

اثر تنش خشکی بر رشد و معماری ریشه گندم در مرحله رشد رویشی

بهاره حسینی پور^۱، افراسیاب راهنما^{۱*}، احمد فرخیان فیروزی^۲

۱- کارشناس ارشد و دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز، ۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۲۳ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۹)

چکیده

توسعه گیاهان زراعی با صفات مطلوب ریشه‌ای، آن‌ها را قادر می‌سازد تا در خاک‌های شور و دارای محدودیت آبی، عملکرد بالاتری داشته باشند. هدف از اجرای این مطالعه، تعیین سطوح مورد نظر پتانسیل آب خاک، به منظور دستیابی به واکنش‌های رشدی ریشه و شناسایی تفاوت ژنوتیپی از نظر طول ریشه اصلی و انشعابات ریشه در پاسخ به تنش خشکی بود. در این پژوهش، سه آزمایش گلخانه‌ای جداگانه با استفاده از لوله‌های پی‌وی‌سی (قطر ۱۰/۵ سانتی‌متر و طول ۵۰ سانتی‌متر)، در مرحله رویشی گندم، به صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. تنش خشکی در پتانسیل آب خاک ۷- تا ۸- مگاپاسکال، به عنوان پتانسیل مناسب برای ایجاد پاسخ رشدی معنی‌دار ریشه تعیین شد. بین ارقام گندم از نظر واکنش رشدی ریشه به تنش خشکی، تفاوت معنی‌داری مشاهده شد. خشکی سبب کاهش رشد سیستم ریشه‌ای همه ارقام از جمله طول ریشه‌های اصلی، طول دو ریشه بلندتر، تعداد ریشه اصلی و فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه، به ترتیب به میزان ۱۹، ۲۱، ۳۷ و ۶۶ درصد در مقایسه با شاهد شد. کاهش مقادیر صفات رشدی ریشه برای ارقام متحمل به خشکی در مقایسه با ارقام حساس، کمتر بود. تفاوت ژنوتیپی در پاسخ رشدی ریشه به تنش خشکی در ارقام گندم، بیانگر وجود فرصت‌های مناسب برای بهبود تحمل به خشکی از طریق به نژادی گیاهی است.

واژه‌های کلیدی: انشعاب زنی ریشه، پتانسیل آب خاک، تفاوت ژنوتیپی، تنش خشکی، گندم.

Effect of drought stress on wheat root growth and architecture at vegetative growth stage

Bahare Hosseinalipour¹, AfrasyabRahnama^{1*}, Ahmad Farrokhian Firouzi²

1. Department of Agronomy and Plant Breeding, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran 2. Department of Soil Science and Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran
(Received: October 15, 2018 - Accepted: January 9, 2019)

ABSTRACT

The development of crops with suitable root traits, enable them to have higher yields in soils with higher salt and limited water. The aims of this study were to determine soil water potential levels to obtain a significant root growth response and identify genotypic differences in seminal root length and root branches in response to drought stress. Three separate factorial greenhouse experiments at vegetative stage of wheat were carried out based on completely randomized design with three replications. The optimum water potential level needed to obtain a significant root growth response ranged from -7 to -8 bar. The results showed the genotypic diversity in root growth response to drought stress. Drought stress reduced root system growth such as seminal axile root length, two longest seminal axile roots, number of seminal roots and distance between the root tip and the first branch root by 19, 21, 37 and 46 % respectively, compared to control. The reduction of root growth traits of tolerant drought stress cultivars was less than sensitive ones. Genotypic variation in root growth response to drought stress indicates the suitable opportunities to improve drought tolerance through plant breeding.

Keywords: Root branching, wheat, soil water potential, drought stress, genotypic variation

* Corresponding author E-mail: a.rahnama@scu.ac.ir

مقدمه

تنش خشکی و شوری، از مهم ترین تنش‌های غیر زیستی محدود کننده تولید محصولات زراعی عمده جهان یعنی گندم و برنج هستند. این تنش‌ها، پایداری عملکرد گیاهان زراعی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. در بین گیاهان زراعی، گندم یکی از مهم‌ترین محصولات غذایی است که تجارت جهانی آن، بیش از سایر محصولات کشاورزی است و حدود ۷۰ درصد از اراضی زیر کشت آن، در مناطق خشک و نیمه خشک قرار گرفته است (Yan & Shi, 2013). شیوه‌های زراعی تا حد زیادی باعث افزایش ذخیره سازی و حفظ رطوبت در یک سیستم کشت می‌شوند. این شیوه‌ها می‌توانند رشد و عملکرد محصول که در ارتباط نزدیک با ویژگی‌های رشدی ریشه هستند را بهبود بخشند. از ویژگی‌های رشدی ریشه می‌توان برای غلبه بر محدودیت‌های محیطی، در راستای حفظ طول ریشه و در نتیجه حفظ جذب آب استفاده کرد (Wasson et al., 2012).

