دست‌ورزی صفات مورفو- فیزیولوژیک گندم نان و گندم ماکارونی با استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد در شرایط متفاوت آبیاری

هادی پیرسته انوشه و یحیی امام[۱*]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۵/۲۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۱/۸)

چکیده

تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی، که امروزه به‌طور گسترده‌ای در کشاورزی کاربرد دارند، اثرهای گوناگونی بر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک گونه‌های گندم دارند. بدین منظور، برای بررسی تأثیر دو تنظیم‌کننده رشد (سایکوسل و سالیسیلیک اسید) بر ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک ارقام گندم روشن و یاواروس در شرایط متفاوت آبیاری (مطلوب، تنش ملایم و تنش شدید)، پژوهشی دو مرحله‌ای (آزمایش کرت‌های یک‌بار خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی) و گلخانه تحقیقاتی (طرح کاملاً تصادفی) در مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در سال زراعی ۸۹-۱۳۸۸ طراحی و اجرا شد. نتایج نشان داد که تنش خشکی موجب کاهش ارتفاع بوته، شاخص سطح برگ و طول دم گل‌آذین و افزایش دمای سایه‌انداز، شاخص کلروفیل‌متر، پرولین و پروتئین محلول گردید. بیشترین و کمترین اثر خشکی به‌ترتیب مربوط به محتوای پرولین آزاد (۱۰۴٪ افزایش) و ارتفاع بوته (۱۸٪ کاهش) بود. کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد سبب افزایش شاخص سطح برگ (۹٪)، محتوای پرولین آزاد (۵۱٪) و پروتئین محلول (۵۷٪) و کاهش دمای سایه‌انداز (۱۴٪) و شاخص کلروفیل‌متر (۱۳٪) شد. سالیسیلیک اسید سبب افزایش و سایکوسل موجب کاهش ارتفاع بوته شد. رقم روشن حساسیت بیشتری به تنش خشکی و کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد نشان داد. اگرچه تنش خشکی موجب کاهش رشد هر دو رقم گندم گردید، لیکن، کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد با تخفیف آثار منفی تنش خشکی بر صفات مورفو- فیزیولوژیک همراه بود.

واژه‌های کلیدی: سایکوسل، سالیسیلیک اسید، کلروفیل، دمای سایه‌انداز، تنش خشکی

۱. به‌ترتیب دانشجوی دکتری و استاد زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: yaemam@gmail.com

مقدمه

غلات مهم‌ترین گیاهان غذایی کره زمین و تأمین‌کننده ۷۰٪ غذای مردم می‌باشند. گندم (*Triticum aestivum* L.) و برنج (*Oryza sativa*) تقریباً ۶۰٪ انرژی مورد نیاز بشر را تأمین می‌کنند (۱۲). گندم مهم‌ترین گیاه زراعی دنیاست که در بسیاری از زمین‌های کشاورزی کشت می‌گردد (۲۱). گندم در بسیاری از کشورها از جمله ایران، عامل بسیار مهمی برای پایداری سیاسی و اقتصادی و هم‌چنین بهبود درآمد بیشتر کشاورزان است. گندم دارای گونه‌های متعددی است و گرچه بیشترین سطح زیر کشت و بیشترین میزان تولید مربوط به گونه *aestivum* یا نان می‌باشد. لیکن، گونه *durum* یا ماکارونی نیز دارای ارزش تجاری بوده و نسبت به گندم نان دارای پروتئین بیشتری است (۱۹). تولید گندم جهان در سال ۲۰۱۰ میلادی معادل ۶۴۷ میلیون تن بود. بر طبق گزارش فائو، تولید گندم ایران در سال ۲۰۱۰ به ۱۴/۵ میلیون تن رسیده است (۱۵).

از آنجا که منشأ گندم ناحیه هلال حاصل‌خیز در شرق مدیترانه است، لذا بوته‌های گندم از ابتدای تکامل، در این منطقه خشکی را به عنوان مهم‌ترین فاکتور محدودکننده محیطی تجربه کرده‌اند (۲). تنش خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیر زنده است که بسته به شدت و مرحله رشد می‌تواند به صورت جدی به کاهش رشد و عملکرد در گندم منجر شود (۲۷ و ۳۲). پاسخ گیاهان به خشکی دارای مکانیسم‌های پیچیده‌ای است که شامل تغییرات مولکولی و گسترش آن به کل فعالیت‌های متابولیسمی گیاه و تأثیر بر مورفولوژی و فیزیولوژی گیاهان می‌باشد (۱۱ و ۳۰). تنش خشکی باعث تجزیه نشاسته و مصرف تدریجی آن می‌شود. کاهش مقدار نشاسته در نتیجه فعالیت آمیلاز صورت می‌گیرد و به افزایش مقدار قندهای قابل حل می‌انجامد (۲۷). با توجه به این‌که تاکنون بیشتر روش‌ها برای مبارزه با خشکی، مانند دست‌ورزی شاخص‌های تحمل و مدیریت مزرعه، هر یک به دلایلی با محدودیت مواجه بوده‌اند (۲۶)، بنابراین استفاده از روش‌های جایگزین مانند استفاده از مواد تنظیم‌کننده رشد (Plant growth regulator, PGR) همچون سالیسیلیک اسید و سایکوسل اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. تنظیم‌کننده‌های رشد، افزون بر این‌که در شرایط بدون تنش موجب افزایش عملکرد می‌شوند، در شرایط تنش خشکی نیز قادرند آثار منفی خشکی را کاهش دهند (۳۴). سایکوسل (Cycocel) یا کلرمکوات کلراید (Chlormequat chloride) با نام اختصاری CCC یکی از کندکننده‌های رشد می‌باشد (۱۲). سایکوسل یکی از مشتقات کولین (Choline) است که نخستین بار در کشورهای اروپایی در دهه ۱۹۶۰ به منظور کاهش خسارت خوابیدگی گندم به بازار ارائه گردید (۱۰). نحوه عمل سایکوسل از راه جلوگیری از فعالیت آنزیم‌های مسیر چرخه بیوسنتز جیبرلیک اسید می‌باشد (۳۶). پژوهش‌های متعددی با دامنه وسیع تیماری در مناطق مختلف در مورد تأثیر کاربرد سایکوسل بر غلات انجام شده است. نتایج این پژوهش‌ها حاکی از آن است که کاربرد سایکوسل یکنواختی درون بوته‌ای را افزایش داده و تولید پنجه‌های مولد سنبله را در جو (*Hordeum vulgare* L.) افزایش می‌دهد (۱۰). سایکوسل به دلیل تحریک رشد ریشه و در نتیجه ازدیاد مقاومت به خشکی، بیشتر مورد توجه بوده است (۱۹ و ۴۰). کاربرد سایکوسل روی غلات موجب افزایش رشد ریشه (۱۲)، کاهش ارتفاع ساقه، افزایش تعداد پنجه در هر بوته (۱۳) و افزایش مقاومت به سرما، شوری، قارچ‌ها و حشرات شده است (۱۰).

سالیسیلیک اسید، به عنوان ماده شبه هورمونی، نقش مهمی در تنظیم رشد و نمو گیاهان ایفا می‌کند (۱۸). نام سالیسیلیک اسید به دلیل وفور این ماده در پوست درخت بید، از واژه سالیکس (Salix، نام جنس درخت بید) گرفته شده است (۲۰). بر طبق گزارش‌ها، سالیسیلیک اسید تأثیرات بسیاری بر مورفولوژی و فیزیولوژی گیاه داشته و در تحریک مکانیسم‌های حمایتی افزایش مقاومت در برابر تنش‌های زنده و غیرزنده نقش دارد (۱۸). سالیسیلیک اسید یک تنظیم‌کننده رشد بیرونی است که روی دامنه‌ای از فرآیندهای درونی، از جمله جوانه‌زنی بذر، بسته شدن روزنه‌ها، جذب وانتقال یون‌ها، نفوذپذیری غشا، سرعت رشد و فتوسنتز تأثیر می‌گذارد (۲۰ و ۲۳). سالیسیلیک

اسید نقش مهمی در پاسخ گیاهان به تنش‌های محیطی دارد و از گیاه در برابر بسیاری از تنش‌های غیرزنده حمایت می‌کند (۲۰). کاربرد بیرونی سالیسیلیک اسید روی گیاهان، آثار فیزیولوژیک متنوعی را از جمله جلوگیری از ذخیره ماده خشک و کنترل جذب و انتقال یون، سبب می‌شود (۲۵). به‌طور کلی، با توجه به این‌که خشکی از ویژگی‌های بارز کشور ما به حساب می‌آید، لذا لازم است برای مقابله با این پدیده طبیعی و غیرقابل اجتناب، راهکارهای زراعی اندیشیده شود. در پژوهش حاضر، در راستای دست‌یابی به این هدف، به ارزیابی و مقایسه تأثیر دو تنظیم‌کننده رشد (سالیسیلیک اسید و سایکوسل) بر برخی صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک گندم نان (روشن) و گندم ماکارونی (یاواروس) در شرایط متفاوت آبیاری پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در سال زراعی ۸۹-۱۳۸۸ در مزرعه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در منطقه باجگاه، واقع در ۱۲ کیلومتری شمال غربی شیراز با طول جغرافیایی ′۷ °۲۹ شرقی، عرض جغرافیایی ′۴۶ °۵۲ شمالی و ارتفاع ۱۸۱۰ متر از سطح دریا، به‌صورت کرت‌های یک‌بار خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی طراحی و اجرا شد. مشخصات هواشناسی منطقه مورد آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است. همزمان با انجام پژوهش مزرعه‌ای، و بررسی دقیق‌تر تیمارها در محیط کنترل شده، آزمایشی گلخانه‌ای در قالب طرح کاملاً تصادفی نیز طراحی و اجرا شد. تیمارهای هر دو پژوهش شامل سطوح آبیاری (مطلوب، تنش ملایم و تنش شدید)، رقم گندم (گندم نان، رقم روشن و گندم ماکارونی، رقم یاواروس) و کاربرد تنظیم‌کننده رشد (عدم کاربرد ماده تنظیم‌کننده رشد (شاهد) و کاربرد شاخساره‌ای ۲/۵ گرم در لیتر سایکوسل و ۷ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید) بود. گندم رقم روشن در سال ۱۳۳۷ از اصفهان معرفی شده، متوسطرس است و مناسب رشد برای مناطق معتدله تا نیمه گرمسیر می‌باشد. به‌علاوه، رقم یاواروس در سال ۱۳۷۵ از مرکز بین‌المللی سیمیت معرفی شده، متوسطرس است و برای مناطق معتدل تا گرم مناسب می‌باشد. تیمار تنش خشکی در مزرعه به‌صورت آبیاری در حد ظرفیت زراعی (FC) تا زمان رسیدن فیزیولوژیک (بدون تنش، به عنوان شاهد)، قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی تا پایان فصل رشد (به عنوان تنش ملایم) و قطع آبیاری در مرحله برجستگی دوگانه تا پایان فصل رشد (به عنوان تنش شدید) و در گلخانه به صورت آبیاری در حد ظرفیت زراعی (بدون تنش، به عنوان شاهد)، ۷۵٪ ظرفیت زراعی (به عنوان تنش ملایم) و ۵۰٪ ظرفیت زراعی (به عنوان تنش شدید) اعمال شد.

