



اثر تنش کم آبی بر متابولیت‌های اسمزی، سیستم آنتی‌اکسیدانی و تولید دانه و روغن آمارانت رقم کونیز

مهرداد یارنیا*

چکیده

خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل تنش‌زای محیطی است که به شدت رشد و عملکرد گیاهان زراعی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. ولی پاسخ گیاهان به این عوامل تنش‌زا بسته به زمان وقوع از نظر مرحله رشدی گیاه متفاوت است. لذا هدف از این مطالعه، بررسی تاثیر اعمال سطوح مختلف تنش کم آبی (آبیاری پس از ۵۰، ۸۰، ۱۱۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر) در مراحل مختلف رشد و نمو آمارانت (استقرار بوته‌ها، آغاز ساقه‌دهی، آغاز گلدهی و پر شدن دانه‌ها) بود. برای این منظور اقدام به تعیین میزان تولید دانه، درصد پروتئین و عملکرد روغن گردید. ارزیابی‌های فیزیولوژیک نیز جهت تعیین میزان تنظیم اسمزی و تغییر فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی انجام پذیرفت. نتایج به دست آمده از این بررسی نشان داد اعمال تنش کم آبی بسته به شدت و دوام تنش باعث افت بین حداقل ۱۰ تا حداکثر ۸۹ درصدی عملکرد دانه، ۲۸ تا ۷۰ درصدی شاخص برداشت، ۱۲ تا ۳۲ درصدی پروتئین دانه و ۲۹ تا ۹۷ درصدی عملکرد روغن در این گیاه می‌شود که نشان از حساسیت بالای تولید دانه و روغن مخصوصاً در تنش‌های شدید و طولانی مدت دارد. نتایج بررسی تغییرات مواد اسمزی (پرولین و کربوهیدرات‌های محلول) نشان داد این گیاه با قرار گرفتن در شرایط تنش کم آبی میزان پرولین و کربوهیدرات‌های محلول را به ترتیب تا ۳۱ و ۵۰ درصد افزایش می‌دهد. توانایی گیاه در این افزایش در خشکی‌های شدید کاهش می‌یابد. به همین ترتیب، آمارانت برای مقابله با تنش کم آبی اقدام به افزایش میزان آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شامل کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسیددیسموتاز به ترتیب تا حداکثر ۵۳، ۲۳ و ۷۹ درصد می‌کند که نقش مهم‌تر آنزیم سوپراکسیددیسموتاز را در مقابله با گونه‌های فعال اکسیژن و تنش اکسیداتیو ناشی از آن نشان می‌دهد. بر اساس این بررسی نشان داده شد که آمارانت گیاهی حساس در برابر کم‌آبی‌های متوسط و شدید (۱۱۰ تا ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک) و با تحمل مناسب به میزان آب حاصل از آبیاری با دور پس از ۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک می‌باشد به طوری که با کاهش ۶۰ درصدی در آب مصرفی (آبیاری پس از ۸۰ به جای ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک) عملکرد دانه این گیاه با کاهش حدود ۱۷ درصد، محصولی در حدود ۲۴۵ گرم در متر مربع (۲/۴۵ تن در هکتار) تولید می‌کند.

واژگان کلیدی: آمارانت، تنظیم اسمزی، سیستم آنتی‌اکسیدانی، عملکرد دانه.

۱- دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

* نگارنده‌ی مسئول (m.yarnia@yahoo.com & yarnia@iaut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۱۳

تاریخ پذیرش: ۹۳/۶/۳۰

مقدمه

آمارانت در سال‌های اخیر به دلیل ارزش غذایی بالای آن مورد توجه قرار گرفته است. پروتئین‌های بذور این گیاه محتوی مقادیر بالایی محتوی اسید آمینه‌های ضروری مخصوصاً لیزین که در سایر گیاهان کمتر است، می‌باشد (Condes *et al.*, 2009; Plate and Areas, 2002). به دلیل این که قیمت پرداختی برای پروتئین‌های حیوانی بسیار بالاست، پروتئین‌های گیاهی منابع پروتئینی مناسبی خواهند بود. بذور لگوم‌ها محتوی مقادیر بالایی پروتئین است، اما بذور این گیاهان مقادیر اسیدهای آمینه محتوی سولفور کمی دارند. بذور گیاه آمارانت منابع بسیار مناسبی از این اسیدهای آمینه هستند (Scilingo *et al.*, 2002). علاوه بر این، خصوصیات مناسب زراعی این گیاه مانند عملکرد نسبی بالای دانه، تحمل به خشکی و مدت زمان کم تولید آن باعث شده است تا در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گیرد (Avanza *et al.*, 2005). متخصصین در حال حاضر این گیاه را از مهم‌ترین گیاهان قرن بیستم می‌دانند. آکادمی علوم آمریکا این گیاه را در بین ۳۶ گونه گیاهی مهم در جهان قرار داده است (Svirskis, 2003).

بر اساس گزارش‌ها، خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل تنش‌زای قرن ۲۱ خواهد بود (Moussa *et al.*, 2011). در سال‌های ۱۹۹۹-۲۰۰۰ بیش از ۶۰ میلیون انسان در مرکز و جنوب غرب آسیا تحت تاثیر خشکی شدیدی قرار گرفتند که ایران، افغانستان، غرب پاکستان، تاجیکستان، ازبکستان و ترکمنستان از آن شدیداً متاثر شدند. میانگین بارندگی ایران تنها ۱۳۸/۳ میلی‌متر بود. در حالی که میانگین بارندگی در طولانی مدت ۲۴۹ میلی‌متر بود که یک سوم میانگین بارندگی در جهان است. این خشکی از ۲۸ استان، ۱۸ استان را به طور جدی متاثر کرد (Salami *et al.*, 2009). از ۱۸/۵ میلیون هکتار زمین زراعی کشور،

۶/۲ هکتار به صورت دیم مورد کشت قرار می‌گیرد (Dadbakhsh and Sepas, 2011; Dadbakhsh *et al.*, 2011). خسارت ناشی از این خشکسالی در ایران ۱/۸ میلیارد دلار بر آورد شده است (Salami *et al.*, 2009).

خشکی می‌تواند در هر مرحله‌ای از رشد و نمو گیاه تاثیرگذار باشد. در حالی که اوایل مرحله زایشی یکی از حساس‌ترین مراحل گیاهان زراعی به تنش خشکی است (Jorgensena *et al.*, 2011). کاهش رشد در اثر خشکی نیز دلیل اصلی کاهش در عملکرد است (Graciano *et al.*, 2005). وقوع عوامل تنش‌زای محیطی در گیاهان موجب تولید فرم‌های فعال اکسیژن می‌شود. از جمله تنش‌هایی که تولید این ترکیبات را در گیاه القاء می‌کند، خشکی است (Wang *et al.*, 2005). در سلول‌های گیاهی، واکنش‌های استرس اکسیداتیو در ارتباط با رادیکال‌های آزاد ناشی از احیای مولکول‌های اکسیژن به رادیکال‌های سوپراکسید، رادیکال‌های هیدروکسیل، رادیکال‌های هیدروژن پراکسید و رادیکال‌های پراکسیل است. رادیکال‌های آزاد می‌توانند هم به صورت آنزیمی و هم غیر آنزیمی برای حفاظت سلول‌های گیاهان حذف شوند (Lin *et al.*, 2006). از جمله آنزیم‌های درگیر در تجزیه فرم‌های فعال اکسیژن می‌توان به سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، گلوکاتایون ردوکتاز و APX اشاره کرد. Grennan (2006) در این رابطه اظهار داشت مسیرهای مختلف سیگنال‌دهی در هنگام وقوع عوامل تنش‌زا پاسخ‌هایی مشابه را بر می‌انگیزد. مثلاً خشکی، دمای پایین و شوری همگی باعث تجمع مواد محلول و آن‌تی‌اکسیدانت‌ها می‌شود (Grennan, 2006). از پاسخ‌های عمومی دیگر به عوامل تنش‌زا تولید مقادیر بالای ترکیبات سازگاری است. این ترکیبات حلالیت بالا و

در مراحل رشد و نمو بر عکس‌العمل سیستم آنتی‌اکسیدانی و متابولیت‌های سازگاری و تولید دانه و روغن آمارانت دانه‌ای بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال ۱۳۹۰ در مزرعه‌ی تحقیقاتی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز واقع در اراضی کرکج در ۱۵ کیلومتری شرق تبریز اجرا گردید. این محل دارای طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۷ دقیقه‌ی شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۵ دقیقه‌ی شمالی با ارتفاع ۱۳۶۰ متر از سطح دریای آزاد است. براساس طبقه‌بندی اقلیمی دوارتن، منطقه دارای اقلیم نیمه خشک سرد است. میانگین دمای سالانه ۱۰ درجه‌ی سلسیوس، میانگین حداکثر دمای سالانه ۱۶ درجه‌ی سلسیوس و میانگین حداقل دمای سالیانه ۲/۲ درجه‌ی سلسیوس است. میانگین بارندگی سالانه‌ی این ناحیه ۲۷۱/۳ میلی‌متر است، pH خاک‌های منطقه در محدوده‌ی قلیایی تا متوسط قرار دارد و خطر شوری قابل ملاحظه‌ای در سطح الارض خاک‌ها وجود ندارد. خصوصیات خاک محل آزمایش در جدول ۱ آورده شده است.

