

مقاله پژوهشی

تأثیر تنش خشکی بر کاهش رشد و زیست توده در تعدادی از ژنوتیپ پایه‌های هیبرید

سیب

داریوش آتشکار^{۱*}، مریم دودانگه‌بالاخانی^۲ و امیرعباس تقی‌زاده^۳

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۱۹ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۲)

چکیده

به‌منظور انتخاب پایه‌های مقاوم به تنش خشکی و تشخیص مکانیزم تحمل به تنش خشکی در آنها، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بر گیاهان گلدانی یک‌ساله انجام گرفت. در این آزمایش از ۱۱ ژنوتیپ پایه هیبرید سیب شامل: AR1 تا AR11 و پایه رویشی MM111 به‌عنوان شاهد متحمل، با کاربرد دو سطح آبیاری به میزان ۴۰ و ۸۰٪ آب قابل استفاده در خاک انجام گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد، در شرایط تنش خشکی ژنوتیپ پایه‌های AR8، AR10 و AR11 با کم‌ترین سرعت رشد و بیوماس خارج از خاک، اما با طول مناسب ریشه و بیشترین نسبت وزن خشک ریشه به شاخساره، بیشترین شباهت به پایه متحمل به تنش خشکی MM111 داشتند. با در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی مورد ارزیابی در پژوهش حاضر، می‌توان بیان داشت که ژنوتیپ پایه‌های AR8، AR10 و AR11 با کاهش سطح تعرق‌کننده، بیوماس خارج از خاک و داشتن سیستم ریشه‌ای کم حجم اما عمیق و استخوانی و افزایش نسبت وزن ریشه به شاخساره از مکانیزم اجتناب از خشکی بهره می‌برند.

کلمات کلیدی: آنزیم، تنش خشکی، رشد، ریشه، سیب، فتوسنتز

۱- استادیار پژوهشی پژوهشکده میوه‌های معتدله و سردسیری، موسسه تحقیقات علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

۲- کارشناس پژوهشکده میوه‌های معتدله و سردسیری، موسسه تحقیقات علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

۳- کارشناس پژوهشکده میوه‌های معتدله و سردسیری، موسسه تحقیقات علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

* پست الکترونیک: datashkar2002@yahoo.com

مقدمه

اجتناب از خشکی شامل مکانیزم‌هایی می‌باشد که از دست رفتن آب از گیاه را به واسطه کنترل روزنه‌ای و تعرق کاهش داده و میزان جذب آب را با گسترش و عمق ریشه بهبود می‌بخشند. توانایی یک گیاه در بالا نگه‌داشتن پتانسیل آب و نگهداری حالت‌های آزاد آب در نسوج خود در طول دوره خشکی را اجتناب از خشکی می‌گویند (وان‌دام^۱، ۱۹۹۱). گیاهان با توانایی اجتناب از خشکی ممکن است در پاسخ به تنش خشکی خصوصیات متفاوتی نظیر افزایش بیوماس، طول، تراکم، انعطاف‌پذیری و گسترش ریشه به اعماق پروفیل خاک و یا کاهش در رشد و سطح برگ و افزایش در تعداد کرک، لوله‌ای شدن برگ، ایجاد واکس بر روی برگ‌ها و تغییرات در میزان باز بودن روزنه را به‌عنوان، مهم‌ترین روش‌های اجتناب از خشکی از خود بروز دهند (کافی و همکاران، ۱۳۸۸). کیفیت ریشه‌ها یعنی ساختمان و توزیع آن نسبت به تعداد آن مهم‌تر است. برای تحمل به خشکی، گزینش گیاهان دارای سیستم ریشه‌ای عمیق کارآمد در تحمل به خشکی اهمیت دارد. داشتن ریشه‌های عمیق و ضخیم به گیاه اجازه می‌دهد که آب را از اعماق پایین جذب نمایند و مقاوم به خشکی شوند (فاروق^۲ و همکاران، ۲۰۰۹). تنش خشکی باعث از بین رفتن ریشه‌های کم‌عمق و افزایش ریشه‌های عمیق می‌گردد، همبستگی مثبتی بین نسبت بالای وزن ریشه به اندام هوایی و عملکرد بالا در شرایط تنش خشکی گزارش شده است (تایز و زایگر^۳، ۲۰۰۶). ساختار ریشه ویژگی بسیار مهمی در تحمل به تنش‌های مختلف به شمار می‌رود و در پایه‌های مختلف متفاوت است (ما^۴، ۲۰۱۳). شناخت میزان نفوذ و توزیع سیستم ریشه در پایه‌های رویشی فاکتور مهمی در گزینش پایه‌های رویشی سیب است (فرناندز^۵ و همکاران، ۱۹۹۵). اگرچه توزیع ریشه در خاک تأثیر قابل توجهی بر ماندگاری درخت پیوندی دارد، اما اطلاعات اندکی در خصوص ویژگی‌های فیزیولوژیکی مربوط به عمق و نفوذ آن در خاک وجود دارد که آیا ژنتیکی و یا متأثر از بافت خاک است. عمق نفوذ ریشه در خاک به عوامل زیادی بستگی دارد. بافت و ساختمان

خاک، دسترسی ریشه به آب، تراکم درختان، طول و زاویه ریشه‌های جانبی نسبت به محور اصلی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در این خصوص هستند (آراکی و ایجیما^۶، ۲۰۰۱؛ یوگا^۷ و همکاران، ۲۰۱۳). طول ریشه تعیین‌کننده عمق نفوذ ریشه در پایه بوده و در بعضی پایه‌ها باعث افزایش ارتفاع درخت پیوند شده می‌شود (شائو^۸ و همکاران، ۱۹۹۸). قابلیت سیستم ریشه برای سازگاری با محیط اطراف آن شاخص بسیار مهمی در انتخاب پایه به شمار می‌رود (فرناندز و همکاران، ۱۹۹۵). بهترین راهکار برای مقابله با خاک‌های خشک و آهکی استفاده از پایه‌های متحمل است (تونی^۹ و همکاران، ۲۰۰۰). از معیارهای اصلی در اصلاح پایه‌های رویشی سیب، بهبود ویژگی‌های خزانه‌ای، باغی و تحمل به تنش‌های زنده و غیرزنده است (زاگوجا^{۱۰} و همکاران، ۱۹۸۹؛ جانسون^{۱۱}، ۲۰۰۰). شناخت ساز و کارهای مقاومت برای گزینش پایه‌های سیب متحمل به تنش خشکی اهمیت فراوانی دارد، پایه‌های متحمل می‌توانند تحمل به تنش خشکی را به رقم پیوندک انتقال دهند (ساکالوسکیت^{۱۲} و همکاران، ۲۰۰۶) پایه‌های رویشی پاکوتاه کننده به دلیل داشتن ریشه‌های کم‌عمق، عموماً استقرار ضعیفی در خاک داشته و حساس به تنش خشکی هستند در صورتی که ریشه در پایه‌های پابلند رشد و سازگاری بهتری در خاک دارند (دی‌واپو^{۱۳} و همکاران، ۲۰۰۹). بررسی تأثیر تنش خشکی بر سیب رقم امپریال گالا روی سه پایه رویشی Mark، M9EMLA و MM111 نشان داد که بیش‌ترین کاهش زیست‌توده مربوط به پایه Mark با ۳۴ درصد کاهش و کم‌ترین کاهش بیوماس در پایه M9 EMLA با ۱۶ درصد کاهش ثبت شد. بر این اساس پایه M9 به‌عنوان پایه متحمل به تنش خشکی گزارش شد (فرناندز و همکاران، ۱۹۹۵). در بررسی تأثیر تنش خشکی بر زیست‌توده کل ۱۰ نوع پایه رویشی سیب مشخص شد که واکنش پایه‌های مختلف نسبت به تنش خشکی متفاوت بود و پایه‌هایی که تحت تنش زیست‌توده کل بیش‌تری تولید کردند نسبت به تنش خشکی متحمل‌ترند. در بین پایه‌های مورد آزمایش پایه‌های P22، B118 و P60 و پایه