خاک‌ورزی در آزمایش مزرعه‌ای شامل شخم عمیق، دوبار دیسک عمود برهم و لولر بود. قبل از کاشت، همه کود فسفره به‌صورت سوپرفسفات تریپل به میزان ۱۱۰ کیلوگرم در هکتار و یک سوم کود نیتروژن‌دار مورد نیاز (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار به‌صورت اوره) به میزان ۵۰ کیلوگرم در هکتار به خاک اضافه گردید. بقیه کود اوره در مراحل ساقه رفتن و گل‌دهی به میزان ۵۰ کیلوگرم در هکتار اضافه شد. کاشت کرت‌های آزمایشی با تراکم ۲۵۰ بوته در مترمربع با دست در تاریخ ۱۸ آبان ماه ۱۳۸۸ صورت گرفت. کرت‌های اصلی به تنش خشکی و کرت‌های فرعی به نوع تنظیم‌کننده رشد و رقم گندم اختصاص یافت. کرت‌های آزمایشی بلافاصله پس ازکاشت آبیاری شدند. مساحت هر کرت آزمایشی ۶ مترمربع، شامل ۳ پشته و ۶ ردیف کاشت بود. آبیاری هر کرت، با استفاده از شیلنگ با دبی جریان آب مشخص، انجام شد. با اندازه‌گیری زمان، مقدار آب آبیاری برای هر کرت تعیین شد. کنترل علف‌های هرز هم به‌صورت وجین دستی و هم با استفاده از علف‌کش‌های 2,4-D (۲/۵ لیتر در هکتار) و گرانستار (۲۵ گرم در هکتار) انجام شد. برای انجام آزمایش گلخانه‌ای، تعداد ۷۲ گلدان پلاستیکی ۵ کیلویی با خاک مزرعه پژوهشی، در مهرماه ۱۳۸۸ پر گردید. برای سهولت زه‌کشی گلدان‌ها، تَه هر گلدان سوراخ شده و مقداری سنگریزه در آن قرار داده شد. میزان آبیاری براساس روش سلول فشاری و تعیین درصد رطوبت وزنی مشخص گردید. میزان FC برای

جدول ۱. داده‌های هواشناسی منطقه باجگاه در شمال غربی شیراز، سال زراعی ۸۹-۱۳۸۸ و میزان آب آبیاری تیمارها

ماه	آبیاری (mm)			بارش	متوسط دما	رطوبت نسبی
	شاهد	تنش ملایم	تنش شدید	(mm)	(ºC)	(٪)
آبان	۱۳۱/۰	۱۳۱/۰	۱۳۱/۰	۱۰/۵۰	۱۰/۶۲	۶۹/۸۳
آذر	۰	۰	۰	۱۲۹/۰۰	۵/۶۶	۸۲/۲۸
دی	۰	۰	۰	۱۷/۰۰	۵/۱۰	۶۵/۰۶
بهمن	۰	۰	۰	۵۴/۵۰	۶/۱۳	۶۳/۸۸
اسفند	۴۳/۰	۴۳/۰	۴۳/۰	۳۷/۵۰	۱۰/۴۰	۵۹/۹۷
فروردین	۷۰/۴	۷۰/۴	۰	۲۴/۵۰	۱۲/۲۳	۶۱/۳۲
اردیبهشت	۱۱۳/۱	۰	۰	۱۳/۰۰	۱۷/۰۴	۵۶/۹۵
خرداد	۶۰/۴	۰	۰	۰	۲۲/۵۸	۴۴/۳۷
مجموع	۴۱۷/۹	۲۴۴/۴	۱۷۴/۰	۲۸۶/۰۰		

خاک مورد استفاده، ۲۲/۳٪ تعیین شد. برای ایجاد درصدهای مختلف FC و اعمال تنش خشکی، از توزین مداوم گلدان‌ها و محاسبه مقدار آب مورد نیاز تا سطح تیمار مربوطه استفاده شد. کاشت به‌صورت ۷ بوته در گلدان با دست صورت گرفت که بعد از استقرار کامل بوته‌ها، به ۵ بوته در هر گلدان تنک گردید. دمای حداقل و حداکثر گلخانه به‌ترتیب ۲۸ و ۱۴ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی بین ۵۵ تا ۶۰ درصد بود. هم‌چنین بوته‌های گندم روزانه در معرض ۱۴ ساعت روشنایی (ترکیبی از لامپ فلورسنت و مهتابی) قرار داده شدند.

بوته‌های گندم در مرحله برجستگی دوگانه با آب (به عنوان شاهد)، محلول تنظیم‌کننده رشد سایکوسل (با غلظت ۲/۵ گرم در لیتر) و یا سالیسیلیک اسید (با غلظت ۷ میلی‌مولار) و به‌صورت کاربرد شاخساره‌ای تیمار شدند. محلول سایکوسل با آب گرم و محلول سالیسیلیک اسید با آب گرم و اتانول تهیه گردید. در آزمایش مزرعه‌ای، ارتفاع بوته، طول دم گل‌آذین، شاخص سطح برگ، شاخص کلروفیل‌متر، دمای اولیه و ثانویه سایه انداز، محتوای پرولین آزاد و پروتئین محلول کل، و در آزمایش گلخانه‌ای ارتفاع بوته، شاخص کلروفیل‌متر، محتوای پرولین آزاد و پروتئین محلول کل اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری دمای سایه انداز (Canopy temperature, CT)، در نیمه روز (ساعات ۱۱ تا ۱۳) در دو مرحله ظهور سنبله (دمای اولیه سایه انداز) و اوایل مرحله شیری شدن دانه (دمای ثانویه سایه انداز) و با استفاده از دماسنج مادون قرمز (KM 842 Standard Model, Kane-May, England) اقدام شد. در هنگام اندازه‌گیری دمای سایه انداز، دماسنج با زاویه ۳۰ درجه نسبت به سطح افق در ارتفاع یک متر از سطح زمین و در حدود ۰/۵ متر از سطح گیاه قرار گرفت. شاخص محتوای کلروفیل (Chlorophyll Content Index, CCI) با استفاده از دستگاه کلروفیل‌سنج (Opti-Sciences X. USA) در ساعات ۹/۵ تا ۱۱ صبح اندازه‌گیری شد. برای محاسبه شاخص سطح برگ از دستگاه مساحت‌سنج (Delta T MK2, England) استفاده شد.

پیش از برداشت نهایی، ارتفاع ساقه و طول دم گل‌آذین اندازه‌گیری شد. ارتفاع ساقه با استفاده از خط‌کش میلی‌متری از سطح خاک (طوقه) تا گره زیر سنبله (یقه) تعیین شد. محتوای پرولین آزاد برگ پرچم براساس روش بیتس (۶) و پروتئین محلول کل براساس روش بردفورد (۸) اندازه‌گیری شد. برای این کار، در مرحله شیری شدن دانه، از برگ پرچم دو بوته در

هر واحد آزمایشی به‌طور تصادفی نمونه‌گیری شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS v. 9.1 انجام شد و میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح ۱٪ مقایسه شدند. نمودارها نیز با کمک برنامه Excel 2007 رسم شدند.

نتایج و بحث

الف) صفات مورفولوژیک

ارتفاع بوته و طول دم گل‌آذین

در شرایط مزرعه، اثر تنش خشکی، رقم و برهمکنش تنظیم‌کننده- رقم در سطح ۱٪ و اثر تنظیم‌کننده و هم‌چنین برهمکنش تنش خشکی- تنظیم‌کننده رشد در سطح ۵٪ بر ارتفاع بوته معنی‌دار گردید (جدول ۲). در گلخانه، ارتفاع بوته‌های گندم تحت تأثیر تنش خشکی، رقم، برهمکنش‌های تنش- رقم و تنش- تنظیم‌کننده و برهمکنش سه‌گانه در سطح ۱٪ قرار گرفت و هم‌چنین اثر تنظیم‌کننده رشد و برهمکنش تنظیم‌کننده- رقم در سطح ۵٪ معنی‌دار شد (جدول ۳). در هر دو آزمایش، تنش خشکی موجب کوتاه‌تر شدن ارتفاع بوته‌ها شد. تنش‌های ملایم و شدید به‌ترتیب سبب کاهش ۱/۵ و ۲۹/۵ درصدی ارتفاع بوته‌ها شدند. اثر تنش ملایم غیرمعنی‌دار و اثر تنش شدید معنی‌دار گردید (جدول ۴). در گلخانه، تنش شدید موجب کاهش معنی‌دار و ۳۵/۳ درصدی ارتفاع بوته گردید (جدول ۵). کاهش ارتفاع بوته بر اثر تنش خشکی ممکن است به سبب کاهش طول میانگره‌ها، کاهش میزان سبزینگی برگ و عدم دریافت کامل تابش خورشید توسط برگ‌ها باشد. در نتیجه، فتوسنتز هر بوته و تولید ماده خشک در آن کاهش می‌یابد (۱۱). هر چند ارتفاع ساقه از ویژگی‌هایی است که تأثیر آن بر عملکرد دانه جزئی و غیرمستقیم می‌باشد (۲۱). علت معنی‌دار شدن تأثیر تنش خشکی ملایم بر ارتفاع بوته در گلخانه (و معنی‌دار نشدن آن در شرایط مزرعه) را می‌توان به توانایی بیشتر بوته‌های گندم در شرایط مزرعه برای استفاده بهتر از رطوبت موجود در لایه‌های پایین‌تر خاک نسبت داد (۱۴). رشد طولی گندم در دوره پس از گل‌دهی بسیار اندک و قابل اغماض است (۱۲). در این آزمایش، تنش ملایم به‌صورت اعمال خشکی در اواخر دوره رشد گندم بود. هم‌چنین بعد از گل‌دهی، به دلیل کاهش رشد رویشی و کاهش سطح برگ، از حساسیت بوته‌های گندم به تنش خشکی کاسته می‌شود (۲ و ۱۲).

