration was measured based on soil water balance in the root zone. The total amounts of evapotranspiration in the control and the proposed treatments (water stress at growth stages of 4-leaf, 12-leaf, flowering, grains doughing) were estimated to be 462, 401, 322.5, 304.5 and 355 mm, respectively. Similarly, the dry biomass of maize was equal to 15025, 14422, 11384, 7746 and 13416 (kg. ha^{-1}), respectively. Descending amounts of evapotranspiration and yield were correspond to control, 4-leaf, doughing, 12-leaf and flowering treatments, respectively. The reason was the sensitivity and different need of plant to transpiration, at different growth stages. To evaluate the yield response to maize evapotranspiration, the value of K_y coefficient in the mentioned growth stages was determined to be 0.3, 0.8, 1.42 and 0.46, respectively. At the flowering stage, the value of K_y coefficient was higher than one, which indicates that the yield of maize is reduced more than the evapotranspiration. The amount of water productivity in the control and stress treatments were calculated to be 3.25, 3.6, 3.53, 2.54 and 3.78 ($kg.m^{-3}$), respectively. The highest to lowest values were corresponded to seeds doughing, 4-leaf, 12-leaf, control and flowering treatments, respectively. The results showed that the full irrigated plant (control treatment) was not a guarantee to increase the water productivity. Rather, by refusing to achieve the maximum yield and accepting the low reduction in yield, water productivity can be increased. Under these conditions, selecting the suitable plant growth stage for low irrigation was also important.

Keywords: K_y coefficient, Low irrigation, Stomatal resistance, Water productivity.

[*]Corresponding Author's Email: Saeidi@org.ikiu.ac.ir

واکنش عملکرد به تبخیر-تعرق ذرت، تحت تأثیر تنش آبی در مراحل مختلف رشد (در دشت قزوین)

رضا سعیدی[1*] و عباس ستوده‌نیا[1]

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۲۳- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳- تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵)

چکیده

در این پژوهش، عملکرد و تبخیر-تعرق ذرت در شرایط اعمال تنش آبی در مراحل مختلف رشد بررسی شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. تیمارها شامل اعمال تنش آبی در مراحل رشد ۴برگی، ۱۲برگی، گل‌دهی، خمیری شدن دانه‌ها و یک تیمار شاهد تحت آبیاری کامل بود. تبخیر-تعرق روزانه گیاه بر اساس بیلان آب خاک در منطقه ریشه اندازه‌گیری شد. مقدار کل تبخیر-تعرق در تیمار شاهد و تیمارهای مذکور به‌ترتیب برابر با ۴۶۲، ۴۰۱، ۳۲۲/۵، ۳۰۴/۵ و ۳۵۵ میلی‌متر در مترمربع برآورد شد. به‌همین ترتیب مقدار عملکرد زیست‌توده خشک ذرت برابر با ۱۵۰۲۵، ۱۴۴۲۲، ۱۱۳۸۴، ۷۷۴۶ و ۱۳۴۱۶ کیلوگرم بر هکتار بود. نتایج نشان داد بیشترین تا کم ترین مقدار تبخیر-تعرق و عملکرد، به‌ترتیب مربوط به تیمارهای شاهد، ۴برگی، خمیری شدن، ۱۲برگی و گل‌دهی بود. علت آن، میزان حساسیت و نیاز متفاوت گیاه به انجام تعرق در مراحل مختلف رشد بود. برای بررسی پاسخ عملکرد به تبخیر-تعرق ذرت، مقدار ضریب K_y در مراحل رشد مذکور به‌ترتیب برابر با ۰/۳، ۰/۸، ۱/۴۲ و ۰/۴۶ به‌دست آمد. در مرحله‌ی گل‌دهی، مقدار ضریب K_y بیشتر از عدد یک بود که بیانگر آن است که عملکرد ذرت نسبت به تبخیر- تعرق، کاهش بیشتری دارد. از سوی دیگر، مقدار بهره‌وری مصرف آب در تیمار شاهد و تیمارهای تحت تنش به‌ترتیب برابر با ۳/۲۵، ۳/۶، ۳/۵۳، ۲/۵۴ و ۳/۷۸ کیلوگرم بر مترمکعب محاسبه شد. بیشترین تا کمترین مقادیر آن به‌ترتیب مربوط به تیمارهای خمیری شدن دانه‌ها، ۴برگی، ۱۲برگی، شاهد و گل‌دهی بود. نتایج نشان داد آبیاری کامل گیاه (تیمار شاهد) تضمینی برای افزایش بهره‌وری مصرف آب نبود بلکه با جلوگیری از دستیابی به حداکثر عملکرد و پذیرش اندکی کاهش محصول، می‌توان بهره‌وری مصرف آب را افزایش داد. در این شرایط، انتخاب مرحله‌ی مناسب رشد گیاه برای اعمال کم‌آبیاری نیز حائز اهمیت بود.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری مصرف آب، ضریب Ky، کم‌آبیاری، مقاومت روزنه‌ای.

مقدمه

بحران کمبود منابع آب باکیفیت در بخش کشاورزی، باعث می شود پژوهش‌هایی درخصوص استفاده بهینه از آب و امکان اعمال کم‌آبیاری در کشت گیاهان زراعی صورت گیرد. در میان غلاتی که به‌صورت آبی کشت می‌شوند، ذرت به‌عنوان یک محصول استراتژیک، نقش به‌سزایی در تأمین خوراک دام و طیور هر کشور دارد. بررسی حساسیت مراحل مختلف رشد ذرت به کم‌آبی، می تواند راهنمای مؤثری برای اتخاذ مدیریت‌های کم‌آبیاری در طول دوره رشد آن باشد. مقاومت روزنه‌ای از جمله شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاهان به‌شمار می‌رود که در کنترل میزان رطوبت خارج‌شده از گیاه و مقدار CO2 وارد شده به آن، نقشی تعیین‌کننده دارد. در فرایند تعرق، آب توسط گیاه از محیط خاک جذب شده و پس از عبور از آوندهای گیاهی به‌صورت بخار از روزنه‌ها خارج می‌شود. اگر آب کافی برای تعرق در دسترس نباشد، مقدار مقاومت روزنه‌ای و دمای سطح برگ گیاه افزایش یافته و در نهایت روزنه‌های برگ مسدود می‌گردد (Seifi *et al.*, 2014). در پژوهش‌های گذشته و در پاسخ به تنش آبی شدید، مقاومت روزنه‌ای گیاه ۷۰ تا ۷۵ درصد افزایش یافت. افزایش مقاومت روزنه‌ای و کاهش تعرق گیاه تحت شرایط تنش آبی، یک نوع سازگاری بود که گیاه برای کاهش از دست دادن آب اِعمال می‌کرد (Fathi *et al.*, 2017). در تحقیقی بر روی ذرت گزارش شد در شرایط کمبود رطوبت خاک (تنش آبی)، هورمون ABA به‌عنوان مکانیسم هورمونی وارد اندام‌های هوایی شده و به‌صورت یک سیستم هشداردهنده اولیه عمل نموده و باعث بسته شدن روزنه‌ها می‌شود. در این شرایط گیاه با بستن روزنه‌های خود، اقدام به حفظ رطوبت و جلوگیری از اتلاف آب می‌کند. به‌طوری که افزایش دمای برگ و کاهش تثبیت CO_2 تاوان این عمل خواهد بود (Mahrokh *et al.*, 2019). در سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴، پژوهشی

