



به‌زرعی کشاورزی

دوره ۲۳ ■ شماره ۲ ■ تابستان ۱۴۰۰

صفحه‌های ۴۰۷-۳۹۳

مقاله پژوهشی:

ارزیابی ویژگی‌های ریشه و اندام هوایی ژنوتیپ‌های کنجد تحت شرایط مختلف رطوبت خاک

مجید غلامحسینی^{۱*}، فرهاد حبیب‌زاده^۲، پریسا همتی^۱

۱. استادیار، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

۲. استادیار، گروه ژنتیک و به‌نژادی گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۰۷

چکیده

بخش مهمی از موفقیت تولید در مناطق دارای تنش خشکی به جذب مؤثر آب توسط سیستم ریشه‌ای کارآمد وابسته است. به‌منظور بررسی تأثیر تیمارهای آبیاری بر صفات ریشه و اندام هوایی ژنوتیپ‌های کنجد (*Sesamum indicum* L.)، آزمایشی در مزارع تحقیقاتی مؤسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج طی سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با چهار تکرار اجرا شد. در این پژوهش پنج ژنوتیپ گیاه کنجد در دو رژیم آبیاری شامل آبیاری کامل و کم‌آبیاری (تنش خشکی) از نظر سیستم ریشه‌ای و صفات مرتبط با اندام هوایی موردبررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد بین ژنوتیپ‌ها و رژیم‌های آبیاری از نظر صفات ریشه و اندام هوایی اختلاف معنی‌داری وجود دارد. در تمامی ژنوتیپ‌ها تراکم طولی ریشه در تیمار آبیاری کامل و در لایه بالایی خاک (عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری) در مقایسه با تیمار تنش بیش‌تر بود. علاوه بر این با اعمال تنش خشکی، عمق ریشه در تمامی ژنوتیپ‌ها به‌طور متوسط ۳۰ درصد افزایش یافت. در مقابل، وزن خشک ریشه در ارقام داراب یک، دشتستان دو و ناز تک‌شاخه به‌ترتیب ۱۵ درصد، ۱۶ درصد و ۲۲ درصد کاهش و در ژنوتیپ‌های ناشکوفای آمریکایی، توده سودانی و اولتان به‌ترتیب ۷ درصد، ۱۰ درصد و ۱ درصد افزایش یافت. از طرف دیگر بیش‌ترین مقدار وزن خشک تک‌بوته در ژنوتیپ ناشکوفای آمریکایی (۳۹ گرم) و کم‌ترین آن در رقم ناز تک‌شاخه (۲۲ گرم) مشاهده شد. به‌عنوان جمع‌بندی نهایی نتایج نشان داد ژنوتیپ ناشکوفای آمریکایی که از لحاظ ویژگی‌های ریشه از جمله عمق ریشه و تراکم طولی ریشه در مقایسه با سایر ارقام برتر بود، علاوه بر این که وزن خشک تک‌بوته بیش‌تری داشت، حداقل کاهش وزن خشک را در شرایط تنش نشان داد.

کلیدواژه‌ها: تراکم طولی ریشه، عمق ریشه، نسبت ریشه به اندام هوایی، وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه.

Evaluation of Root and Shoot Characteristics of Sesame Genotypes under Different Soil Moisture Conditions

Majid Gholamhoseini^{1*}, Farhad Habibzadeh² and Parisa Hemmati¹

1. Assistant Professor, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

2. Assistant Professor, Department of Genetics and Plant Breeding, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

Received: September 5, 2020

Accepted: December 27, 2020

Abstract

In dry regions, root systems play a major role in controlling plant growth and yield, thanks to their importance in water absorption. In order to investigate the effect of irrigation regimes on root and shoot traits of sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes, a field experiment has been conducted in Karaj, at Seed and Plant Improvement Institute, during 2017 and 2018. A factorial experiment has been laid out in a completely-randomized design with four replications. This study deals with five genotypes of sesame in two irrigation regimes, including full and low (drought stress) irrigation treatments in terms of root and shoot-related traits. Results show that there have been significant differences between genotypes and irrigation regimes for root and shoot traits. In all genotypes, root length density is higher in full irrigation treatment as well as the upper soil layer (0 to 30 cm deep), compared to stress treatment. In addition, under drought stress conditions root depth increases (by 30% in average) in all genotypes. In contrast, root dry weight has decreased in Dashtestan 2 (15%), Darab 1 (16%), and Naz (22%), and increased in Oltan (1%), USA-ns 96 (7%), and Sodan 94 (10%) genotypes. On the other hand, the highest amount of shoot dry weight belongs to the USA-ns 96 genotype (39 g), and the lowest to Naz cultivar (22 g). Finally, results show that USA-ns 96 genotype, being superior in terms of root characteristics such as root depth and root length density compared to other genotypes, in addition to having more shoot dry weight, show the least dry weight loss under stress conditions.

Keywords: Root depth, root dry weight, root length density, root to shoot ratio, shoot dry weight.

۱. مقدمه

ایران با میانگین سالانه ۲۵۰ میلی‌متر بارندگی و ۱۸۰۰ میلی‌متر تبخیر جزو مناطق خشک دنیا محسوب می‌شود (Jouyban & Moosavi, 2012). افزایش جمعیت جهان و کمبود آب شیرین از یک‌سو و قرارگرفتن بیش از ۲۶ درصد از زمین‌های زراعی کره زمین در معرض خشکی از سوی دیگر تهدیدی جدی برای امنیت غذایی محسوب می‌شوند (Farre & Faci, 2009). یکی از راه‌کارهای مؤثر افزایش ثبات در تولید محصولات کشاورزی، اصلاح ژنتیکی گیاهان برای تحمل تنش‌های غیرزیستی است. بنابراین برای فهم بیشتر مکانیزم‌های مقاومت و دستیابی به منابع ژنتیکی موردنیاز در برنامه‌های اصلاحی، درک صفات فیزیولوژیک و مورفولوژیک مرتبط با مقاومت به خشکی به‌ویژه صفات ریشه، ضروری است. اگرچه پژوهش‌هایی روی ویژگی‌های سیستم ریشه‌ای گونه‌های گیاهان زراعی انجام گرفته است، ولی به دلیل مشکلات مرتبط با اندازه‌گیری سیستم‌های ریشه در مقادیر و مراحل مختلف (به‌غیر از گیاهچه‌ها)، دانش مربوط به این بررسی‌ها هنوز در مرحله ابتدایی توسعه بوده و ارتباط کمی معتبری بین صفات ریشه‌ای و عملکرد گیاه وجود ندارد (Bengough et al., 2011). باید توجه داشت که به‌ویژه در شرایط تنش خشکی، ریشه‌ها نقش مستقیم و آشکاری در مدیریت تأمین آب از طریق عمق ریشه‌زایی و تعداد ریشه‌ها در یک لایه خاص دارند و مطالعه مستقیم آن‌ها از ارزش بسیاری برخوردار است (Wasaya et al., 2018).

در پژوهش‌های ریشه، تظاهر صفات به محیط بستگی داشته و بسیاری از پژوهش‌ها برهم‌کنش‌های قابل‌ملاحظه ژنوتیپ‌ها با محیط را نشان داده‌اند (Costa et al., 2002). ریشه‌زایی عمیق‌تر و به‌دنبال آن استخراج آب می‌تواند عامل مهمی در تحمل تنش خشکی باشد، زیرا از خشکی به‌طور مؤثری اجتناب می‌شود (Gregory, 2006). یافته‌های

Sponchiado et al. (1989) اهمیت این موضوع را بر تحمل به خشکی لوبیای معمولی (*Phaseolus vulgaris* L.) نشان داده است. این پژوهش‌گران بیان داشتند زمانی که ارقام مختلف لوبیای معمولی در شرایط آبیاری کامل رشد یافت، تمام لاین‌ها تا ۰/۸-۰/۷ متری ریشه داده ولی تحت شرایط خشکی، دو لاین متحمل به خشکی (BAT477 و BAT85) حداقل تا ۱/۲ متری ریشه‌دوانی کرده، درحالی‌که ریشه دو رقم حساس به خشکی (BAT1224 و A70) فقط تا عمق ۰/۸ متری رسیده بود.