نتایج آزمایش مزرعه‌ای در مورد اثر تنش ملایم خشکی بر ارتفاع بوته با نتایج خواجه و همکاران (۲۲) مطابقت داشت. این پژوهشگران با اعمال تنش خشکی در مرحله گل‌دهی به بعد دریافتند که ارتفاع بوته تحت تأثیر معنی‌دار تنش خشکی قرار نگرفت، زیرا در این زمان گیاه تقریباً به ارتفاع نهایی خود رسیده بود. تأثیر تنظیم‌کننده‌های رشد بر ارتفاع بوته متفاوت بود. درحالی‌که سالیسیلیک اسید موجب افزایش ارتفاع بوته به‌صورت غیرمعنی‌دار در مزرعه و معنی‌دار در گلخانه گردید، کاربرد سایکوسل با کاهش معنی‌دار ارتفاع بوته در مزرعه (جدول ۴) و کاهش غیرمعنی‌دار در گلخانه (جدول ۵) همراه بود. روند تأثیر تنظیم‌کننده‌های رشد بر ارتفاع بوته در شرایط مطلوب و تنش نسبتاً مشابه بود (شکل‌های ۱- الف و ۲- الف). افزایش طول ساقه در اثر کاربرد سالیسیلیک اسید ممکن است به دلیل نقش آن در فتوسنتز و افزایش مواد پرورده باشد، همان‌گونه که توسط سایر پژوهشگران مورد توجه قرار گرفته است (۲۵). افزایش طول ساقه در اثر کاربرد شاخساره‌ای سالیسیلیک اسید در گونه‌های مختلف زراعی مانند ذرت (۲۴) و جو (۲۹) گزارش شده است. برخی پژوهشگران با کاربرد سایکوسل در اواسط مرحله پنجه‌زنی بیان کردند که سایکوسل به‌طور معنی‌داری ارتفاع بوته را در مقایسه با گیاه شاهد کاهش داد و طول میانگره‌های ساقه کم شد (۳۷ و ۴۰). در پژوهش شکوفا و امام (۴۰)، استفاده از تنظیم‌کننده رشد سایکوسل به‌طور مؤثری ارتفاع گیاه گندم پاییزه را کاهش داد و این کاهش ارتفاع، انتقال مواد پرورده را به نفع اندام‌های زایشی و در نهایت عملکرد دانه تغییر داد. نتایج برخی پژوهش‌های دیگر حاکی از آن است که تنظیم‌کننده‌های رشد می‌توانند ارتفاع نهایی ساقه را افزایش دهند (۳۵) و یا بی‌تغییر باقی گذارند (۲۲). در این پژوهش، ارتفاع بوته در رقم روشن به‌طور

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس اثرهای تنش خشکی، تنظیم‌کننده رشد گیاهی و رقم بر ویژگی‌های مورفو- فیزیولوژیک گندم نان و گندم ماکارونی در آزمایش مزرعه‌ای

		میانگین مربعات						
منابع تغییر	درجه آزادی	ارتفاع بوته	طول دم گل‌آذین	شاخص سطح برگ	کلروفیل‌متر	دمای اولیه سایه انداز	دمای ثانویه سایه انداز	پرولین آزاد	پروتئین محلول
تنش خشکی	۲	۹۰۶۶/۸۸**	۱۳۶۵/۱۳**	۲۱/۷۲*	۲۶۶۰/۱۸**	۱۲/۶۲^{ns}	۳۳۰/۱۶**	۳۲۲/۶۴**	۲۲۰/۸۶**
تنظیم‌کننده رشد	۲	۱۳۴۸/۲۲*	۳/۶۶*	۱/۴۰*	۴۱۴/۸۶**	۲۲/۹۲**	۳۱۶/۱۶**	۱۲۴/۱۸**	۱۳۷/۱۷**
رقم	۱	۶۰۷۸۴/۲۲**	۵۶۲۵/۰۶**	۴/۱۰**	۱۸۱/۷۶**	۲۳۴/۷۲**	۱۴۴/۵۰**	۸۱/۰۶**	۰/۰۵^{ns}
تنظیم‌کننده×رقم	۲	۲۵۳/۵۵**	۲/۸۸^{ns}	۰/۰۵^{ns}	۰/۱۳^{ns}	۱/۶۸^{ns}	۲/۱۶^{ns}	۵۵/۴۷**	۰/۸۸^{ns}
تنش× رقم	۲	۲۶/۸۸^{ns}	۲۴۴/۰۶**	۰/۲۰^{ns}	۱۷/۳۹*	۰/۶۸^{ns}	۴/۵۰^{ns}	۶/۰۹^{ns}	۰/۱۴^{ns}
تنش× تنظیم‌کننده	۴	۳۲/۲۲*	۱/۳۹^{ns}	۰/۱۳^{ns}	۱۳۵/۲۵**	۲۱/۸۸**	۸/۳۳^{ns}	۱۴/۰۱**	۰/۵۶^{ns}
برهمکنش سه‌گانه	۴	۲۴/۲۲^{ns}	۱۲/۸۵*	۰/۰۰*	۰/۳۹۳^{ns}	۵/۳۲*	۲/۱۶^{ns}	۱۵/۸۶**	۰/۲۲^{ns}
ضریب تغییرات (٪)		۱۶/۳۵	۶/۴۳	۱۰/۴۱	۲۳/۳۴	۱۶/۷۶	۲۵/۳۱	۹/۴۵	۷/۴۵

**، * و ns: به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و بدون تفاوت معنی‌دار

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس اثرهای تنش خشکی، تنظیم‌کننده رشد گیاهی و رقم بر ویژگی‌های مورفو- فیزیولوژیک گندم نان و گندم ماکارونی در آزمایش گلخانه‌ای

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		ارتفاع بوته	کلروفیل‌متر	پرولین آزاد	پروتئین محلول
تنش خشکی	۲	۱۰۸۶۲/۱۸**	۱۹۹۲/۱۸**	۹۸۳/۳۲**	۲۳۰/۸۹*
تنظیم‌کننده رشد	۲	۳۴۹/۹۸*	۱۶۷/۷۲**	۲۶۱/۰۰*	۷۱۲/۱۲**
رقم	۱	۴۴۰۲۵/۳۳**	۱۱۳/۵۰**	۱۰۲/۱۱^{ns}	۰/۱۲^{ns}
تنظیم‌کننده×رقم	۲	۶۰/۲۶*	۲/۰۶^{ns}	۱۳۴/۴۲^{ns}	۰/۵۴^{ns}
تنش× رقم	۲	۱۸۳/۲۰**	۱۱/۲۶**	۴۵/۳۲**	۰/۳۴^{ns}
تنش× تنظیم‌کننده	۴	۴۷/۷۸**	۳۸/۵۲**	۴۵/۳۰^{ns}	۰/۲۸*
برهمکنش سه‌گانه	۴	۵۲/۹۳**	۱/۶۵^{ns}	۵۱/۲۳**	۰/۸۵^{ns}
ضریب تغییرات (٪)		۱۴/۵۱	۱۲/۶۴	۱۵/۴۳	۱۰/۴۳

**، * و ns: به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و بدون تفاوت معنی‌دار

معنی‌داری زیادتر از رقم یاواروس بود، که به دلیل ویژگی‌های رقم بود (جداول ۴ و ۵). به‌طور کلی، واکنش ارتفاع رقم یاواروس به تنظیم‌کننده‌های رشد و تنش خشکی کمتر از رقم پابلند روشن بود (شکل‌های ۱- الف و ۲- الف). راجالا (۳۵) نیز در پژوهش خود دریافت که ارقام پاکوتاه نسبت به استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد غیرحساس بودند.

از یک سو، ارقام دارای ساقه بلندتر حساسیت بیشتری به خوابیدگی دارند (۱۲)، و از سوی دیگر کوتاه بودن بوته گندم با کاهش عملکرد بیولوژیک همراه است و در نتیجه عملکرد دانه کاهش می‌یابد (۱۹). بنابراین، ارتفاعی برای گندم مناسب است که عملکرد دانه وعملکرد بیولوژیک مطلوب بوده و در عین حال بوته‌ها دچار خوابیدگی نگردند. نتایج این پژوهش نشان داد که سایکوسل سبب کاهش و سالیسیلیک اسید موجب افزایش ارتفاع بوته شد. لذا، از این نظر سایکوسل برای ارقام پابلند و در شرایط فراوانی رطوبت و مواد غذایی (جهت جلوگیری از ایجاد ورس) و سالیسیلیک اسید برای ارقام پاکوتاه جهت افزایش فتوسنتز و جبران کاهش ارتفاع ناشی از تنش خشکی برای تولید مناسب ماده خشک در شرایط محدودیت رطوبت مناسب به نظر می‌رسند. اثر تنش خشکی، رقم و برهمکنش تنش- رقم در سطح ۱٪ و اثر تنظیم‌کننده رشد و برهمکنش سه‌گانه در سطح ۵٪ بر طول دم‌گل‌آذین در آزمایش مزرعه‌ای معنی‌دار گردید (جدول ۲). تنش شدید خشکی موجب کاهش معنی‌دار طول دم گل‌آذین گردید (جدول ۴). طول دم‌گل‌آذین در اثر تنش شدید ۴۱/۹٪ نسبت به شاهد کاهش یافت. کاهش رشد دم گل‌آذین در اثر تنش خشکی به دلیل نقش آب در رشد و توسعه سلولی است (۱۴). در واقع کاهش طول دم گل‌آذین در اثر تنش خشکی موجب شد که ارتفاع بوته‌های گندم تحت تأثیر خشکی کاهش معنی‌داری داشته باشد (۱۴). میانگره‌ها از پایین به بالا یکی پس از دیگری به حداکثر رشد طولی خود می‌رسند تا با رشد طولی میانگره آخر (دم گل‌آذین) سنبله از غلاف برگ پرچم (آخرین برگ) خارج شده و آشکار گردد (۱۲).