8. Shao
9. Tony
10. Zagaja
11. Johnson
12. Sakalauskaitė
13. Di Vaio

1. Van Damme
2. Farooq
3. Taiz and Zeiger
4. Ma
5. Fernandez
6. Araki and Iijima
7. Uga

به منظور ارزیابی و مقایسه نتایج حاصل از تحقیقات در خصوص میزان تحمل به تنش خشکی با استفاده از شاخص‌های رشدی و ارتباط آن با مورفولوژی ریشه در ژنوتیپ پایه‌های هیبرید سیب انجام گرفته است.

مواد و روش‌ها

به‌منظور غربال‌گری تعدادی از پایه‌های هیبرید سیب حاصل از برنامه به‌نژادی پایه‌های رویشی سیب در ایران (آتشکار و همکاران، ۱۳۹۵) و انتخاب پایه یا پایه‌های مقاوم یا متحمل به تنش خشکی، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بر گیاهان گلدانی یک‌ساله در گلخانه و آزمایشگاه پژوهشکده میوه‌های معتدله و سردسیری، موسسه تحقیقات علوم باغبانی با شرایط کنترل شده نوری و دمایی انجام گرفت. در این آزمایش از ۱۱ ژنوتیپ پایه هیبرید سیب شامل: AR1 تا AR11 و پایه رویشی MM111 به‌عنوان شاهد متحمل استفاده شد (جدول ۱). برای این منظور در دی‌ماه، قلمه‌هایی به‌طول ۲۵ سانتی‌متر از این پایه‌ها تهیه و پس از تیمار با هورمون IBA با غلظت ۳۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در بستر پرلیت مجهز به پاگرم با دمای بستر ۲۱ درجه سانتی‌گراد در مدت زمان ۴۵ روز ریشه‌دار شدند. قلمه‌های ریشه‌دار شده ۴۵ روز بعد به گلدان‌هایی با قطر با طول ۲۵ سانتی‌متر و قطر دهانه ۳۰ سانتی‌متر حاوی بستر کاشت (خاک‌برگ، خاک، ماسه‌بادی و پیت‌ماس به نسبت ۱:۱:۱) انتقال داده شدند. پس از سه‌ماه رشد در شرایط نرمال، اعمال تنش خشکی روی گیاهان به طول ۶۰ سانتی‌متر و قطر ۱ سانتی‌متر با دو تیمار ۴۰ درصد (تنش خشکی) و ۸۰ درصد آب در دسترس خاک (شاهد) از اواسط تیرماه شروع شد و به‌مدت دو ماه به‌طول انجامید. به این صورت که ابتدا در آزمایشگاه تحقیقات خاک و آب درصد رطوبت خاک در شرایط ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی تعیین شد و وزن گلدان‌ها در شرایط ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی با توجه به وزن و بافت خاک آنها مشخص شد. با محاسبه مقدار وزنی آب گلدان‌ها در شرایط ۴۰ و ۸۰ آب قابل استفاده در خاک، تیمارهای رطوبتی و وزن کل گلدان‌ها در هر یک از این تیمارها با ملاحظه وزن گلدان و نهال داخل آن تعیین شد. گلدان‌ها به‌صورت منظم توزین شده و منطبق با کاهش وزن آنها، مقدار آب لازم اضافه شد تا محتوی آب در خاک گلدان‌ها در تیمارهای مختلف ثابت باقی بماند. پس از اعمال تیمارهای خشکی، در مهر ماه گیاهان با دقت از گلدان خارج شدند. سپس طول، عرض و سطح پهنک

بذری آنتونوکا نسبت به تنش خشکی مقاوم و پایه‌های M26، M9، P2 و B396 حساس گزارش شدند (ساکالوسکی و همکاران، ۲۰۰۶). در پژوهش‌های پیشین به اثبات رسید، کمترین کاهش در تبادلات روزنه‌ای و فتوسنتز تحت تنش خشکی در ژنوتیپ پایه‌های AR1، AR4، AR8 و AR11 و بیشترین عکس‌العمل منفی نسبت به تنش خشکی در ژنوتیپ پایه‌های AR3، AR6، AR7 و AR9 مشاهده شد که به‌عنوان دو گروه ژنوتیپ‌های متحمل و حساس به تنش خشکی دسته‌بندی می‌شوند. محتوی نسبی آب برگ در ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی، علی‌الرغم داشتن تعرق بیشتر به میزان کمتری کاهش یافت و همین امر میزان آماس برگ‌ها و شاخص‌های فتوسنتزی آن‌ها را بهبود داد. احتمالاً این ژنوتیپ‌ها با سیستم ریشه‌ای ویژه، توانایی جذب بیشتر آب از خاک را داشته و یا قدرت جذب و نگهداری آب بیشتری دارند (آتشکار و همکاران، ۱۳۹۷). تحت تنش خشکی پایه‌های سیب به لحاظ شاخص‌های فیزیولوژیک و زیست‌شیمیایی واکنش‌های متفاوتی نشان دادند، پایه‌های AR3، AR5، AR7 و AR1 با داشتن دست کم یکی از شاخص‌های حساسیت به تنش خشکی، شامل کاهش شاخص پایداری غشاء یاخته‌ای، کاهش ثبات در رنگدانه‌های فتوسنتزی و به دنبال آن کاهش فلورسنس کلروفیل، افزایش غلظت پرولین و مالون-دی‌آلدید، نسبت به شرایط آبیاری شاهد به‌عنوان پایه‌های حساس به خشکی شناسایی شدند (آتشکار و همکاران، ۱۳۹۹). در پژوهشی دیگر، ژنوتیپ پایه‌های هیبرید سیب براساس قدرت رشد به دو دسته کلی تقسیم شدند: ۱- ژنوتیپ‌های کم‌رشد (پاکوتاه) AR11، AR8 و AR4 که دارای کمترین بیوماس، کمترین سرعت رشد و بیشترین تراکم روزنه در واحد سطح برگ بودند و ۲- ژنوتیپ‌های پررشد AR1، AR3، AR6، AR7 و AR9 که دارای بیشترین بیوماس، بیشترین سرعت رشد و کمترین تراکم روزنه در واحد سطح برگ بودند. ژنوتیپ‌های کم‌رشد بیشترین نسبت وزن خشک ریشه به شاخساره را داشتند. گسترش رشد طولی ریشه با گسترش افقی رابطه عکس داشت. ژنوتیپ‌های AR1، AR5، AR4 و AR10 که گسترش طولی ریشه بیشتری نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها داشتند، گسترش افقی ریشه کمتری داشتند و ژنوتیپ پایه‌های AR3، AR8 و AR2 که گسترش طولی کمتری داشتند، گسترش افقی بیشتری داشتند (آتشکار و همکاران، ۱۳۹۹). این پژوهش

توزین شدند. نسبت وزن خشک ریشه به شاخساره و درصد رشد بیوماس تحت شرایط تنش خشکی نسبت به تیمار آبیاری شاهد نیز محاسبه شد. داده‌های ثبت شده با استفاده از نرم افزار SAS-9.1 تجزیه آماری و مقایسه میانگین اثر تیمارها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵٪ انجام گرفت و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار EXCEL استفاده شد.