عمق ریشه، تراکم طولی ریشه و توانایی ریشه برای نفوذ به لایه‌های متراکم خاک به‌عنوان صفات ریشه‌ای مرتبط با توانایی گیاهان زراعی از جمله برنج (Uga et al., 2013)، گندم (Waines & Ehdaie, 2005) و نخود (Purushothaman et al., 2017) در اجتناب از خشکی پیشنهاد شده است. در همین زمینه Lafitte et al. (2001) دریافتند که تعداد زیادی از ویژگی‌های متفاوت ریشه‌ای مانند عمق ریشه و الگوهای پراکنش ریشه بین انواع مختلف برنج وجود دارد. هم‌چنین Brück et al. (2003) نیز تفاوت‌ها در ویژگی‌های ریشه هشت رقم ارزن مروریدی، که برای نشان‌دادن دامنه وسیعی از زمان بلوغ و ارتفاع گیاه با کاربرد مقادیر مختلف کودهای فسفر گزینش شده بودند، را مورد پژوهش قرار دادند. ایشان گزارش کردند تنوع ژنوتیپی قابل‌ملاحظه‌ای برای وزن خشک ریشه، طول ریشه و تراکم طولی ریشه وجود داشت ولی برای عمق ریشه، تخصیص ریشه‌ها بین خاک بالایی و خاک زیرین یا برای طول ویژه ریشه این‌گونه نبود.

بخش زیادی از زمین‌های زراعی ایران در نواحی خشک و نیمه‌خشک واقع شده‌اند و کنجد نیز محصول خاص مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری است. بنابراین بررسی واکنش به خشکی در گیاه کنجد به‌ویژه از طریق مطالعه صفات ریشه‌ای در ژنوتیپ‌های مختلف آن، از

پلیکا تهیه و در ابعاد طولی ۱۵۰ سانتی‌متری برش داده شد. هم‌چنین به‌منظور استخراج دقیق‌تر و راحت‌تر ریشه‌ها، لوله‌ها از دو طرف نیز برش خوردند. پس از آماده‌سازی اولیه لوله‌ها، جوی‌هایی به عمق ۵۰ سانتی‌متر با استفاده از نهرکن در مزرعه ایجاد و داخل آن لوله‌های U-PVC (پلیکا) با قطر ۳۰ سانتی‌متر به‌صورت عمودی جاگذاری و با خاک مزرعه پر شدند. جدول (۱) برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده را نشان می‌دهد. آبیاری اول بلافاصله بعد از کاشت، در تاریخ ۱۸ و ۲۰ خردادماه به‌ترتیب در سال اول و دوم آزمایش و آبیاری‌های بعدی پس از استقرار اولیه گیاهان با توجه به تیمارهای آزمایشی و با استفاده از مخزن و شیلنگ انتقال آب جداگانه برای هر واحد آزمایشی انجام گرفت. جدول زمان‌بندی آبیاری واحدهای آزمایشی براساس روش تغییرات درصد حجمی رطوبت خاک انجام شد. در این روش هنگامی که درصد رطوبت خاک از حد مشخصی کم‌تر شود، آبیاری انجام می‌شود. در این آزمایش آبیاری زمانی صورت گرفت که ۴۰ و ۸۰ درصد رطوبت قابل استفاده در خاک به‌ترتیب در تیمار آبیاری کامل و تنش خشکی، به‌وسیله گیاه و یا تبخیر از سطح خاک تخلیه شد.

تعیین مقدار رطوبت قابل استفاده نیز از تفاضل درصد حجمی رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی از درصد حجمی رطوبت در نقطه پژمردگی دائمی به‌دست آمد. برای کنترل رطوبت خاک در واحدهای آزمایشی از دستگاه T.D.R (Time-Domain Reflectometry, Trase System1, Soilmoisture Equipment Corp, USA) استفاده شد.

اهمیت زیادی برخوردار است. با این‌حال، در مورد ویژگی‌های ریشه گیاه کنجد، پژوهش‌های بسیار کمی انجام شده است. به همین منظور مطالعه حاضر با هدف بررسی تنوع موجود میان ژنوتیپ‌های کنجد از نظر صفات ریشه، تغییرات کمی صفات در واکنش به تنش خشکی، ارتباط بین صفات اندام هوایی با ریشه و نیز امکان استفاده از این صفات به‌عنوان معیارهایی برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی انجام شد.

۲. مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در بهار و تابستان سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ در مزرعه پژوهشی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، واقع در محمد شهر کرج اجرا شد. محل اجرای آزمایش با ۱۳۲۳ متر ارتفاع از سطح دریا و با مختصات جغرافیایی ۳۵ درجه و ۸۰ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۹۷ دقیقه طول شرقی و میانگین بارندگی سالیانه ۲۵۰ میلی‌متر، براساس روش طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن در گروه اقلیمی نیمه‌خشک طبقه‌بندی می‌شود.

در این پژوهش ژنوتیپ‌های مختلف گیاه کنجد (ژنوتیپ‌های ایرانی شامل اولتان، دشتستان ۲، داراب ۱ و ناز تک‌شاخه و ژنوتیپ‌های خارجی شامل توده سودانی (Sudan 94) و ناشکوفای آمریکایی (USA-ns 96) در دو رژیم آبیاری شامل آبیاری کامل و کم‌آبیاری (تنش خشکی) از نظر سیستم ریشه‌ای و صفات مرتبط با اندام هوایی مورد بررسی قرار گرفتند. بدین منظور، ابتدا شاخه‌های شش متری لوله‌های

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده برای پر کردن لوله‌های پلیکا

پتاسیم	فسفر	درصد	درصد	درصد	درصد	هدایت	واکنش گل	بافت
قابل جذب	قابل جذب	نیترژن	حجمی رطوبت	حجمی رطوبت	مواد	الکتریکی	اشباع	خاک
(mg/kg)	(mg/kg)	کل	در Wilting point	در Field capacity	آلی	(dS/m)		رسی
۲۵۶	۱۲/۶۰	۰/۰۶	۱۱	۳۴	۰/۱۸	۲/۲۲	۷/۲۰	

اندازه‌گیری شده به وسیله دستگاه Delta-T area meter; وزن خشک برگ، وزن خشک تک‌بوته و نسبت وزن ریشه به اندام هوایی اندازه‌گیری شد. شایان ذکر است پس از جمع‌آوری کامل داده‌ها، کلیه تجزیه‌های آماری شامل آزمون بارتلت، تجزیه مرکب دو سال آزمایش و محاسبات همبستگی با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱) انجام گرفت و برای مقایسه میانگین‌های اصلی از آزمون LSD و در صورت معنی‌دار بودن اثر متقابل، برش‌دهی انجام و میانگین‌ها با استفاده از آزمون Ismeans مقایسه شدند.

شکل (۱)، نمایی کلی از نحوه اجرای آزمایش را نشان می‌دهد. نمونه‌برداری ریشه و اندام هوایی ۱۱۰ روز بعد از کاشت در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک انجام گرفت. در هنگام برداشت، لوله‌ها از زمین بیرون آورده شده و بوته‌ها همراه با ریشه کامل از خاک جدا (شکل ۲) و صفات ریشه‌ای شامل وزن خشک ریشه و تراکم طولی ریشه (طول ریشه در واحد حجم خاک) در عمق صفر تا ۱۵۰ سانتی‌متری خاک با فواصل ۳۰ سانتی‌متری و عمق ریشه براساس روش‌های پیشنهادی *Figuroa-Bustos et al.* (2018) و صفات اندام هوایی شامل سطح برگ



شکل ۱. نمایی از نحوه اجرای آزمایش



شکل ۲. نحوه استخراج ریشه از واحدهای آزمایشی.

a بازکردن طولی لوله، b شست‌وشوی ریشه، c و d دو نمونه از ریشه‌های استخراج پ‌شده

۳. نتایج و بحث

۱.۳. تراکم طولی ریشه

نتایج حاصل از جدول (۲) نشان داد که تراکم طولی ریشه در تمامی ژنوتیپ‌ها در تیمار آبیاری کامل و در لایه بالایی خاک (عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری) در مقایسه با تیمار تنش تا ۶۷ درصد بیش‌تر می‌باشد. اگرچه با افزایش عمق خاک در تمامی ژنوتیپ‌ها و در هر دو تیمار آبیاری از تراکم طولی ریشه کاسته شد، اما این روند نزولی به‌ویژه در تیمار آبیاری کامل و در ارقام ناز تک‌شاخه و داراب ۱ مشهودتر بود (جدول ۲). در ارقام ناز تک‌شاخه و داراب ۱ در عمق بیش‌تر از ۶۰ سانتی‌متری خاک و در هر دو تیمار آبیاری، تراکم طولی ریشه به حداقل مقدار خود رسید. در مقابل در سایر ژنوتیپ‌ها مانند اولتان، دشتستان دو، ناشکوفای آمریکایی و توده سودانی، در تیمار آبیاری کامل تا عمق ۹۰ سانتی‌متری و در تیمار تنش تا عمق ۱۲۰ سانتی‌متری خاک مقادیر مختلفی از تراکم طولی ریشه قابل تشخیص بود (جدول ۲).

تراکم طولی ریشه را می‌توان مهم‌ترین پارامتر مربوط به رشد ریشه دانست، زیرا پژوهش‌گران معتقدند که ویژگی طول ریشه در در واحد حجم خاک بهترین صفت

برای محاسبه و برآورد جذب آب توسط گیاه است (Fang *et al.*, 2017).