آزمایش به صورت اسپلت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار با دو فاکتور انجام شد. فاکتور اول سطوح مختلف آبی در ۵ سطح شامل آبیاری پس از ۵۰، ۸۰، ۱۱۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک کلاس A و فاکتور دوم زمان اعمال تنش در ۴ سطح استقرار بوته‌ها، شاخه‌دهی، گلدهی و پر شدن دانه‌ها بود.

در بهار سال ۱۳۹۰ عملیات زراعی شامل، شخم‌زنی، دیسک‌زنی، خط‌کشی و پشته‌بندی صورت گرفت. در اواسط اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۰ با گاو رو شدن زمین، بعد از نمونه‌برداری از خاک مزرعه، یک شخم سطحی به منظور کنترل علف‌های هرز به زمین زده شد. کاشت در خرداد ماه انجام گردید. زمین طرح

وزن مولکولی پایینی دارند و معمولاً از گیاه در برابر عوامل تنش زا از طریق مکانیسم‌های مختلف مانند تداخل در تنظیم اسمزی سلول‌ها، سمیت‌زدایی فرم‌های فعال اکسیژن، حفاظت از تمامیت غشاء، پایدار نگه داشتن آنزیم‌ها و پروتئین‌ها محافظت می‌کند (Ashraf and Foolad, 2008). محققین در ذرت گزارش نموده‌اند که ارقام مقاوم ذرت، مقادیر پایین‌تری از H_2O_2 را تجمع می‌دهند که این امر به دلیل افزایش فعالیت پراکسیدازها است. لذا به غشاهای سلولی صدمات کمتری وارد می‌شود. همچنین در ارقام مقاوم ذرت پرولین بیشتری نیز تجمع می‌یابد. حتی در این ارقام میزان فتوسنتز نیز افزایش می‌یابد. در ارقام مقاوم ذرت در این آزمایش حتی میزان سوپراکسید دیسموتازها و کاتالازها نیز بیشتر است (Moussa and Abdel-Aziz, 2008).

یارنیا و همکاران (Yarnia et al., 2011) گزارش نمودند که خشکی تعداد گل آذین، وزن خشک اندام هوایی، سطح برگ و عملکرد دانه آمارانت رقم Koniz را کاهش می‌دهد. ملاکار و همکاران (Mlakar et al., 2000) تاثیر خشکی را در مراحل مختلف رشد و نمو (پس از استقرار گیاهچه‌ها، در مرحله رشد رویشی، در مرحله قبل از تشکیل گل‌ها و در هنگام گلدهی) آمارانت مورد بررسی قرار دادند. اعمال خشکی در طول مراحل رشد و نمو گیاه آمارانت (پس از استقرار گیاهچه‌ها) منجر به کاهش ۵۱ درصدی عملکرد دانه گردید. با وجود این مشخص شد که مرحله گلدهی از مراحل حساس به خشکی است که روی عملکرد دانه تاثیر بیشتری دارد. در بررسی دیگری روی آمارانت خشکی طول اندام هوایی را کاهش داد. ولی منجر به افزایش میزان پروتئین گردید (Kgang et al., 2008).

با توجه به اهمیت این موضوع، هدف از این مطالعه بررسی تاثیر اعمال سطوح مختلف خشکی

کربوهیدرات‌های محلول ۰/۱ میلی لیتر از عصاره تهیه شده با ۳ میلی‌لیتر آنترون مخلوط و میزان جذب با اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۲۵ نانومتر قرائت گردید (Irigoyen et al., 1992).

روش عصاره‌گیری و استخراج آنزیم‌ها

جهت اندازه‌گیری، ابتدا مقدار ۲۰۰ میلی‌گرم نمونه‌های برگگی تر در مرحله پر شدن دانه‌ها جدا شده و با ۳ میلی‌متر بافرتریس ساییده و سانتریفیوژ گردید. از عصاره تهیه شده، جهت سنجش آنزیم‌ها استفاده شد. برای سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT) از روش فتوشیمیایی (Li-Ping et al., 2006) استفاده شد. ۳ میلی لیتر مخلوط واکنش حاوی بافرتریس ۰/۱ میلی مولار (pH = ۶/۸)، ۱۰ میلی مولار H₂O₂ و عصاره آنزیم تهیه شده و در دستگاه اسپکتروفتومتر با طول موج ۲۴۰ نانومتر خوانده شد.

برای سنجش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) نیز ۳ میلی‌لیتر مخلوط واکنش حاوی ۵۰ میلی مولار بافر HEPES-KOH (pH=۷/۸)، ۰/۱ میلی‌مولار EDTA، ۵۰ میلی‌مولار Na₂CO₃ با (pH=۱۰/۲)، ۱۲ میلی‌مولار L-methionin، ۷۵ میکرومولار NBT، میکرومولار ریوفلاوین و عصاره آنزیمی تهیه شد و سپس توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۶۰ نانومتر قرائت گردید (Li-Ping et al., 2006).

برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم پراکسیداز (POD) ۳ میلی‌لیتر مخلوط واکنش حاوی بافرتریس ۰/۱ میلی‌مولار (pH = ۶)، گایاکول ۲۸ میلی‌مولار، ۱۰ میلی‌مولار H₂O₂ و در نهایت عصاره آنزیمی تهیه شده و با طول موج ۴۷۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید.

در زمان برداشت نهایی (اوایل آبان ماه) عملکرد دانه در واحد سطح تعیین گردید. از محصول دانه‌ای

متشکل از ۴۰ کرت به ابعاد ۲×۴ متر که در هر کرت ۴ ردیف کاشت به صورت ردیفی به فاصله‌ی ۵۰ سانتی‌متر و فاصله کرت‌های فرعی از یکدیگر یک خط نکاشت و فاصله‌ی کرت‌های اصلی از یکدیگر دو متر و فاصله تکرارهای آزمایشی تیز دو متر در نظر گرفته شد. کاشت بذور با فاصله روی ردیف ۵ سانتی‌متر انجام و پس از ۴ برگه شدن بوته‌ها اقدام به عملیات تنک کردن جهت رعایت تراکم ۲۰۰ هزار بوته در هکتار گردید. همزمان با کاشت مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره مصرف شد. عملیات وجین تا پایان رشد رویشی ادامه یافت. آبیاری همه کرت‌ها تا مرحله استقرار بوته (۶-۸ برگگی) به طور یکسان و با دور هر ۳-۵ روز یک بار انجام و پس از این مرحله آبیاری بر اساس تیمارهای آزمایشی و بر اساس میزان تبخیر از تشتک کلاس A انجام شد. برای این منظور ابتدا FC خاک مزرعه با استفاده از دستگاه محفظه فشار تعیین گردید. در هر بار آبیاری ابتدا بر اساس مقدار رطوبت خاک میزان آب مورد نیاز برای ایجاد حالت FC خاک محاسبه و این مقدار آب مورد نیاز هر کرت با استفاده از کنتور آب مصرف گردید (Yarnia and Khorshidi, 2009). مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژنه در مرحله تولید شاخه انجام شد.