توسعه گیاهان زراعی دارای صفات مطلوب ریشه جهت دستیابی به عملکرد بالا در خاک‌های دارای محدودیت آبی، همواره مورد توجه بوده است (Rahnema et al., 2011). شناسایی تنوع ژنتیکی در ویژگی‌های رشدی ریشه می‌تواند از طریق به‌نژادی گیاهی، به بهبود استقرار گیاهچه در خاک‌های خشک و شور و در نتیجه بهبود عملکرد گیاهان زراعی منتهی شود (Richards, 2008). با وجود این، اطلاعات محدودی در زمینه‌ی تنوع ژنوتیپی از نظر ویژگی‌های رشدی ریشه موجود است (Schweiger et al., 2009). مشخص شده است که گیاهان مقاوم و سازگار با محیط‌های خشک، از نظر توسعه سیستم ریشه‌ای، دارای انعطاف پذیری زیادی هستند و این انعطاف پذیری ریشه به تنش خشکی، ممکن است اثرات نامطلوب خشکی بر عملکرد گیاهان زراعی را کاهش دهد (Ehdaie et al., 2012). وقتی ریشه گیاه در معرض کمبود آب خاک قرار می‌گیرد، میزان رشد و تمایز سلول‌های ریشه تغییر می‌کند و معماری سیستم ریشه از نظر میزان انشعاب یا میزان طویل شدن

انشعاب ریشه تغییر می‌یابد. به هر روی، برنامه‌های به‌نژادی در زمینه ویژگی‌های رشدی ریشه، پیچیده‌تر از ویژگی‌های رشدی اندام هوایی است (Wasson et al., 2012). از این رو، درک جامع از چگونگی توسعه سیستم ریشه‌ای در شرایط تنش خشکی، امری ضروری است. در چنین شرایطی، با شناخت معماری سیستم ریشه‌ای می‌توان فرصت مناسبی برای غلبه بر اثرات نامطلوب خشکی و افزایش عملکرد گیاهان زراعی فراهم آورد (Whitmore & Whalley, 2009).

معماری سیستم ریشه‌ای، در واقع ویژگی‌های آرایش فضایی یک سیستم ریشه‌ای را در محل رشد آن تعیین می‌کند و شامل ویژگی‌های هندسی مانند زاویه رشد محور ریشه و ویژگی‌های توپولوژیک آن است که بیانگر الگوی انشعاب زنی و رشد ریشه فرعی است (Manschadi et al., 2008). نتایج آزمایشگاهی و مزرعه‌ای نشان می‌دهد که این صفات می‌توانند اثرات تنش را با افزایش جذب آب، از طریق افزایش طول و تراکم ریشه و نیز استخراج بیشتر آب، از طریق افزایش نفوذ ریشه در عمق تعدیل کنند (Manschadi et al., 2008). گیاهان دارای ریشه‌های عمیق‌تر با قابلیت دسترسی به آب بیشتر، قادر به حفظ هدایت روزنه‌ای بالا و در نتیجه فتوسنتز بالاتر هستند و تاج پوشش خنک‌تری نیز دارند (Lopes & Reynolds, 2010).

طول ریشه به‌عنوان شاخصی برای توانایی گیاهان جهت جذب آب از لایه‌های عمیق‌تر خاک و نفوذپذیری بهتر ریشه‌ها در خاک محسوب می‌شود. از این رو، آگاهی از وضعیت طول ریشه و توزیع آن در پروفیل خاک و همچنین آگاهی از اندازه و شکل سیستم ریشه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Wasson et al., 2012). پژوهش در زمینه صفات سیستم ریشه‌ای، به دلیل روش‌های پیچیده اندازه‌گیری، مستلزم صرف وقت زیادی است. همچنین استفاده از روش‌های فنوتایپینگ برای مطالعات ریشه‌ای در مزرعه با محدودیت همراه است و تفسیر صفات مورد نظر در شرایط آزمایشگاهی بر روی گیاهچه‌های جوان به صفات مورد نظر در سیستم

صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. در راستای اجرای این پژوهش، از لوله‌های پی‌وی‌سی با اندازه‌های یکسان، به قطر ۱۱ سانتی‌متر و طول ۵۰ سانتی‌متر استفاده شد و انتهای لوله‌ها با دو لایه پلک ضخیم و شفاف پوشانده شد. برای خروج زه آب نیز تعدادی منفذ یکسان در انتهای لوله و بر روی طلق‌ها ایجاد شد. سپس درون هر لوله و به منظور سهولت خروج خاک و جلوگیری از آسیب به ریشه در زمان نمونه برداری، یک کیسه پلاستیکی هم‌اندازه با قطر دهانه و ارتفاع لوله‌ها قرار داده شد (Fakhri, 2013). برای آماده سازی خاک مورد نیاز آزمایش، ابتدا از خاک چند مکان مختلف از مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی نمونه برداری شد. پس از خشک شدن نمونه‌ها در هوای آزاد و عبور از الک دو میلی‌متری، میزان هدایت الکتریکی به روش وزنی یک به یک (خاک: آب v/w) با اضافه کردن آب دو بار تقطیر شده و عصاره‌گیری با کاغذ واتمن (۴۱) پس از ۲۴ ساعت، با استفاده از دستگاه هدایت سنج الکتریکی (Inolab Model) اندازه‌گیری شد. پس از خشک شدن نمونه خاک در مجاورت هوا، این نمونه‌ها از الک شش میلی‌متری عبور داده شدند. ماسه نیز پس از عبور از الک دو میلی‌متری با نسبت وزنی مشخص (۴۰ درصد ماسه و ۶۰ درصد خاک) به صورت جداگانه برای هر لوله با خاک ترکیب شد. برای هر لوله پی‌وی‌سی، پنج کیلوگرم خاک مخلوط شده در نظر گرفته شد (Fakhri, 2013). بر اساس نتایج آزمون خاک و حدود بحرانی عناصر، مقادیر محاسبه شده نیتروژن، فسفر و پتاس به خاک اضافه شد (جدول ۱).

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

Table 1. Physicochemical properties of the soil

Soil texture	EC (dS.m ⁻¹)	pH	N (%)	P ₂ O ₅ (mg.kg ⁻¹)	K ₂ O (mg.kg ⁻¹)
Sandy loam	1.8	7.5	0.46	10	200

سانتی‌گراد در روز و 15 ± 3 درجه سانتی‌گراد در شب و نور طبیعی گلخانه نگهداری شدند. در مرحله رشد دو برگگی، تعداد بوته‌ها با تنک کردن، کاهش یافت و دو بوته درون هر لوله پی‌وی‌سی نگهداری شد.

به منظور تعیین پتانسیل رطوبتی خاک در مکش‌های مورد نظر و به دنبال آن تعیین نیاز آبی

ریشه‌ای بالغ در مزرعه نیز مشکل است. از دیگر دلایل بی‌توجهی به ویژگی‌های انطباقی ریشه به خشکی می‌توان به عمق ریشه‌دهی بیشتر و افزایش توزیع طول ریشه در عمق، مشکلات مربوط به عدم دسترسی به ریشه و ارزیابی سیستم ریشه‌ای در خاک، شکل پذیری فنوتیپی وسیع صفات ریشه در پاسخ به شرایط مختلف خاک و عدم استفاده از روش غربالگری فنوتیپی سریع و مقرون به صرفه اشاره کرد (Manschadi *et al.*, 2008). از این رو، توسعه سیستم‌های انتخابی برای ویژگی‌های سیستم ریشه‌ای بالغ، همواره با چالش رو به رو بوده است. با توجه به وجود موانع، انتخاب برای صفات متداول ریشه‌ای، ویژگی‌های معماری ریشه در مراحل اولیه نمو گیاه و رشد و کارکرد سیستم ریشه بالغ در پایان فصل ممکن است به عنوان شاخص مناسب انتخاب در برنامه‌های توسعه گیاه زراعی مورد توجه قرار گیرند. به توجه به اهمیت توسعه سیستم ریشه‌ای در شرایط وجود تنش‌های محیطی و با توجه به وجود ارتباط بین ویژگی‌های معماری ریشه در مراحل اولیه رشد گیاه و مراحل بعدی رشد، این تحقیق با هدف بررسی اثر تنش خشکی بر ویژگی‌های رشدی ریشه و تعیین تفاوت ژنوتیپی در صفات رشدی ریشه برخی ارقام حساس و متحمل به خشکی گندم مورد کشت در کشور در مرحله رشد رویشی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در پاییز ۱۳۹۴ در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز، به