برگ از طریق عکس‌برداری از برگ‌ها و به کمک نرم‌افزار آنالیز تصویر (Image J، نسخه 1.32) اندازه‌گیری و سطح برگ کل گیاه محاسبه شد. طول و عرض سیستم ریشه‌ای، وزن تر ریشه، ساقه و برگ اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک اندام‌ها، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون الکتریکی با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و پس از خشک شدن

جدول ۱- ژنوتیپ پایه‌های سیب مورد مطالعه و والدین آن‌ها.

ژنوتیپ پایه	والدین	شجره نامه
AR1	AZOP	حاصل از گرده‌افشانی آزاد رقم آرایش اصفهان
AR2	AZOP	حاصل از گرده‌افشانی آزاد رقم آرایش اصفهان
AR3	M9OP	حاصل از گرده‌افشانی آزاد پایه M9
AR4	M9OP	حاصل از گرده‌افشانی آزاد پایه M9
AR5	AZ×M9	هیبرید بین رقم آرایش به‌عنوان پایه مادری و M9 به‌عنوان پایه پدری
AR6	AZ×M9	هیبرید بین رقم آرایش به‌عنوان پایه مادری و M9 به‌عنوان پایه پدری
AR7	AZ×B9	هیبرید بین رقم آرایش به‌عنوان پایه مادری و B9 به‌عنوان پایه پدری
AR8	AZ×B9	هیبرید بین رقم آرایش به‌عنوان پایه مادری و B9 به‌عنوان پایه پدری
AR9	AZ×M27	هیبرید بین رقم آرایش به‌عنوان پایه مادری و M27 پایه پدری
AR10	AZ×M27	هیبرید بین رقم آرایش به‌عنوان پایه مادری و M27 پایه پدری
AR11	Morabaei×M9	هیبرید بین رقم مربایی به‌عنوان پایه مادری و M9 به‌عنوان پایه پدری
MM111	Northmspy×Merton793	هیبرید بین رقم Northm spy به‌عنوان پایه مادری و Merton793 به‌عنوان پایه پدری (۱۹۲۰)

نتایج و بحث

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، صفات رویشی شامل سطح برگ، وزن تر و خشک ریشه‌ها، عمق و گسترش ریشه به‌علاوه برخی متغیرهای زیست توده مانند وزن تر و خشک کل اندام هوایی، وزن تر و خشک برگ‌ها در بین ژنوتیپ پایه‌های هیبرید سیب، تنش خشکی و اثر متقابل ژنوتیپ‌های پایه رویشی و تنش خشکی اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد نشان دادند (جدول ۲).

وزن تر و خشک و سطح برگ‌ها

تأثیر تنش خشکی و نوع پایه بر وزن تر و خشک برگ و سطح برگ در سطح یک درصد معنی‌دار شد، اما اثر متقابل این دو متغیر غیرمعنی‌دار بود (جدول ۲). تنش خشکی باعث کاهش سطح، وزن تر و خشک برگ‌ها در ژنوتیپ پایه‌های سیب شد، اما پاسخ ژنوتیپ پایه‌ها نسبت به هم متفاوت بود. مقایسه میانگین سطح برگ در تیمار تنش خشکی نسبت به تیمار آبیاری شاهد نشان داد که ژنوتیپ پایه‌های AR6، AR8 و

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس تأثیر تنش خشکی بر صفات رویشی ژنوتیپ پایه‌های هیبرید سیب

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن تر برگ‌ها	وزن خشک برگ‌ها	سطح برگ	وزن تر ساقه و شاخه	وزن خشک ساقه و شاخه
پایه	۱۱	۸۶/۸۹**	۱۲/۵۱**	۳۳۱۳۸۲/۳۰**	۴۲۶/۸۹**	۱۰۶/۸۵**
سطح تنش	۱	۹۰۳/۹۰**	۸۷/۹۵**	۲۳۸۸۸۵۳/۵۳**	۱۷۶۷/۱۵**	۴۴۱/۰۴**
سطح تنش×پایه	۱۱	۱۳/۷۰ ^{ns}	۱/۶۶ ^{ns}	۷۴۷۹۸/۹۵ ^{ns}	۷۱/۱۹**	۲۰/۷۵**
تکرار	۲	۰/۵۱ ^{ns}	۰/۱۱ ^{ns}	۱۷۶۱۲/۲ ^{ns}	۶/۹۰ ^{ns}	۱/۳۶ ^{ns}
خطا	۴۶	۱۸/۴۱	۲/۵۵	۵۰۷۰۶/۵	۱۹/۰۳	۴۱/۵
ضریب تغییرات (درصد)		۲۲/۸۳	۲۳/۵۰	۲۴/۱۴	۱۸/۹۷	۲۰/۴۶

جدول ۲ (ادامه) - نتایج تجزیه واریانس تأثیر تنش خشکی بر صفات رویشی ژنوتیپ پایه‌های هیبرید سیب

منابع تغییرات	درجه آزادی	نسبت وزن خشک ریشه به شاخه	وزن خشک ریشه	وزن تر ریشه	گسترش افقی ریشه	گسترش عمودی ریشه
پایه	۱۱	۰/۲۲**	۶/۷۴**	۱۴۲/۷۰**	۷/۶۹ ^{ns}	۳۴۹/۵۸**
سطح تنش	۱	۰/۰۶*	۱۸۶/۵۶**	۳۲۴۴/۱۵**	۲۸۰/۰۵**	۱۹۸۴/۵۰**
سطح تنش × پایه	۱۱	۰/۰۳ ^{ns}	۵/۲۹*	۵۵/۱ ^{ns}	۱۵/۸۱**	۵۸/۰۴ ^{ns}
تکرار	۲	۰/۰۱ ^{ns}	۳/۴۲ ^{ns}	۸۶/۰۴ ^{ns}	۴/۸۸ ^{ns}	۲۰۹/۲۶ ^{ns}
خطای کل	۴۶	۰/۰۲	۲/۳۶	۳۴/۳۶	۴/۴۲	۱۴۲/۷۱
ضریب تغییرات (درصد)		۳۹/۰۶	۲۹/۹۵	۲۴/۹۹	۱۴/۹۹	۲۱/۷۴