برای اندازه‌گیری پرولین و قندهای محلول در مرحله پر شدن دانه‌ها، ۱۵ گرم از برگ‌های انتهایی گیاه انتخاب و عصاره حاصل رسوب‌گیری و سانتریفیوژ شده آنها تهیه گردید. برای تعیین مقدار پرولین یک میلی‌لیتر از عصاره استخراج شده با ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر دو بار تقطیر مخلوط و ۵ میلی‌لیتر معرف نین‌هیدرین و ۵ میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال به نمونه‌ها اضافه شد. با استفاده از ۱۰ میلی‌لیتر بنزن پرولین را وارد فاز بنزن نموده و شدت جذب آن با اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۱۵ نانومتر قرائت شد (Irigoyen et al., 1992). برای تعیین کل

بوته‌های آمارانت عملکرد دانه را به ترتیب ۳/۳۴، ۲/۵۰، ۴/۶۹ و ۲/۸۹ درصد نسبت به سطح آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک کاهش داد. این کاهش با اعمال سطوح آبیاری پس از مرحله شاخه‌دهی گیاه به ترتیب ۳/۱۰، ۷/۴۰، ۶۰ و ۵/۸۱ درصد بود. اعمال سطوح آبیاری پس از ۸۰، ۱۱۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک پس از مرحله گلدهی آمارانت منجر به کاهش به ترتیب ۲/۲۵، ۵/۴۵ و ۶۵ درصدی و در مرحله دانه‌بندی گیاه به ترتیب کاهش ۳/۱۰، ۸/۲۱، ۵/۲۸ و ۱/۴۳ درصدی در عملکرد دانه گردید. ملاحظه می‌گردد اعمال تنش کم آبی بسته به شدت و دوام تنش باعث افت بین حداقل ۱۰ تا حداکثر ۸۹ درصدی عملکرد دانه در این گیاه می‌شود که اهمیت اعمال مدیریت صحیح آبیاری را نشان می‌دهد. معادلات رگرسیونی خطی ساده نیز نشان داد بیشترین میزان افت در عملکرد با افزایش شدت تنش در اثر اعمال از مرحله استقرار و شاخه‌دهی اتفاق افتاد به طوری که به ازای تاخیر هر واحدی آبیاری در این مراحل از رشد آمارانت، عملکرد دانه به ترتیب ۶۰ و ۳۳ واحد کاهش یافت. این کاهش در صورت اعمال تنش کم آبی در مراحل گلدهی و پرشدن دانه به ترتیب ۴۵ و ۳۳ واحد بود (شکل ۱). ملاکار و همکاران (Mlakar et al., 2000) تاثیر خشکی را در مراحل مختلف رشد و نمو (پس از استقرار گیاهچه‌ها، در مرحله رشد رویشی، در مرحله قبل از تشکیل گل‌ها و در هنگام گلدهی) آمارانت بررسی و اعلام کردند اعمال خشکی در طول مراحل رشد و نمو گیاه آمارانت (پس از استقرار گیاهچه‌ها) منجر به کاهش ۵۱ درصدی عملکرد دانه گردید. با وجود این مشخص شد که مرحله گلدهی از مراحل حساس به خشکی است که روی عملکرد دانه تاثیر بیشتری دارد.

برداشت شده جهت تعیین درصد پروتئین و درصد روغن دانه‌ها استفاده گردید. میزان پروتئین در دانه به روش کج‌لدال (Mulvaney and Banwart, 1990) و میزان روغن دانه به روش میکروسوکسله اندازه‌گیری شد (Ajibola et al., 1990).

قبل از تجزیه آماری، تست نرمال بودن داده‌ها انجام و سپس تجزیه و تحلیل آماری داده‌های به دست آمده از اندازه‌گیری صفات مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار Mstac انجام شد. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد. برای ترسیم شکل‌ها از نرم‌افزار Excel استفاده گردید.

نتایج و بحث

اعمال سطوح مختلف خشکی در دوره‌های رشدی و اثرات متقابل آنها بر صفات بررسی شده در آمارانت معنی‌دار بود (جدول ۲).

عملکرد دانه

در این بررسی تمامی سطوح آبیاری منجر به تغییر معنی‌دار در عملکرد دانه آمارانت گردید، به طوری که افزایش دور آبیاری از آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک در کلیه مراحل رشدی باعث کاهش تولید دانه در این گیاه شد. بالاترین عملکرد دانه بین ۲۸۳ تا ۳۱۷ گرم بر مترمربع در دور آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک حاصل شد که نسبت به سایر سطوح آبیاری در هر مرحله رشدی دارای برتری معنی‌دار بود. کمترین عملکرد دانه نیز به دنبال اعمال سطح آبیاری پس از ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک از زمان استقرار بوته‌های آمارانت معادل ۳۱ گرم بر مترمربع به دست آمد. این بررسی نشان داد با تاخیر در وقوع تنش کم آبی میزان افت عملکرد دانه آمارانت کمتر خواهد بود به طوری که اعمال سطوح آبیاری پس از ۸۰، ۱۱۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک پس از استقرار

تنش خشکی عملکرد گیاهان زراعی دانه‌ای را از طریق سه مکانیسم عمده کاهش می‌دهد. ۱: کاهش میزان دریافت تابش فعال فتوسنتزی توسط کانوبی گیاهی (به دلیل کاهش رشد برگ‌ها و پیری زودرس برگ‌ها)، ۲: کاهش کارایی مصرف انرژی و ۳: کاهش شاخص برداشت (به دلیل تخصیص کمتر اسمیلات‌ها به بخش‌های اقتصادی گیاهان زراعی) (Hlavinka et al., 2009). کاهش یا توقف فتوسنتز در اثر خشکی مهم‌ترین عامل تعیین کننده بقا و عملکرد گیاهان در شرایط خشکی است و بسیاری از اثرات خشکی در ارتباط با فرآیندهای فتوسنتزی گیاهان است. فتوسنتز در گیاهان نتیجه فرآیندهای مختلفی است که شامل انتشار گاز دی اکسید کربن و فرآیندهای بیوشیمیایی است. میزان فتوسنتز در طی خشکی به شدت کاهش می‌یابد. در شرایط مزرعه‌ای کاهش هدایت روزنه‌ای مهم‌ترین عامل کاهش فتوسنتز است (Efeo lu et al., 2009). خشکی می‌تواند در هر مرحله‌ای از رشد و نمو گیاه تاثیرگذار باشد. جورگنسن و همکاران (Jorgensena et al., 2011) اعلام کردند اوایل مرحله زایشی یکی از حساس‌ترین مراحل گیاهان زراعی به تنش خشکی است در حالی که در این بررسی اعمال تنش قبل از گلدهی اثر بیشتری در کاهش عملکرد دانه نسبت به مرحله گلدهی و بعد از آن داشت. می‌توان گفت کمبود آب میزان تجمع ماده خشک را در گیاهان کاهش می‌دهد زیرا خشکی باعث کاهش میزان فتوسنتز می‌شود. کاهش ماده خشک در قبل از گرده‌افشانی، بقای گلچه‌ها را در گیاهان کاهش می‌دهد (Rajala et al., 2009).

شاخص برداشت

بر اساس نتایج این بررسی با کاهش آب مصرفی در تمامی مراحل رشد آمارانت شاخص برداشت در این گیاه کاهش معنی‌داری یافت که نشان از کاهش بیشتر تولید دانه در این گیاه در مقایسه با تجمع ماده

خشک در اندام‌های هوایی آن در اثر کمبود آب می‌باشد. بالاترین شاخص برداشت در محدوده ۲۵ تا ۲۸ درصد در دور آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک با برتری معنی‌دار نسبت به سایر سطوح آبیاری حاصل شد. کمترین میزان شاخص برداشت در تیمار آبیاری پس از ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک از زمان استقرار بوته‌های آمارانت معادل ۷/۶ درصد به دست آمد. همانند تغییرات عملکرد دانه، با تاخیر در وقوع تنش کم آبی کاهش شاخص برداشت کمتر بود. اعمال سطوح آبیاری پس از ۱۱۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک پس از استقرار بوته‌های آمارانت، شاخص برداشت را به ترتیب ۳۰/۴، ۴۳/۸ و ۷۰/۳ درصد و پس از مرحله شاخه‌دهی گیاه به ترتیب ۲۳/۵، ۳۵/۸ و ۶۰/۳ درصد کاهش داد. در این دو مرحله آبیاری پس از ۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک اثر معنی‌داری بر این صفت نداشت، با اعمال تنش کم آبی پس از مرحله گلدهی آبیاری ۸۰ و ۱۱۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تاثیری بر شاخص برداشت نداشت ولی آبیاری پس از ۱۴۰ و ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک به ترتیب ۲۸ و ۴۳/۷ درصد این مؤلفه را کاهش داد. اعمال کمبود آب پس از آغاز پر شدن دانه‌ها فقط در آبیاری پس از ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک به‌طور معنی‌دار و به میزان ۳۰/۵ درصد شاخص برداشت را نسبت به سطح آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک کاهش داد.

ملاحظه می‌گردد کمترین اثر تنش بر شاخص برداشت با اعمال تنش کم آبی در مرحله دانه‌بندی نسبت به سایر مراحل رشدی گیاه حاصل می‌شود، بدین ترتیب بسته به شدت و دوام تنش کاهش معنی‌دار شاخص برداشت بین حداقل ۲۸ تا حداکثر ۷۰ درصد می‌باشد. بر اساس مطالب ذکر شده ملاحظه می‌گردد که این مؤلفه نسبت به عملکرد دانه اثرپذیری کمتری در برابر تنش کمبود آب دارد.