* نویسنده مسئول: Saeidi@org.ikiu.ac.ir

بر روی ذرت تحت تیمارهای مختلف آبیاری در دانشگاه نبراسکا-لینکلن انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش آبیاری، تبخیر-تعرق واقعی گیاه افزایش یافت (Daran, 2015). در پژوهش دیگر مقدار تبخیر-تعرق ذرت تحت تنش آبی بررسی شد. نتایج نشان داد با انجام آبیاری در سطح ۵۵ درصد نیاز آبی ذرت (کم‌آبیاری)، مقدار تبخیر-تعرق نسبت به شرایط آبیاری کامل حدود ۳۳ درصد کاهش یافت (Trout and Dejonge, 2017). در پژوهش‌های گذشته گزارش شد که پاسخ گیاهان به تنش آبی، در مراحل مختلف رشد متفاوت بوده است. این مسئله در برنامه‌ریزی کم آبیاری دارای اهمیت زیادی بود (Al-Kaisi and Broner, 2009). به‌طوری که ذرت در مراحل رشد رویشی و رسیدگی، تحمل بیشتری به تنش آبی داشت. حساس‌ترین مرحله رشد ذرت مرحله گل‌دهی بود و کمترین عملکرد دانه در اثر کمبود رطوبت خاک، در آن مرحله اتفاق افتاد (Doorenbos and Kassam., 1979). در تحقیق دیگر اعلام شد دوره‌های بحرانی تنش آبی ذرت شامل مراحل استقرار گیاهچه، دوره رشد سریع، مرحله گرده افشانی و پرشدن دانه بود. دلیل آن فرایندهای فیزیولوژیکی متفاوت در مراحل رشد ذرت بود که باعث تأثیر متفاوت تنش بر روی عملکرد محصول می‌شد (Nielsen, 2002). در پژوهشی عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ تحت تأثیر چهار سطح آبیاری ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه، بررسی شد. نتایج نشان داد در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی به‌دلیل کاهش رشد رویشی و به تأخیر افتادن گرده افشانی و رسیدگی فیزیولوژیکی ذرت، کاهش عملکرد محصول معنی‌دار بود (Alinejadian Bidabadi *et al*., 2016). در تحقیق دیگر گزارش شد که افزایش تنش آبی قبل از مرحله گل‌دهی ذرت، بر مقدار عملکرد و بهره وری مصرف آب بسیار مؤثر بود. به‌طوری که افزایش تنش قبل از گل‌دهی، بر شدت کاهش عملکرد و بهره‌وری مصرف آب نسبت به مراحل دیگر رشد افزود (Akbari Nodehi, 2018). به‌طور کلی نتایج نشان داد که تنش آبی بر کاهش مقدار تبخیر-تعرق و عملکرد گیاه ذرت مؤثر بوده‌است. بنابراین در شرایط تنش آبی می‌توان پاسخ عملکرد به تبخیر- تعرق گیاهان را نسبت به شرایط پتانسیل منطقه بررسی نمود، تا میزان اثرپذیری عملکرد نسبت به سطوح مختلف تنش مشخص گردد. برای این منظور ضریب K_y که نشان دهنده شیب کاهش عملکرد نسبی نسبت به کاهش تبخیر-تعرق نسبی بود، توسط دورنبوس و کسّام (۱۹۷۹) ارائه شد. در تحقیقی مقدار ضریب K_y برای کل دوره رشد گیاه ذرت در شرایط تنش آبی، عدد ۱/۲۵ برآورد شد (Doorenbos and Kassam, 1979). در تحقیق دیگر با اعمال تنش آبی از طریق تغییر دور آبیاری از ۶ به ۱۰ روز، مقدار ضریب K_y در کل دوره رشد ذرت عدد ۱/۱۴ محاسبه شد. مفهوم عدد حاصل این بود که به‌ازای هر واحد اُفت در میزان تبخیر-تعرق نسبی گیاه، اُفت عملکرد نسبی ۱/۱۴ واحد بود (Kiani and Saberi, 2015). تاکنون پژوهش‌های متنوعی درخصوص تأثیر تنش آبی بر عملکرد ذرت، در کل دوره و مراحل مختلف رشد صورت گرفته است. اما در مورد پاسخ عملکرد به تبخیر-تعرق ذرت تحت تأثیر حداکثر تنش آبی ممکن در مراحل مختلف رشد، پژوهش چندانی انجام نشده است. در پژوهش حاضر با اعمال پالس‌هایی جداگانه از تنش آبی در مراحل رشد گیاه، واکنش عملکرد نسبت به تبخیر-تعرق واقعی ذرت و بهره‌وری مصرف آب، در منطقه قزوین بررسی شد. از این‌رو در زمان کمبود آب باکیفیت در این منطقه، می‌توان کشت ذرت را با اعمال تنش آبی (کم‌آبیاری) انجام داد. در این شرایط انتخاب مرحله‌ی رشد مناسب (بهینه) برای اعمال تنش، می‌تواند موجب بروز کمترین خسارت در مقدار عملکرد محصول باشد.

مواد و روش‌ها

معرفی طرح

این پژوهش در سال ۱۳۹۴ و در شهر قزوین، با موقعیت جغرافیایی ۵۰ درجه و صفر دقیقه و ۳۳ ثانیه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۱۸ دقیقه و ۱۷ ثانیه عرض شمالی انجام شد. آب مورد نیاز برای آبیاری از آب زیرزمینی با هدایت الکتریکی ۰/۴۷ دسی‌زیمنس بر متر و اسیدیته ۷/۲ تأمین شد. قبل از اجرای پژوهش، در ۵ نقطه از مزرعه و از اعماق ۳۰-۰، ۶۰-۳۰ و ۶۰-۹۰ سانتی‌متری، نمونه خاک تهیه شد. آنالیز شیمیایی و فیزیکی بر روی نمونه‌ها، توسط آزمایشگاه خاک‌شناسی معتبر انجام شد و نتایج آن در جدول (۱) ارائه شد. گیاه مورد مطالعه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ بود که در کرت‌هایی با ابعاد ۳×۳ متر و با فاصله ۲ متر از هم کاشته شد. هر کرت دارای پنج ردیف کشت جویچه‌ای با فاصله‌ی ۶۰ سانتی‌متر از هم بود که به‌صورت سطحی آبیاری شد. بذرها با تراکم ۸۰۰۰۰ بوته در هکتار در تاریخ اول تیر ماه کشت شد و زیست‌توده نهایی با هدف مصرف علوفه‌ای ذرت‌ها در تاریخ ۲۵ مهرماه برداشت شد. در طول دوره‌ی رشد گیاه، بارندگی اتفاق نیفتاد و نیاز آبی گیاه صرفاً از طریق آبیاری تأمین شد. بر اساس نتایج بررسی شیمیایی خاک، مصرف کودهای ازت (اوره)، سوپر فسفات تریپل، سولفات پتاسیم، گوگرد و کود دامی به‌ترتیب به‌مقدار ۳۵۰، ۲۰۰، ۲۰۰، ۲۰۰ و ۱۵۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار توسط آزمایشگاه خاک توصیه شد. کود اوره در طول دوره کشت و بقیه کودها قبل از کشت به خاک اضافه شد. تیمارها شامل یک تیمار شاهد و چهار تیمار اعمال تنش آبی تا حد آستانه پژمردگی موقت گیاه (انسداد جزئی روزنه برگ‌ها) بود. مقدار

مقاومت روزنه‌ای برگ‌های ذرت به‌صورت روزانه و توسط دستگاه پرومتر مدل AP4 ساخت شرکت دلتاتی (ΔT) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری پارامتر مذکور، هر روز ساعت ۷ صبح از هر کرت سه گیاه و از هر گیاه سه برگ جوان انتخاب شد و میانگین داده‌ها ثبت شد. در تیمار شاهد (P_C) آبیاری در حد نیاز آبی گیاه (آبیاری کامل) و قبل از اتمام آب سهل الوصول خاک انجام شد. در تیمارهای دیگر، تنش آبی در چهار مرحله‌ی رشد ۴برگی (P_1)، ۱۲برگی (P_2)، گل‌دهی (P_3) و خمیری شدن دانه‌ها (P_4) اعمال شد. مراحل مذکور براساس مراحل رشد ابتدایی، توسعه، میانی و نهایی گیاه ذرت انتخاب شد. به‌طورکلی تیمارها در سه تکرار و مجموعاً ۱۵ کرت، به‌صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی اعمال شد (شکل ۱).