داد که ژنوتیپ پایه‌های AR4، AR5 و AR7 با ۹/۳، ۱۷/۵ و ۲۱/۷ درصد کم‌ترین کاهش و ژنوتیپ پایه‌های AR1، AR2، AR6، AR11 و MM111 با ۴۸/۴، ۴۶/۲، ۳۹/۱۰، ۴۴/۵ و ۶۰/۲ درصد بیش‌ترین کاهش وزن تر ساقه و شاخه را داشتند. تنش خشکی باعث کاهش وزن خشک ساقه و شاخه در ژنوتیپ پایه‌های سیب شد. مقایسه میانگین وزن خشک ساقه و شاخه ژنوتیپ پایه‌های سیب تحت شرایط تنش خشکی و نسبت به آبیاری شاهد نشان داد که ژنوتیپ پایه‌های AR4 و AR5 با ۱۵/۹ و ۱۴/۹ گرم، کم‌ترین کاهش و ژنوتیپ پایه‌های AR1، AR2، AR11 و MM111 با ۴۷/۸، ۴۵/۴، ۶۳/۷ و ۶۳/۷ گرم، بیش‌ترین کاهش وزن خشک ساقه و شاخه را در بین ژنوتیپ پایه‌های سیب داشتند (جدول ۳).

وزن تر و خشک ریشه‌ها

در شرایط آبیاری شاهد، ژنوتیپ پایه‌های سیب از نظر وزن تر ریشه با هم تفاوت معنی‌داری داشتند و بیش‌ترین وزن تر ریشه در ژنوتیپ پایه‌ها AR2، AR7، AR9 و AR1 با ۴۶/۱۲، ۳۸/۲۳، ۳۴/۹۳ و ۳۵/۱۰ گرم و کم‌ترین وزن تر ریشه در ژنوتیپ پایه‌های AR3، MM111 و AR4 با ۲۳/۴۳، ۲۵/۳۳ و ۲۲/۹۰ گرم ثبت شد (شکل ۱الف). مقایسه میانگین وزن تر ریشه در ژنوتیپ پایه‌های سیب تحت تنش خشکی نسبت به تیمار آبیاری شاهد نشان داد که ژنوتیپ پایه‌های AR5، AR10 و MM111 با ۲۹/۹، ۲۰/۳ و ۲۲/۴ کم‌ترین کاهش در وزن تر ریشه و ژنوتیپ پایه‌های AR1، AR2، AR4، AR11 و AR9 با ۶۰/۶، ۵۹/۲، ۵۳/۵، ۵۷/۲ و ۵۵/۵ بیش‌ترین درصد کاهش وزن تر ریشه را در بین ژنوتیپ پایه‌های سیب داشتند (جدول ۳). ژنوتیپ پایه‌های سیب از نظر وزن خشک ریشه نیز تفاوت معنی‌داری با هم داشتند. در شرایط آبیاری شاهد بیش‌ترین وزن خشک ریشه در ژنوتیپ پایه‌های AR1، AR7 و AR9 با ۸/۵۳، ۷ و ۱۰/۹۶ گرم و کم‌ترین وزن خشک ریشه

AR10 و AR2 با ۵۱/۸، ۴۵/۷، ۳۴/۷ و ۴۲/۳ درصد بیش‌ترین و ژنوتیپ پایه‌های AR3، AR7 به‌میزان ۱۹/۱ و ۱۹/۷ درصد، کم‌ترین کاهش را نشان دادند. از نظر وزن تر کل برگ‌ها ژنوتیپ پایه‌های AR3، AR7 و AR9 با ۱۶/۷، ۱۹/۶ و ۲۴/۴ درصد، کم‌ترین کاهش و ژنوتیپ پایه‌های AR4، AR8، AR10 با ۴۵/۵، ۳۹/۶ و ۴۲/۱ درصد، بیش‌ترین کاهش وزن تر را در شرایط تنش خشکی نشان دادند که تقریباً مشابه پایه رویشی MM111 با ۴۸/۴ درصد بود. همچنین ژنوتیپ پایه‌های AR3، AR7 و AR9 با ۱۳/۲، ۱۵/۲ و ۱۸/۴ درصد، کم‌ترین و ژنوتیپ پایه‌های AR4، AR8، AR11 و AR1 با ۴۱/۶، ۴۱/۴ و ۳۷/۷ درصد بیش‌ترین کاهش در وزن خشک برگ را در شرایط تنش داشتند (جدول ۳). در شرایط آبیاری یکسان، پتانسیل آب برگ در پایه‌های پر رشد منفی‌تر از پایه‌های کم‌رشد است زیرا با داشتن سطح برگ بیش‌تر، تعرق بیش‌تری نسبت به پایه‌های کم‌رشد داشته و در نتیجه پتانسیل آب برگ کاهش می‌یابد (آتشکار و همکاران، ۱۳۹۷) اما این ژنوتیپ‌ها دارای سطح برگ بیش‌تر و به تبع آن سطح فتوسنتزکننده بیش‌تری بوده و تحت شرایط تنش خشکی نیز زیست‌توده بیش‌تری نسبت به پایه‌های کم‌رشد تولید می‌کنند. باید بین کاهش میزان تعرق و سطح بحرانی برگ برای فتوسنتز تعادل پایداری وجود داشته باشد، وقتی این تعادل به‌دست نمی‌آید، مزیت کاهش تعرق به‌وسیله عدم دسترسی کافی به مواد جذب‌شونده (آسمیلات‌ها^۱) از بین می‌رود و زیست‌توده کل کاهش می‌یابد، بنابراین ژنوتیپ پایه‌های کم‌رشد تحت تنش خشکی از رشد و زیست‌توده کم‌تری نسبت به پایه‌های پر رشد برخوردارند (بولات^۲ و همکاران، ۲۰۱۴).

وزن تر و خشک اندام هوایی

مقایسه میانگین وزن تر ساقه و شاخه ژنوتیپ پایه‌های سیب تحت شرایط تنش خشکی نسبت به تیمار آبیاری شاهد نشان

جدول ۳- تأثیر تنش خشکی بر کاهش رشد رویشی ژنوتیپ پایه‌های هیبرید سیب نسبت به تیمار آبیاری شاهد (درصد)

ژنوتیپ پایه	وزن خشک شاخه و ساقه %	وزن تر شاخه و ساقه %	سطح برگ گیاه %	وزن خشک کل برگ‌ها %	وزن تر کل برگ‌ها %
AR1	۶۳/۷	۶۰/۲	۳۹/۳	۲۷/۸	۲۹
AR2	۴۵/۴	۴۴/۵	۵۱/۸	۳۶/۶	۳۷/۶
AR3	۳۶/۴	۳۵/۲	۱۹/۷	۱۸/۴	۲۴/۴
AR4	۱۵/۹	۲۱/۷	۴۲/۵	۳۷/۷	۴۲/۱
AR5	۱۴/۹	۱۷/۵	۲۳/۷	۲۶/۶	۳۵/۴
AR6	۳۹/۸	۳۹/۱	۳۴/۷	۳۳/۵	۳۷/۵
AR7	۱۷/۶	۹/۳	۱۹/۱	۱۵/۶	۱۹/۶
AR8	۲۹/۱	۲۷/۷	۴۲/۳	۴۱/۶	۳۹/۶
AR9	۳۰/۳	۲۷/۸	۲۴/۵	۱۳/۶	۱۶/۷
AR10	۳۸/۷	۴۱/۶	۴۵/۷	۳۴/۳	۴۵/۵
AR11	۴۷/۸	۴۶/۳	۲۵/۳	۴۱/۶	۳۷/۶
MM111	۴۷	۴۸/۴	۳۲/۱	۲۸/۴	۳۲/۲