گزارش شده است در صورت خشک‌شدن طولانی خاک، در ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی، رشد تراکم طولی ریشه به طرف اعماق خاک تسریع می‌شود و بین عمق ریشه، رطوبت قابل‌استفاده خاک و بافت خاک ارتباط وجود دارد (Vadez, 2014). به‌عبارت دیگر، مقاومت برخی از ارقام و ژنوتیپ‌ها در برابر خشکی به عمق و فراوانی انشعابات سیستم ریشه‌ای (تراکم طولی ریشه) بستگی دارد که با این شبکه ریشه‌ای آب موردنیاز خود را از حجم وسیع‌تری از خاک تأمین می‌نمایند. تأثیرپذیری صفت تراکم طولی ریشه از تنش رطوبتی توسط سایر پژوهش‌گران نیز تأیید شده است (Lynch & Wojciechowski, 2015). هرچند که بیش‌ترین تراکم سیستم ریشه‌ای گیاهان زراعی در لایه صفر تا ۶۰ سانتی‌متری خاک قرار می‌گیرد، در طول دوره رشد گیاه، به‌طور متناوب رطوبت این لایه از خاک کاهش می‌یابد، اما رطوبت اضافی معمولاً در عمق بیش از ۶۰ سانتی‌متر خاک وجود دارد (Khan *et al.*, 2016). بنابراین، سیستم ریشه‌ای عمیق و انبوهی که توانایی استفاده از رطوبت لایه‌های عمیق خاک را دارا باشد، اهمیت زیادی برای اجتناب از خشکی دارد.

جدول ۲. مقایسه میانگین تراکم طولی ریشه (سانتی‌متر بر سانتی‌متر مکعب) ژنوتیپ‌های کنجد در تیمارهای مختلف آبیاری

	آبیاری کامل عمق خاک (cm)					تنش خشکی عمق خاک (cm)				
	۱۵۰-۱۲۰	۱۲۰-۹۰	۹۰-۶۰	۶۰-۳۰	۳۰-۰	۱۵۰-۱۲۰	۱۲۰-۹۰	۹۰-۶۰	۶۰-۳۰	۳۰-۰
اولتان	۰	۰	۰/۰۴۳ c	۰/۳۰۵ a	۰/۷۵۶ a	۰	۰	۰/۱۶۱ b	۰/۲۷۹ b	۰/۴۴۷ a
داراب یک	۰	۰	۰ d	۰/۱۶۱ bc	۰/۵۵۷ c	۰	۰	۰/۳۰ c	۰/۰۹۹ c	۰/۳۶۷ b
دشتستان دو	۰	۰	۰/۰۳۸ c	۰/۱۹۸ b	۰/۵۸۶ bc	۰	۰	۰/۱۱۰ b	۰/۱۸۴ bc	۰/۲۷۴ c
ناز تک‌شاخه	۰	۰	۰ d	۰/۰۸۵ c	۰/۶۸۱ b	۰	۰	۰/۰۰۷ c	۰/۱۰۹ c	۰/۳۸۳ b
توده سودانی	۰	۰	۰/۲۳۵ b	۰/۳۰۲ a	۰/۴۲۱ d	۰	۰	۰/۰۴۳ a	۰/۳۰۶ b	۰/۱۳۳ d
ناشکوفای آمریکایی	۰	۰	۰/۳۴۴ a	۰/۳۸۴ a	۰/۵۱۲ cd	۰	۰	۰/۰۲۳ b	۰/۵۸۱ a	۰/۴۹۶ a

در هر ستون میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح آماری پنج درصد ندارند. داده‌ها میانگین دو سال آزمایش هستند.

۲.۳. وزن خشک ریشه

نتایج نشان‌دهنده این است که اثر متقابل ژنوتیپ و فراهمی آب تعیین‌کننده پاسخ ریشه می‌باشد. البته باید توجه داشت که وزن ریشه شاخص مناسبی برای توجیه حد فعالیت یا جذب آب توسط ریشه نیست، زیرا ریشه‌های موین درحالی‌که ممکن است فعال‌ترین بخش جذبی ریشه باشند، از نظر وزنی بخش ناچیزی از کل وزن ریشه را تشکیل می‌دهند، بنابراین لایه‌ای از خاک که بیش‌ترین وزن ریشه را دارد، الزاماً بیش‌ترین جذب آب و مواد غذایی را ندارد (Farre & Faci, 2009).

۳.۳. عمق ریشه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل رژیم آبیاری در ژنوتیپ بر عمق ریشه معنی‌دار بود (جدول ۴) و این بدان معنی است که پاسخ ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی یکسان نبوده و میزان افزایش/کاهش ارزش صفت در اثر تنش خشکی برای برخی از ژنوتیپ‌ها بیش‌تر از برخی دیگر بوده است. اگرچه اعتقاد اغلب پژوهش‌گران بر این است که در گیاهان زراعی حداکثر عمق ریشه، یک صفت ژنتیکی است (Narayanan *et al.*, 2014). در عین حال همانند نتایج این آزمایش، این صفت تحت تأثیر عوامل محیطی نیز قرار می‌گیرد (Pardo *et al.*, 2000). نتایج نشان داد در تیمار آبیاری کامل و تنش خشکی حداکثر عمق ریشه در توده سودانی و حداقل آن از رقم ناز تک‌شاخه به‌دست آمد (شکل ۳). نتایج بیان‌گر آن است که اگرچه در تمامی ژنوتیپ‌ها اعمال تنش خشکی باعث افزایش عمق ریشه شد، اما در ژنوتیپ‌های اولتان، ناشکوفای آمریکایی، توده سودانی و دشتستان ۲، عمق ریشه در شرایط تنش نسبت به تیمار آبیاری کامل بین ۳۰ تا ۴۴ درصد افزایش پیدا کرد، درحالی‌که در رقم ناز تک‌شاخه و داراب ۱، افزایش عمق ریشه به‌ترتیب برابر ۱۸ و ۲۴ درصد بود (شکل ۳).

در تمامی ژنوتیپ‌ها و در هر دو تیمار آبیاری (به‌استثنای توده سودانی در تیمار تنش خشکی) وزن خشک ریشه با افزایش عمق خاک کاهش پیدا کرد (جدول ۳). به‌ترتیب در ارقام ناز تک‌شاخه، دشتستان ۲، داراب ۱، اولتان، ژنوتیپ ناشکوفای آمریکایی و توده سودانی در تیمار آبیاری کامل ۷۸، ۶۲، ۷۰، ۶۰، ۴۵ و ۴۴ درصد از وزن خشک کل ریشه در لایه بالایی صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک قرار داشت. این مقادیر در شرایط تنش خشکی برابر ۶۷، ۴۶، ۶۳، ۴۶، ۴۳ و ۲۳ درصد به‌ترتیب در ژنوتیپ‌های یادشده بود (جدول ۳). در توده سودانی، افزایش عمق خاک تا ۹۰ سانتی‌متری از سطح خاک وزن خشک ریشه را افزایش داد و پس از آن روند نزولی وزن خشک ریشه مشاهده شد (جدول ۳). از طرف دیگر اعمال تنش خشکی باعث گردید مجموع وزن خشک ریشه سه رقم ناز تک‌شاخه، داراب ۱ و دشتستان ۲ با نسبت‌های مختلف کاهش یابد (جدول ۳). در سه رقم یاد شده اعمال شرایط تنش به‌ترتیب موجب کاهش ۲۲، ۱۵ و ۱۶ درصدی وزن خشک کل ریشه شد. در مقابل در رقم اولتان، ژنوتیپ ناشکوفای آمریکایی و توده سودانی، مجموع وزن خشک ریشه در مواجهه با شرایط تنش یا تغییر محسوسی نداشته، مانند رقم اولتان، و یا حتی تا ۱۲ درصد افزایش یافته است، مانند آنچه در ژنوتیپ ناشکوفای آمریکایی ثبت شد (جدول ۳). شاید بتوان کاهش وزن خشک ریشه در ارقام ناز تک‌شاخه، داراب ۱ و دشتستان ۲ را در شرایط تنش خشکی به اختصاص کربن تولیدشده به سایر مسیرهای متابولیک مؤثر در تخفیف اثر تنش مربوط دانست. گزارش شده است که در زمان شروع تنش خشکی، گسترش برگ متوقف می‌شود، درحالی‌که جذب کربن هم‌چنان در حدود نزدیک به مقادیر نرمال باقی می‌ماند. کربن اضافی تولیدشده ممکن است ذخیره شود و برای تنظیم اسمزی به‌کار رود و یا آن‌که به رشد ریشه اختصاص یابد (Palta *et al.*, 2011).