درون هر لوله در هر مرحله از آزمایش، چهار بذر جوانه‌دار شده و هم‌اندازه در عمق دو سانتی‌متری خاک کشت شد و سپس با آب تصفیه شده با هدایت الکتریکی 1 ± 0.3 دسی‌زیمنس بر متر آبیاری شدند. لوله‌های پی‌وی‌سی در تمام مدت رشد، درون گلخانه‌ای با متوسط درجه حرارت 25 ± 3 درجه

اندازه گیری محور اصلی و انشعابات ریشه

به منظور جداسازی ریشه‌ها از خاک، لوله‌های پی وی سی به مدت ۳۰ دقیقه در ظروف حاوی آب قرار داده شدند تا خاک آن‌ها اشباع شود. سپس کیسه پلاستیکی حاوی بستر کاشت و ریشه درون آن، به آهستگی از لوله‌ها خارج شد. شستشوی ریشه‌ها با استفاده از فشار ملایم آب یک آبپاش، روی بستر کاشت و ریشه انجام شد و ریشه‌ها از خاک جدا شدند (Fakhri, 2013). طول ریشه اصلی با خط‌کش میلی‌متری اندازه‌گیری شد. طول ریشه‌های اصلی و فرعی نیز با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری طول و سطح ریشه (DELTA-T SCAN, UK) انجام شد. طول ریشه‌های فرعی، از تفریق مجموع طول ریشه‌های اصلی و فرعی از طول ریشه اصلی به دست آمد (Rahnama et al., 2011).

آزمایش اول

با هدف تعیین سطوح مورد نظر پتانسیل آب خاک در ایجاد تفاوت‌های رشدی ریشه، آزمایشی به صورت طرح فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد.

در این آزمایش، دو رقم گندم شامل: رقم روشن به عنوان رقم متحمل به خشکی و رقم قدس به عنوان رقم حساس به خشکی، به عنوان فاکتور اول (Mortazavian 2015) و سطوح مختلف خشکی شامل: پتانسیل آب خاک در مکش‌های ۰/۳- بار (شاهد)، ۲- تا ۳- بار، ۵- تا ۶-، ۷- تا ۸- و ۱۰- تا ۱۱- بار به عنوان فاکتور دوم در نظر گرفته شدند.

برای هر تیمار در هر تکرار، دو لوله پی‌وی‌سی در هر واحد آزمایشی در نظر گرفته شد و آزمایش در مجموع شامل ۶۰ لوله پی‌وی‌سی بود. لوله‌ها در شرایط گلخانه با نور طبیعی و میانگین دمای 24 ± 3 درجه سانتی‌گراد (روز) و 14 ± 3 درجه سانتی‌گراد (شب) نگهداری شدند. سپس گیاهچه‌ها با رسیدن به آغاز مرحله دو برگی (نه روز پس از کاشت)، به مدت ۱۴ روز در معرض تنش خشکی قرار گرفتند. پتانسیل آب خاک برای سطوح خشکی، در طول مدت آزمایش ثابت نگه

گیاه در طی رشد و در نهایت اعمال تنش بر اساس تیمارهای آزمایش، منحنی رطوبتی خاک با استفاده از دستگاه صفحات فشاری (Pressure Plate Extractor, Eijkelkamp) در مکش‌های ۰/۳-، ۳-، ۵- و ۱۵- بار رسم شد (Klute & Dirksen., 1986).