شکل ۱- شبکه تیمارها در مزرعه

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

پارامتر	واحد	عمق خاک (سانتی‌متر) ۳۰-۰	۶۰-۳۰	۹۰-۶۰
هدایت الکتریکی	$dS.m^{-1}$	۰/۵۴	۰/۶	۰/۶۷
اسیدیته (PH)	-	۷/۶	۷/۶	۷/۸
کربن آلی	درصد	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۱
ازت	درصد	۰/۰۶	۰/۱	۰/۱۲
فسفر قابل جذب	p.p.m	۴	۱	۱
پتاسیم قابل جذب	p.p.m	۲۸۸	۶۰	۵۷
بافت خاک	-	SL	SL	SL
رس	درصد	۱۰	۸	۱۱
سیلت	درصد	۳۳	۲۴/۵	۳۰
شن	درصد	۵۷	۶۷/۵	۵۹
رطوبت وزنی حد ظرفیت زراعی	درصد	۲۳	۲۴/۵	۲۳/۷
رطوبت وزنی حد پژمردگی	درصد	۱۰	۱۱	۱۰/۶
چگالی ظاهری	$g.cm^{-3}$	۱/۵۳	۱/۵۵	۱/۵۱

تعیین زمان و حجم آبیاری

در این پژوهش رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه گیاه، به‌صورت روزانه با دستگاه بازتاب زمانی امواج (TDR[1]) مدل TRIME-FM اندازه‌گیری شد. قبل از شروع آزمایش، دستگاه TDR برای برآورد مقادیر مختلف رطوبت خاک مزرعه مورد ارزیابی قرار گرفت و اعداد ثبت شده توسط آن، نسبت به مقادیر واقعی رطوبت خاک واسنجی شد. از سوی دیگر برای حذف اثرات حاشیه‌ای، داده‌های رطوبتی از مرکز هر کرت برداشت شد. با توجه به تحقیقات گذشته، حد آب سهل‌الوصول خاک برای گیاه ذرت، در تمام مراحل رشد بین ۴۰ تا ۸۰ درصد گزارش شد (Jarollahi, 2001). بنابراین در کرت‌های شاهد برای اطمینان از این‌که به گیاه ذرت حتی در حساس‌ترین دوره رشد هم تنش آبی وارد نمی‌شود، حد آب سهل‌الوصول خاک به‌مقدار ۴۰ درصد درنظر گرفته شد. یعنی پس از اتمام ۴۰ درصد از رطوبت بین دو حد ظرفیت مزرعه (FC[2]) و نقطه پژمردگی (PWP[3])، کرت‌های شاهد آبیاری شدند. درصد رطوبت وزنی خاک در حد FC و PWP با استفاده از دستگاه‌های صفحات فشاری و گرم‌خانه، محاسبه و در جدول (۱) ارائه شد. به این صورت که نمونه‌ی اشباع از خاک مزرعه، به‌ترتیب در فشار مکشی یک سوم و ۱۵ اتمسفر قرار داده شد. سپس از تقسیم وزن آب باقی‌مانده در خاک بر وزن دانه‌های خشک خاک، مقدار رطوبت وزنی در نقطه پتانسیلی مدنظر محاسبه شد. در سایر تیمارها که شامل اعمال تنش آبی در یکی از مراحل رشد گیاه بود، کاهش رطوبت خاک از حد آب سهل‌الوصول، باعث افزایش مقاومت روزنه‌ای برگ‌های تحت تنش نسبت به تحت کنترل (شاهد) شد. با ادامه‌ی کاهش رطوبت خاک، دستگاه پرومتر نشان داد که برای جلوگیری از تخلیه آب از اندام‌های گیاهی، روزنه‌ی برگ‌های گیاهان تحت تنش به‌طور جزئی مسدود شد. این لحظه زمان رسیدن به نقطه پژمردگی موقت بود، به‌طوری که از نظر ظاهری نیز پژمردگی برگ‌های تحت تنش نسبت به شاهد، مؤید آن بود. بنابراین زمان آبیاری کرت‌های تحت تنش پس از اعمال حداکثر تنش ممکن بر گیاه (پژمردگی موقت) درنظر گرفته شد تا از پژمردگی دائم و مرگ گیاهان جلوگیری شود.

حجم آب آبیاری در هر تیمار، با توجه به مقدار کمبود رطوبت خاک تا حد FC، عمق ریشه گیاه و مساحت کرت، بر اساس رابطه (۱) تعیین شد. مقدار حجم آب ورودی به هر کرت با کنتور حجمی کنترل شد. آب از مخزن مورد نظر توسط شیلنگ به کرت‌ها انتقال داده شد و آبیاری در جویچه‌ها به‌صورت سطحی انجام شد. آب به‌شکل یکنواخت در سطح هر کرت توزیع شد و با توجه به محصور بودن کرت‌ها و عدم خروج آب از آن‌ها، بازده آبیاری صد در صد بود. به‌طور کلی، تاریخ و حجم آب آبیاری هر تیمار در جدول (۲) ارائه شد.

$$\forall = \frac{(\theta_{FC}-\theta_m)}{100}.\rho b.D_{rz}.A \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

$\forall$: حجم آب آبیاری (m^3)، θ_{FC}: درصد رطوبت وزنی خاک در نقطه ظرفیت مزرعه، θ_m: درصد رطوبت وزنی خاک بلافاصله قبل از انجام آبیاری، ρb: چگالی ظاهری خاک ($g.cm^{-3}$)، D_{rz}:

[1]- Time Domain Reflectometer
[2]- Field Capacity
[3]- Permanent Wilting Point

عمق ریشه گیاه (m) و A: مساحت کرت (m^2).

برآورد تبخیر-تعرق

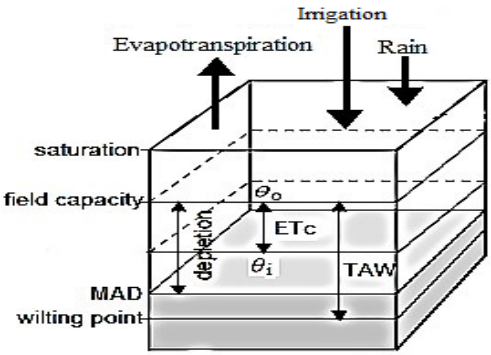
در فاصله‌ی بین دو آبیاری، مقدار رطوبت روزانه خاک در مرکز هر کرت و در منطقه ریشه گیاه اندازه‌گیری شد. با توجه به عدم وجود بارندگی در دوره کشت و نبود زهکشی یا جریان‌های ترجیحی در عمق خاک، رَوَند کاهشی رطوبت خاک صرفاً متأثر از فرایند تبخیر-تعرق گیاهان بود. بنابراین مقدار تبخیر-تعرق گیاهان در واحد سطح، بر اساس بیلان آب خاک (شکل۲) و از طریق رابطه (۲) برآورد شد.

$$(ET_c)_i = (\theta_{i-1} - \theta_i).\rho b.D_{rz}$$ (رابطه ۲)

$(ET_c)_i$: تبخیر- تعرق روزانه گیاه (cm)، θ: درصد رطوبت وزنی خاک، i: شمارنده روزهای بین دور آبیاری، $(\theta_{i-1} - \theta_i)$: اختلاف رطوبت روزانه خاک، ρb: چگالی ظاهری خاک ($g.cm^{-3}$)، D_{rz}: عمق ریشه گیاه (cm).