میزان پروتئین افزایش یافته ولی خشکی شدید در آفتابگردان میزان پروتئین بذر را کاهش می‌دهد. در این بررسی اعمال تنش در مراحل آغاز گلدهی و پر شدن دانه، درصد پروتئین کمتری نسبت به اعمال تنش در مراحل آغاز شاخه‌دهی و پس از استقرار بوته‌ها داشت. بیشترین درصد پروتئین دانه معادل ۹/۵ درصد در صورت اعمال تنش در آغاز شاخه‌دهی و کمترین آن در صورت اعمال تنش در شروع پر شدن دانه‌ها معادل ۸/۵ درصد به دست آمد (شکل ۴). اعمال تنش در مرحله گلدهی و بعد از آن منجر به کاهش دوره پر شدن دانه شده، لذا زمان کمتری برای افزایش محتوای پروتئین در دسترس گیاه خواهد بود در حالی که وقوع تنش کم آبی در مراحل اولیه رشد منجر به سازگاری گیاه با این شرایط و در نتیجه تنظیم فازهای رشدی گیاه می‌گردد لذا امکان تولید پروتئین بیشتری وجود خواهد داشت.

عملکرد روغن

با افزایش شدت تنش، عملکرد روغن کاهش بیشتری را نشان داد. اعمال تنش در مراحل اولیه رشد تاثیر بیشتری بر عملکرد روغن داشت. بیشترین میزان کاهش تحت تاثیر خشکی در سطح آبیاری پس از ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر مشاهده شد. بالاترین عملکرد روغن بین ۴۹ تا ۵۸ گرم بر مترمربع در دور آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک حاصل شد که نسبت به سایر سطوح آبیاری در هر مرحله رشدی دارای برتری معنی‌دار بود. کمترین عملکرد روغن با اعمال تیمار آبیاری پس از ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک از مرحله استقرار بوته‌های امارانت معادل ۱/۴ گرم بر متر مربع به دست آمد که نشان از افت شدید این صفت در اثر تنش کمبود آب می‌باشد. در این بررسی اعمال سطوح آبیاری پس از ۸۰، ۱۱۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک پس

معادلات رگرسیونی خطی ساده نیز تبعیت تغییرات این مؤلفه از عملکرد دانه را مشخص می‌کند به طوری که به ازای تاخیر هر واحد آبیاری در مراحل استقرار و شاخه‌دهی به ترتیب ۴/۱۸ و ۴/۱۳ واحد کاهش یافت. این کاهش در صورت اعمال تنش کم آبی در مراحل گلدهی و پر شدن دانه به ترتیب ۲/۷۳ و ۲/۱۱ واحد بود (شکل ۲).

گزارش شده است که شاخص برداشت این گیاه بین ۰/۲ تا ۰/۳ متغیر است (Thanapornpoonpong *et al.*, 2008). با این که این گیاه می‌تواند شرایط نامساعد محیطی را به خوبی تحمل کند با این وجود شرایط محیطی نامساعد روی میزان تولید بذر تاثیر می‌گذارد. در بسیاری از تحقیقات انجام شده، وقوع خشکی قبل از گرده‌افشانی هم روی تعداد دانه و هم روی وزن هزار دانه تاثیر بیشتری نسبت به مراحل بعدی رشد و در نتیجه شاخص برداشت می‌گذارد (Thanapornpoonpong *et al.*, 2007) که تاییدی بر نتایج این تحقیق است.

درصد پروتئین دانه

کاهش آب در دسترس گیاه به دنبال تاخیر در آبیاری تا آبیاری پس از ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک منجر به افزایش معنی‌دار میزان پروتئین دانه نسبت به آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک گردید ولی افزایش شدت تنش به آبیاری پس از ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تغییر معنی‌داری در درصد پروتئین دانه نسبت به آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک ایجاد نکرد بدین ترتیب سطوح آبیاری پس از ۸۰، ۱۱۰ و ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک به ترتیب منجر به افزایش ۱۲/۸، ۱۸/۵ و ۳۲/۲ درصدی میزان پروتئین دانه در این گیاه نسبت به سطح آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک شد (شکل ۳). حدادی و همکاران (Haddadi *et al.*, 2010) نیز گزارش نمودند که تحت تاثیر خشکی

تشتک منجر به افزایش معنی‌دار میزان پرولین نسبت به آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک گردید ولی افزایش شدت تنش به آبیاری پس از ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک باعث کاهش پرولین تولیدی در حد آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک شد که احتمالاً به دلیل آسیب وارده به متابولیسم گیاه و فرآیندهای بیوشیمیایی تولید کننده پرولین در شدت‌های بالای تنش است. در تنش‌های شدید به دلیل آسیب وارده به فعالیت‌های حیاتی امکان تولید متابولیت‌های سازگاری نیز کمتر خواهد بود. بدین ترتیب سطوح آبیاری پس از ۸۰، ۱۱۰ و ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک به ترتیب منجر به افزایش ۱۲، ۱۵ و ۳۱ درصدی میزان پرولین تولیدی در این گیاه شد (شکل ۶). افزایش میزان پرولین در گیاهان در اثر خشکی توسط موسی و عبدالعزیز (Moussa and Abdel-Aziz, 2008) نیز گزارش شده است. تحت شرایط خشکی حفظ تورژسانس برگ‌ها با تنظیم اسمزی در پاسخ به تجمع پرولین ممکن می‌گردد و در نتیجه جذب آب از خاک خشک نیز بهبود می‌یابد (Cordeiro *et al.*, 2009).

در این آزمایش بین تیمارهای اعمال تنش در مراحل آغاز شاخه‌دهی و پس از استقرار بوته‌ها از نظر مقدار پرولین اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. اعمال تنش در مراحل آغاز گل‌دهی و پر شدن دانه‌ها منجر به کاهش به ترتیب ۶/۶ و ۸/۵ درصدی میزان پرولین تولیدی نسبت به اعمال تنش در مراحل آغاز شاخه‌دهی و پس از استقرار بوته‌ها شد (شکل ۷). در بررسی تغییرات عملکرد دانه و شاخص برداشت نیز ملاحظه گردید اثرات تنش اعمال شده در مراحل انتهایی رشد بر این صفات کمتر می‌باشد. پرولین نقش مهمی در حفاظت از ماکرومولکول‌ها و ارگانول‌ها از طریق پایدارسازی پروتئین‌ها بر علیه اثرهای تخریبی تنش دارد (Munns, 2002)، در این بررسی

از استقرار بوته‌های آمارانت عملکرد روغن را به ترتیب ۴۵، ۶۵/۴، ۸۳/۹ و ۹۶/۹ درصد و پس از مرحله گلدهی به ترتیب ۲۹/۲، ۴۱/۳، ۶۱/۳ و ۸۳/۳ درصد نسبت به سطح آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک کاهش داد. اعمال تیمارهای ۱۱۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک در مرحله شاخه‌دهی عملکرد روغن را به ترتیب ۵۶/۴، ۷۵/۸ و ۹۳/۲ درصد و در مرحله پر شدن دانه به ترتیب ۳۳/۵، ۴۲/۶ و ۶۲/۲ درصد کاهش داد. اعمال کم آبی در سطح ۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک در این دو مرحله رشدی تاثیر معنی‌داری بر عملکرد روغن نداشت. ملاحظه می‌گردد این صفت حساسیت بالایی در برابر تنش کم آبی داشته و بیشترین افت در بین صفات بررسی شده (۹۷ درصد) را داشت. معادلات رگرسیونی خطی ساده نشان داد به ازای تاخیر هر واحدی آبیاری در مراحل استقرار بوته، شاخه‌دهی، گلدهی و پر شدن دانه به ترتیب ۱۰/۷، ۱۳/۱، ۱۰/۲ و ۸/۶ واحد کاهش یافت (شکل ۵).

تجمع ترکیبات اسمزی

تنظیم اسمزی یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌هایی است که در اکثر گیاهان به هنگام وقوع خشکی اتفاق می‌افتد. تنظیم اسمزی به معنی کاهش پتانسیل اسمزی، به دلیل تجمع مواد محلول از جمله پرولین، ساکارز، کربوهیدرات‌ها و سایر ترکیبات محلول در پروتوپلاسم در پاسخ به کمبود آبی است. مهم‌ترین روشی که تنظیم اسمزی از طریق آن روی عملکرد تاثیر می‌گذارد، استخراج رطوبت از لایه‌های عمیق‌تر خاک است. این افزایش مصرف آب توسط گیاهان منجر به تولید عملکرد بیشتر و شاخص برداشت بیشتری می‌شود (Chimenti *et al.*, 2006).