ارزیابی ویژگی‌های ریشه و اندام هوایی ژنوتیپ‌های کنجد تحت شرایط مختلف رطوبت خاک

جدول ۳. مقایسه میانگین وزن خشک ریشه (گرم) ژنوتیپ‌های کنجد در تیمارهای مختلف آبیاری

تنش خشکی عمق خاک (cm)						آبیاری کامل عمق خاک (cm)						
۱۵۰-۰	۱۵۰-۱۲۰	۱۲۰-۹۰	۹۰-۶۰	۶۰-۳۰	۳۰-۰	۱۵۰-۰	۱۵۰-۱۲۰	۱۲۰-۹۰	۹۰-۶۰	۶۰-۳۰	۳۰-۰	
۸/۹b	۰b	۰/۷bc	۱/۶b	۲/۵b	۴/۱a	۸/۷b	۰	۰	۰/۸b	۲/۶a	۵/۳a	اولتان
۴d	۰b	۰d	۰/۵cd	۱c	۲/۵b	۴/۸d	۰	۰	۰c	۱/۴c	۳/۴c	داراب یک
۵/۴c	۰b	۰/۳c	۱bc	۱/۶c	۲/۵b	۶/۴c	۰	۰	۰/۶b	۱/۸b	۴bc	دشتستان دو
۳/۶d	۰b	۰d	۰/۲d	۱c	۲/۴b	۴/۶d	۰	۰	۰c	۱c	۳/۶c	ناز تک‌شاخه
۹/۵b	۰b	۱/۳a	۳a	۲/۸b	۲/۴b	۸/۶b	۰	۰	۱/۹a	۲/۷a	۴bc	توده سودانی
۱۱/۸a	۰/۶a	۰/۹ab	۱/۴b	۴/۱a	۴/۸a	۱۰/۵a	۰	۰	۲/۵a	۳/۳a	۴/۸ab	ناشکوکا آمریکایی

در هر ستون میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح آماری پنج درصد ندارند. داده‌ها میانگین دو سال آزمایش هستند.

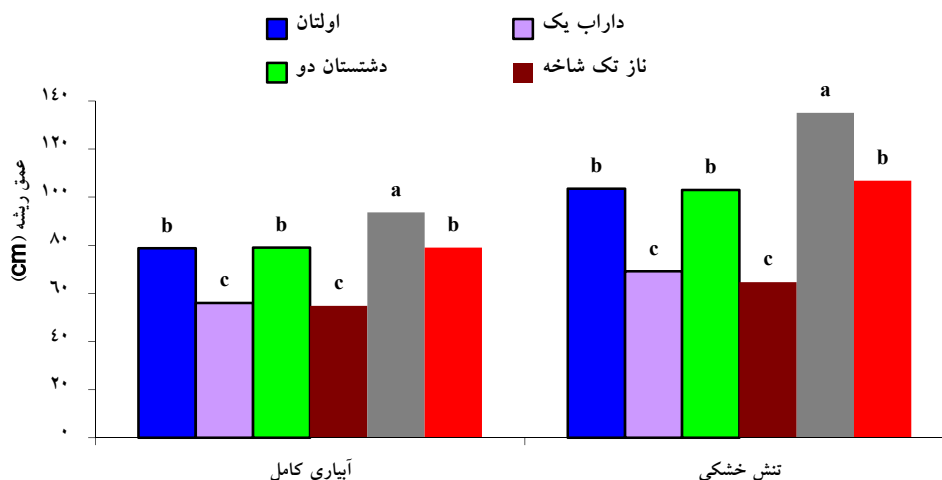
جدول ۴. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات مرتبط با ریشه و اندام هوایی گیاه کنجد تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و ژنوتیپ

منابع تغییر	درجه آزادی	عمق ریشه	وزن خشک برگ	سطح برگ	وزن خشک تک‌بوته	نسبت وزن ریشه به اندام هوایی
سال	۱	۲۳۴ **	۵۴/۶ **	۱۵۶۷۵ **	۲۵۴ **	۰/۱۶ **
رژیم آبیاری (I)	۱	۱۳۲۰۷ **	۹۶۷ **	۱۱۵۹۲۶ **	۲۶۸۰ **	۰/۱۵ **
سال × رژیم آبیاری	۱	۶۰/۱ ns	۶/۵۵ **	۱۹۸ ns	۱۲/۶ ns	۰/۰۰۵ ns
ژنوتیپ (G)	۵	۶۸۲۳ **	۱۱۳ **	۷۰۷۶۲ **	۵۹۴ **	۰/۰۸ **
سال × ژنوتیپ	۵	۷۷/۹ *	۵/۵۷ **	۱۴۲۱ **	۴/۰۴ ns	۰/۰۴ **
رژیم آبیاری × ژنوتیپ	۵	۵۰۵ **	۲/۴۴ **	۳۱۴۱ **	۱۵/۵ ns	۰/۰۰۷ **
سال × رژیم آبیاری × ژنوتیپ	۵	۱۱/۰ ns	۰/۵۰ ns	۸۴/۵ ns	۲/۷۲ ns	۰/۰۰۴ ns
خطای آزمایشی	۷۲	۳۳/۰	۰/۲۵	۸۷/۹	۱۸/۲	۰/۰۰۲
ضریب تغییرات (%)		۶۷۳	۶/۸۱	۴/۹۶	۱۴/۳۴	۱۸/۰۷

ns، * و **: به ترتیب بدون اثر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

براساس قابلیت افزایش عمق ریشه به اعماق خاک و جذب آب انجام داد که در مقایسه با فرایندهای تنظیم اسمزی برای گیاه کم هزینه‌تر اما کارآمدتر می‌باشد (Strock *et al.*, 2019). این انتخاب به‌ویژه برای ژنوتیپ‌هایی که تنظیم اسمزی محدودتری دارند مناسب‌تر است (Wasaya *et al.*, 2018). با این حال، باید توجه داشت که تحمل به تنش خشکی صفت پیچیده‌ای است و تنها ریشه عمیق نمی‌تواند باعث تولید بیش‌تر محصول در شرایط تنش شود، اما می‌توان از ژنوتیپ‌هایی با ریشه عمیق حداقل در اصلاح این صفت به‌عنوان یکی از سازوکارهای تحمل استفاده کرد.

تفاوت ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در این آزمایش نوید این موضوع را می‌دهد که می‌توان به دنبال ژنوتیپ‌هایی بود که در تنش‌های احتمالی قادر به دستیابی به رطوبت در لایه‌های عمیق‌تر خاک بوده و از این طریق نیاز آبی خود را تأمین نمایند. نتایج Purushothaman *et al.* (2017) نیز نشان می‌دهد که در ارقام متحمل و نیمه‌متحمل نخود، عمق ریشه در شرایط تنش نسبت به شاهد افزایش پیدا کرده است، درحالی‌که تنش خشکی در رقم حساس سبب کاهش عمق ریشه نسبت به شرایط آبیاری کامل شده است که این عامل محدودیتی اساسی برای ارقام حساس است. در شرایط تنش خشکی برای انتخاب ارقام پرمحکم می‌توان انتخاب را



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل رژیم آبیاری در ژنوتیپ بر عمق ریشه کنجد. در هر رژیم آبیاری میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح آماری پنج درصد ندارند. داده‌ها میانگین دو سال آزمایش هستند. آبیاری کامل: آبیاری پس از مصرف ۴۰ درصد رطوبت قابل استفاده. تنش خشکی: آبیاری پس از مصرف ۸۰ درصد رطوبت قابل استفاده.

خشکی به وقوع پیوست. به‌طورکلی اندازه، موفولوژی و ساختمان ریشه تعیین‌کننده توانایی گیاه در جذب آب و مواد غذایی می‌باشد و اندازه نسبی و سرعت رشد اندام هوایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Costa et al., 2002). سیستم‌های ریشه بهینه می‌تواند رشد مطلوب اندام هوایی از جمله برگ را به‌دنبال داشته باشد.