جدول ۲- زمان و مقدار آب آبیاری در هر تیمار

تیمار شاهد		مرحله ۴برگی		مرحله ۱۲برگی		مرحله گل‌دهی		مرحله خمیر شدن دانه	
تاریخ	حجم آبیاری (لیتر در کرت)	تاریخ	حجم آبیاری (لیتر در کرت)	تاریخ	حجم آبیاری (لیتر در کرت)	تاریخ	حجم آبیاری (لیتر در کرت)	تاریخ	حجم آبیاری (لیتر در کرت)
۹۴/۴/۱	۲۲۵	۹۴/۴/۱	۲۲۵	۹۴/۴/۱	۲۲۵	۹۴/۴/۱	۲۲۵	۹۴/۴/۱	۲۲۵
۹۴/۴/۶	۲۲۵	۹۴/۴/۶	۲۲۵	۹۴/۴/۶	۲۲۵	۹۴/۴/۶	۲۲۵	۹۴/۴/۶	۲۲۵
۹۴/۴/۱۲	۲۲۵	۹۴/۴/۱۲	۲۲۵	۹۴/۴/۱۲	۲۲۵	۹۴/۴/۱۲	۲۲۵	۹۴/۴/۱۲	۲۲۵
۹۴/۴/۱۹	۲۳۴	۹۴/۴/۳۰	۳۵۱	۹۴/۴/۱۹	۲۳۴	۹۴/۴/۱۹	۲۳۴	۹۴/۴/۱۹	۲۳۴
۹۴/۴/۲۶	۲۵۲	۹۴/۵/۷	۲۷۰	۹۴/۴/۲۶	۲۵۲	۹۴/۴/۲۶	۲۵۲	۹۴/۴/۲۶	۲۵۲
۹۴/۵/۳	۲۶۱	۹۴/۵/۱۵	۲۷۰	۹۴/۵/۳	۲۶۱	۹۴/۵/۳	۲۶۱	۹۴/۵/۳	۲۶۱
۹۴/۵/۱۲	۲۷۹	۹۴/۵/۲۳	۲۷۹	۹۴/۶/۵	۴۶۸	۹۴/۵/۱۲	۲۷۹	۹۴/۵/۱۲	۲۷۹
۹۴/۵/۲۱	۲۷۹	۹۴/۶/۱	۲۷۹	۹۴/۶/۱۴	۲۵۲	۹۴/۵/۲۱	۲۷۹	۹۴/۵/۲۱	۲۷۹
۹۴/۵/۲۹	۲۸۸	۹۴/۶/۹	۲۸۸	۹۴/۶/۲۲	۲۵۲	۹۴/۵/۲۹	۲۸۸	۹۴/۵/۲۹	۲۸۸
۹۴/۶/۶	۲۹۷	۹۴/۶/۱۷	۲۸۸	۹۴/۶/۳۰	۲۵۲	۹۴/۶/۲۴	۴۰۵	۹۴/۶/۶	۲۹۷
۹۴/۶/۱۳	۳۰۶	۹۴/۶/۲۴	۲۸۸	۹۴/۷/۸	۲۴۳	۹۴/۷/۷	۱۵۳	۹۴/۶/۱۳	۳۰۶
۹۴/۶/۱۹	۳۰۶	۹۴/۷/۲	۲۸۸	۹۴/۷/۱۷	۲۴۳	۹۴/۷/۱۸	۱۴۴	۹۴/۶/۱۹	۳۰۶
۹۴/۶/۲۵	۳۰۶	۹۴/۷/۱۰	۲۷۹					۹۴/۷/۱۱	۱۲۶
۹۴/۷/۱	۳۰۶	۹۴/۷/۱۹	۲۷۹					۹۴/۷/۱۹	۱۱۷
۹۴/۷/۹	۲۹۷								
۹۴/۷/۱۸	۲۹۷								



شکل ۲- بیلان رطوبتی خاک تحت تأثیر فرایند تبخیر- تعرق گیاه

اندازه‌گیری عملکرد محصول و تحلیل آماری

پس از رسیدگی بیولوژیکی ذرت‌ها، در تاریخ ۲۵ مهرماه عملیات برداشت محصول انجام شد. با توجه به هدف برداشت علوفه‌ای ذرت، بوته‌های هر کرت از کف زمین بریده شد و برای خشک شدن به آزمایشگاه منتقل شد. به‌این صورت که بوته‌ها به‌مدت ۴۸ ساعت در داخل گرمخانه قرار داده شد و در دمای ۷۲ درجه به طور کامل خشک شد. وزن کل بوته‌های خشک شده در واحد سطح، به‌عنوان عملکرد زیست توده خشک ذرت درنظر گرفته شد.

از سوی دیگر تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌های مربوط به مقدار تبخیر-تعرق و عملکرد زیست‌توده خشک محصول، توسط نرم‌افزار SPSS و با آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد.

ضریب پاسخ عملکرد به تبخیر-تعرق (K_y) و بهره‌وری مصرف آب (WP[1])

در اثر تنش آبی وارده بر گیاه، تبخیر- تعرق و عملکرد گیاه نسبت به شرایط استاندارد (پتانسیل) منطقه کاهش می‌یابد. در این شرایط، کاهش نسبی عملکرد نسبت به کاهش نسبی تبخیر-تعرق گیاه، برای گیاهان مختلف و مراحل رشد آن‌ها می‌تواند متفاوت باشد. حساسیت مطلب فوق با استفاده از ضریب K_y تبیین شده و از طریق رابطه (۳) قابل محاسبه است (Doorenbos and Kassam, 1979).

$$1 - \frac{Y_a}{Y_{max}} = K_y\left(1 - \frac{ET_a}{ET_{max}}\right)$$ (رابطه ۳)

K_y: ضریب پاسخ عملکرد ذرت به تبخیر-تعرق، Y_a: عملکرد زیست‌توده خشک ذرت در کرت تحت تنش (kg)، Y_{max}: عملکرد زیست‌توده خشک ذرت در کرت شاهد (kg)، ET_a: مجموع تبخیر-

۱ - Water Productivity

تعرق ذرت در کرت تحت تنش (mm)، ET_{max}: مجموع تبخیر-تعرق ذرت در کرت شاهد (mm).

برای محاسبه بهره‌وری مصرف آب، مقدار حجم آب مصرف شده برای تأمین کمبود رطوبت خاک تا حد ظرفیت مزرعه، در کل دوره کشت برای هر تیمار تجمیع شد. سپس از تقسیم وزن عملکرد زیست‌توده خشک محصول بر حجم آب مصرفی، بهره‌وری مصرف آب برآورد شد (رابطه ۴).

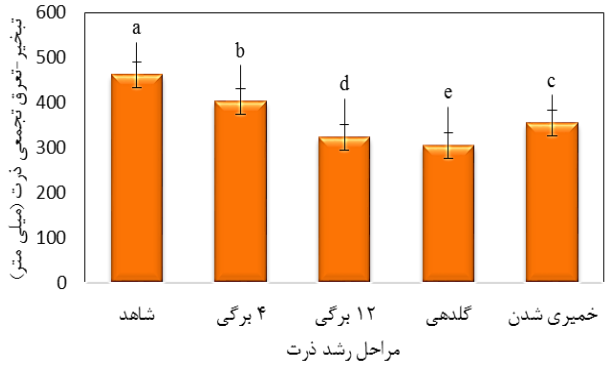
$$WP = \frac{Y}{\forall}$$ (رابطه ۴)

WP: بهره‌وری مصرف آب ($kg.m^{-3}$)، Y: عملکرد زیست‌توده خشک ذرت ($kg.ha^{-1}$)، ∀: مجموع حجم آب آبیاری مصرف شده در کل دوره رشد ($m^3.ha^{-1}$)