پرولین

کاهش آب در دسترس گیاه به دنبال تاخیر در آبیاری تا آبیاری پس از ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از

۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک نسبت به آبیاری پس از ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک منجر به کاهش روند افزایشی در مقدار این صفت شده است (شکل ۸). مشخص است که با کاهش میزان آب گیاه، غلظت ترکیبات قندی افزایش خواهد یافت. محققین گزارش نموده‌اند که در گیاهان جوان مکانیسم‌های مقاومت به خشکی زودتر و مؤثرتر از گیاهان پیر خواهد بود. به همین ترتیب برگ‌های جوان عکس‌العمل سریع‌تر و بیشتری را به خشکی نشان می‌دهند (Chaves et al., 2003; Cordeiro et al., 2009). که این موضوع در تجمع کربوهیدرات‌های محلول در گیاه آمارانت مواجه شده با تنش خشکی در دوره‌های رشدی مطابقت دارد. از آنجایی که خشکی تاثیر شدیدی را روی میزان فتوسنتز برگ‌ها دارد (Lin et al., 2006)، در تیمارهایی که در مراحل اولیه رشد اعمال شده‌اند، گیاه فرصت کافی برای سازگاری بیشتر با شرایط حادث شده را داشته و لذا امکان تجمع بیشتر ترکیبات اسمزی نیز بیشتر فراهم گردیده است.

در مرحله پر شدن دانه‌ها، آبیاری پس از ۱۷۰ میلی‌متر نسبت به آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر نه تنها موجب افزایش کربوهیدرات‌های محلول نشد بلکه باعث کاهش ۲۱/۱ درصدی این مؤلفه گردید (شکل ۸). مکل و همکاران (Meckel et al., 1984) نیز در سویا مشاهده نمودند وقتی بوته‌های سویا در مراحل زایشی در معرض استرس آبی قرار می‌گیرند دوره پر شدن دانه‌ها کاهش یافته و رسیدگی بذور تسریع می‌یابد لذا تحت این شرایط نیاز به تجمع کربوهیدرات‌های محلول کمتر خواهد بود.

میزان فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی

در این بررسی با افزایش شدت و مدت اعمال تنش کم آبی فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و سوپر اکسیددیسموتاز تغییر یافت. روند تغییرات این آنزیم‌ها مشابه متابولیت‌های سازگاری بود.

مشخص شد هر چه دوره وقوع تنش در گیاه بیشتر باشد پرولین بیشتری با هدف اثرگذاری حفاظتی تولید می‌گردد.

کربوهیدرات‌های محلول

بر اساس نتایج به‌دست آمده از این بررسی تمامی سطوح آبیاری مورد بررسی افزایش معنی‌داری در میزان کربوهیدرات‌های محلول نسبت به سطح آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک باعث شد. البته اعمال آبیاری پس از ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک در مرحله پر شدن دانه با کاهش معنی‌دار این صفت کمترین میزان کربوهیدرات‌های محلول را باعث گردید. به طوری که اعمال سطوح آبیاری پس از ۸۰، ۱۱۰، ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک پس از استقرار بوته‌های آمارانت، میزان کربوهیدرات‌های محلول را به ترتیب ۲۴/۵، ۳۶/۷ و ۳۷/۲ درصد افزایش معنی‌داری یافت. با اعمال سطوح آبیاری پس از ۸۰، ۱۱۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از مرحله شاخه‌دهی گیاه میزان کربوهیدرات‌های محلول به ترتیب ۲۹/۶، ۳۳، ۴۹/۴ و ۳۴/۸ درصد افزایش نشان داد در حالی که اعمال کم آبیاری پس از مرحله گلدهی فقط در سطوح ۱۱۰ و ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک باعث افزایش معنی‌دار این صفت به ترتیب به میزان ۱۹/۹ و ۴۹/۷ درصد نسبت به سطح آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک گردید. در شرایط وقوع تنش کم آبی در مرحله پر شدن دانه در آمارانت افزایش معنی‌دار تجمع کربوهیدرات‌ها به میزان ۲۹/۳ درصد فقط در آبیاری پس از ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک مشاهده شد بدین ترتیب میزان افزایش تجمع کربوهیدرات‌های محلول در مرحله پر شدن دانه در مقایسه با سایر مراحل رشدی به مراتب کمتر بوده است. در این بررسی با افزایش دور آبیاری از ۵۰ به ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک درصد افزایش این مؤلفه، روند صعودی داشته ولی افزایش دور آبیاری به

آنزیم کاتالاز

با اعمال تنش کم آبی تا سطح آبیاری پس از ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک میزان فعالیت آنزیم کاتالاز افزوده شد بنابراین، بیشترین میزان این آنزیم در سطح آبیاری پس از ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک با اعمال تنش از گلدهی (۱۲/۷۵ واحد بر گرم وزن تر) حاصل شد. افزایش میزان تولید آنزیم کاتالاز در اثر تنش خشکی توسط موسی و عبدالفتاح (Moussa and Abd El-Fattah, 2011) نیز گزارش شده است.

اعمال سطوح آبیاری پس از ۱۱۰، ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک پس از استقرار بوته‌های آمارانت، میزان فعالیت کاتالاز را به ترتیب ۲۸/۸ و ۲۸/۳ درصد افزایش داد. در مرحله شاخه‌دهی گیاه، اعمال سطوح آبیاری پس از ۸۰، ۱۱۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر فعالیت کاتالاز را به ترتیب ۳۳/۵، ۳۵/۹، ۵۲/۶ و ۳۶/۶ درصد افزایش داد ولی اعمال کم آبیاری پس از مرحله گلدهی فقط در سطوح ۸۰ و ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک باعث افزایش معنی‌دار این صفت به ترتیب به میزان ۲۰/۸ و ۵۰/۱ درصد نسبت به سطح آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک گردید. در مرحله پر شدن دانه در آمارانت افزایش معنی‌دار فعالیت این آنزیم به میزان ۲۹/۵ درصد فقط در آبیاری پس از ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک مشاهده شد. درصد افزایش فعالیت این آنزیم نیز مانند تجمع کربوهیدرات‌های محلول با افزایش دور آبیاری از ۵۰ به ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک روند صعودی داشته ولی افزایش دور آبیاری به ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک نسبت به آبیاری پس از ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک منجر به کاهش روند افزایشی در مقدار این صفت شد (شکل ۹). اعمال تیمار آبیاری پس از ۱۷۰ میلی‌متر نسبت به آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر در مرحله پر شدن دانه‌ها باعث

کاهش ۲۱/۹ درصدی این صفت گردید (شکل ۹). در شدت‌های خشکی پایین تولید فرم‌های فعال اکسیژن با تحریک ژن‌ها منجر به تولید و فعالیت سیستم‌های آنتی‌اکسیدان می‌شود. اما گزارش‌ها حاکی بر این است که در خشکی‌های شدید، ژن‌ها نیز تخریب می‌شوند (DaMatta and Cochicho Ramalho, 2010; Gill and Tuteja, 2006). مخصوصاً در مراحل نهایی رشد گیاه که تا زمان اندازه‌گیری میزان کاتالاز فرصت کمتری نسبت به اعمال تنش در سایر مراحل برای ایجاد سازگاری وجود دارد.

آنزیم پراکسیداز

با افزایش شدت تنش در اثر تاخیر در آبیاری، فعالیت آنزیم پراکسیداز افزایش معنی‌داری تا سطح آبیاری ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک نشان داد بنابراین، بین سطوح آبیاری پس از ۵۰ و ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. سطوح آبیاری ۸۰، ۱۱۰ و ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک باعث افزایش به ترتیب ۸/۵، ۱۰/۲ و ۲۲/۹ درصدی فعالیت آنزیم پراکسیداز شد (شکل ۱۰). افزایش میزان آنزیم پراکسیداز در اثر تنش خشکی توسط داماتا و رامالهو (DaMatta and Cochicho Ramalho, 2006) و گیل و توتجا (Gill and Tuteja, 2010) نیز گزارش شده است. افزایش شدت کم آبی به آبیاری ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک فعالیت این آنزیم را ۱۶/۵ درصد نسبت به آبیاری ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک کاهش داد. این کاهش می‌تواند ناشی از آسیب دیدن مسیرهای سنتز این آنزیم تحت خشکی‌های شدید باشد. محققین گزارش نموده‌اند که ارقام مقاوم مقادیر پایین‌تری از H_2O_2 را تجمع می‌دهند که این امر به دلیل افزایش فعالیت پراکسیدازها است. لذا به غشاهای سلولی صدمات کمتری وارد می‌شود (Moussa and Abd El-Fattah, 2011).

آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز

نتایج این بررسی نشان داد با تاخیر در آبیاری از ۸۰ به ۱۱۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز افزایش معنی‌داری یافت. این افزایش به ترتیب ۲/۶۶، ۹/۲۵ و ۲/۷۹ درصد نسبت به آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک بود. معادله رگرسیونی خطی ساده نشان داد به ازای تاخیر هر واحد آبیاری میزان فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز ۰/۷۳ واحد افزایش یافت (شکل ۱۱).

مقایسه افزایش فعالیت این سه آنزیم، نقش بیشتر سوپر اکسید دیسموتاز را در پاسخ به تنش کم آبی آمارانت نشان می‌دهد. جویت و همکاران (Jubete *et al.*, 2010) نیز گزارش نمودند که تنش خشکی میزان آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز و کاتالاز را افزایش می‌دهد، ولی بسته به شدت تنش و نوع گیاه میزان افزایش این آنزیم‌ها متفاوت خواهد بود.

نتیجه‌گیری کلی

این بررسی نشان داد آمارانت با تغییرات قابل توجهی که در برخی از صفات فیزیولوژیک از جمله فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان و ترکیبات اسمزی در شرایط تنش کم آبی ایجاد می‌کند به این تنش

محیطی پاسخ می‌دهد. این صفات در آمارانت تا آبیاری پس از ۱۴۰ میلی‌متر افزایش یافته ولی در خشکی شدید (آبیاری پس از ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر) روند کاهشی نسبت به آبیاری پس از ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک نشان دادند. با این حال پاسخ فیزیولوژیک گیاه به کم آبی کاملاً به شدت و دوره حادث شدن تنش بستگی دارد. تغییرات تولید دانه، محتوای پروتئین و روغن دانه نیز نشان داد کم آبی می‌تواند در آمارانت به ترتیب کاهشی تا ۸۹، ۳۲ و ۹۷ درصد در این صفات ایجاد نماید. البته این تغییرات در تنش ملایم و وقوع آن در مراحل انتهایی رشد آمارانت معنی‌دار نبوده ولی در کم‌آبی‌های شدید مخصوصاً وقوع آن در اوایل دوره‌ی رشدی قابل توجه می‌باشد. این موضوع حساسیت آمارانت را در برابر کم‌آبی‌های متوسط و شدید و تحمل مناسب این گیاه به میزان آب حاصل از آبیاری با دور پس از ۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک را نشان داد. بر اساس نتایج آزمایش انجام شده در آمارانت دانه‌ای ملاحظه شد با کاهش ۶۰ درصدی در آب مصرفی (آبیاری پس از ۸۰ به جای ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک) عملکرد دانه این گیاه کاهشی فقط حدود ۱۷ درصد داشته و محصولی در حدود ۲۴۵ گرم در متر مربع (۲/۴۵ تن در هکتار) تولید می‌کند.

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1- Some physical and chemical characteristics of the soil

بافت خاک Soil texture	رس Clay	سیلت Silt	شن sand	پتاسیم Potash (P.P.M)	فسفر Phosphorus (P.P.M)	نیتروژن کل T.N(%)	کربن آلی O.C (%)	مواد خنثی شونده TNV(%)	اسیدیته گل اشباع PH	هدایت الکتریکی Ec (ds/m)
شنی لومی Sandy loam	12%	21%	67%	194	22.53	0.215	2.24	17.25	7.87	1.84

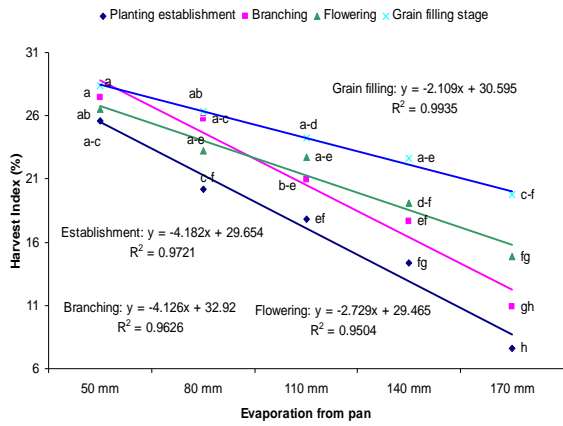
جدول ۲- درجه آزادی و میانگین مربعات برای صفات مورد بررسی در آمارانت

Table 2- Anlysis of variance and mean square for studied traits in Amaranth

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات								
		عملکرد دانه Grain yield	شاخص برداشت Harvest Index	پروتئین Protein	عملکرد روغن Oil yield	پرولین Prolin	کربوهیدرات- های محلول Soluble carbohydrate	کاتالاز Catalase	پراکسیداز Peroxidase	سوپراکسید دیسموتاز SOD
تکرار Replication	2	4.7	3	0.81	15.47	6.27*	2.36	0.63	86.95	184.83
سطوح آبیاری Irrigation levels	4	277**	23.6	11.16**	588.4**	26.18**	86.97**	20.11**	326.85*	724.3*
خطای اصلی Error a	8	24	14.2	0.91	9.14	0.76	9.16	2.91	71.82	149.48
مرحله رشد Growth stage	3	134**	11.6	3.12**	215.44**	7.62**	24.95**	7.18**	89.61	207.55
آبیاری × مرحله رشد I×G	12	14**	87.4*	0.77	85.47**	1.96	8.23**	2.09**	51.29	77.05
خطای فرعی Error b	30	22	12.8	0.53	7.25	1.68	3.12	0.76	63.76	425.83
ضریب تغییرات CV(%)		22.58	15.6	12.72	5.43	9.75	8.64	8.62	12.49	8.07

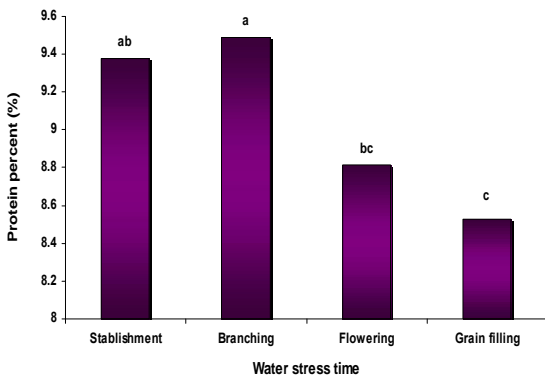
* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱٪.

* and **: significant at 5% and 1% probability levels, respectively.



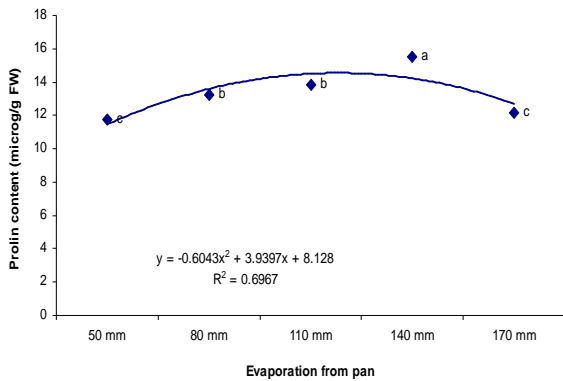
شکل ۲- تاثیر شدت و زمان اعمال کم آبی بر شاخص برداشت آماران

Figure 2- Effect of water deficit time and intensity on amaranth harvest index



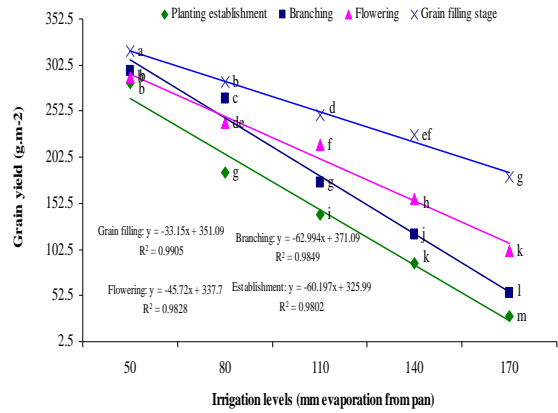
شکل ۳- تاثیر شدت اعمال کم آبی بر درصد پروتئین دانه آماران