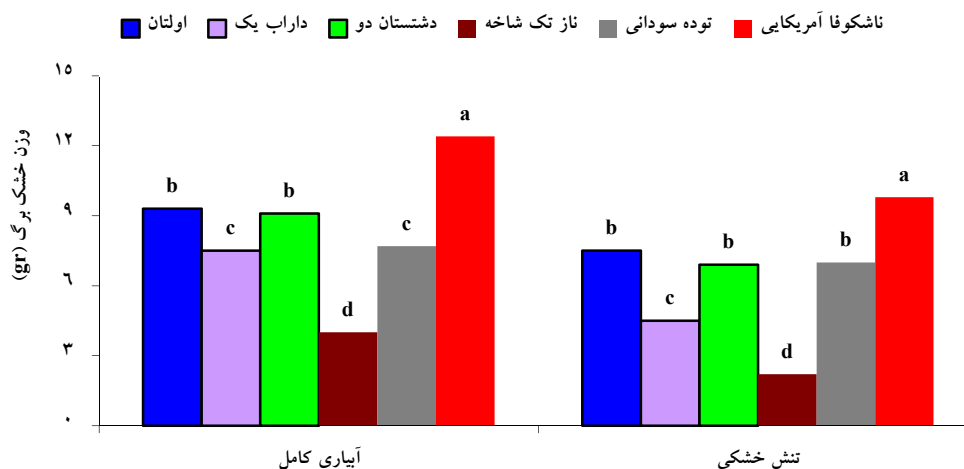
۵.۳. سطح برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل رژیم آبیاری در ژنوتیپ بر سطح برگ معنی‌دار بود (جدول ۴). مشابه با نتایج وزن خشک برگ، در صفت سطح برگ نیز در هر دو تیمار آبیاری ژنوتیپ ناشکوفای آمریکایی حداکثر سطح برگ را تولید کرد (شکل ۵). اگرچه تنش خشکی باعث کاهش سطح برگ در تمامی ژنوتیپ‌های مورد مطالعه شد، اما ژنوتیپ‌های مختلف درصدهای متفاوتی از کاهش سطح برگ را در واکنش به تنش خشکی نشان دادند که مبین تنوع ژنتیکی این صفت در بین ژنوتیپ‌ها می‌باشد.

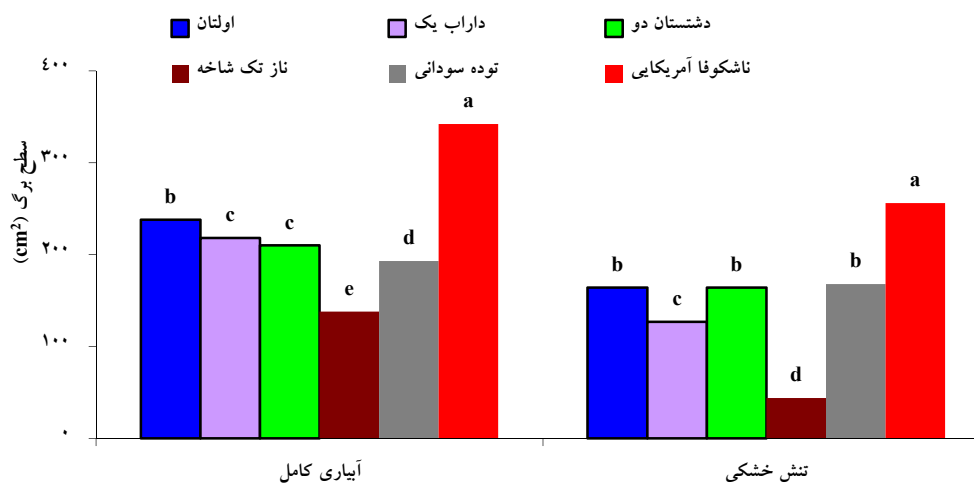
۴.۳. وزن خشک برگ

اثر اصلی تیمارهای آزمایشی و اثر متقابل رژیم آبیاری در ژنوتیپ بر صفت وزن خشک برگ در سطح آماری یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). همان‌طورکه انتظار می‌رفت کاهش فراهمی آب با افت وزن خشک برگ در تمامی ژنوتیپ‌ها همراه بود به‌طوری‌که تیمار تنش خشکی در مقایسه با آبیاری کامل دو گرم معادل ۲۴ درصد وزن خشک برگ را کاهش داد. نتایج نشان داد که در هر دو تیمار آبیاری، ژنوتیپ ناشکوفای آمریکایی نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها وزن خشک برگ بیشتری را تولید کرد (شکل ۴). هم‌چنین حداقل مقدار کاهش وزن برگ برابر با نه درصد در توده سودانی تا حداکثر کاهش برابر با ۴۳ درصد در رقم ناز تک‌شاخه مشاهده شد. با توجه به صفات بررسی‌شده ریشه مشخص می‌شود در ژنوتیپ‌هایی که از لحاظ صفات ریشه به‌ویژه تراکم طولی ریشه برتر بودند مانند توده سودانی و ژنوتیپ ناشکوفای آمریکایی حداقل کاهش وزن خشک برگ ناشی از تنش

ارزیابی ویژگی‌های ریشه و اندام هوایی ژنوتیپ‌های کنجد تحت شرایط مختلف رطوبت خاک



شکل ۴. مقایسه میانگین اثر متقابل رژیم آبیاری در ژنوتیپ بر وزن خشک برگ کنجد. در هر رژیم آبیاری میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح آماری پنج درصد ندارند. داده‌ها میانگین دو سال آزمایش هستند. آبیاری کامل: آبیاری پس از مصرف ۴۰ درصد رطوبت قابل استفاده. تنش خشکی: آبیاری پس از مصرف ۸۰ درصد رطوبت قابل استفاده.



شکل ۵. مقایسه میانگین اثر متقابل رژیم آبیاری در ژنوتیپ بر سطح برگ کنجد. در هر رژیم آبیاری میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح آماری پنج درصد ندارند. داده‌ها میانگین دو سال آزمایش هستند. آبیاری کامل: آبیاری پس از مصرف ۴۰ درصد رطوبت قابل استفاده. تنش خشکی: آبیاری پس از مصرف ۸۰ درصد رطوبت قابل استفاده.

شرایط کمبود آب کاهش هدایت هیدرولیکی سلول‌های برگ می‌باشد که به‌نوبه خود سبب کاهش انتقال آب شده و طولیل شدن و توسعه سلول را به تعویق می‌اندازد (Fritschi *et al.*, 2003). وجود یک همبستگی مستقیم و معنی‌دار بین

چنین می‌توان استنباط نمود که کاهش سطح برگ در ژنوتیپ‌های کنجد در شرایط تنش می‌تواند با کاهش محتوای نسبی آب برگ در ارتباط باشد. گزارش شده است که یکی از دلایل اصلی کاهش توسعه برگ تحت

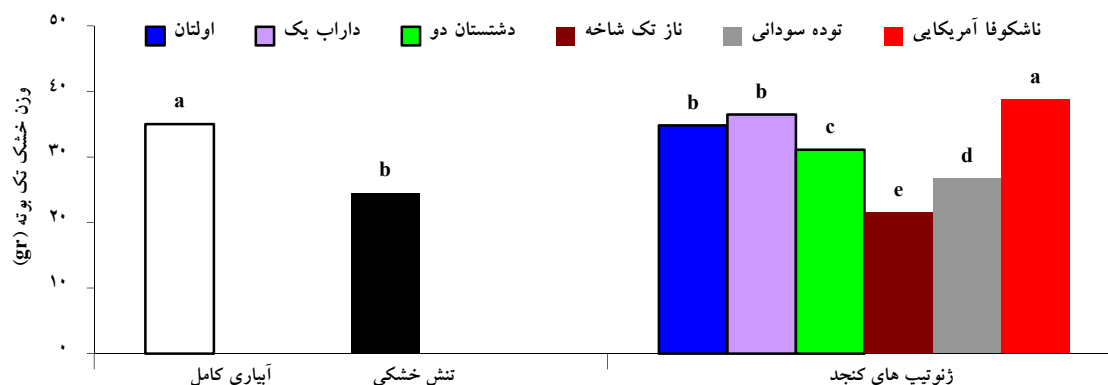
ژنوتیپ‌های کنجد نیز از نظر وزن خشک بوته با یکدیگر اختلاف معنی‌داری داشتند (شکل ۶). بیش‌ترین وزن خشک بوته در ژنوتیپ ناشکوفای آمریکایی (۳۹ گرم) و کم‌ترین آن در رقم ناز تک‌شاخه (۲۲ گرم) مشاهده شد (شکل ۶). مهم‌ترین دلیل برای پایین‌بودن عملکرد ماده خشک رقم ناز تک‌شاخه ویژگی عدم شاخه‌زنی این رقم می‌باشد، به این دلیل که بین تعداد شاخه فرعی و عملکرد ماده خشک کنجد همبستگی مستقیم و معنی‌داری گزارش شده است (Ebrahimian *et al.*, 2019). به‌علاوه باید توجه داشت که تفاوت ژنوتیپ‌ها از لحاظ عملکرد ماده خشک می‌تواند ناشی از پتانسیل ژنتیکی متفاوت آن‌ها نیز باشد. در بین ژنوتیپ‌ها، توده سودانی حداقل کاهش وزن خشک تک‌بوته (۲۲ درصد) را در اثر اعمال تنش نشان داد و به‌ترتیب پس از آن ژنوتیپ ناشکوفای آمریکایی (۲۷ درصد)، دشتستان ۲ (۲۹ درصد)، اولتان (۳۱ درصد)، داراب ۱ (۳۴ درصد) و ناز تک‌شاخه (۴۰ درصد) قرار داشتند. در این آزمایش نیز ژنوتیپ‌هایی مانند اولتان و ناشکوفای آمریکایی که از لحاظ ویژگی‌های ریشه از جمله عمق ریشه و تراکم طولی ریشه برتر بودند، علاوه بر این‌که وزن خشک تک‌بوته بیش‌تری داشتند، حداقل کاهش وزن خشک را در شرایط تنش نشان دادند. در این بین وضعیت توده سودانی اندکی متفاوت بود. در این ژنوتیپ اگرچه حداقل افت وزن خشک اندام هوایی در اثر تنش مشاهده شد، اما وزن خشک تک‌بوته این ژنوتیپ، با وجود ویژگی‌های برتر آن در صفات ریشه، در زمره ژنوتیپ‌های برتر نبود. برخلاف سایر ارقام و ژنوتیپ‌ها، در توده سودانی بهبود ژنتیکی برای رشد و نمو آن صورت نگرفته است و تقریباً ویژگی‌های رشدی آن مشابه با گونه‌های غیراهلی است. بنابراین پایین بودن وزن خشک تک‌بوته آن در تیمارهای مختلف آبیاری منطقی به‌نظر می‌رسد.