در ژنوتیپ پایه‌های AR4، AR3 و MM111 با ۴/۴۶، ۵/۲۶ و ۵/۶۰ گرم بود (شکل ۱ ب). تنش خشکی باعث کاهش وزن خشک ریشه در ژنوتیپ پایه‌های سیب شد. مقایسه میانگین

وزن خشک ریشه در ژنوتیپ پایه‌های سیب تحت شرایط تنش خشکی نسبت به تیمار آبیاری شاهد نشان داد که ژنوتیپ پایه‌های AR5، AR10 و MM111 با ۲۰/۲، ۱۰/۷ و ۲۲/۸

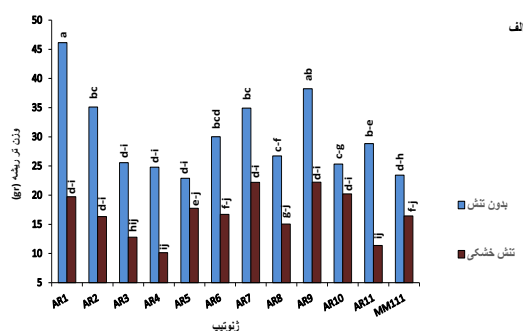
جدول ۳- تأثیر تنش خشکی بر کاهش رشد ریشه در ژنوتیپ پایه‌های هیبرید سیب نسبت به تیمار آبیاری شاهد (درصد)

ژنوتیپ پایه	وزن تر ریشه %	وزن خشک ریشه %	گسترش عمودی ریشه %	گسترش افقی ریشه %	نسبت وزن خشک ریشه به شاخه %
AR1	۵۷/۲	۶۳/۵	۲۶/۲	۱۶/۳	۲/۱
AR2	۳۵/۵	۶۰/۷	۲۲/۹	۴۴/۶	-۲۶/۱
AR3	۴۹/۹	۵۳/۶	۱۳/۳	۳۲	-۲۷
AR4	۵۹/۲	۵۶/۳	۲۷/۱	۴۲/۹	-۴۲/۶
AR5	۲۲/۴	۲۲/۸	۲۶/۱	۱۴/۳	-۸/۳
AR6	۴۴/۴	۵۰/۹	۱۰/۶	۲/۵	-۱۷/۹
AR7	۳۶/۴	۴۶/۸	۲۲/۵	۲۹/۷	-۳۳/۳
AR8	۴۳/۸	۴۸	۱۳/۹	۳۶/۷	-۲۴/۶
AR9	۵۵/۵	۵۷/۷	۱۷/۵	۱۷/۵	-۲۸/۶
AR10	۲۰/۳	۱۰/۷	۳/۲	۴۳/۶	۴۶/۶
AR11	۶۰/۶	۶۷/۸	۶/۲	۲۷/۱	-۲۰/۴
MM111	۲۹/۹	۲۰/۲	۱۸/۹	۲/۳	۵۲/۵

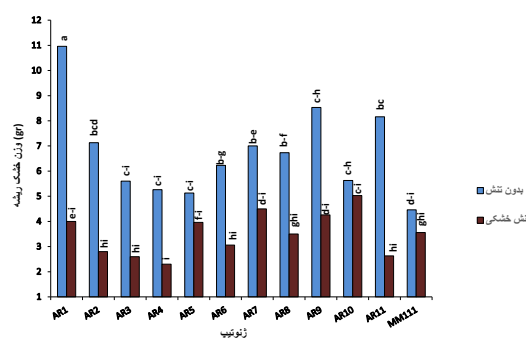
درصد کم‌ترین کاهش در وزن خشک ریشه و ژنوتیپ پایه‌های AR1، AR2، AR4 و AR11 با ۶۷/۸، ۵۶/۳، ۶۰/۷ و ۶۳/۵ درصد، بیش‌ترین کاهش در وزن خشک ریشه را در شرایط تنش خشکی داشتند. مقایسه میانگین نسبت وزن خشک

ریشه به ساقه و شاخه در ژنوتیپ پایه‌های سیب تحت تنش خشکی نسبت به تیمار آبیاری شاهد نشان داد که نسبت وزن خشک ریشه به ساقه و شاخه در ژنوتیپ پایه‌های AR2، MM111 و AR10 با ۵۲/۵، ۴۶/۶ و ۲/۱ درصد افزایش یافت در

سیب با کاهش پتانسیل آب برگ، سریعاً روزنه‌ها را می‌بندند و با کاهش رشد اندام‌های هوایی تجمع ماده خشک بیش‌تری در ریشه داشتند. کاهش وزن‌تر و خشک ساقه و شاخه در بعضی از ژنوتیپ پایه‌های سیب تحت شرایط تنش خشکی منجر به افزایش وزن‌تر و خشک ریشه‌ها شد که دلیل تحمل بیشتر آن‌ها نسبت به تنش خشکی است (بلوم^۱، ۲۰۰۵). تنش خشکی باعث کاهش رشد برگ‌ها و افزایش توزیع مواد به سمت ریشه‌ها می‌شود، بنابراین باعث افزایش نسبت ریشه به ساقه در برگ خواهد شد، این مسئله باعث کاهش قسمت هدردهنده آب و افزایش بخش جاذب آب می‌شود (ساکالوسکیت^۲ و همکاران، ۲۰۰۶).



حالی‌که این نسبت در ژنوتیپ پایه‌های AR4, AR7, AR9 و AR4 به ترتیب ۳۸/۶، ۳۳/۳ و ۴۲/۶ درصد در شرایط تنش خشکی کاهش یافت (جدول ۳). ژنوتیپ پایه‌های سیب به لحاظ وزن‌تر و خشک ریشه تفاوت‌های آشکاری باهم داشتند و تحت شرایط تنش خشکی وزن‌تر و خشک ریشه در تمامی ژنوتیپ پایه‌های سیب نسبت به شرایط آبیاری شاهد کاهش یافت. اما در بعضی از ژنوتیپ پایه‌ها شامل AR5, AR10 و MM111 کاهش کم‌تری در وزن‌تر و خشک ریشه در این شرایط مشاهده شد. مقدار و توزیع ریشه بر توانایی ریشه در جذب آب تأثیر می‌گذارد، افزایش وزن خشک ریشه‌ها با میزان مقاومت به خشکی گیاه رابطه مستقیم دارد گیاهان با سیستم ریشه قوی نسبت به تنش خشکی مقاوم‌ترند. تحت تنش خشکی پایه‌های