تنظیم‌کننده‌های رشد، طول دم گل‌آذین گندم را افزایش دادند (جدول ۳ و شکل ۱- ج). طول میانگره‌های ساقه از پایین به بالا زیاد می‌شود. به گونه‌ای که دم گل‌آذین ممکن است نصف ارتفاع ساقه را تشکیل دهد (۲۲). بر طبق پژوهش‌ها،

جدول ۴. میانگین اثرهای تنش خشکی، تنظیم‌کننده‌های رشد و رقم بر ویژگی‌های مورفو- فیزیولوژیک گندم نان و گندم ماکارونی در آزمایش مزرعه‌ای

تیمار	ارتفاع بوته (cm)	طول دم گل‌آذین (cm)	شاخص سطح برگ	کلروفیل‌متر (واحد اسپاد)	دمای اولیه کانوپی (°C)	دمای ثانویه کانوپی (°C)	پرولین آزاد (µmol/g dw)	پروتئین محلول (mg/g dw)
تنش خشکی								
شاهد	۱۲۱/۰۰^{a}	۳۵/۵۰^{a}	۵/۵۱^{a}	۳۹/۱۰^{a}	۲۳/۶۴^{a}	۲۴/۵۸^{a}	۵/۵۸^{c}	۶/۷۵^{c}
خشکی ملایم	۱۱۹/۳۳^{b}	۳۰/۰۸^{b}	۵/۲۰^{a}	۴۸/۷۶^{b}	۲۳/۹۳^{a}	۲۸/۱۶^{b}	۹/۶۶^{b}	۹/۷۱^{b}
خشکی شدید	۸۴/۵۰^{c}	۲۰/۶۰^{c}	۳/۷۳^{b}	۶۰/۱۳^{c}	۲۵/۳۸^{a}	۳۲/۰۰^{c}	۱۲/۹۰^{a}	۱۲/۸۱^{a}
تنظیم‌کننده رشد								
شاهد	۱۱۰/۱۶^{a}	۲۷/۱۶^{b}	۴/۵۸^{b}	۵۴/۰۵^{c}	۲۵/۷۰^{b}	۳۲/۲۵^{c}	۷/۶۱^{b}	۷/۹۳^{b}
سایکوسل	۹۸/۰۰^{b}	۲۹/۶۰^{a}	۴/۸۰^{ab}	۴۶/۲۰^{a}	۲۴/۴۸^{a}	۲۷/۳۳^{b}	۱۱/۹۵^{a}	۸/۸۸^{b}
سالیسیلیک اسید	۱۱/۶۶^{a}	۲۹/۴۱^{a}	۵/۰۶^{a}	۴۷/۷۵^{b}	۲۳/۷۶^{a}	۲۵/۱۶^{a}	۸/۵۸^{b}	۱۲/۴۶^{a}
رقم								
روشن	۷۷/۵۵^{b}	۱۹/۸۸^{b}	۴/۵۷^{b}	۴۷/۷۴^{a}	۲۶/۴۵^{b}	۲۹/۶۶^{b}	۱۰/۴۴^{a}	۹/۷۸^{a}
یاواروس	۱۳۵/۶۶^{a}	۳۷/۵۶^{a}	۵/۰۵^{a}	۵۰/۹۲^{b}	۲۲/۸۴^{a}	۲۶/۸۳^{a}	۸/۳۲^{b}	۹/۷۳^{a}

*: میانگین‌های دارای حروف یکسان در هر ستون، برای هر تیمار، اختلاف معنی‌دار ندارند (LSD ≤ ۰/۰۱).

جدول ۵. میانگین اثرهای تنش خشکی، تنظیم‌کننده‌های رشد و رقم بر ویژگی‌های مورفو- فیزیولوژیک گندم نان و گندم ماکارونی در آزمایش گلخانه

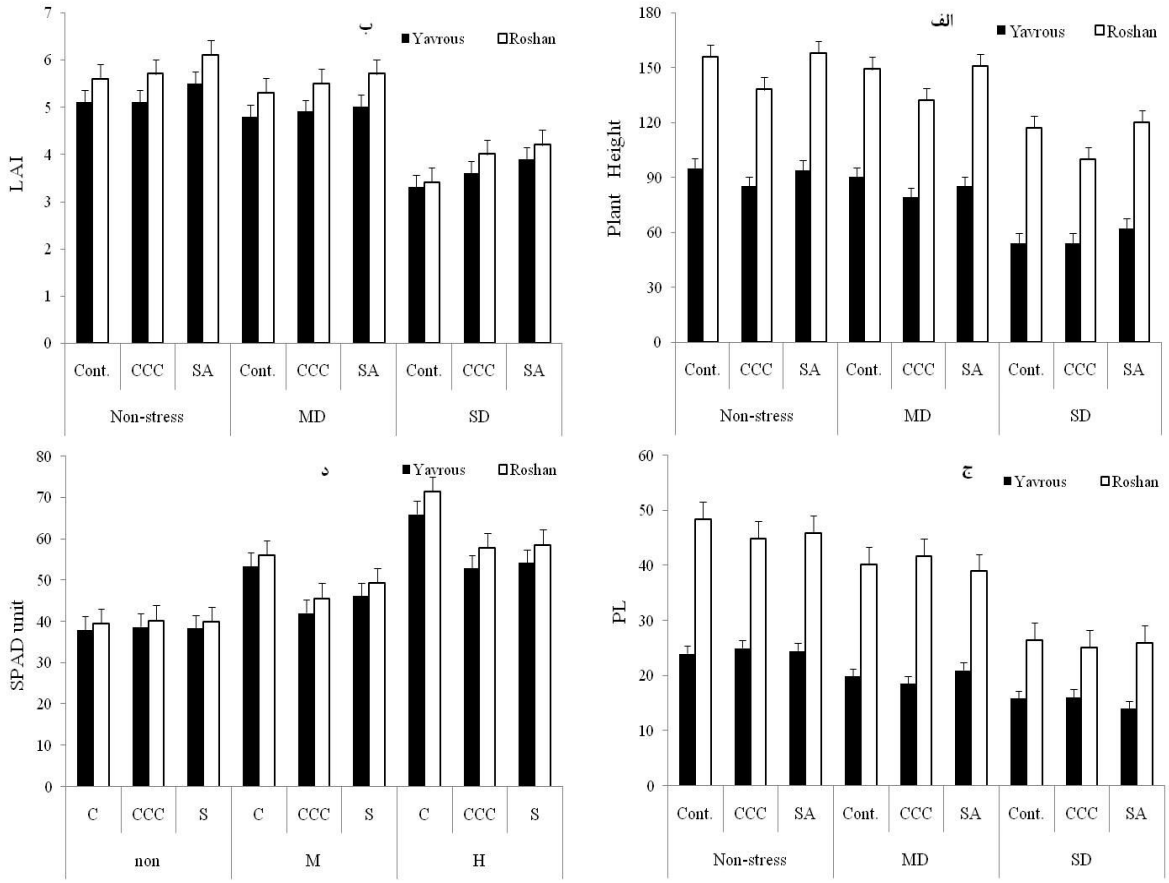
تیمار	ارتفاع بوته (cm)	کلروفیل‌متر (واحد اسپاد)	پرولین آزاد (µmol/g dw)	پروتئین محلول (mg/g dw)
		تنش خشکی		
شاهد	۱۱۶/۰۰^{a}	۲۳/۲۶^{a}	۳/۱۹^{c}	۷/۳۲^{b}
خشکی ملایم	۱۰۵/۳۵^{b}	۳۷/۴۳^{b}	۸/۴۳^{a}	۱۰/۱۱^{a}
خشکی شدید	۷۵/۰۰^{c}	۴۵/۳۰^{c}	۵/۵۴^{b}	۶/۹۵^{b}
		تنظیم‌کننده رشد		
شاهد	۹۶/۸۳^{b}	۳۸/۳۸^{b}	۵/۷۶^{b}	۶/۱۲^{c}
سایکوسل	۹۶/۳۳^{b}	۳۷/۷۰^{a}	۹/۹۸^{a}	۱۰/۴۳^{b}
سالیسیلیک اسید	۱۰۳/۱۸^{a}	۳۳/۹۱^{a}	۱۰/۱۰^{a}	۱۳/۵۳^{a}
		رقم		
روشن	۷۴/۰۵^{b}	۳۴/۰۷^{a}	۹/۳۴^{a}	۸/۱۳^{a}
یاواروس	۱۲۳/۵۱^{a}	۳۶/۵۸^{a}	۸/۶۵^{a}	۸/۴۳^{a}

*: میانگین‌های دارای حروف یکسان در هر ستون، برای هر تیمار، اختلاف معنی‌دار ندارند (LSD ≤ ۰/۰۱).