محتوی نسبی آب برگ و سطح برگ (Gholamhoseini *et al.*, 2013) این فرضیه را حمایت می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه و رشد آن‌ها می‌تواند در مقاومت به تنش خشکی تأثیر زیادی داشته باشد. زیرا افزایش رشد، طول و نفوذ ریشه، منجر به افزایش جذب آب از اعماق خاک و حفظ فعالیت ریشه و تداوم رشد اندام هوایی می‌شود (Palta & Yang, 2014). به بیان دیگر، همبستگی مثبت و معنی‌داری بین رشد ریشه و تحمل بیش‌تر به خشکی وجود دارد (Zhang *et al.*, 2009). در این آزمایش نیز ژنوتیپ‌های ناشکوفای آمریکایی، توده سودانی، اولتان و دشتستان ۲، با داشتن ریشه‌های عمیق و تراکم طولی ریشه در لایه‌های پایینی خاک می‌توانند از طریق جذب آب از اعماق خاک، کاهش فشار آب ناشی از تنش خشکی را با کاهش حداقلی سطح برگ (به‌طور متوسط کم‌تر از ۲۵ درصد) جبران کنند، درحالی‌که در ارقام ناز تک‌شاخه و داراب ۱، به‌دلیل عدم توسعه مطلوب ریشه به‌ویژه در لایه‌های پایینی خاک، در شرایط تنش خشکی با کاهش شدید سطح برگ (بیش از ۵۰ درصدی) و به‌دنبال آن کاهش تعرق، تنش خشکی را تحمل می‌کنند.

۶.۳. وزن خشک تک‌بوته

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی تیمارهای آزمایشی بر وزن خشک بوته معنی‌دار بود (جدول ۴). با کاهش فراهمی آب در تیمار تنش، وزن خشک تک‌بوته ۳۰ درصد کاهش یافت (شکل ۶). نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های دیگر پژوهش‌گران مبنی بر کاهش وزن خشک اندام هوایی کنجد در اثر تنش خشکی مشابه است (Jouyban and Moosavi, 2012). کاهش مداوم آب در خاک باعث کاهش اندازه و سطح برگ و در نتیجه کاهش ماده خشک اندام هوایی می‌شود (Kenan *et al.*, 2007).

ارزیابی ویژگی‌های ریشه و اندام هوایی ژنوتیپ‌های کنجد تحت شرایط مختلف رطوبت خاک

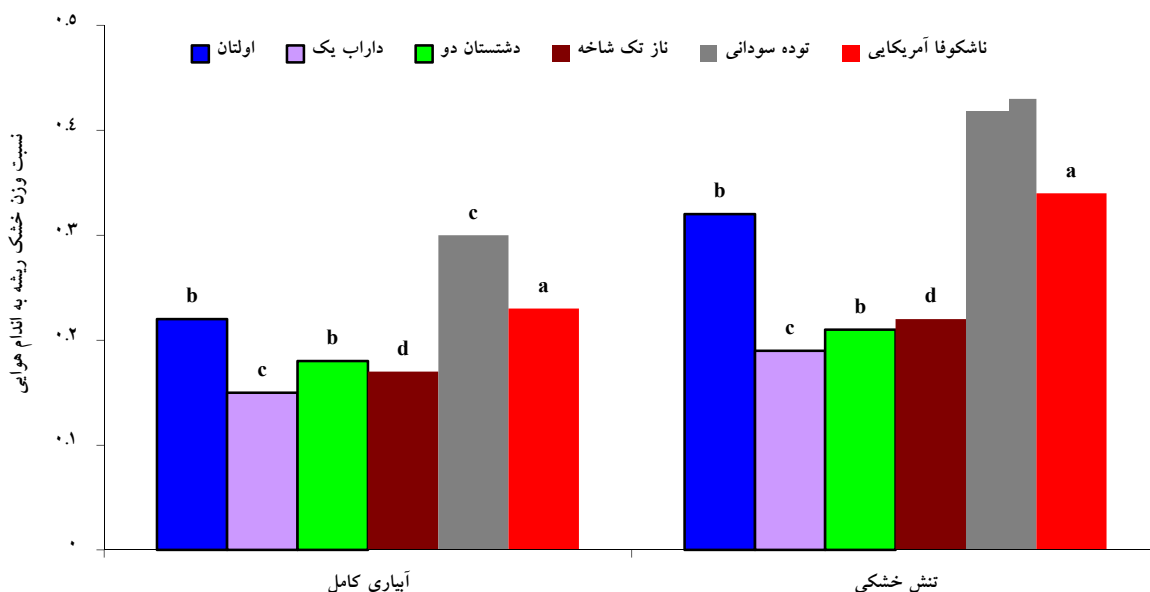


شکل ۶. مقایسه میانگین اثر اصلی رژیم آبیاری و ژنوتیپ بر وزن خشک تک بوته کنجد. در هر تیمار (رژیم آبیاری و ژنوتیپ) میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح آماری پنج درصد ندارند. داده‌ها میانگین دو سال آزمایش هستند. آبیاری کامل: آبیاری پس از مصرف ۴۰ درصد رطوبت قابل استفاده. تنش خشکی: آبیاری پس از مصرف ۸۰ درصد رطوبت قابل استفاده.

اثر متقابل رژیم آبیاری در ژنوتیپ نیز بیان‌گر آن است که در هر دو تیمار آبیاری حداقل نسبت وزن ریشه به اندام هوایی در رقم داراب ۱ و حداکثر آن در توده سودانی به ثبت رسید (شکل ۷). از طرف دیگر، در سه ژنوتیپ اولتان، ناشکوفای آمریکایی و توده سودانی تنش خشکی باعث افزایش بیش از ۴۰ درصدی نسبت وزن ریشه به اندام هوایی شد. در سه ژنوتیپ دیگر این افزایش به‌طور متوسط برابر با ۲۵ درصد بود (شکل ۷). گزارش شده است که ارقام متحمل به خشکی با افزایش نسبت وزن ریشه به اندام هوایی قادر می‌شوند در دوره‌های خشکی، برای جذب آب ریشه‌های خود را به لایه‌هایی از خاک که پیش از این مورد استفاده نبوده‌اند، نفوذ دهند و از این طریق تعرق و فتوسنتز خالص مثبت را در شرایط تنش حفظ نمایند (Fang *et al.*, 2017). از آنجایی که نسبت بالاتر وزن ریشه به اندام هوایی توان گیاه را برای افزایش تحمل به خشکی بهبود می‌بخشد، لذا اغلب متخصصان فیزیولوژی گیاهی این نسبت را به‌عنوان یک معیار مهم برای گزینش ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی معرفی می‌نمایند (Vadez, 2014).

۷.۳. نسبت وزن ریشه به اندام هوایی

نتایج آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد که علاوه بر اثر اصلی تیمارهای آزمایشی، اثر متقابل رژیم آبیاری در ژنوتیپ نیز بر نسبت وزن ریشه به اندام هوایی در سطح آماری یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). اعمال تنش خشکی باعث افزایش معنی‌دار نسبت وزن ریشه به اندام هوایی شد. مطالعات متعدد نشان داده است که تنش خشکی، نسبت وزن ریشه به اندام هوایی را در اکثر گیاهان زراعی افزایش می‌دهد و این افزایش به کاهش بیش‌تر رشد اندام هوایی نسبت به ریشه مربوط می‌باشد (Fageria, 2004; Berntson, 1994). ریشه‌ها به‌علت نزدیکی به منبع محدودشده (در اینجا آب)، اولین فرصت را برای استفاده از آب دارند، درحالی‌که در مورد بهره‌برداری از مواد فتوسنتزی تشکیل‌شده در اندام هوایی آخرین شانس را دارند. بنابراین تأثیر کاهش فراهمی آب بر ریشه‌ها در مقایسه با اندام هوایی کم‌تر می‌باشد که این امر افزایش نسبت وزن ریشه به اندام هوایی را در اثر وقوع تنش به‌دنبال خواهد داشت. به هر روی، نسبت بالای وزن ریشه به اندام هوایی عامل عمده‌ای برای مقاومت به خشکی در برخی از گیاهان از جمله نخود (Purushothaman *et al.*, 2017) و برنج (Ganapathy *et al.*, 2010) می‌باشد.