شکل ۱- مقایسه وزن تر ریشه‌ها (الف)، وزن خشک ریشه‌ها (ب) ژنوتیپ پایه‌های مختلف سیب در شرایط آبیاری شاهد و تنش خشکی. ستون‌های با حروف مشترک تفاوت معنی داری بر اساس روش دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

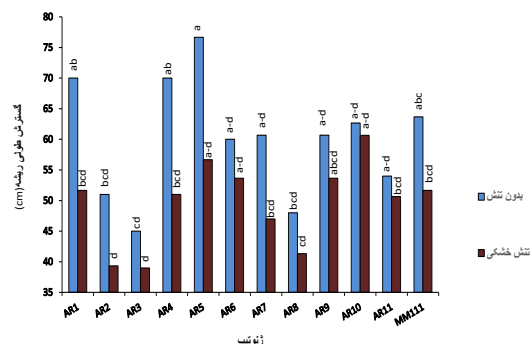
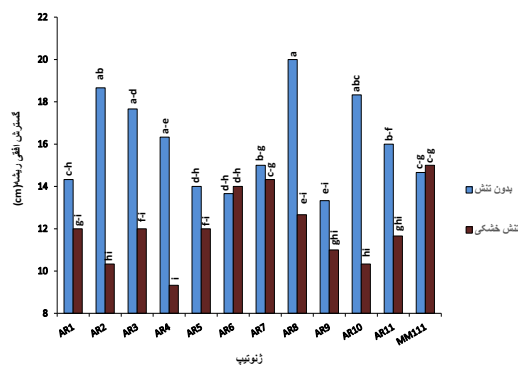
کاملاً مشابه بود با این تفاوت که مقادیر رشد طولی ریشه در شرایط تنش خشکی کم‌تر از شرایط آبیاری شاهد بود (شکل ۲الف).

گسترش افقی ریشه

گسترش رشد طولی ریشه در ژنوتیپ پایه‌های سیب با گسترش افقی در آن‌ها رابطه عکس داشت. در ژنوتیپ پایه‌هایی که دارای حداکثر رشد طولی بودند، گسترش افقی در آن‌ها اندک بود، ژنوتیپ پایه‌های AR1, AR4, AR5 و AR10 که گسترش طولی بیش‌تری نسبت به سایر ژنوتیپ پایه‌ها داشتند، گسترش افقی ریشه کم‌تری داشتند و ژنوتیپ پایه‌های AR2, AR3 و AR8 که گسترش طولی کم‌تری داشتند گسترش افقی بیش‌تری داشتند (شکل ۲-ب). تنش خشکی باعث کاهش گسترش افقی ریشه در ژنوتیپ پایه‌های سیب شد، به‌طوری‌که میانگین آن در تیمار آبیاری شاهد از ۱۶ سانتی‌متر به ۱۲/۰۵ سانتی‌متر در تیمار تنش خشکی کاهش

گسترش عمودی ریشه

تحت شرایط آبیاری شاهد، بیش‌ترین گسترش عمودی ریشه‌ها مربوط به ژنوتیپ پایه‌های AR1, AR4, AR5 و AR10 با ۶۲/۶۷، ۷۶/۶۷، ۷۰ و ۷۰ سانتی‌متر و کم‌ترین گسترش عمودی ریشه‌ها در ژنوتیپ پایه‌های AR2, AR3 و AR8 با ۴۸، ۴۵ و ۵۱ سانتی‌متر بود. تنش خشکی باعث کاهش گسترش عمودی ریشه در ژنوتیپ پایه‌های سیب نسبت به تیمار آبیاری شاهد شد. مقایسه میانگین گسترش عمودی ریشه در ژنوتیپ پایه‌های سیب تحت تنش خشکی نسبت به تیمار آبیاری شاهد نشان داد که ژنوتیپ پایه‌های AR6, AR9, AR10 و AR11 با ۶/۲، ۳/۲، ۱۷/۵ و ۱۰/۶ درصد کم‌ترین و ژنوتیپ پایه‌های AR1, AR2, AR4 و AR5 با ۲۶/۱، ۲۷/۱، ۲۲/۹ و ۲۶/۲ درصد بیش‌ترین کاهش در گسترش عمودی ریشه را داشتند (جدول ۳). بررسی گسترش طولی ریشه ژنوتیپ پایه‌های سیب نشان داد که الگوی آن در هر دو شرایط تنش و عدم تنش



شکل ۲- مقایسه گسترش طولی ریشه (الف)، گسترش افقی ریشه‌ها (ب) ژنوتیپ پایه‌های مختلف سیب در شرایط آبیاری شاهد و تنش خشکی. ستون‌های با حروف مشترک تفاوت معنی داری بر اساس روش دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

دوساله گلدانی ژنوتیپ پایه‌های هیبرید سیب نیز نشان داد، بیشترین وزن تر و خشک ریشه در ژنوتیپ پایه‌های AR9 و AR1 و کمترین وزن تر و خشک ریشه در ژنوتیپ پایه‌های AR10، AR11، M111 و بیشترین حجم ریشه در ژنوتیپ پایه‌های AR1 و AR4، AR5 و کمترین حجم ریشه در ژنوتیپ پایه‌های AR10، MM111 و بیشترین گسترش عمودی ریشه‌ها مربوط به ژنوتیپ پایه‌های AR1، AR6 و AR4 و کمترین گسترش عمودی ریشه‌ها در ژنوتیپ پایه‌های AR10 و MM111، بیشترین گسترش افقی ریشه‌ها مربوط به ژنوتیپ پایه‌های AR1، AR2، AR4 و کمترین گسترش عمودی ریشه‌ها در ژنوتیپ پایه‌های AR10 و AR11 ثبت شد، ریشه ژنوتیپ پایه‌های AR11 و AR10 کمترین طول، وزن تر و خشک و حجم نسبت به سایر ژنوتیپ پایه‌ها داشتند و بنابراین بیشترین شباهت را از نظر صفات مورفولوژیکی نسبت به پایه شاهد متحمل به خشکی MM111 داشتند (آتشکار و همکاران ۱۴۰۳). تفاوت‌های ژنوتیپی از نظر طول و گسترش سیستم ریشه در اکثر گیاهان گزارش شده است (آتشکار، ۱۴۰۲). داشتن ریشه‌های عمیق و ضخیم به عنوان مکانیزم‌های اجتناب از تنش خشکی محسوب می‌شوند. کیفیت ریشه‌ها یعنی ساختمان و توزیع آن نسبت به تعداد آن مهم‌تر است. برای تحمل به خشکی، گزینش گیاهان دارای سیستم ریشه‌های عمیق کارآمد در تحمل به خشکی اهمیت دارد. ریشه‌های عمیق و ضخیم به گیاه اجازه می‌دهد که آب را از اعماق پایین جذب نمایند و مقاوم به خشکی شوند (فاروق و همکاران، ۲۰۰۹). پایه رویشی MM111 در بین سایر پایه‌های رویشی سیب تحمل بیشتری نسبت به تنش خشکی دارد و همواره در آزمایشات به عنوان شاهد متحمل به تنش خشکی استفاده