نتایج و بحث

تبخیر-تعرق

نتایج بررسی مقادیر تبخیر-تعرق در تیمارهای مختلف نشان داد تنش آبی باعث کاهش مقدار تبخیر-تعرق نسبت به شرایط استاندارد (پتانسیل) منطقه شد. تأثیر اِعمال تنش آبی در مراحل مختلف رشد بر مقدار تبخیر-تعرق ذرت، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). مجموع تبخیر-تعرق ذرت در تیمار شاهد و تیمارهای مرحله رشد ۴برگی، ۱۲برگی، گل‌دهی و شیری شدن دانه‌ها به‌ترتیب برابر با ۴۶۲، ۴۰۱، ۳۲۲/۵، ۳۰۴/۵ و ۳۵۵ میلی‌متر در واحد سطح بود (شکل ۳). بر اساس نتایج به‌دست آمده اِعمال حداکثر تنش آبی در مراحل مختلف رشد ذرت، تأثیر متفاوتی بر مقدار تبخیر-تعرق تجمعی گیاه داشت. بیشترین تا کم‌ترین مقدار تبخیر-تعرق به‌ترتیب مربوط به تیمارهای شاهد، ۴برگی، خمیری شدن، ۱۲برگی و گل‌دهی بود. به‌طوری کلی مقدار کاهش تبخیر-تعرق در مراحل رشد ۴برگی، ۱۲برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه به‌ترتیب ۱۳/۲، ۳۰/۲، ۳۴/۱ و ۲۳/۲ درصد نسبت به گیاه شاهد بود. مقادیر تبخیر-تعرق نشان داد که از زمان اِعمال تنش آبی (اتمام آب سهل‌الوصول خاک) تا انسداد روزنه‌ها، مقدار کاهش تعرق گیاه، در همه‌ی مراحل رشد به اندازه‌ای یکسان نبوده است. در این خصوص، بررسی منحنی Kc (ضریب گیاهی تبخیر-تعرق در دوره رشد) نیز این نکته را یادآوری کرد که مقدار تبخیر-تعرق ذرت در طول دوره رشد رَوَند یکسانی ندارد. به‌طوری که در دوره میانی رشد دارای بیشترین مقدار و در دوره‌های ابتدایی و انتهایی رشد مقادیر کمتری داشت. بنابراین میزان حساسیت و نیاز متفاوت گیاه به انجام تعرق در مراحل مختلف رشد ذرت، از علل کاهش متفاوت تبخیر-تعرق بوده است. در تحقیقی مشابه بر روی ذرت در استان مازندران، پس از تخلیه‌ی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصد رطوبت خاک در مراحل قبل و بعد از مرحله‌ی گل‌دهی، عملیات آبیاری انجام شد. از طریق بستن بیلان آب در عمق ریشه، مقدار تبخیر-تعرق برآورد شد. بیشترین مقدار تبخیر-تعرق به‌مقدار ۴۹۶ میلی‌متر، در تیمار تخلیه‌ی رطوبتی ۳۰ درصد قبل و ۹۰ درصد بعد از مرحله‌ی گل دهی رُخ داد. کمترین مقدار تبخیر-تعرق نیز به‌مقدار ۳۴۲ میلی‌متر مربوط به معکوس حالت فوق بود. نتایج نشان داد به‌علت افزایش حساسیت در مرحله گل‌دهی ذرت، اعمال تنش آبی در قبل از این مرحله، باعث کاهش ۳۰ درصدی مقدار تبخیر-تعرق شد (Akbari Nodehi, 2018). در پژوهش حاضر نیز اعمال تنش آبی در مرحله گل‌دهی، باعث کاهش ۳۴ درصدی مقدار تبخیر-تعرق شد و از این نظر مشابه نتایج پژوهش‌های گذشته بود. در یک تحقیق چهار ساله در دشت‌های مرکزی آمریکا، مقدار تبخیر-تعرق ذرت تحت تیمارهای آبیاری شامل ۱۰۰، ۸۵، ۷۵، ۷۰، ۵۵ و ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد اِعمال کم‌آبیاری (تنش آبی) در طول دوره رشد گیاه، باعث کاهش مقدار تبخیر-تعرق ذرت نسبت به شرایط آبیاری کامل شد. به‌طوری که برای تیمارهای آبیاری ۱۰۰ تا ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه، مقدار تبخیر-تعرق ذرت طی چهار سال زراعی (۲۰۰۸-۲۰۱۱) به‌ترتیب در بازه‌ی ۶۳۵-۴۳۱، ۶۳۴-۳۷۹، ۶۱۶-۳۵۵ و ۶۴۸-۳۶۸ میلی متر قرار داشت (Trout and Dejonge, 2017). در تحقیقی در تایوان جنوبی، تبخیر-تعرق ذرت در سطوح آبیاری کامل و کم آبیاری شامل نسبت ۸۳، ۶۷، ۵۰ و ۳۳ درصد آبیاری کامل بررسی شد. نتایج نشان داد در سال زراعی ۲۰۱۵-۲۰۱۶، مجموع تبخیر-تعرق ذرت در تیمارهای مذکور به‌ترتیب برابر با ۳۷۵، ۳۲۵، ۲۷۵، ۲۲۵ و ۱۷۵ میلی‌متر بود (Greaves and Wang, 2017). در تحقیق دیگر در ایالت نبراسکا، مقدار تبخیر-تعرق ذرت تحت سطوح مختلف کم‌آبیاری و آبیاری کامل در بازه‌ی ۴۸۱ الی ۶۳۴ برآورد شد (Djaman *et al.*, 2013).



شکل ۳- تبخیر-تعرق تجمعی ذرت در شرایط اعمال تنش آبی در مراحل مختلف رشد

عملکرد محصول

در این پژوهش تأثیر اعمال تنش آبی در مراحل مختلف رشد، بر

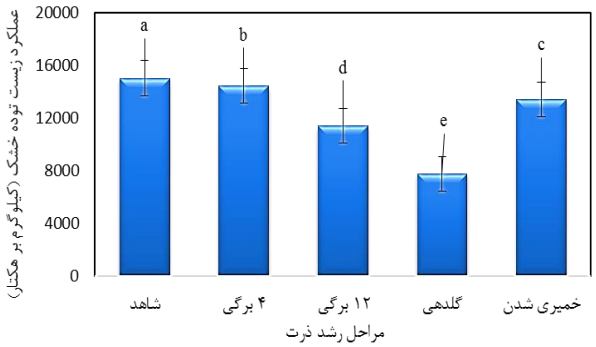
مقدار عملکرد زیست‌توده خشک ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). مقدار عملکرد خشک ذرت در تیمار شاهد و تیمارهای مرحله رشد ۴برگی، ۱۲برگی، گل‌دهی و شیری شدن دانه‌ها به‌ترتیب برابر با ۱۵۰۲۵، ۱۴۴۲۲، ۱۱۳۸۴، ۷۷۴۶ و ۱۳۴۱۶ کیلوگرم بر هکتار بود (شکل ۴).