شکل ۷. مقایسه میانگین اثر متقابل رژیم آبیاری در ژنوتیپ بر نسبت وزن ریشه به اندام هوایی. در هر رژیم آبیاری میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح آماری پنج درصد ندارند. داده‌ها میانگین دو سال آزمایش هستند. آبیاری کامل: آبیاری پس از مصرف ۴۰ درصد رطوبت قابل استفاده. تنش خشکی: آبیاری پس از مصرف ۸۰ درصد رطوبت قابل استفاده.

۸.۳. همبستگی بین صفات اندام هوایی و ریشه

نتایج نشان می‌دهد که سطح برگ با صفات مختلف ریشه از جمله وزن ریشه و تراکم طولی ریشه (در عمق ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری خاک) در هر دو تیمار آبیاری همبستگی مثبت و معنی‌داری دارد (جدول ۵). در مقابل، ارتباط معنی‌داری بین سطح برگ و عمق ریشه در شرایط آبیاری کامل مشاهده نشد. در حالی که بین این دو صفت در شرایط تنش خشکی همبستگی مستقیم و معنی‌داری وجود داشت (جدول ۵). وزن خشک برگ نیز مشابه با صفت سطح برگ با اکثر صفات اندازه‌گیری شده در ریشه همبستگی مستقیمی داشت (جدول ۵). وزن خشک بوته به‌عنوان مهم‌ترین صفت اندام هوایی در این مطالعه با وزن ریشه و تراکم طولی ریشه در عمق ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری خاک در هر دو تیمار آبیاری همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت (جدول ۵). وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین وزن خشک اندام هوایی و

صفات مختلف ریشه گویای تأثیر مثبت و مستقیم پاسخ‌های رشدی ریشه بر رشد و تجمع ماده خشک اندام هوایی گیاه به‌ویژه در شرایط تنش می‌باشد. پژوهش‌های گذشته نشان داده‌اند که سامانه ریشه‌ای عمیق‌تر و انبوه‌تر به‌ویژه در لایه‌های زیر سطحی خاک تأثیر بیشتری بر عملکرد گیاهان زراعی دارد (Waines & Ehdai, 2005). در این آزمایش نیز همبستگی معنی‌دار میان تراکم طولی ریشه در عمق‌های مختلف خاک با وزن خشک تک‌بوته در شرایط تنش خشکی اثبات‌کننده فرضیه فوق است (جدول ۵).

این یافته‌ها با نتایج (Jongrunklang et al., 2012) مطابقت دارد که نشان دادند تراکم ریشه در اعماق، بیش‌ترین تأثیر را بر میزان عملکرد در شرایط تنش خشکی دارد. زیرا در شرایطی که رطوبت تنها در اعماق پایین خاک ذخیره شده است وجود ریشه در این نواحی می‌تواند رشد گیاه را تضمین کند.

جدول ۵. ضرایب همبستگی صفات ریشه با اندام هوایی در تیمار آبیاری کامل و تنش خشکی

نسبت وزن ریشه به اندام هوایی	وزن خشک برگ	وزن خشک تک‌بوته	نسبت وزن ریشه به اندام هوایی	تنش خشکی				
				وزن خشک برگ	وزن خشک تک‌بوته	نسبت وزن ریشه به اندام هوایی		
۰/۴۰ ns	۰/۶۱*	۰/۵۸*	۰/۵۶*	۰/۶۳**	۰/۴۶ ns	۰/۴۸ ns	۰/۳۴ ns	۱
۰/۷۴**	۰/۶۰*	۰/۷۵**	۰/۷۴**	۰/۷۱**	۰/۵۸*	۰/۷۶**	۰/۶۲**	۲
۰/۸۷**	۰/۳۱ ns	۰/۵۳*	۰/۴۸ ns	۰/۶۷**	۰/۵۰ ns	۰/۶۸**	۰/۶۵**	۳
۰/۸۵**	۰/۴۳ ns	۰/۶۴**	۰/۶۰*	۰/۷۳**	-۰/۱۸ ns	۰/۰۱ ns	-۰/۱۲ ns	۴
۰/۶۸**	-۰/۰۷ ns	۰/۱۴ ns	۰/۱۲ ns	-	-	-	-	۵
۰/۸۲**	۰/۵۷*	۰/۷۳**	۰/۶۹**	۰/۷۷**	۰/۵۴*	۰/۶۶**	۰/۵۵*	۶
۰/۶۵**	۰/۴۵ ns	۰/۷۱**	۰/۶۴**	۰/۵۷*	۰/۳۳ ns	۰/۴۹ ns	۰/۳۲ ns	۷
-۰/۰۳ ns	۰/۳۲ ns	۰/۱۴ ns	۰/۱۳ ns	۰/۲۵ ns	۰/۱۷ ns	۰/۰۷ ns	-۰/۰۳ ns	۸
۰/۶۳**	۰/۵۸*	۰/۷۲**	۰/۸۳**	۰/۶۲**	۰/۵۸*	۰/۷۳**	۰/۶۳**	۹
۰/۸۱**	۰/۱۲ ns	۰/۳۵ ns	۰/۳۰ ns	۰/۵۵*	۰/۴۵ ns	۰/۶۱*	۰/۶۴**	۱۰
۰/۱۳ ns	۰/۱۸ ns	۰/۲۵ ns	۰/۲۶ ns	۰/۶۰**	-۰/۲۷ ns	-۰/۰۶ ns	-۰/۱۹ ns	۱۱
۰/۶۳**	-۰/۰۸ ns	۰/۱۳ ns	۰/۱۱ ns	-	-	-	-	۱۲

۱: وزن خشک ریشه در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری خاک، ۲: وزن خشک ریشه در عمق ۳۰ تا ۶۰ سانتی متری خاک، ۳: وزن خشک ریشه در عمق ۶۰ تا ۹۰ سانتی متری خاک، ۴: وزن خشک ریشه در عمق ۹۰ تا ۱۲۰ سانتی متری خاک، ۵: وزن خشک ریشه در عمق ۱۲۰ تا ۱۵۰ سانتی متری خاک، ۶: مجموع وزن خشک ریشه، ۷: عمق ریشه، ۸: تراکم طولی ریشه در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری خاک، ۹: تراکم طولی ریشه در عمق ۳۰ تا ۶۰ سانتی متری خاک، ۱۰: تراکم طولی ریشه در عمق ۶۰ تا ۹۰ سانتی متری خاک، ۱۱: تراکم طولی ریشه در عمق ۹۰ تا ۱۲۰ سانتی متری خاک، ۱۲: تراکم طولی ریشه در عمق ۱۲۰ تا ۱۵۰ سانتی متری خاک، ns، * و ** به ترتیب بدون اثر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

۴. نتیجه‌گیری

عمق خاک، وزن خشک ریشه و تراکم طولی ریشه به‌طور خطی کاهش یافت، که نشان‌دهنده کاهش مستمر فعالیت ریشه با افزایش عمق خاک می‌باشد. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که این ارقام سیستم ریشه‌ای ضعیفی در پایین‌تر از عمق ۶۰ سانتی‌متری خاک داشته باشند. در ارقامی مانند دشتستان ۲ و اولتان، در تیمار آبیاری کامل، تقریباً تمامی گسترش ریشه (بیش‌تر از ۹۵ درصد) محدود به عمق صفر تا ۶۰ سانتی‌متری خاک بود. در مقابل و در تیمار تنش، محدوده گسترده‌گی ریشه در این ارقام بیش‌تر شده، به‌طوری‌که ۲۵ درصد از وزن خشک و تراکم طولی ریشه در عمق ۶۰ تا ۹۰ سانتی‌متری خاک مشاهده شد. در ژنوتیپ ناشکوفای آمریکایی و توده سودانی دسترسی

در اکثر مواقع کنجد در زمین‌هایی کشت می‌شود که رطوبت خاک ناچیز و گیاه با دوره‌های متناوب خشکی در طول فصل رشد مواجه می‌شود. زمین‌های این مناطق معمولاً از لحاظ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، نامناسب هستند. در چنین اراضی سیستم ریشه‌ای مناسب برای جذب حداکثر آب محدود موجود در خاک می‌تواند در ثبات عملکرد مؤثر باشد. این ویژگی تنها از طریق مکانیسم‌های سازگاری مرتبط با ریشه و اندام هوایی حاصل خواهد شد.