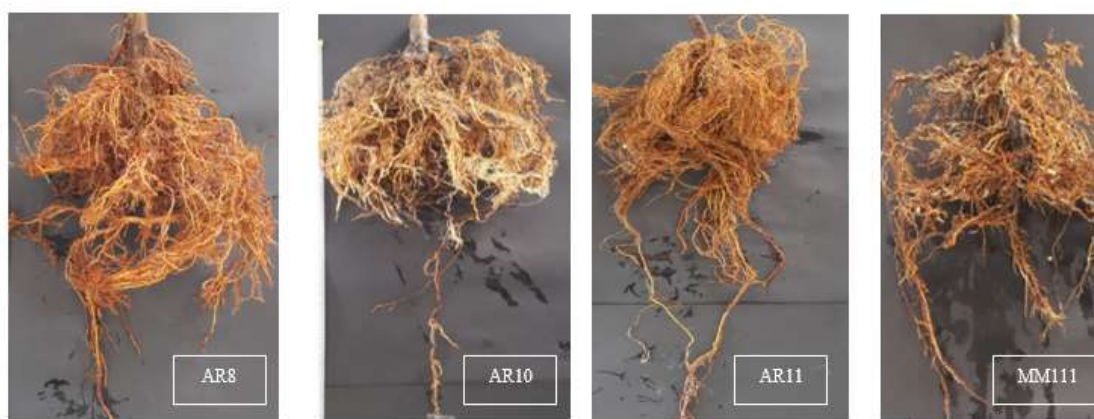
یافت (شکل ۲-ب). مقایسه میانگین گسترش افقی ریشه در ژنوتیپ پایه‌های سیب تحت تنش خشکی نسبت به تیمار آبیاری شاهد نشان داد که ژنوتیپ پایه‌های AR6 و MM111 به ترتیب با ۲/۳ و ۲/۵ درصد گسترش افقی ریشه کمترین کاهش گسترش و ژنوتیپ پایه‌های AR2، AR4، AR8 و AR10 با ۴۲/۹، ۳۶/۷، ۴۳/۶ و ۴۴/۶ درصد بیشترین کاهش در گسترش افقی ریشه‌ها تحت تنش خشکی نشان دادند (جدول ۳). تفاوت‌های ژنوتیپی از نظر طول و گسترش سیستم ریشه در اکثر گیاهان گزارش شده است (علیزاده^۱ و همکاران، ۲۰۱۱). الگوی گسترش افقی ریشه در شرایط آبیاری شاهد و تنش خشکی کاملاً متفاوت بود. ژنوتیپ پایه‌هایی که در شرایط آبیاری شاهد دارای حداکثر مقادیر رشد افقی بودند در شرایط تنش خشکی با شدت بیش‌تری دچار افت رشد افقی شدند. این موضوع بیانگر تأثیر منفی تنش خشکی بر گسترش افقی ریشه‌ها است. تنش خشکی باعث از بین رفتن ریشه‌های کم‌عمق و افزایش ریشه‌های عمیق می‌شود (تایز و زایگر ۲۰۰۶). پایه رویشی MM111 به عنوان پایه مقاوم به خشکی در بین سایر پایه‌های رویشی سیب شناخته شده است (فرناندز و همکاران، ۱۹۹۵؛ انجم^۲ و همکاران، ۲۰۰۳). گسترش و افزایش وزن خشک ریشه در این پایه نسبت به سایر ژنوتیپ پایه‌ها شناخته‌شده‌تر است. ژنوتیپ پایه‌های پررشد AR3، AR6، AR7 و AR9 دارای بیش‌ترین سطح برگ و حداکثر سطح تعرق‌کننده، حداقل تبادلات گازی، تعرق و فتوسنتز نسبت به سایر ژنوتیپ پایه‌ها بودند، اما ژنوتیپ پایه‌های کم رشد AR4، AR8 و AR11 دارای حداقل سطح برگ، حداکثر تبادلات روزنه‌ای، تعرق و فتوسنتز نسبت به سایر ژنوتیپ پایه‌ها بودند. نتایج بررسی رشد ریشه در نهال‌های

می‌شود، ریشه‌های ضخیم و کم‌حجم از ویژگی‌های پایه‌رویشی MM111 به‌شمار می‌رود. ژنوتیپ پایه‌های هیبرید سیب AR4, AR11 و AR8 دارای کمترین بیوماس، کمترین سرعت رشد و بیشترین تراکم روزنه در واحد سطح برگ و بیشترین نسبت وزن خشک ریشه به شاخساره داشتند (آتشکار و همکاران، ۱۳۹۹). تحت تأثیر تنش خشکی، پارامترهای فیزیولوژیکی کاهش یافت و میزان کاهش آن در ژنوتیپ پایه‌های مختلف متفاوت بود. ژنوتیپ پایه‌های AR8, AR11 و AR4 در شرایط تنش خشکی با داشتن بیشترین محتوی نسبی آب برگ و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان بیشتر، نسبت به سایر ژنوتیپ پایه‌ها متحمل به تنش خشکی ارزیابی می‌شوند (آتشکار، ۱۴۰۲). الگوی رشد ریشه تحت تأثیر تنش

خشکی قرار گرفت، ژنوتیپ پایه‌های AR2, AR3 و AR8 که در شرایط آبیاری شاهد دارای حداکثر رشد افقی ریشه بودند تحت تنش خشکی دچار کاهش شدید رشد افقی شدند از طرفی تجمع ماده خشک به‌عنوان شاخص تحمل به تنش خشکی در ژنوتیپ پایه‌های متوسط رشد شامل AR5, AR10 و MM111 بیشتر بود (آتشکار، ۱۴۰۱). ژنوتیپ پایه‌های AR10, AR11 و MM111 کم‌ترین طول، وزن تر و خشک و حجم نسبت به سایر ژنوتیپ پایه‌ها داشتند (آتشکار و همکاران، ۱۴۰۳) (شکل‌های ۳ و ۴). بنابراین نتیجه‌گیری می‌شود ریشه‌های ضخیم و کم‌حجم جزء شاخص‌های فیزیکی تحمل به تنش خشکی در پایه‌های سیب به‌شمار می‌رود.



شکل ۳- سیستم ریشه‌ای در ژنوتیپ پایه‌های حساس به تنش خشکی



شکل ۴- سیستم ریشه‌ای در ژنوتیپ پایه‌های متحمل به تنش خشکی

خشکی قرار گرفت و شدت آن در ژنوتیپ پایه‌های مختلف متفاوت بود. تحت تأثیر تنش خشکی در ژنوتیپ پایه‌های کم رشد AR8, AR10 و AR11 و پایه رویشی MM111

نتیجه‌گیری کلی

ژنوتیپ پایه‌های مورد بررسی به لحاظ صفات رویشی تفاوت معنی‌داری نشان دادند. صفات رویشی تحت تأثیر تنش

به تنش خشکی MM111 بودند. شاخص‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی نیز تحمل به تنش خشکی در ژنوتیپ پایه‌های کم‌رشد AR10, AR8 و AR11 و پایه رویشی MM111 را به اثبات رسانده است. بنابراین نتیجه‌گیری می‌شود مکانیزم مقاومت به تنش خشکی در ژنوتیپ پایه‌های مورد مطالعه به نسبت ریشه/شاخساره و ساختار مورفولوژیکی ریشه مرتبط بوده و برای مقاومت به تنش خشکی از مکانیزم اجتناب از خشکی بهره می‌برند.