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات مورد بررسی در طرح

تابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		عملکرد زیست‌توده خشک	تبخیر-تعرق
تکرار	۲	۱۱۰/۶^{ns}	۰/۱۱۴^{ns}
مراحل رشد	۴	۸۴۴۹×۱۰^{۴**}	۳۸۱۳۶**
خطا	۸	۱۵/۶۱	۰/۵۷۴

ns و **: به‌ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد

بیشترین تا کمترین مقدار عملکرد زیست‌توده خشک به‌ترتیب مربوط به تیمارهای شاهد، ۴برگی، خمیری شدن دانه‌ها، ۱۲برگی و گل‌دهی بود. به‌طوری کلی مقدار کاهش عملکرد زیست‌توده خشک در مراحل رشد ۴برگی، ۱۲برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه به‌ترتیب ۴، ۲۴/۲، ۴۸/۴ و ۱۰/۷ درصد نسبت به گیاه شاهد بود. حساسیت متفاوت ذرت به تنش آبی در مراحل مختلف رشد، دلیل مطمئنی برای نتایج به‌دست آمده بود. کمبود آب در مراحل اولیه رشد، تأثیر چندانی بر مقدار زیست‌توده نهایی ذرت نداشت و از نظر زمانی امکان جبران خسارت در مراحل بعدی رشد وجود داشت. اما در مراحل توسعه و میانی رشد به‌علت گسترش سریع اندام‌های گیاهی و نیاز آبی بالا، تأثیر تنش آبی بر عملکرد چشمگیر بود و فرصتی نیز برای جبران آن موجود نبود. تنش آبی در زمان گل‌دهی باعث اختلال در عمل گرده‌افشانی، عقیم شدن گیاه و مانعی در مسیر تولید بلال و دانه ذرت بود. در مرحله خمیری شدن دانه، تقریباً دانه‌ها به آستانه پُر شدن و رسیدگی بیولوژیک نزدیک شده بودند. بنابراین تنش آبی در مرحله‌ی نهایی رشد، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد زیست‌توده ذرت نگذاشت. در پژوهش مشابه گزارش شد که تنش آبی در اوایل رشد رویشی ذرت، تولید ماده خشک گیاه را به‌مقدار کمی کاهش داد. ولی در اواخر رشد و در مرحله گل‌دهی، تأثیر زیادی بر کاهش شاخص رشد گیاه داشت (Pandey *et al.*, 2000). در تحقیقی مقدار کاهش عملکرد بیولوژیکی ذرت تحت تأثیر تنش آبی در مراحل رشد رویشی، گل‌دهی و دانه‌بندی به‌ترتیب ۳۲/۸۲، ۳۸/۰۹ و ۱۸/۴۹ درصد بود. اعمال تنش آبی در مرحله دانه‌بندی و گل‌دهی به‌ترتیب کمترین و بیشترین اثر را بر مقدار عملکرد بیولوژیک ذرت داشت (Mohammadi Behmadi and Armin, 2017). در تحقیق مذکور اعمال تنش آبی در مرحله‌ی گل‌دهی بیشترین اثر را بر کاهش عملکرد ذرت داشت، از این‌رو نتایج به‌دست آمده مشابه نتایج پژوهش حاضر بود. در تحقیق دیگر، مقدار عملکرد ماده خشک ذرت علوفه‌ای در شرایط تأمین ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه، به‌ترتیب ۲۱۵۶۰، ۱۹۵۰۰ و ۱۲۵۶۰ کیلوگرم در هکتار برآورد شد (Saeidinia *et al.*, 2019). در تحقیقی تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری در شرایط قبل و بعد از گل‌دهی ذرت بررسی شد. در این شرایط، مقدار عملکرد محصول در منطقه مازندران از ۵۳۴۲ تا ۱۴۴۶۱ کیلوگرم بر هکتار متغیر بود. وقوع تنش آبی هم‌زمان با تقسیم میوزی در گل تاجی باعث عقیم شدن دانه‌های گرده شد. لذا از طویل شدن ابریشم‌ها در بلال جلوگیری شد و درنتیجه کاهش شدید عملکرد محصول اتفاق افتاد (Akbari Nodehi, 2018). در تحقیق دیگر در غرب ترکیه، مقدار عملکرد ذرت بین ۲۸۸۰ تا ۱۱۳۴۰ کیلوگرم بر هکتار برآورد شد (Dagdelin *et al.*, 2006). در پژوهشی نیز با اعمال کم‌آبیاری در سطوح ۸۳، ۶۷، ۵۰ و ۳۳ درصد آبیاری کامل، مقدار عملکرد دانه ذرت به‌ترتیب ۸/۶، ۱۰/۵، ۲۵/۱ و ۳۷/۷ درصد کاهش یافت (Greaves and Wang, 2017).

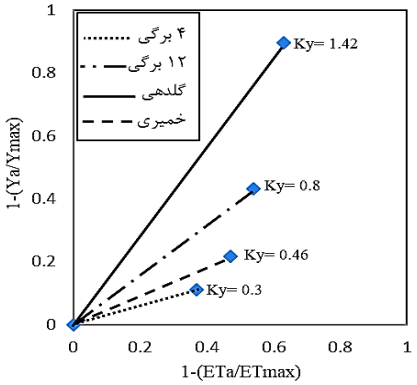


شکل ۴- عملکرد زیست‌توده خشک ذرت در شرایط اعمال تنش آبی در مراحل مختلف رشد

ضریب پاسخ عملکرد به تبخیر-تعرق (K_y)

در این پژوهش، کاهش مقادیر تبخیر-تعرق و عملکرد زیست‌توده ذرت تحت تأثیر اعمال تنش آبی در مراحل مختلف رشد، ثبت شد. برای بررسی پاسخ عملکرد به تبخیر-تعرق در شریط تنش آبی، ضریب K_y با استفاده از رابطه (۳) برآورد شد. مقدار ضریب K_y در مراحل رشد ۴برگی، ۱۲برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه‌ها به‌ترتیب برابر با ۰/۳، ۰/۸، ۱/۴۲ و ۰/۴۶ به‌دست آمد (شکل ۵). نتایج نشان داد پاسخ عملکرد به تبخیر- تعرق ذرت، در مراحل مختلف رشد متفاوت بود و در مراحل حساس رشد، مقدار ضریب K_y افزایش یافت. به‌طوری‌که در مرحله‌ی گل‌دهی ذرت، مقدار ضریب K_y بیشتر از عدد یک شد. شرایط مذکور (ضریب K_y بزرگ‌تر از یک)، نشان‌دهنده‌ی این بود که عملکرد ذرت نسبت به

تبخیر- تعرق گیاه کاهش بیشتری داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در همه‌ی مراحل رشد ذرت، عملکرد محصول نسبت به مقدار تبخیر- تعرق آن، با یک شیب ثابت تغییر نکرده است. یعنی برای اعمال یک دوره‌ی محدود از تنش آبی (کم‌آبیاری)، می‌توان مرحله‌ای از رشد گیاه را انتخاب نمود که منجر به حداقل کاهش عملکرد محصول گردد. همچنین لازم است برنامه‌ریزان در مدیریت‌های آبیاری، تأمین نیاز آبی گیاهان در مراحل حساس رشد را مدنظر قرار دهند. به‌طور مشابه در نشریه شماره ۳۳ آبیاری و زهکشی فائو (FAO33)، در شرایط تنش آبی مقدار ضریب K_y برای مراحل رشد ابتدایی، توسعه، میانی، نهایی و کل دوره رشد ذرت به‌ترتیب ۰/۴، ۱/۵، ۰/۵، ۰/۲ و ۱/۲۵ گزارش شد (Doorenbos and Kassam, 1979). در تحقیقی اثر تنش آبی در مراحل رشد ذرت شامل مرحله رشد رویشی، گل‌دهی و رسیدن، در منطقه‌ی کرج بررسی شد. مقادیر ضریب K_y در مراحل رشد مذکور به‌ترتیب ۰/۴، ۱/۵ و ۰/۵ برآورد شد (Rezaverdinejad *et al.*, 2011). در تحقیق دیگر مقدار ضریب K_y برای ذرت، در یک اقلیم مرطوب در ترکیه محاسبه شد. ضریب K_y تحت رژیم کم‌آبیاری در مراحل رشد رویشی، گل‌دهی و پر شدن دانه‌های ذرت به‌ترتیب ۰/۹، ۱/۱۲ و ۰/۸۷ به‌دست آمد (Kuscu and Demir, 2013). در تحقیقی نیز گزارش شد که با کاهش آب آبیاری تا میزان ۴۰ درصد آبیاری کامل، ضریب K_y در کل دوره رشد ذرت، عدد ۱/۳۶ برآورد شد (Trout and Dejonge, 2017). در پژوهشی دیگر اثر تنش آبی بر رشد، مصرف آب و عملکرد ذرت علوفه‌ای در اقلیم نیمه‌خشک مراکش مطالعه شد. نتایج نشان داد در این پژوهش با تیمارهای آبیاری شامل ۱۰۰، ۸۰، ۶۰، ۴۰ و ۲۰ درصد تبخیر- تعرق ذرت، ضریب K_y در کل دوره رشد عدد ۱/۱۲ برآورد شد (Bouazzama *et al.*, 2012).