اعمال تنش خشکی

ابتدا لوله‌های پی‌وی‌سی و کیسه پلاستیکی درون هر لوله به طور دقیق وزن شدند. برای هر لوله پی‌وی‌سی، پنج کیلوگرم از خاک تهیه شده در نظر گرفته شد. در هر آزمایش و برای هر واحد آزمایشی، یک لوله پی‌وی‌سی حاوی گیاه به عنوان شاهد، با هدف جلوگیری از آسیب رساندن دستگاه رطوبت سنج به ریشه گیاه اصلی در نظر گرفته شد. پس از کاشت گیاه و تا قبل از رسیدن به مرحله دو برگی، رطوبت همه لوله‌های حاوی گیاه در حد ظرفیت زراعی نگهداری شد. با توجه به تیمار مربوطه، درصد رطوبت حجمی خاک هر تیمار با استفاده از دستگاه رطوبت سنج (ProCheck, Decagon Devices, USA) اندازه‌گیری شد و سپس با استفاده از منحنی رطوبتی رسم شده، پتانسیل رطوبتی خاک تعیین شد. پس از تعیین پتانسیل آب خاک، در صورتی که میزان آن کمتر از میزان مورد نظر برای یک تیمار خاص بود (برای مثال، پتانسیل آب خاک برای تیمار شاهد از ۰/۳- بار به ۲- بار رسیده بود)، ابتدا برای آگاهی از وضعیت درصد رطوبتی وزنی خاک، لوله‌های پی‌وی‌سی شاهد برای آن تیمار خاص، با استفاده از ترازو وزن شدند و از آن‌جا که وزن خاک خشک و لوله‌های پی‌وی‌سی و کیسه پلاستیکی قبل از کشت به طور دقیق اندازه‌گیری شده بود، درصد رطوبت وزنی و وزن آب خاک، با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد. سپس با اختلاف این عدد با درصد رطوبت وزنی در نقطه پتانسیل مورد نظر، میزان آب آبیاری تعیین شد.

$$100 \times \frac{\text{وزن خاک خشک} - \text{وزن اولیه خاک}}{\text{وزن خاک خشک}} = \text{درصد رطوبت وزنی}$$

(شاهد) و ۷- تا ۸- بار، به صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی مورد مطالعه قرار گرفتند. دو لوله پی‌وی‌سی در هر واحد آزمایشی با سه تکرار، در شرایط گلخانه‌ای با نور طبیعی و میانگین دمای 26 ± 3 درجه سانتی‌گراد (روز) و 15 ± 3 درجه سانتی‌گراد (شب) نگهداری شدند. آزمایش در مجموع شامل ۴۸ لوله بود. گیاهچه‌ها با رسیدن به آغاز مرحله دو برگی، به مدت ۲۱ روز در معرض تنش قرار گرفتند و برای اندازه‌گیری طول ریشه‌های اصلی و فرعی برداشت شدند.

داده‌های به دست آمده با استفاده از نرم افزار آماری SAS تجزیه و تحلیل (تجزیه واریانس و همبستگی صفات) شدند و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از نرم افزار MSTATC انجام شد. برای رسم نمودارها از نرم افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

آزمایش اول: بهترین سطح خشکی در ایجاد تفاوت‌های رشدی ریشه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین سطوح مختلف خشکی، از نظر ویژگی‌های رشدی سیستم ریشه شامل طول ریشه و وزن خشک ریشه در سطح احتمال یک درصد و برای تعداد ریشه اصلی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری وجود داشت. بین ارقام نیز از نظر طول ریشه و وزن خشک ریشه در سطح یک درصد تفاوت معنی‌داری مشاهده شد اما این تفاوت از نظر تعداد ریشه اصلی معنی‌دار نبود. برهم‌کنش بین سطوح مختلف خشکی و ارقام برای صفات مورد مطالعه، تفاوت معنی‌داری نشان نداد (جدول ۲).

داشته شد. سپس گیاهان به منظور اندازه‌گیری محور ریشه برداشت شدند.

آزمایش دوم

به‌منظور بررسی وجود تفاوت بین ارقام گندم از نظر رشد ریشه در پاسخ به خشکی، هشت رقم گندم در دو سطح تنش خشکی (با توجه به نتایج آزمایش قبلی)، به صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفتند. ارقام گندم شامل روشن، بم، طبسی و ماهوتی به عنوان ارقام متحمل به خشکی) و ارقام شیراز، فلات، قدس و اترک به عنوان ارقام حساس به خشکی (Maghsoudi & Maghsoudi, 2007; Karami & Rokhzadi, 2012; Mortazavian *et al.*, 2015) انتخاب شدند. سطوح خشکی شامل پتانسیل آب خاک $0/3$ - بار (شاهد) و ۷- تا ۸- بار در نظر گرفته شدند. در این آزمایش، دو لوله پی‌وی‌سی در هر واحد آزمایشی با سه تکرار، در شرایط گلخانه با نور طبیعی و میانگین دمای 26 ± 3 درجه سانتی‌گراد (روز) و 15 ± 3 درجه سانتی‌گراد (شب) نگهداری شدند. آزمایش در مجموع شامل ۹۶ لوله بود. گیاهچه‌ها با رسیدن به آغاز مرحله دو برگی، به مدت ۱۴ روز در معرض تنش قرار گرفتند و همانند آزمایش اول، برای اندازه‌گیری طول ریشه برداشت شدند.