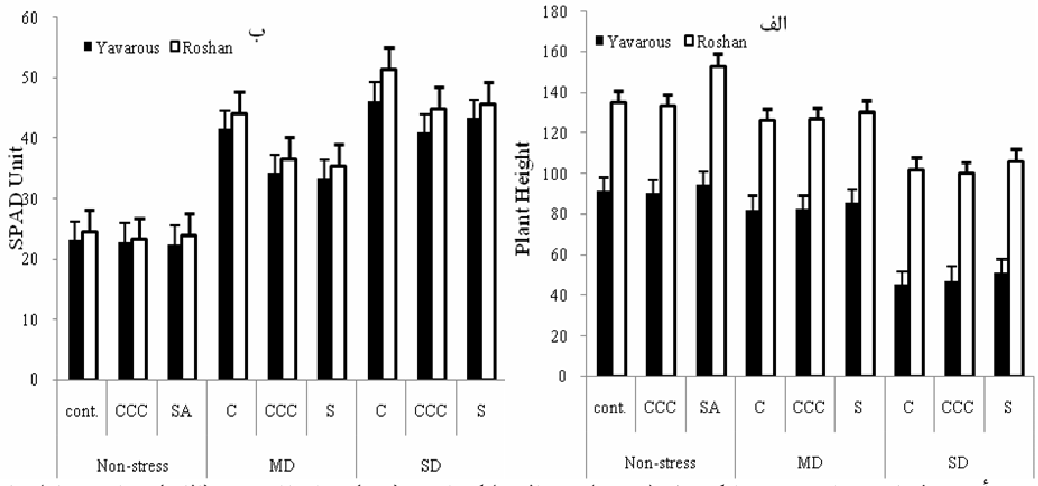
تغییرات طول دم گل‌آذین به شرایط محیطی وابسته است (۳۹). چنانچه راجالا (۳۵) با کاربرد تنظیم‌کننده رشد افزایش طول دم گل‌آذین را در بوته‌های یولاف گزارش کرد. لیکن، خواجه و همکاران (۲۲) با کاربرد برگی سایکوسل تغییری در ارتفاع نهایی بوته‌های جو مشاهده نکردند. طول دم گل‌آذین در بین ارقام تفاوت قابل توجهی داشت که از این نظر یک صفت مربوط به رقم می‌باشد (۲۲). به عبارت دیگر، تفاوت در طول دم گل‌آذین ناشی از اختلاف بین ویژگی‌های ارقام بود. طول دم گل‌آذین در رقم روشن حدود ۸۹٪ نسبت به یاواروس بزرگ‌تر بود. البته در این بین، رقم یاواروس نسبت به اعمال تنش خشکی و کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد تقریباً غیرحساس بود (شکل ۱- ج). روی‌هم رفته، تنش خشکی، طول دم گل‌آذین را در هر دو رقم کاهش داد. لیکن، این کاهش در رقم روشن زیادتر از رقم یاواروس بود.

شاخص سطح برگ

نتایج تجزیه واریانس آزمایش مزرعه‌ای نشان داد که شاخص سطح برگ تحت تأثیر معنی‌دار تنش خشکی، تنظیم‌کننده رشد و برهمکنش سه‌گانه در سطح احتمال ۵٪، و هم‌چنین اثر رقم در سطح احتمال ۱٪ قرار گرفت (جدول ۲). تنش خشکی سبب کاهش شاخص سطح برگ شد. اگرچه این اثر فقط در تنش شدید خشکی معنی‌دار بود (جدول ۴). شاخص سطح برگ در اثر تنش شدید خشکی نسبت به تیمار شاهد ۳۲/۳٪ کاهش یافت. عوامل محیطی، از جمله خشکی، پیری برگ‌های گندم را تسریع کرده و سبب کاهش سطح برگ می‌شوند (۱۴). تنش خشکی پیش از گل‌دهی از طریق کاهش سرعت گسترش برگ‌ها و تغییر در شکل برگ، سطح برگ را کاهش می‌دهد، که منجر به دریافت کمتر نور می‌شود. درحالی‌که تنش خشکی بعد از گل‌دهی از طریق تسریع پیری برگ‌ها سبب کاهش سطح برگ می‌شود (۱۱). بیشتر پژوهشگران بر این باور هستند که



شکل ۱. تأثیر تنظیم‌کننده‌های رشد سایکوسل (CCC) و سالیسیلیک اسید (SA) بر ارتفاع بوته (الف)، شاخص سطح برگ (ب)، طول دم گل‌آذین (ج) و شاخص کلروفیل‌متر (د) تحت شرایط متفاوت آبیاری مطلوب (Non-stress)، تنش ملایم (MD) و تنش شدید (SD) خشکی در دو رقم گندم در مزرعه. علامتI در هر ستون، خطای استاندارد است.



شکل ۲. تأثیر تنظیم‌کننده‌های رشد سایکوسل (CCC) و سالیسیلیک اسید (SA) بر ارتفاع بوته (الف)، شاخص کلروفیل‌متر (ب)، تحت شرایط متفاوت آبیاری مطلوب (Non-stress)، تنش ملایم (MD) و شدید (SD) خشکی در دو رقم گندم در گلخانه. علامتI در هر ستون، خطای استاندارد است.

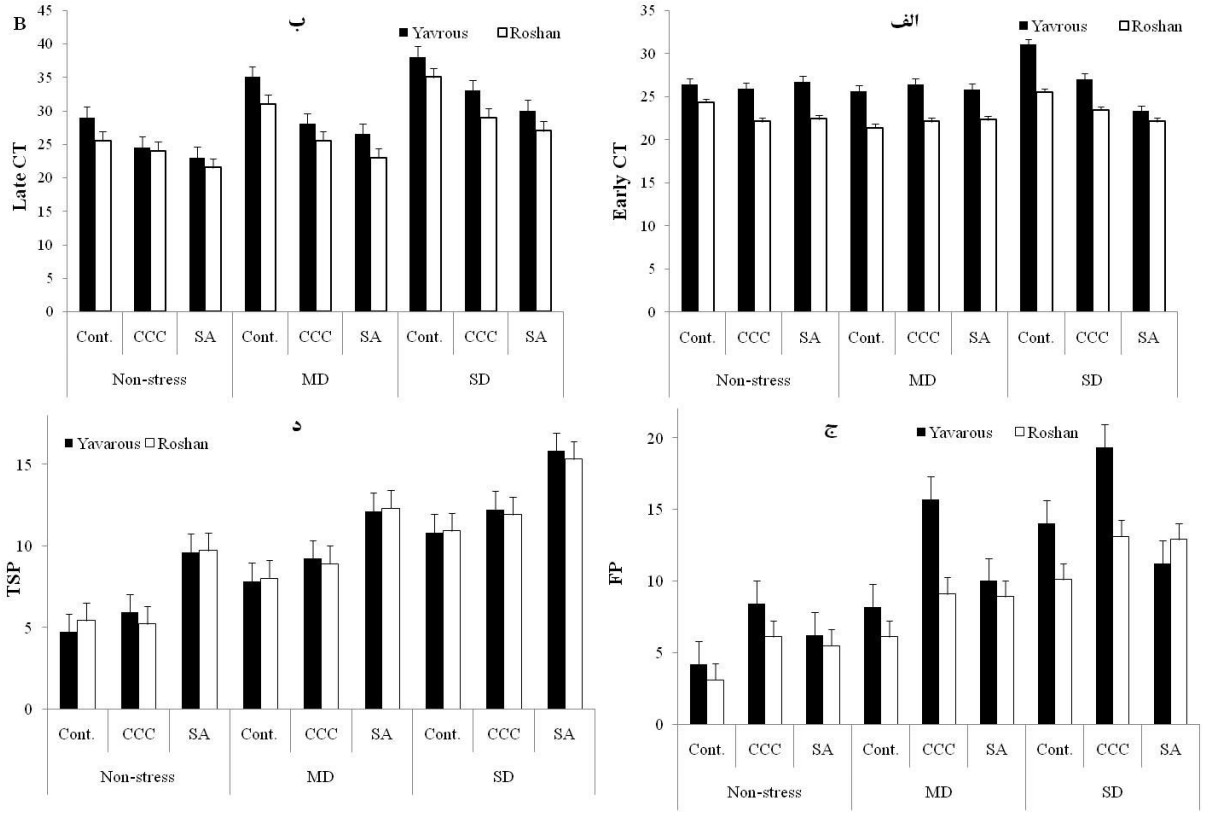
بیشینه شاخص سطح برگ در زمان گل‌دهی حاصل می‌شود (۱۲ و ۳۹). بنابراین، عدم تأثیر معنی‌دار تنش ملایم خشکی بر شاخص سطح برگ قابل توجیه می‌باشد. شاخص سطح برگ در بوته‌های تحت تیمار با تنظیم‌کننده‌های رشد بهبود یافت (جدول ۴ و شکل ۱- ب). سایکوسل و سالیسیلیک اسید به‌ترتیب موجب افزایش ۴/۸ و ۱۰/۴ درصدی در شاخص سطح برگ شدند. تنظیم‌کننده‌های رشد نیز از طریق کاهش سرعت نمو و به تأخیر انداختن رسیدگی، سبب افزایش سطح برگ می‌شوند (۴۱). افزایش شاخص سطح برگ در پژوهش‌های پیشین در اثر تیمار با سایکوسل (۴۰) و سالیسیلیک اسید (۲۹) نیز مشخص شده است. رقم روشن دارای شاخص سطح برگ بیشتری نسبت به یاواروس بود. به‌طور معمول، شاخص سطح برگ بیشتر از ۴ برای دریافت کامل تابش خورشید کافی است (۱۲). تغییرات شاخص سطح برگ در رقم یاواروس تحت تأثیر تیمارها کمتر بود. هم‌چنین کمترین تفاوت‌ها در تیمار تنش شدید خشکی مشاهده شد (شکل ۱- ب) اگرچه سایکوسل و سالیسیلیک اسید اثر مثبتی بر شاخص سطح برگ هر دو رقم داشتند، لیکن، این افزایش در تیمارهای سالیسیلیک اسید و رقم روشن بیشتر بود. به دلیل نقش مهم سطح سبز برگ‌ها در فتوسنتز، شاخص سطح برگ مناسب برای تولید بهینه ماده خشک در گیاه ضروری است. در شرایط تنش خشکی، تنظیم‌کننده‌های رشد توانستند بخشی از افت ناشی از خشکی را تعدیل نمایند (شکل ۱- ب). این موضوع می‌تواند در تولید بیشتر مواد پرورده در شرایط تنش خشکی مفید باشد.