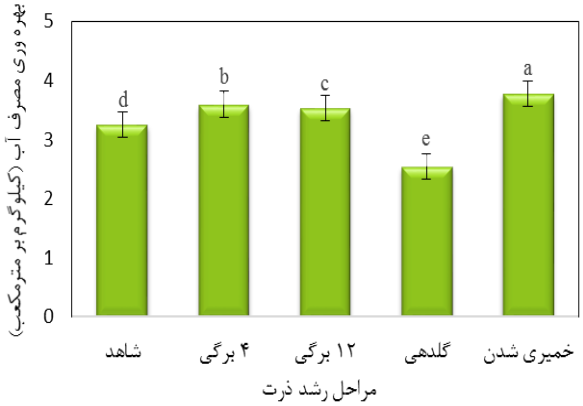


شکل ۵- مقادیر ضریب K_y برای مراحل مختلف رشد ذرت، در شرایط تنش آبی

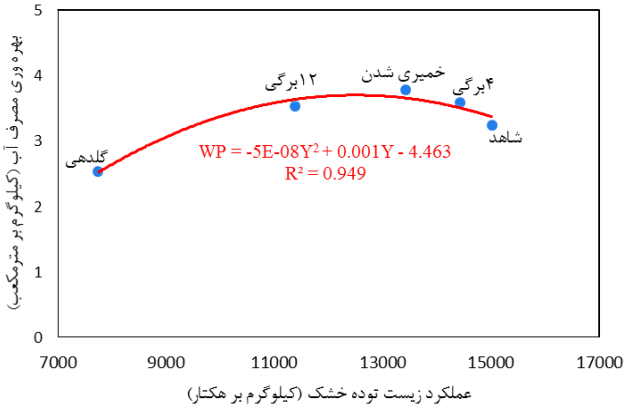
بهره‌وری مصرف آب (WP)

حجم آب مصرفی در تیمارهای مختلف، برای تأمین کمبود آب خاک تا حد ظرفیت مزرعه در نظر گرفته شد. واکنش زیست‌توده خشک ذرت به مقدار حجم آب مصرفی، نشان‌دهنده بهره‌وری مصرف آب در دوره‌ی رشد گیاه بود. در این پژوهش مقدار بهره‌وری مصرف آب در تیمار شاهد و تیمارهای مرحله رشد ۴برگی، ۱۲برگی، گل‌دهی و شیری شدن دانه‌ها به‌ترتیب برابر با ۳/۲۵، ۳/۶، ۳/۵۳، ۲/۵۴ و ۳/۷۸ کیلوگرم بر متر مکعب بود (شکل ۶). بیشترین تا کمترین مقدار بهره‌وری مصرف آب به‌ترتیب مربوط به تیمارهای خمیری شدن دانه‌ها، ۴برگی، ۱۲برگی، شاهد و گل‌دهی بود. همچنین بین دو پارامتر عملکرد زیست‌توده خشک ذرت و بهره‌وری مصرف آب، تابع $WP=-5\times10^{-8}Y^2+0.001Y-4.463$ با ضریب همبستگی ۰/۹۴۹، برازش داده شد (شکل ۷). نتایج نشان داد اثر تنش آبی در مراحل مختلف رشد یکسان نبود و آبیاری کامل گیاه (تیمار شاهد) تضمینی برای افزایش بهره‌وری مصرف آب نبود. بلکه با خودداری از دستیابی به عملکرد پتانسیل گیاه در منطقه (حداکثر عملکرد) و پذیرش اندکی کاهش محصول، می‌توان امکان افزایش بهره‌وری مصرف آب را فراهم نمود. لذا در شرایطی که اهمیت مصرف آب بیش از افزایش تولید محصول بود، استفاده از تابع مذکور در جهت مصرف بهینه‌ی آب توصیه شد. برای یافتن عملکرد و بهره‌وری بهینه مصرف آب (رأس منحنی)، از تابع ارائه شده در شکل (۷) مشتق گرفته و مساوی صفر قرار داده شد. پس از حل رابطه‌ی حاصل، مشخص شد که اعمال تنش آبی (کم‌آبیاری) در حوالی مرحله‌ی خمیری شدن دانه‌ها، منجر به تولید بهینه محصول از لحاظ بهره‌وری مصرف آب شد. بنابراین اِعمال کم‌آبیاری در مرحله‌ی رشد مذکور، راه‌کار مناسبی برای افزایش بهره‌وری مصرف آب بود. در تحقیقی مشابه بر روی ذرت، بیشترین بهره‌وری مصرف آب زمانی حاصل شد که تنش آبی در مرحله رشد رویشی اعمال شد. همچنین بیشترین کاهش عملکرد در اثر تنش آبی، در مرحله گل‌دهی و گرده افشانی ذرت اتفاق افتاد (Mansouri Far *et al.*, 2010). در تحقیقی در استان مازندران، تیمارهای آبیاری بر اساس تخلیه‌ی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصد رطوبت در قبل و بعد از مرحله‌ی گل‌دهی ذرت اعمال شد. نتایج نشان داد بیشترین بهره‌وری مصرف آب به‌مقدار ۴/۲۵ (کیلوگرم بر مترمکعب) مربوط به تیمار ۳۰ درصد تخلیه‌ی رطوبتی خاک بود. اما افزایش تنش آبی قبل از گل‌دهی، باعث کاهش شدیدتر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ذرت شد (Akbari Nodehi, 2018). در پژوهش حاضر نیز کم‌ترین مقدار بهره‌وری مصرف آب مربوط به اعمال تنش آبی در مرحله گل‌دهی ذرت بود. در تحقیقی بر روی ذرت در خوزستان، اثر کم‌آبیاری در حد ۷۰ درصد آبیاری کامل بررسی شد. نتایج نشان داد در شرایط کم آبیاری مذکور، بهره‌وری مصرف آب نسبت به شرایط مطلوب ۳۱/۶

درصد کاهش یافت (Kazemizadeh *et al*., 2019). در تحقیقی در ترکیه، بهره‌وری مصرف آب ذرت علوفه‌ای تحت تیمارهای کم‌آبیاری بررسی شد. نتایج نشان داد بهره‌وری مصرف آب در دو سال زراعی بین مقادیر ۳/۶۲ الی ۴/۴۲ کیلوگرم بر متر مکعب بود (Ucak *et al*., 2016). در پژوهشی در یک اقلیم نیمه‌خشک در آمریکا مقدار بهره‌وری مصرف آب ذرت بین ۵ الی ۲/۳ کیلوگرم بر متر مکعب برآورد شد (Djaman *et al*., 2018). در آزمایشی دیگر شامل سیستم آبیاری زیرسطحی، عملکرد ذرت تحت تیمارهای مختلف تاریخ کشت در منطقه نبراسکا بررسی شد. نتایج نشان داد مقدار بهره‌وری مصرف آب تحت شرایط فوق بین ۵/۲۲ الی ۱/۲ کیلوگرم بر متر مکعب برآورد شد (Djaman and Irmak, 2012). در پژوهش کنونی مقادیر بهره‌وری مصرف آب در بازه‌ی ۲/۵۴ تا ۳/۷۸ کیلوگرم بر متر مکعب قرار داشت. از این‌رو علی‌رغم تفاوت در روش آزمایش، نتایج به‌دست آمده در محدوده نتایج پژوهش‌های گذشته بود.