سطح، وزن تر و خشک برگ و شاخساره کاهش یافت اما طول ریشه و نسبت وزن خشک ریشه نسبت به شاخساره نسبت به پایه‌های پر رشد بیشتر بود. گسترش افقی ریشه در مقایسه با گسترش عمودی ریشه با شدت بیشتری تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفت و مقدار آن کاهش یافت. ساختار مورفولوژیکی ریشه در ژنوتیپ پایه‌های مورد متفاوت بود. ژنوتیپ پایه‌های کم‌رشد AR10, AR8 و AR11 دارای ریشه‌های کم‌حجم و ضخیم مشابه ریشه پایه متحمل

منابع

- آتشکار، د. ۱۴۰۱. تأثیر تنش خشکی بر رشد رویشی برخی از پایه‌های هیبرید انتخابی سیب. مجله پژوهش در علوم باغبانی، ۱۱(۱): ۲۶-۱۱.
- آتشکار، د. ۱۴۰۲. تأثیر تنش خشکی بر محتوی نسبی آب برگ و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در برخی از پایه‌های هیبرید سیب. مجله پژوهش در علوم باغبانی، ۱۲(۱): ۴۴-۳۱.
- آتشکار، د.، ارشادی، ا.، عبدالمهی، ح. و طاهری، م. ۱۳۹۹. اثرهای تنش خشکی بر شاخص‌های فیزیولوژیک و زیست‌شیمیایی پایه‌های دورگه سیب. مجله علوم و فنون باغبانی ایران، ۲۱(۱): ۱۰۷-۱۲۲.
- آتشکار، د.، ارشادی، ا.، طاهری، م. و عبدالمهی، ح. ۱۳۹۷. غربال‌گری برخی پایه‌های دورگه انتخابی سیب برای تحمل به تنش خشکی بر اساس صفات مرتبط با فتوسنتز. مجله علوم باغبانی ایران، ۴۹(۴): ۱۰۱۳-۱۰۲۴.
- آتشکار، د.، تقی‌زاده، ا. و دودانگه‌بالاخانی، م. ۱۴۰۳. مطالعه سیستم ریشه در تعدادی از پایه‌های هیبرید سیب. پژوهش‌های میوه‌کاری، ۹(۲): ۳۴-۲۴.
- آتشکار، د.، پیرخضری، م. و تقی‌زاده، ا. ۱۳۹۵. تولید وارزیابی مقدماتی پایه‌های دورگ رویشی سیب (*domesica Mallus* Borkh). علوم باغبانی ایران، ۴۷(۲): ۳۳۵-۳۲۹.
- آتشکار، د.، حق‌جویان، ر.، دودانگه‌بالاخانی، م. و ا. سلیمانی. ۱۳۹۹. پیش‌بینی پتانسیل رشد با مطالعه صفات رویشی در برخی پایه‌های سیب دورگه. مجله علوم باغبانی ایران، ۵۱(۴): ۹۳۷-۹۲۵.
- کافی، م.، برزویی، ا.، صالحی، م.، کمندی، ع.، معصومی، ع. و نباتی، ج. ۱۳۸۸. فیزیولوژی تنش‌های محیطی در گیاهان. چاپ اول. انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد. ۳۹۴، ۵۰۲ ص.
- Alizadeh, A., Alizade, V., Nassery, L. and Eivazi, A. 2011. Effect of drought stress on apple dwarf rootstocks. Technical Journal of Engineering and Applied Science, 1(3): 86-94.
- Anjum, F., Yaseen, M., Rasul, E., Wahid, A. and Anjum, S. 2003. Water stress in barley (*Hordeum vulgare* L.). II. Effect on chemical composition and chlorophyll contents. Pakistan Journal Agriculture Science, 40(1-2): 45-49.
- Araki, H. and Iijima, M. 2001. Deep rooting in winter wheat: rooting nodes of deep roots in two cultivars with deep and shallow root systems. Plant Production Science, 4(3): 215-219.
- Blum, A. 2005. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? Australian Journal of Agricultural Research, 56(11): 1159-1168.
- Bolat, I., Dikilitas, M., Ercisli, S., Ikinci, A. and Tonkaz, T. 2014. The effect of water stress on some morphological, physiological, and biochemical characteristics and bud success on apple and quince rootstocks. The Scientific World Journal, 2014(1): 769732.
- Di Vaio, C., Cirillo, C., Buccheri, M. and Limongelli, F. 2009. Effect of interstock (M. 9 and M. 27) on vegetative growth and yield of apple trees (cv “Annurca”). Scientia Horticulturae, 119(3): 270-274.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N.S.M.A., Fujita, D.B.S.M.A. and Basra, S.M. 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. In Sustainable agriculture. Dordrecht: Springer Netherlands. pp.153-188.

- Fernandez, R.T., Perry, R.L. and Ferree, D.C. 1995. Root distribution patterns of nine apple rootstock in two contrasting soil types. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 120(1): 6-13.
- Johnson, W.C., 2000. Methods and Results of Screening for Disease and Insect Apple Rootstocks. *The Compact Fruit Tree*, 33: 108-111.
- Ma, L., Hou, C.W., Zhang, X.Z., Li, H.L., Han, D.G., Wang, Y. and Han, Z.H. 2013. Seasonal growth and spatial distribution of apple tree roots on different rootstocks or interstems. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 138(2): 79-87.
- Sakalauskaitė, J., Kviklys, D., Lanauskas, J. and Duchovskis, P. 2006. Biomass production, dry weight partitioning and leaf area of apple rootstocks under drought stress. *Sodininkystė ir daržininkystė*, 25(3): 283-291.
- Shao, K.J., Li, D.K. and Zhang, Z.R. 1988. A study on the breeding of apple dwarfing rootstock SH series. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 3: 86-93.
- Taiz, L. and Zeiger, E. 2006. *Plant Physiology*, 4th Ed., Sinauer Associates Inc. Publishers, Massachusetts.
- Tony, W., Kento, B. and Evens, K. 2000. Breeding and evaluation of new rootstocks for apple, pear and sweet cherry. In: 43rd annual IDFTA conference, Newzeland. *The Compact Fruit*, vol 33, number 2.
- Uga, Y., Sugimoto, K., Ogawa, S., Rane, J., Ishitani, M., Hara, N., Kitomi, Y., Inukai, Y., Ono, K., Kanno, N. and Inoue, H. 2013. Control of root system architecture by DEEPER ROOTING 1 increases rice yield under drought conditions. *Nature Genetics*, 45(9): 1097-1102.
- Van Damme, P.L.J. 1991. Adaptations to drought stress in plants. Morphological adaptations. *Mededelingen van de Faculteit Landbouwwetenschappen Rijksuniversiteit Gent (Belgium)*: 56(1).
- Zagaja, S.W., Jakubowski, T., Pieklo, A. and Przybyla, A. 1989. Preliminary evaluation of new clones of apple rootstocks. *Fruit Science*, 16: 205-213.