Figure 3- Effect of water deficit intensity on amaranth protein percentage



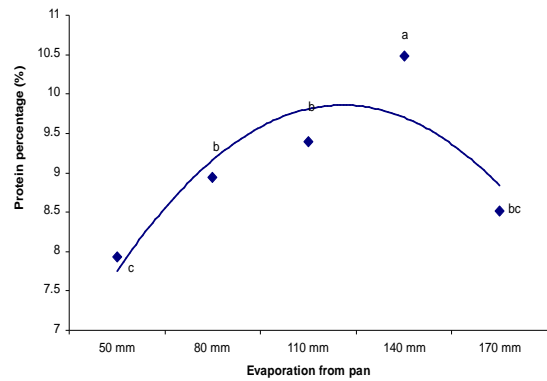
شکل ۴- تاثیر زمان اعمال کم آبی بر درصد پروتئین دانه آماران

Figure 4- Effect of water deficit time on amaranth protein percentage



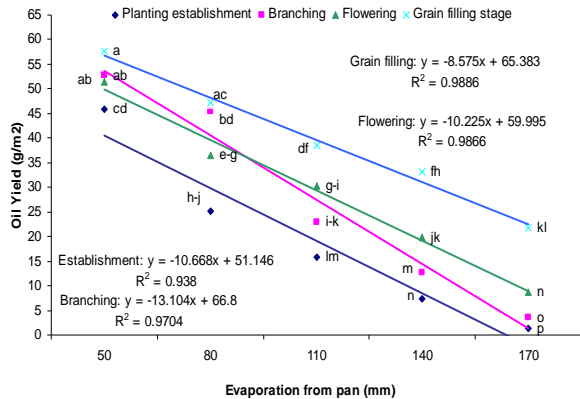
شکل ۵- تاثیر شدت و زمان اعمال کم آبی بر عملکرد دانه آماران

Figure 5- Effect of water deficit time and intensity on amaranth grain yield



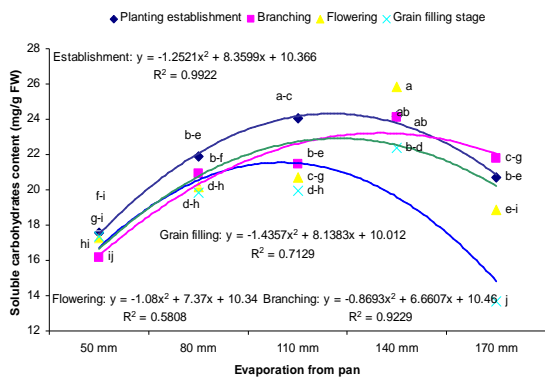
شکل ۶- تاثیر شدت اعمال کم آبی بر درصد پروتئین دانه آماران

Figure 6- Effect of water deficit intensity on amaranth protein percentage



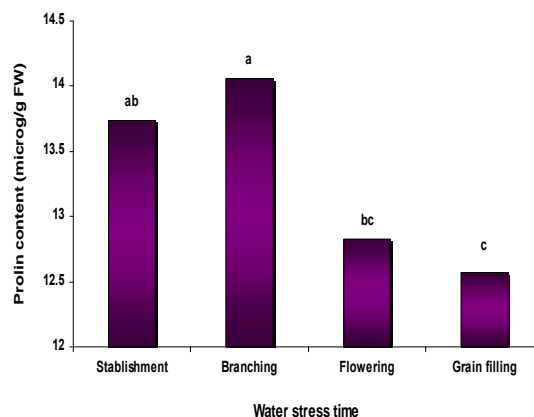
شکل ۷- تاثیر شدت و زمان اعمال کم آبی بر عملکرد روغن آماران

Figure 7- Effect of water deficit time and intensity on amaranth oil yield



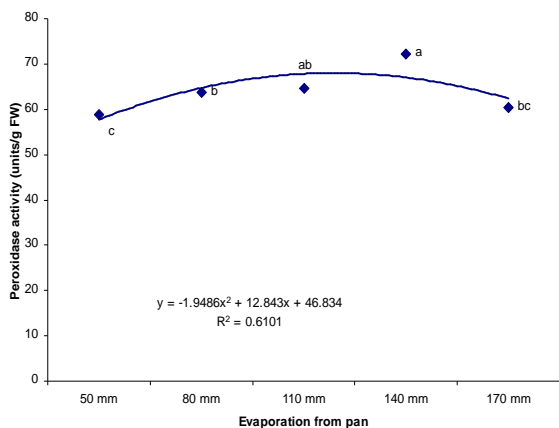
شکل ۸- تاثیر زمان اعمال سطوح مختلف کم آبی بر میزان کربوهیدرات‌های محلول

Figure 8- Effect of water deficit time and intensity on amaranth soluble carbohydrates



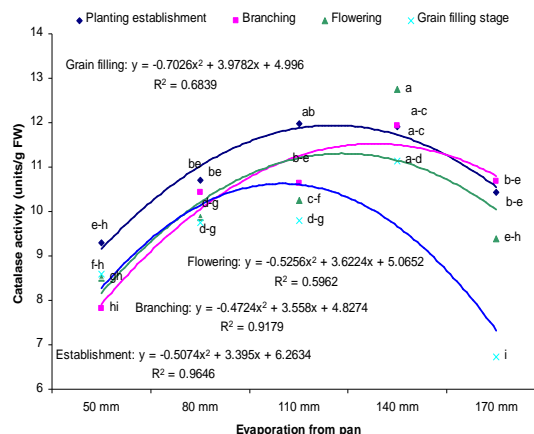
شکل ۷- تاثیر زمان اعمال کم آبی بر میزان پرولین

Figure 7- Effect of water deficit time on amaranth prolin content



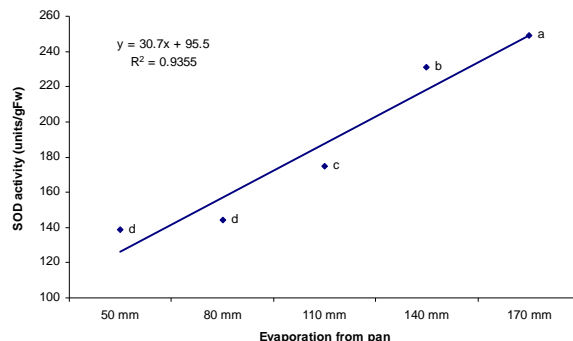
شکل ۱۰- تاثیر اعمال سطح مختلف کم آبی بر میزان آنزیم پراکسیداز

Figure 10- Effect of water deficit time and intensity on amaranth peroxidase activity



شکل ۹- تاثیر زمان اعمال سطوح مختلف کم آبی بر میزان آنزیم کاتالاز

Figure 9- Effect of water deficit time and intensity on amaranth catalase activity



شکل ۱۱- تاثیر اعمال سطح مختلف کم آبی بر میزان آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز

Figure 11- Effect of water deficit time and intensity on amaranth superoxide dismutase activity

References

منابع مورد استفاده

- Ajibola, O., S.E. Fasina, and K.A. Adeeko. 1990. Mechanical expression of oil from melon seeds. *Sci. Rept. Fac. Agr.* 32: 47-52.
- Ashraf, M., and M.R. Foolad. 2008. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany.* 59: 206–216.
- Avanza, M.V., M.C. Puppo, and M.C. Anon. 2005. Rheological characterization of amaranth protein gels. *Food Hydrocolloids.* 19: 889–898.
- Chaves, M., J. Maroco, and J. Pereira. 2003. Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology.* 30: 239-264.
- Chimenti, C.A., M. Marcantonio, and A.J. Hal. 2006. Divergent selection for osmotic adjustment results in improved drought tolerance in maize (*Zea mays* L.) in both early growth and flowering phases. *Field Crops Research.* 95: 305–315.
- Condes, M.C., A.A. Scilingo, and M.C. Anon. 2009. Characterization of amaranth proteins modified by trypsin proteolysis. Structural and functional changes. *LWT - Food Science and Technology.* 42: 963–970.
- Cordeiro, Y.E.M., H.A. Pinheiro, B.G. dos Santos Filho, S.S.E. Correa, J.R.R. Silva, and M.B. Dias-Filho. 2009. Physiological and morphological responses of young mahogany (*Swietenia macrophylla* King) plants to drought. *Forest Ecology and Management.* 258: 1449–1455.
- Dadbakhsh, A., A. Yazdansepar, and M. Ahmadizadeh. 2011. Study drought stress on yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes by drought tolerance indices. *Advances in Environmental Biology.* 5(7): 1804-1810.
- Dadbakhsh, A., and A.Y. Sepas. 2011. Evaluation of drought tolerance of bread wheat genotypes after pollination stage by stress and sensitivity tolerance indices. *Advances in Environmental Biology.* 5(6): 1046-1050.
- DaMatta, F.M., and J.D. Cochicho Ramalho. 2006. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: A review. *Braz. J. Plant Physiol.* 18(1): 55-81.
- Efeolu, B., Y. Ekmekçi, and N. Çiçek. 2009. Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery. *South African Journal of Botany.* 75: 34–42.
- Gill, S.S., and N. Tuteja. 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry.* 48: 909-930.
- Graciano, C., J.J. Guiame't, and J.F. Goya. 2005. Impact of nitrogen and phosphorus fertilization on drought responses in *Eucalyptus grandis* seedlings. *Forest Ecology and Management.* 212: 40–49.
- Grennan, A.K. 2006. Abiotic stress in rice, an omic approach. *Plant Physiology.* 140: 1139-1141.