شکل ۶- بهره‌وری مصرف آب ذرت در شرایط اعمال تنش آبی در مراحل مختلف رشد



شکل ۷- تابع تولید محصول- بهره‌وری آب، در شرایط اعمال تنش آبی در مراحل مختلف رشد

نتیجه‌گیری

در شرایط بحران کمبود آب، کاهش مصرف آب ضمن حفظ تولید محصولات کشاورزی، نیازمند اتخاذ راه‌کارهایی مناسب در مدیریت کم‌آبیاری است. برای این منظور، در این پژوهش عکس‌العمل عملکرد زیست‌توده به تبخیر-تعرق ذرت تحت اِعمال تنش آبی در مراحل مختلف رشد بررسی شد. نتایج نشان داد در مراحل رشد ۴برگی، ۱۲برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه‌های ذرت، عملکرد زیست‌توده خشک نسبت به مقدار تبخیر- تعرق آن، با یک شیب ثابت تغییر نکرد. افزایش مقدار ضریب K_y در مراحل حساس رشد، نشان‌داد عملکرد ذرت نسبت به تبخیر-تعرق آن کاهش بیشتری داشت. بنابراین برای اعمال یک دوره‌ی محدود از تنش آبی (کم‌آبیاری)، انتخاب مرحله‌ای از رشد گیاه که منجر به حداقل کاهش عملکرد محصول گردد، حائز اهمیت بود. از سوی دیگر، بیشترین تا کمترین مقدار بهره‌وری مصرف آب به‌ترتیب مربوط به تیمارهای خمیری شدن دانه‌ها، ۴برگی، ۱۲برگی، شاهد و گل‌دهی بود. نتایج نشان داد با تأمین آب مورد نیاز گیاه در حد پتانسیل منطقه (تیمار شاهد)، لزوماً بالاترین مقدار بهره‌وری مصرف آب حاصل نشد. بلکه اِعمال کم‌آبیاری در مراحل ابتدایی و پایانی رشد ذرت، راه‌کار مناسبی برای افزایش بهره‌وری مصرف آب بود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Akbari Nodehi, D. (2018). Effect of water stress on different growth stages of yield and water use efficiency of maize. *Journal of Water and Irrigation Management*. 7(2), 305-318. (In Farsi)

Alinejadian Bidabadi, A., Jorooni, E., Barzegar, A. and Maleki, A. (2016). The effect of different irrigation levels on water use efficiency on the basis of maize grain and soil moisture variations. *Journal of water and irrigation management*. 6(1), 47-59. (In Farsi)

Al-kaisi, M. M. and Broner, I. (2009). Crop Water Use and Growth Stages. Colorado State University Extension. No. 4.715

Bouazzama, B., Xanthoulis, D., Bouaziz, A., Ruelle, P. and Mailhol, J. C. (2012). Effect of water stress on growth, water consumption and yield of silage maize under flood irrigation in a semiarid climate of Tadla (Morocco). *Journal of Agronomy, Society et Environment*. 16(4), 468-477.

Dagdelin, N., Yilmaz, E., Sezgin, F and Gurbuz, T. (2006). Water-yield relation and water use efficiency of cotton (Gossypium hirsutum L.) and second crop corn (Zea mays L.) in western Turkey. *Journal of Agricultural Water Management.*

82(1-2), 63-85.

Djaman, K. and Irmak, S. (2012). Soil water extraction patterns, crop, irrigation, and evapotranspiration water use efficiency under full and limited irrigation and rainfed conditions. Journal of ASABE. 55, 1223–1238

Djaman, K., Irmak, S., Rathje, W. R., Martin, D. L. and Eisenhauer, D. E. (2013). Maize evapotranspiration, yield production function, biomass, grain yield, harvest index, and yield response factors under full and limited irrigation. Journal of ASABE. 56, 273–293

Djaman, K., Neill, M., Owen, C., Smeal, D., Koudahe, K., West, M., Allen, S., Lombard, K. and Irmak, S. (2018). Crop Evapotranspiration, Irrigation Water Requirement and Water Productivity of Maize from Meteorological Data under Semiarid Climate. *Journal of water*. 10, 405: 1-17.

Daran, R. R. (2015) Maize evapotranspiration, canopy and stomatal resistances, crop water productivity, and economic analysis for various nitrogen fertilizer rates under full irrigation, limited irrigation, and rainfed settings. Ph.D. dissertation, University of Nebraska.

Doorenbos, J. and Kassam, A. K. (1979). Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper 33. FAO, United Nations, Rome. 176 p.

Fathi, H., Amiri, M. E., Imani, A., Hajilou, J. and Nikbakht, J. (2017). Tolerance Almond Genotypes on GN15 Rootstock to Deficit Irrigation Stress on Some Physiological Characteristics and Leaf Temperature. *Iranian Journal of Horticultural Science and Technology*. 18(2), 159-176. (In Farsi)

Greaves, G. and Wang, Y. (2017). Yield response, water productivity, and seasonal water production functions for maize under deficit irrigation water management in southern Taiwan. *Journal of Plant Production Science*. 20(4), 353-365.

Jarollahi, R. (2001). Determination of readily available water in different stages of growth for grain corn in Karaj. *Journal of Soil and Water Sciences*. 15(2), 290-298. (In Farsi)

Kazemizadeh, M., Hooshmand, A., Naseri, A. Golabi, M. and Meskarbashee, M. (2019). Evaluation of yield, water use efficiency and Nitrogen efficiency in corn cultivation in Khuzestan province. *Journal of protection of water and soil resources*. 9(1), 35-50. (In Farsi)

Kiani, A. R. and Saberi, A. R. (2015). An investigation of sweet corn yield and water use influenced by different deficit irrigation methods and two sowing patterns. *Journal of Water and Soil Conservation.* 21(6), 155-171. (In Farsi)

Kuscu, H. and Demir, A. O. (2013). Yield and Water Use Efficiency of Maize under Deficit Irrigation Regimes in a Sub-Humid Climate. *Journal of philipp agric scientist*. 96(1), 32-41.

Mahrokh, A., Nabipoor, M., Roshanfekr, H. and Chookan, R. (2019). Response of some physiological traits of corn to drought stress and application of cytokinin and auxin. *Journal of environmental stresses in crop sciences.* 12(1), 1-15. (In Farsi)

Mohammadi Behmadi, M. and Armin, M. (2017). Effect of Drought Stress on Yield and Yield Components of Different Maize Cultivars in Delayed Cultivation. *Journal of Applied Research in Plant Ecophysiology*. 4(1), 17-34. (In Farsi)

Nielsen, R. L. (2002). Drought and heat stress effects on corn pollination. *Journal of Agry (Purdue)*. 196, 19-25.

Pandey, R. K., Maranville, J. W. and Chetima, M. M. (2000). Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment. II. Shoot growth. *Journal of Agricultural Water Management*. 46, 15–27.

Rezaverdinejad, V., Besharat, S., Abghari, H. and Ahmadi, H. (2011). Estimation of Maximum Allowable Deficit in Different Growth Stages of Fodder Mays Using Canopy-Air Temperature Difference. *Journal of Water and Soil*. 25(6), 1344-1352. (in Farsi)

Saeidinia, M., Nasrolahi, A. H. and Sharifipoor, M. (2019). Investigating the Ability of Crop Water Stress Index for Irrigation Scheduling and Estimating Corn Forage Yield. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 50(3), 555-565. (In Farsi)

Seifi, A., Mirlatifi, S., Dehghanisanij, H. and Torabi, M. (2014). Determination of Crop Water Stress Index for Pistachio Trees under Subsurface Drip Irrigation Using Canopy-Air Temperature Difference. *Journal of Water and Irrigation Management*. 4(1), 123-136. (In Farsi)

Trout, T. J. and Dejonge, K. C. (2017). Water productivity of maize in the US high plains. *Journal of Irrig Sci*. 35, 251–266.

Ucak, A. B., Ayasan, T. and Turan, N. (2016). Yield, Quality and Water Use Efficiencies of Silage Maize as Effected by Deficit Irrigation Treatments. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*. 4(12), 1228-1239.