ب) صفات فیزیولوژیک

دمای اولیه و ثانویه سایه انداز

در آزمایش مزرعه‌ای، اثر تنظیم‌کننده رشد، رقم و برهمکنش تنظیم‌کننده- رقم در سطح احتمال ۱٪ و برهمکنش سه‌گانه در سطح احتمال ۵٪ بر دمای اولیه سایه انداز (مرحله ظهور سنبله) معنی‌دار گردید. هم‌چنین دمای ثانویه سایه انداز (اوایل مرحله شیری شدن دانه) تحت تأثیر معنی‌دار اثر تنظیم‌کننده رشد، رقم و تنش خشکی قرار گرفت. لیکن، هیچ‌کدام از برهمکنش‌ها بر دمای ثانویه سایه انداز تأثیرگذار نبود (جدول ۲). تنش خشکی، دمای اولیه سایه انداز را تغییر نداد. اما سبب افزایش معنی‌دار دمای ثانویه سایه انداز گردید. تنش‌های ملایم و شدید خشکی به‌ترتیب موجب ۱۴/۵ و ۳۰/۱ درصد افزایش دمای ثانویه سایه انداز نسبت به شاهد شدند (جدول ۴). اگرچه دمای اولیه سایه انداز ۲/۸٪ در تنش شدید نسبت به شاهد بیشتر بود، لیکن، این تفاوت معنی‌دار نشد. این موضوع می‌تواند به دلیل کوتاه بودن فاصله زمانی بین اعمال تنش شدید با دمای اولیه سایه انداز (مرحله اول اندازه‌گیری) باشد. اندازه‌گیری دمای سایه انداز در طول دوره زندگی گیاه می‌تواند معیاری برای تحمل به خشکی و هم‌چنین شاخصی برای استفاده بهتر از آب مورد استفاده قرار گیرد (۱). پینتر و همکاران (۳۳) بیان کردند که وضیت رطوبتی خاک تأثیر مستقیمی بر دمای سایه انداز گندم دارد، و این تفاوت با تشدید تنش خشکی افزایش می‌یابد. سایر پژوهشگران در مورد نقش تنش خشکی در افزایش دمای سایه انداز نیز نتایج مشابهی گرفتند (۱۷ و ۳۱). در تیمار آبیاری مطلوب، تفاوت بین دمای اولیه و ثانویه سایه انداز کم بود. اما در تیمارهای تنش خشکی، دمای ثانویه به میزان قابل توجهی بیشتر از دمای اولیه بود (شکل‌های ۳- الف و ۳- ب). این روند در مورد ارقام نیز مشابه بود. تفاوت بین ارقام یاواروس و روشن در دمای ثانویه بیشتر از دمای اولیه بود.

اگرچه تنش خشکی فقط بر دمای ثانویه سایه انداز اثر معنی‌دار داشت، اما اثر تنظیم‌کننده رشد بر دمای اولیه و ثانویه سایه انداز معنی‌دار شد (جدول ۲). بیشترین و کمترین دمای سایه انداز به‌ترتیب در تیمارهای شاهد و محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید به‌دست آمد و تفاوت بین سالیسیلیک اسید و سایکوسل معنی‌دار بود. تأثیر هر دو تنظیم‌کننده رشد بر دمای ثانویه بیشتر از دمای اولیه سایه انداز بود (جدول ۴). سالیسیلیک اسید موجب کاهش ۷/۵ درصدی دمای اولیه و کاهش ۲۱/۹ درصدی دمای ثانویه سایه انداز گردید. این مقادیر برای سایکوسل به‌ترتیب در حدود ۴/۷ و ۱۵/۲ درصد بود.



شکل ۳. تأثیر سایکوسل (CCC) و سالیسیلیک اسید (SA) بر دمای اولیه سایه انداز (الف)، دمای ثانویه سایه انداز (ب)، محتوای پرولین (ج) و پروتئین (د) تحت شرایط آبیاری مطلوب (Non-stress)، تنش ملایم (MD) و تنش شدید (SD) خشکی در دو رقم گندم در مزرعه. علامتI در هر ستون، خطای استاندارد است.

تفاوت بین اثر سایکوسل و سالیسیلیک اسید می‌تواند به دلیل تأثیر بیشتر سالیسیلیک اسید در افزایش ارتفاع گیاه و شاخص سطح برگ و هم‌چنین افزایش رشد و عملکرد بیولوژیک باشد.

کاهش دما در اثر کاربرد سایکوسل را می‌توان به نقش آن در افزایش دوره سبزمانی برگ و افزایش میزان سبزینگی برگ نسبت داد (۱۴، ۳۴ و ۴۰). تفاوت بین دمای ثانویه سایه انداز تیمار شاهد با تنظیم‌کننده‌های رشد در شرایط تنش خشکی نسبت به شرایط بدون تنش بیشتر بود. در شرایط تنش، تنظیم‌کننده‌های رشد اثر کاهنده بیشتری بر دمای سایه انداز بروز دادند (شکل ۳- ب). در بین ارقام، یاواروس دارای دمای سایه انداز بیشتری نسبت به رقم روشن بود (جدول ۴). این تفاوت می‌تواند به دلیل تفاوت ارتفاع دو رقم باشد. روشن با ارتفاع بیشتر، به دلیل سایه اندازی و پوشش بهتر سایه انداز، دارای دمای کمتری بود. تفاوت بین دمای سایه انداز ارقام روشن و یاواروس، در شرایط تنش خشکی نسبت به شاهد افزایش یافت. الدرفسی و مورگان (۱) بیان کردند که ارقام گندم در شرایط آبیاری یکسان اختلاف معنی‌داری از نظر دمای سایه انداز نداشتند. لیکن با اعمال تنش، بین ارقام گندم تفاوت معنی‌داری به وجود آمد. پینتر و همکاران (۳۳) گزارش کردند که ارقام با دمای سایه انداز کمتر میزان فتوسنتز بیشتری دارند. این موضوع را می‌توان به روابط آبی و تبخیر و تعرق نسبت داد (۱۷). بنابراین، رقم روشن می‌تواند ظرفیت فتوسنتزی زیادتری داشته باشد. هر دو تنظیم‌کننده رشد سبب کاهش دمای سایه انداز شدند، ولی اثر سالیسیلیک اسید بیشتر بود. با توجه به

نقش کم بودن دمای سایه انداز در افزایش میزان فتوسنتز و مصرف بهتر آب، می‌توان اثر مثبت سالیسیلیک اسید بر عملکرد دانه را به این موضوع نسبت داد. کم بودن دمای سایه انداز در رقم روشن نسبت به رقم یاواروس می‌تواند نشان‌دهنده این موضوع باشد که رقم روشن دارای پتانسیل بیشتر برای انجام حداکثر فتوسنتز است. هم‌چنین با توجه به نقش دمای سایه انداز در تحمل بیشتر کاهش رطوبت خاک، به نظر می‌رسد هر دو تنظیم‌کننده رشد مقاومت به خشکی را در گیاه افزایش دادند.

شاخص محتوای کلروفیل‌متر

نتایج تجزیه واریانس آزمایش مزرعه‌ای نشان داد که تنش خشکی، تنظیم‌کننده رشد، رقم و برهمکنش تنش- تنظیم‌کننده در سطح احتمال ۱٪ و هم‌چنین اثر برهمکنش تنش- رقم در سطح احتمال ۵٪ بر شاخص محتوای کلروفیل‌متر (عدد اسپاد) معنی‌دار گردید (جدول ۲). در گلخانه نیز همه آثار اصلی و برهمکنش‌ها، بجز برهمکنش تنظیم‌کننده رشد- رقم و برهمکنش سه‌گانه، در سطح ۱٪ بر شاخص محتوای کلروفیل‌متر معنی‌دار بود (جدول ۳). تنش خشکی سبب افزایش شاخص دستگاه کلروفیل‌متر گردید. تفاوت بین تنش‌های خشکی ملایم و شدید معنی‌دار بود (جداول ۴ و ۵). تنش‌های خشکی ملایم و شدید به‌طور میانگین در مزرعه به‌ترتیب سبب افزایش ۳۱/۵ و ۵۳/۷ درصدی و در گلخانه افزایش ۶۱/۳ و ۹۵/۲ درصدی شاخص محتوای کلروفیل برگ پرچم شدند. روند تغییرات عدد کلروفیل‌متر تحت تأثیر سالیسیلیک اسید و سایکوسل در مزرعه و گلخانه مشابه بود. تنظیم‌کننده‌های رشد میزان شاخص کلروفیل را کاهش دادند (جداول ۴ و ۵). در شرایط آبیاری مطلوب، تفاوتی بین بوته‌های گندم شاهد و تیمار شده با تنظیم‌کننده‌های رشد از نظر میزان کلروفیل نبود. اما با اعمال تنش، بین تیمارها تفاوت‌های معنی‌داری به وجود آمد (شکل‌های ۱- د و ۲- ب). کلروفیل رنگدانه‌ای است که مسؤلیت اصلی آن دریافت انرژی نور برای استفاده در فتوسنتز است (۱۴). تغییرات میزان کلروفیل اندازه‌گیری شده با شدت تنش خشکی با یافته‌های مجیدیان و همکاران (۲۸) و بریدمییر (۹) مطابقت دارد. اثر تنظیم‌کننده‌های رشد می‌تواند به‌صورت تأثیر بر سبزمانی برگ بر کلروفیل برگ بوته‌های گندم باشد (۳۴). در بین ارقام در آزمایش مزرعه‌ای، میزان شاخص کلروفیل در رقم روشن کمتر از رقم یاواروس بود (جدول ۴)، هرچند در گلخانه تفاوت معنی‌داری دیده نشد (جدول ۵). تفاوت بین این دو رقم در شرایط تنش، به ویژه تنش شدید، نسبت به شرایط بدون تنش بیشتر بود (شکل‌های ۱- د و ۲- ب). با توجه به رابطه شاخص کلروفیل‌متر با تنش خشکی، به نظر می‌رسد که رقم روشن دارای حساسیت بیشتری به تنش خشکی باشد.