- Haddadi, P., B. Yazdi-samadi, N.B. Langlade, M.R. Naghavi, M. Berger, A. Kalantari, A. Calmon, P. Maury, P. Vincourt, and A. Sarrafi. 2010. Genetic control of protein, oil and fatty acids content under partial drought stress and late sowing conditions in sunflower (*Helianthus annuus*). *African Journal of Biotechnology*. 9(40): 6768-6782.
- Hlavinka, P., M. Trnka, D. Semeradovaa, M. Dubrovsky, Z. Zalud, and M. Mozny. 2009. Effect of drought on yield variability of key crops in Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology*. 149: 431 – 442.
- Irigoyen, J.J., D.W. Emerrich, and M.Sanchez-Diaz. 1992. Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa plant. *Physiol Plant*. 84: 55-60.
- Jorgensena, S.T., W.H. Ntundub, M. Ouédraogoc, J.L. Christiansena, and F. Liua. 2011. Effect of a short and severe intermittent drought on transpiration, seed yield, yield components, and harvest index in four landraces of bambara groundnut. *International Journal of Plant Production*. 5(1): 25-36.
- Jubete, L.A., H. Wijngaard, E.K. Arendt, and E. Gallagher. 2010. Polyphenol composition and in vitro antioxidant activity of amaranth, quinoa buckwheat and wheat as affected by sprouting and baking. *Food Chemistry*. 119: 770–778.
- Kgang, I.E., L. Van Emmenes, N. Laloo, K. Kunert, N. Matole, and U. Schlüter. 2008. Characterisation of drought tolerant *Amaranthus tricolor* mutant plants. 5th International Symposium of the European Amaranth Association. Nitra, November 9-14. Slovak Republic.
- Lin, Pi-Yu, C., Y. Chi-Ming, C. Wen-Ching, L. Hsiao-Feng, and C. Tsan-Ru. 2006. The effects of flooding and drought stresses on the antioxidant constituents in sweet potato leaves. *Botanical Studies*. 47: 417-426.
- Li-Ping, B., S. Fang-Gong, G. Ti-Da, and S. Zhao-Hui. 2006. Effect of soil drought stress on leaf water status, membrane permeability and enzymatic antioxidant system of maize. *Soil Science*. 16: 326-332.
- Meckel, L., D.B. Egli, R.E. Philips, D. Radcliffe, and J.E. Legaaett. 1984. Effect of moisture stress on seed growth in soybean. *Agron. J*. 76: 647-650.
- Mlakar, S.G., M. Bavec, M. Jakop, and F. Bavec. 2000. Productivity of grain amaranth a. cruentus 'g6' as affected by drought occurring at different growth stages. 5th International Symposium of the European Amaranth Association. Nitra, November 9-14. Slovak Republic.
- Moussa, H.R. and M. Abd El-Fattah Hassan Mohamed. 2011. Role of nitric acid or H₂O₂ in antioxidant defense system of *Pisum sativum* L. under drought stress. *Nature and Science*. 9(5): 211-216.
- Moussa, H.R., and S.M. Abdel-Aziz. 2008. Comparative response of drought tolerant and drought sensitive maize genotypes to water stress. *Australian Journal of Crop Science*. 1(1): 31-36.

- Mulvaney, X.T., and W.L. Banwart. 1990. A rapid method for total nitrogen analysis using microwave digestion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1625-1629.
- Munns, R. 2002. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell Environ.* 25: 239-250.
- Plate, A.Y.A., and J.A.G. Areas. 2002. Cholesterol-lowering effect of extruded amaranth (*Amaranthus caudatus* L.) in hypercholesterolemic rabbits. *Food Chemistry.* 76: 1-6.
- Rajala, A., K. Hakala, P. Makela, S. Muurinen, and P. Peltonen-Sainio. 2009. Spring wheat response to timing of water deficit through sink and grain filling capacity. *Field Crops Research.* 114(2): 263-271
- Salami, H., N. Shahnooshib, and K.J. Thomsonc. 2009. The economic impacts of drought on the economy of Iran: An integration of linear programming and macroeconomic modelling approaches. *Ecological Economics.* 68: 1032 – 1039.
- Scilingo, A.A., S.E.M. Ortiz, E.N. Martı´nez, and M.C. Anon. 2002. Amaranth protein isolates modified by hydrolytic and thermal treatments, relationship between structure and solubility. *Food Research International.* 35: 855-862.
- Svirskis, A. 2003. Investigation of amaranth cultivation and utilisation in Lithuania. *Agronomy Research.* 1(2): 253-264.
- Thanapornpoonpong, S., S. Vearasilp, E. Pawelzik, and S. Gorinstein, 2008. Influence of various nitrogen applications on protein and amino acid profiles of Amaranth and Quinoa. *J. Agric. Food Chem.* 56: 11464-11470.
- Thanapornpoonpong, S., W. Somsaka, E. Pawelzickb, and S. Vearasilp. 2007. Yield component of amaranth (*Amaranthus spp.*) grown under Northern Thailand irrigated area. Conference on International Agricultural Research for Development. University of Göttingen, October 9-11.
- Wang Qing-Bin, W., K. Suk-Yoon, K. Sang-Soo, and S. Wei-Ai. 2005. Enhanced drought tolerance of transgenic rice plants expressing a pea manganese superoxide dismutase. *Journal of Plant Physiology.* 162: 465-472.
- Yarnia, M., and M.B. Khorshidi Benam. 2009. Water in relation to soils and plants. Islamic Azad University, Tabriz Branch Pub. pp: 194.
- Yarnia, M., M.B. Khorshidi Benam, E. Farajzadeh Memari Tabrizi, N. Nobari, and V. Ahmadzadeh. 2011. Effect of planting dates and density in drought stress condition on yield and yield components of amaranth cv. koniz. *Advances in Environmental Biology.* 5(6): 1139-1149.

The Effect of Water Deficit stress on Osmotic Metabolites and Anti Oxidant System and Grain and Oil Yield of Amaranth CV. Koniz

Yarnia, M.^{1*}

Received: February 2014, Accepted: 21 September 2014

Abstract

Drought is one of the most important environmental stresses that highly affect crop growth and yield. But the response of crops to stress depending on the timing of crop growth stages is different. The purpose of this study was to investigate effect of different levels of water stress (irrigation after 50, 80, 110, 140 and 170 mm evaporation from pan) on different stages of Amaranth growth (establishment, branching, flowering and grain filling). To find the effects of water deficit stress on this plant it was decided to determine its protein percentage, oil and grain yields under drought stress. Evaluation of physiological characteristics as to the extent of osmotic adjustment and antioxidant activity was also carried out. Results showed that water deficit stress, depending on the severity and duration of stress, caused a reduction between between a minimum of 10 to a maximum of 89 percent in yield, 28 to 70 percent in harvest index, 12 to 32 percent in grain protein and 29 to 97 percent in oil yield. This indicates the high sensitivity of grain and oil yields to severe and prolonged drought stresses. Changes in osmotic substances (proline and soluble carbohydrates) showed that this crop under water stress conditions increased proline and soluble carbohydrates by 31 and 50 percents, respectively. Thus, it could be said that under severe droughts the ability of crops to cope with drought will be reduced. Similarly, amaranth, to cope with water stress, increases the amount of antioxidant enzymes like catalase, peroxidase and super oxid dismutase up to 53, 23 and 79%, respectively. Higher amount of super oxid dismutase enzyme produce as the result of drought stress may play an important role to cope with reactive oxygen species and oxidative stresses.

Based on the results obtained it may be concluded that amaranth is a sensitive plant to moderate and severe drought (110 to 170 mm evaporation from pan) and responsive to irrigation after 80 mm evaporation from pan. Consequently, a 60% decrease in irrigation water (irrigation after 80 instead of 50 mm evaporation from pan) grain yield was reduced by 17% about 245 g.m⁻² (2.45 ton.ha⁻¹).

Key words: Amaranth, Antioxidant systems, Grain yield, Osmotic adjustment.

¹ Associate Prof., Department of Agronomy and Plant Breeding, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

* Corresponding Author: m.yarnia@yahoo.com & yarnia@iaut.ac.ir