نتایج این پژوهش نشان داد در ارقامی مانند ناز تک‌شاخه و داراب ۱ در هر دو تیمار آبیاری با افزایش

- Hamel, C., Reid, L.M., & Smith, D.L. (2002). Root morphology of contrasting maize genotypes. *Agronomy Journal*, 94, 96-101.
- Ebrahimian, E., Seyyedi, S.M., Bybordi, A., & Damalas, C. A. (2019). Seed yield and oil quality of sunflower, safflower, and sesame under different levels of irrigation water availability. *Agricultural Water Management*, 218, 149-157
- Fageria, N. K. (2004). Influence of dry matter and length of roots on growth of five field crops at varying soil zinc and copper levels. *Journal of Plant Nutrition*, 27, 1517-1523.
- Fang, Y., Du, Y., Wang, J., Wu, A., Qiao, S., Xu, B., Zhang, S., Siddique, K.H.M., & Chen, Y. (2017). Moderate drought stress affected root growth and grain yield in old, modern and newly released cultivars of Winter Wheat. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1-14.
- Farre, L., & Faci, J. M. (2009). Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a mediterranean environment. *Agricultural Water Management*, 96, 383-394.
- Figuroa-Bustos, V., Palta, J.A., Chen, Y., & Siddique, K.H.M. (2018). Characterization of Root and Shoot Traits in Wheat Cultivars with Putative Differences in Root System Size. *Agronomy*, 8, 109-123.
- Fritschi, F.B., Roberts, B.A., Travis, R.L., Rains, D.W., & Hutmacher, R.B. (2003). Response of irrigated acala and pima cotton to nitrogen fertilizations: growth, dry matter partitioning, and yield. *Agronomy Journal*, 95, 133-146.
- Ganapathy, S., Ganesh, S.K., Shanmugasundaram, P., & Chandra Babu, R. (2010). Studies on root traits for drought tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) under controlled (PVC pipes) condition. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 1(4), 1016-1020.
- Gholamhoseini, M., Ghalavand, A., Khodaei-Joghan, A., Dolatabadian, A., Zakikhani, H., & Farmanbar, E. (2013). Zeolite-amended cattle manure effects on sunflower yield, seed quality, water use efficiency and nutrient leaching. *Soil & Tillage Research*, 126, 193-202.
- Gregory, P.J. (2006). *Plant Roots: Growth, activity and interaction with soils*. Blackwell Publishing Ltd. UK.
- Jongrunklang, N., Toomsan, B., Vorasoot, N., Jogloy, S., Boote, K.J., Hoogenboom, G., & Patanothai, A. (2012). Classification of root distribution patterns and their contributions to yield in peanut genotypes under midseason drought stress. *Field Crops Research*, 127, 181-190.

ریشه به اعماق خاک بیش‌تر بود و تا ۵۰ درصد از وزن خشک و تراکم طولی ریشه در عمق ۶۰ تا ۹۰ سانتی‌متر خاک ثبت شد. از آنجایی که حتی در شرایط تنش خشکی شدید مقدار قابل‌توجهی رطوبت در اعماق خاک وجود دارد، ژنوتیپ‌هایی که بتوانند از این رطوبت بهره ببرند در شرایط تنش خشکی موفق هستند. به طوری که نتایج نشان داد ژنوتیپی مانند ناشکوفای آمریکایی که از لحاظ ویژگی‌های ریشه از جمله عمق ریشه و تراکم طولی ریشه در مقایسه با سایر ارقام برتر بود، علاوه بر این که وزن خشک تک‌بوته بیش‌تری داشت، حداقل کاهش وزن خشک را در شرایط تنش نشان داد.

۵. تشکر و قدردانی

از مسئولان محترم مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر به خاطر تأمین هزینه‌های اجرایی این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد. مقاله حاضر مستخرج از پروژه پژوهشی مصوب در مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر به شماره ۹۶۰۶۶۹-۰۳-۰۳-۲ می‌باشد.

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Berntson, G.M. (1994). Modelling root architecture: are there tradeoffs between efficiency and potential of resource acquisition? *New Phytologist*, 127, 483-493.
- Bengough, A.G., McKenzie, B.M., Hallett, P.D., & Valentine, T.A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, 62, 59-68.
- Brück, H., Sattelmacher, B., & Payne, W.A. (2003). Varietal differences in shoot and rooting parameters of pearl millet on sandy soils in Niger. *Plant and Soil*, 251, 175-185.
- Costa, C., Dwyer, L.M., Zhou, X., Dutilleul, P.,

- Jouyban, Z., & Moosavi, S.G. (2012). Seed yield and some yield components of sesame as affected by irrigation interval and different levels of n fertilization and superabsorbent. *African Journal of Biotechnical*, 11(49), 10944-48.
- Kenan, U., Kill, F., Gencoglan, C., & Merdan, H. (2007). Effect of irrigation frequency and amount on water use efficiency and yield of sesame under field condition. *Field Crops Research*, 101, 249-254.
- Khan, M.A., Gemenet, D.C., & Villordon, A. (2016). Root system architecture and abiotic stress tolerance: Current knowledge in root and tuber crops. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1-13.
- Lafitte, H.R., Champoux, M.C., McLaren, G., & O'Toole, J.C. (2001). Rice root morphological traits are related to isozyme group and adaptation. *Field Crops Research*, 71, 57-70.
- Lynch, J.P., & Wojciechowski, T. (2015). Opportunities and challenges in the subsoil: pathways to deeper rooted crops. *Journal of Experimental Botany*, 66, 2199-2210.
- Narayanan, S., Mohan, A., Gill, K.S., & Vara Prasad, P.V. (2014). Variability of root traits in spring wheat germplasm. *PLOS ONE*, 9(6), 1-15.
- Palta, J.A., & Yang, J. (2014). Crop root system behaviour and yield. *Field Crops Research*, 165, 1-4.
- Palta, J.A., Chen, X., Milroy, S.P., Rebetzke, G.J., Dreccer, M.F., & Watt, M. (2011). Large root systems: Are they useful in adapting wheat to dry environments? *Functional Plant Biology*, 38, 347-354.
- Pardo, A., Amato, M., & Chiaranda, F.Q. (2000). Relationships between soil structure, root distribution and water uptake of chickpea (*Cicer arietinum* L.). Plant growth and water distribution. *European Journal of Agronomy*, 13, 39-45.
- Purushothaman, R., Krishnamurthy, L., Upadhyaya, H.D., Vadez, V., & Varshney, R.K. (2017). Root traits confer grain yield advantages under terminal drought in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Field Crops Research*, 201, 146-161.
- Sponchiado, B.N., White, J.W., Castillo, J.A., & Jones, P.G. (1989). Root growth of four common bean cultivars in relation to drought tolerance in environments with contrasting soil types. *Experimental Agriculture*, 25, 249-257.
- Strock, C.F., Burrige, J., Massas, A.S.F., Beaver, J., Beebe, S., Camilo, S.A., Fourie, D., Jochua, C., Miguel, M., Miklas P.N., Mndolwa E., Nchimbi-Msolla, S., Polania, J., Porch, T.G., Rosas, J.C., Trapp, J.J., & Lynch J.P. (2019). Seedling root architecture and its relationship with seed yield across diverse environments in *Phaseolus vulgaris*. *Field Crops Research*, 237, 53-64.
- Uga, Y., Sugimoto, K., Ogawa, S., Rane, J., Ishitani, M., Hara, N., Kitomi, Y., Inukai, Y., Ono, K., Kanno, N., Inoue, H., Takehisa, H., Motoyama, R., Nagamura, Y., Wu, J., Matsumoto, T., Takai, T., Okuno, K., & Yano, M. (2013). Control of root system architecture by DEEPER ROOTING 1 increases rice yield under drought conditions. *Nature Genetics*, 45, 1097-1102.
- Vadez, V. (2014). Root hydraulic: The forgotten side of roots in drought adaptation. *Field Crops Research*, 165, 15-24.
- Waines, J.G., & Ehdaie, B. (2005). Optimizing root characters and grain yield in wheat. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*, 41, 1-5.
- Wasaya, A., Zhang, X., Fang, Q., & Yan, Z. (2018). Root Phenotyping for Drought Tolerance: A Review. *Agronomy*, 8(11), 241-261.
- Zhang, X., Chen, S., Sun, H., Wang, Y., & Shao, L. (2009). Root size, distribution and soil water depletion as affected by cultivars and environmental factors. *Field Crops Research*, 114, 75-83.