بین میزان کلروفیل با نیتروژن دانه رابطه مثبت و مستقیمی وجود دارد (۲۸). بنابراین، با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان گفت احتمالاً بیشترین درصد نیتروژن دانه در تیمارهای تنش خشکی به‌دست آید. بریدمییر (۹) گزارش کرد که شاخص کلروفیل‌متر در شرایط تنش خشکی نسبت به شرایط مطلوب بیشتر بود. وی دلیل این افزایش را اثر بیشتر تنش خشکی بر تولید ماده خشک نسبت به جذب نیتروژن دانست. بنابراین در برگ‌های تحت تنش، غلظت نیتروژن بیشتر بوده و در نتیجه کلروفیل در برگ‌های گیاه در تیمار تنش خشکی مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، با مطالعه ارتباط بین رشد بوته و اعداد کلروفیل‌متر در شرایط تنش، رابطه معکوسی بین رشد و شاخص کلروفیل‌متر به‌دست آمد، که با نتایج پژوهشگران پیشین (۵، ۹ و ۲۸) مطابقت داشت. هر دو تنظیم‌کننده رشد توانستند بخشی از اثر افزاینده تنش خشکی بر شاخص محتوای کلروفیل‌متر را تعدیل نمایند. به‌طور میانگین، سایکوسل و سالیسیلیک اسید شاخص محتوای کلروفیل‌متر را به‌ترتیب ۱۴/۵ و ۱۱/۶ درصد در مزرعه و ۱۲/۱ و ۱۱/۶درصد در گلخانه کاهش دادند، که بیشتر این اثرها در شرایط تنش خشکی اعمال شد (شکل‌های ۱- د و ۲- ب).

محتوای پرولین آزاد

نتایج تجزیه واریانس آزمایش مزرعه‌ای نشان داد که همه اثرهای اصلی و برهمکنش‌ها، به‌جز اثر برهمکنش تنش خشکی- رقم، در سطح ۱٪ بر محتوای پرولین آزاد معنی‌دار بود (جدول ۲). در شرایط آزمایش گلخانه‌ای نیز محتوای پرولین آزاد تحت تأثیر معنی‌دار اثر تنش خشکی در سطح احتمال ۱٪، تنظیم‌کننده رشد در سطح احتمال ۵٪، برهمکنش تنش خشکی- رقم در سطح احتمال ۱٪ و اثر برهمکنش سه‌گانه در سطح احتمال ۱٪ قرار گرفت (جدول ۳). تنش خشکی در هر دو آزمایش موجب افزایش محتوای پرولین آزاد گردید. در شرایط مزرعه‌ای، میزان این افزایش به شدت تنش وابسته بود. به‌طوری‌که بیشترین و کمترین محتوای پرولین به‌ترتیب در تیمارهای تنش شدید خشکی و شاهد مشاهده گردید (جدول ۴). شدت افزایش پرولین در این شرایط در اثر تنش خشکی به‌طور قابل توجهی بیشتر بود. به‌طوری‌که تنش‌های ملایم و شدید خشکی به‌ترتیب سبب ۷۳/۱ و ۱۳۱/۱ درصد افزایش در محتوای پرولین گردیدند. در شرایط گلخانه‌ای، بیشترین محتوای پرولین آزاد در تنش ملایم خشکی به‌دست آمد. تنش شدید محتوای پرولین را کاهش داد. لیکن در این تیمار محتوای پرولین همچنان نسبت به تیمار شاهد بیشتر بود (جدول ۵). میزان افزایش محتوای پرولین آزاد در تنش‌های ملایم و شدید ۱۶۴/۲ و ۷۳/۶ درصد نسبت به شاهد بود. بیشتر بودن میزان پرولین آزاد در تنش ملایم نسبت به تنش شدید در شرایط گلخانه‌ای می‌تواند به این دلیل باشد که در گلخانه، به دلیل وجود محدودیت برای رشد و توسعه ریشه در گلدان‌ها، قطع آبیاری از مرحله برجستگی دوگانه (به عنوان تنش شدید) موجب ایجاد تنش بسیار شدید و آسیب به سنتز پرولین گردیده است. ولی قطع آبیاری از مرحله گل‌دهی (به عنوان تنش ملایم) موجب تحریک شدیدتر سنتز پرولین گردید.

تنش‌های غیرزنده مثل خشکی و شوری، که اغلب باعث کاهش پتانسیل آب در سلول می‌شوند، منجر به تجمع قابل توجهی در پرولین در گیاهان می‌گردند (۷ و ۳۲). تنش شدید خشکی در مزرعه باعث افزایش بیشتر محتوای پرولین شد. این موضوع می‌تواند به دلیل تحریک بیشتر پیش ساخت پرولین (Glutamate-1-semialdehyde) در کاهش‌های زیادتر پتانسیل اسمزی باشد؛ موضوعی که پیشتر توسط برخی پژوهشگران گزارش شده است (۳۰ و ۳۴). تیمار تنش شدید خشکی در گلخانه، به دلیل کم بودن توانایی بوته‌های گندم برای تحمل خشکی، موجب کاهش پرولین شد. این موضوع نیز احتمالاً به دلیل تحت تأثیر قرار گرفتن سنتز پرولین به‌وسیله خشکی بوده است (۳، ۳۴ و ۳۸). در هر دو آزمایش گلخانه و مزرعه، تنظیم‌کننده‌های رشد سبب بهبود محتوای پرولین آزاد شدند. در مزرعه، سایکوسل افزایش قابل توجهی در محتوای پرولین داشت (جدول ۴). این میزان نسبت به شاهد بیشتر از ۵۷٪ بود. در گلخانه، سایکوسل و سالیسیلیک اسید به‌ترتیب سبب افزایش معنی‌دار ۷۳/۳ و ۷۳/۲ درصدی محتوای پرولین آزاد نسبت به شاهد شدند که با هم تفاوت معنی‌داری نداشتند (جدول ۵). پژوهشگران این افزایش‌ها را به نقش تنظیم‌کننده‌های رشد در فرآیند تولید پرولین نسبت داده‌اند (۴ و ۳۴). این نتایج با نتایج پژوهشگران پیشین مطابقت دارد (۱۶ و ۲۶). این مشاهدات نشان‌دهنده نقش مثبت تنظیم‌کننده‌های رشد در تحمل به خشکی است. این موضوع توسط سایر پژوهشگران نیز نشان داده شده است (۴، ۲۹ و ۳۵).

این افزایش محتوای پرولین در اثر تنش خشکی و تنظیم‌کننده‌های رشد در هر دو رقم مشاهده شد (شکل ۳- ج). در مزرعه، میزان پرولین رقم یاواروس بیشتر بود (جدول ۴)، لیکن در گلخانه تفاوت معنی‌داری بین ارقام مشاهده نشد (جدول ۵). برخلاف سایر صفات بررسی شده، یاواروس از نظر محتوای پرولین پاسخ بیشتری به تنش خشکی و تنظیم‌کننده‌های رشد نشان داد (شکل ۳- ج). به‌طور کلی، بیشترین محتوای پرولین آزاد در بوته‌های گندمی اندازه‌گیری شد که در شرایط تنش شدید رشد کردند و تحت تیمار شاخساره‌ای سایکوسل قرار گرفتند (شکل ۳- ج). تجمع بیشتر پرولین می‌تواند نشان‌دهنده مقاومت بیشتر رقم به تنش‌ها، به‌ویژه تنش خشکی، باشد (۴، ۱۴ و ۳۲).

پروتئین محلول کل

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که در مزرعه، پروتئین محلول کل فقط تحت تأثیر معنی‌دار تنش خشکی و تنظیم‌کننده رشد در سطح احتمال ۱٪ قرار گرفت (جدول ۲). در گلخانه نیز اثر تنش خشکی در سطح احتمال ۵٪ و هم‌چنین اثرهای تنظیم‌کننده رشد و برهمکنش تنش خشکی- تنظیم‌کننده رشد در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۳). در هر دو شرایط آزمایشی مزرعه‌ای و گلخانه‌ای، تنش خشکی موجب افزایش میزان پروتئین محلول کل شد (جداول ۴ و ۵). بیشترین میزان پروتئین در مزرعه و گلخانه به‌ترتیب در تنش شدید (۱۲/۸۱ میلی‌گرم در گرم) و تنش ملایم خشکی (۱۰/۱۱ میلی‌گرم در گرم) به‌دست آمد. در مزرعه، کمترین میزان پروتئین در تیمار شاهد به‌دست آمد که از نظر آماری به‌طور معنی‌داری از تنش ملایم خشکی کمتر بود. لیکن در گلخانه، میزان پروتئین در تیمار تنش شدید خشکی حداقل بود (جدول ۵). این موضوع احتمالاً به دلیل تخریب اسیدآمینه‌ها در اثر تنش شدید خشکی می‌باشد (۳ و ۷). تنظیم‌کننده‌های رشد اثر مثبت و معنی‌داری بر میزان پروتئین داشتند. به‌طوری‌که تیمارهای کاربرد شاخساره‌ای سالیسیلیک اسید در هر دو آزمایش بیشترین میزان پروتئین را تولید کردند. اثر سایکوسل در گلخانه بر افزایش میزان پروتئین قابل توجه بود (جدول ۵). اثر تنظیم‌کننده‌های رشد بر افزایش پروتئین محلول کل توسط پژوهشگران پیشین نیز نشان داده شده است (۳ و ۴۲).

از نظر میزان پروتئین بین دو رقم تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. در تنش‌های شدید، کمترین تفاوت‌ها بین تیمارها مشاهده شد (شکل ۳- د). در هر دو آزمایش، نتایج نشان داد که تنظیم‌کننده‌های رشد موجب افزایش پروتئین محلول کل در هر دو رقم می‌گردند که این افزایش احتمالاً به دلیل افزایش سبزمانی برگ است. به دلیل نقش پروتئین‌ها در تحمل گیاهان به تنش‌ها، مثل تنش خشکی (۳۲)، می‌توان گفت که تنظیم‌کننده‌ها با افزایش میزان پروتئین می‌توانند نقش حمایتی برای گیاه در برابر تنش خشکی داشته باشند.

نتیجه‌گیری

اگرچه تنش خشکی موجب کاهش سطح برگ، ارتفاع گیاه و طول دم گل‌آذین و افزایش دمای اولیه و ثانویه، شاخص محتوای کلروفیل، پرولین آزاد و پروتئین محلول در هر دو رقم شد، لیکن ،این تغییرات در رقم روشن به مراتب بیشتر بود. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده مقاومت بیشتر این رقم به تنش خشکی باشد. از سوی دیگر، هرچند کاربرد سالیسیلیک اسید و سایکوسل موجب بهبود رشد در شرایط آبیاری مطلوب و تنش خشکی شدند؛ لیکن، کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد در هر دو رقم با تعدیل اثر تنش خشکی همراه بود. با توجه به نقش تعدیل کنندگی تنظیم‌کننده‌های رشد در آثار منفی تنش خشکی، می‌توان کاربرد سایکوسل با غلظت ۲ تا ۳ گرم در لیتر و سالیسیلیک اسید با غلظت ۷ تا ۱۰ میلی‌مولار را برای شرایط مشابه با پژوهش حاضر توصیه کرد. کاربرد همزمان این تنظیم کننده‌ها به همراه آفت‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها و سایر مواد شیمیایی، اقتصادی بودن آنها را توجیه خواهد کرد.

منابع مورد استفاده

1. Alderfasi, A. and J. Morgan. 1998. Use of canopy temperature as an indicator for water use efficiency and yield productivity in wheat. *Saudi Journal of Biological Science* 5: 57-71.
2. Araus, J. L., A. Febrero, M. Catala, M. Molist, J. Voltas and I. Romagosa. 1999. Crop water availability in early agriculture: Evidence from carbon isotope discrimination of seeds from a tenth millennium BP site on the Euphrates. *Global Change Biology* 5: 233-244.
3. Ashraf, M. and M. R. Foolad. 2007. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany* 59: 206-216.
4. Ashraf, M., N. A. Akram, R. N. Arteca and M. R. Foolad. 2010. The physiological, biochemical and molecular roles of brassinosteroids and salicylic acid in plant processes and salt tolerance. *Critical Review in Plant Science* 29:

162-190.
5. Barraclough, P. B., and J. Kyle. 2001. Effect of water stress on chlorophyll meter reading in winter wheat. PP. 722-723. *In:* Horst, W. J. (Ed.), Plant Nutrition-Food Security and Sustainability of Agro-ecosystems. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
6. Bates, L. S., R. P. Waldren and I. D. Teare. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil* 39: 205-207.
7. Bartels, D. and R. Sunkar. 2005. Drought and salt tolerance in plants. *Critical Review in Plant Science* 24: 23-58.
8. Bradford, M. M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantites of protein utilizing the principles of protein dyebinding. *Biochemistry* 72: 248-254.
9. Bredemeier, C. 2005. Laser-induced chlorophyll fluorescence sensing as a tool for site-specific nitrogen fertilizer evaluation under controlled environmental and field conditions in wheat and maize. PhD. Thesis, Technical University of Munich, Germany, 219 p.
10. Cartwright, P. M., and S. R. Waddington. 1982. Growth regulators and grain yield in spring cereals. PP. 61-70. *In:* Hawkins, A. F. and B. Jeffcoat (Eds.), Opportunities for Manipulation of Cereal Productivity, Monograph 7, British Plant Growth Regulator Group, Wantage.
11. Chaves, M. M., J. P. Maroco and J. S. Pereira. 2003. Understanding plant responses to drought- from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology* 330: 239-264.
12. Emam, Y. 2007. Cereal Production. 3rd Ed., Shiraz University Press, Shiraz, Iran, 190 p. (In Farsi).
13. Emam, Y. and M. Dastfal. 1997. Above and below ground responses of winter barely plants to chlormequat in moist and drying soil. *Crop Research* 14: 457- 470.
14. Emam Y. and M. J. Seghatoeslami. 2005. Crop Yield, Physiology and Processes. Shiraz University Press, Shiraz, Iran, 599 p. (In Farsi).
15. FAO. 2010. Quarterly Bulletin of Statistics. Rome, Italy.
16. Farooq, U. and A. Bano .2006. Effect of abscisic acid and chlorocholine chloride on nodulation and biochemical content of *Vigna raditata* L., under water stress. *Pakistan Journal of Botany* 38: 1511-1518.
17. Gardner, B., B. Blad and G. Wilson. 1986. Characterizing corn moisture stress sensitivity using canopy temperature measurements. *Remote Sensing and Environment* 19: 207-211.
18. Hayat, S. and A. Ahmad. 2007. Salicylic acid- A Plant Hormone. Springer, 410 p.
19. Humphirse, E. C. 1968. CCC and cereals. *Field Crop* 21: 91-99.
20. Hussein, M. M., L. K. Balbaa and M. S. Gaballah. 2007. Salicylic acid and salinity effects on growth of maize plants. *Research Journal of Agricultural and Biological Science* 3: 321-328.
21. Kaydan, D., M. Yagmur and N. Okut. 2006. Effects of salicylic acid on the growth and some physiological characters in salt stressed wheat (*Triticum aestivum* L.). *Tarim Bilimleri Dergisi* 13: 114-119.
22. Khajeh, N., Y. Emam, H. Pakneyat and, A. A. Kamgarhaghighi. 2008. Interaction of plant growth regulator chlormequat chloride (CCC) and drought stress on growth and grain yield of three barley cultivars (*Hordeum vulgare* L.). *Iranian Field Crop Science Journal* 39: 215-224.
23. Khan, W., B. Prithivira and A. Smith. 2003. Photosynthetic responses of corn and soybean to foliar application of salicylates. *Journal of Plant Physiology* 160: 485-492.
24. Khodary, S. E. A. 2004. Effect of salicylic acid on the growth, photosynthesis and carbohydrate metabolism in salt-stressed maize plants. *International Journal of Agriculture and Biology* 6: 5-8.
25. Maibangsa, S., M. Thangaraj and S. Roy. 2000. Effect of brassinosteriod and salicylic acid on rice grown under low irradiance condition. *Indian Journal of Agricultural Research* 34: 258-260.
26. Maiti, R. K., S. Moreno-Limon and P. Wesche-Ebeling. 2000. Responses of some crops to various abiotic stress factors and its physiological and biochemical basis of resistances. *Agricultural Reviews* 21: 155-167.
27. Majer, P., L. Sass, T. Lelley, L. Cseuz, I. Vass, D. Dudits and J. Pauk. 2008. Testing drought tolerance of wheat by a complex stress diagnostic system installed in greenhouse. *Acta Biologica Szegediensis* 52: 97-100.
28. Majidian, M., A. Ghalavand, A. A. Kamgarhaghighi and N. Karimian. 2008. Effect of drought stress, nitrogen fertilization and biofertilizer on SPAD index, grain yield and yield components of maize SC704. *Iranian Crop Science* 10: 303-330.
29. Metwally, A., A. Finkmeier, M. George and K. Dietz. 2003. Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedling. *Plant Physiology* 1321: 272-281.
30. Molnar I., L. Gaspar, E. Sarvari, S. Dulai, B. Haffman, L. M. Molnar and G. Galiba. 2004. Physiological and morphological response to water stress in *Aegilops biuncialis* a *Triticum aestivum* genotype with differing tolerance to drought. *Functional Plant Biology* 31: 1149-1159.
31. Mtui, T.A., Kanemasu, E.T. and Wassom, C. 1981. Canopy temperatures, water use and water use efficiency of corn genotypes. *Agronomy Journal* 73: 639-643.
32. Pessarakli, M. 2001. Handbook of Plant and Crop Physiology. 2nd ed., Marcel Dekker Inc., New York, 997 p.

33. Pinter, P. J. J., G. Zipoli, R. J. Reginato, R. D. Jackson, S. B. Idso and J. P. Hohman. 1990. Canopy temperature as an indicator of differential water use and yield performance among wheat cultivars. *Agricultural Water Management* 18: 35-48.
34. Pirasteh-Anosheh, H. and Y. Emam. 2010. Effect of plant growth regulators on total protein, proline content and antioxidant enzymes in two wheat cultivars under drought stress conditions. The 1st Proteomics Congress, Shiraz, Iran, p. 78. (In Farsi).
35. Rajala, A. 2003. Plant Growth Regulators to Manipulated Cereal Growth in Northern Growing Conditions. PhD Thesis, University of Helsinki, Finland.
36. Rajala, A. 2004. Plant growth regulators to manipulate oat stands. *Agriculture and Food Science* 13: 186-197.
37. Rajala, A. and P. P. Sainio. 2001. Plant growth regulator effects on spring cereal root and shoot growth. *Agronomy Journal* 93: 936-943.
38. Richards, R. A. 1996. Defining selection criteria to improve yield under drought. *Plant Growth Regulator* 20: 57-166.
39. Sainio, P. P. and A. Rajala. 2001. Chlormequat chloride and ethephon affect growth and yield formation of conventional, naked and dwarf oat. *Agriculture and Food Science* 10: 165-174.
40. Shekoofa, A. and Y. Emam. 2008. Effect of nitrogen fertilization and plant growth regulators on yield of wheat cv. Shiraz. *Journal of Agricultural Science and Technology* 10: 101-108.
41. Sliman, Z. T., Y. A. Refay and KH. A. Mostafa. 1994. Effects of cycocel rate and time of application on performance of two bread wheat cultivars. King Saud University, *Research Bulletin* 44: 5-19.
42. Tasgin, E., O. Atici, B. Nalbantoglou and L. P. Popova. 2006. Effects of salicylic acid and cold treatments on protein levels and on the activities of antioxidants enzymes in the apoplast of winter wheat leaves. *Phytochemistry* 67: 710-715.