آزمایش سوم

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش قبلی و به‌منظور مطالعه دقیق‌تر ویژگی‌های رشدی ریشه و بررسی وضعیت انشعاب‌زنی ریشه در واکنش به تنش خشکی، دو رقم بم و روشن به عنوان ارقام متحمل به خشکی و ارقام قدس و اترک به عنوان ارقام حساس به خشکی، در دو سطح خشکی شامل پتانسیل آب خاک $0/3$ - بار

جدول ۲- تجزیه واریانس پارامترهای رشدی ریشه ارقام گندم نان، دو هفته پس از مواجهه با سطوح تنش خشکی

Table 2. Variance analysis of root growth parameters of bread wheat cultivars two weeks after exposure to drought stress levels

Source of variance	df	Means of squares		
		Seminal root length	Root number	Root dry weight
Cultivar	1	2198**	0.03 ^{ns}	0.0015**
Drought	4	2151**	4.21*	0.0005**
Drought×Cultivar	4	111 ^{ns}	0.28 ^{ns}	0.00002 ^{ns}
Error	20	112	1.46	0.00005
(%) CV	-	9.24	18.82	13.14

ns: غیر معنی‌دار، * و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns: Non-significant, ** and *: significant at 1% and 5% of probability levels respectively.

۱۰- بار نسبت به شاهد، تفاوت معنی‌داری را نشان داد اما این تفاوت بین ارقام معنی‌دار نبود. وزن خشک ریشه نیز در شرایط تنش خشکی کاهش یافت. با افزایش روند خشکی از پتانسیل ۵- بار، تفاوت محسوسی مشاهده شد و این تفاوت در پتانسیل ۷- بار نسبت به شاهد معنی‌دار بود. همچنین وزن خشک ریشه در رقم حساس به خشکی قدس، کاهش بیشتری را نسبت به رقم متحمل به خشکی روشن نشان داد (جدول ۳).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که طول ریشه‌های اصلی در شرایط تنش خشکی کاهش یافت. این کاهش در سطوح اولیه تنش، تفاوت معنی‌داری را نسبت به شاهد نشان نداد اما با کاهش پتانسیل آب خاک به ۵- بار، طول ریشه اصلی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. همچنین بین ارقام از نظر طول ریشه-های اصلی، تفاوت معنی‌داری وجود داشت و مقادیر آن در رقم روشن، بیشتر از رقم قدس بود (جدول ۳). تعداد ریشه‌های اصلی نیز در شرایط تنش خشکی کاهش یافت و میزان این کاهش در پتانسیل ۷- و

جدول ۳- مقایسه میانگین پارامترهای رشدی ریشه ارقام گندم نان دو هفته پس از مواجهه با سطوح تنش خشکی

Table 3- Mean comparison of root growth parameters of bread wheat cultivars two weeks after exposure to drought stress levels

	Means		
	Seminal root length (cm)	Root number (cm)	Root dry weight (gr)
Cultivars			
Roshan	123 a [†]	6.46a	0.058 a
Qods	106 b	6.40a	0.044 b
Drought stress			
Control	135 a	7.1 a	0.058a
~ - 2 bar	132 a	7.3 a	0.060 a
~ - 5 bar	113 b	6.5 a	0.055 a
~ - 7 bar	97 bc	5.6 b	0.040 b
~ - 10 bar	94 c	5.5 b	0.041 b

[†] میانگین‌های دارای حرف مشترک برای هر صفت با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد نداشتند.

Means followed by the same letter for each trait are not significantly different ($P = 0.05$), according to Duncan's Multiple Range Test.

وزن خشک ریشه و طول دو ریشه بلندتر تفاوت بسیار معنی‌داری وجود داشت. برهم‌کنش بین سطوح خشکی و ارقام نیز تفاوت معنی‌داری را برای صفات طول ریشه و ماده خشک ریشه نشان داد (جدول ۴).

آزمایش دوم: تفاوت ژنوتیپی در ویژگی‌های رشدی ریشه
نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های رشدی سیستم ریشه هشت رقم گندم و تیمار خشکی نشان داد که بین دو سطح خشکی و بین ارقام گندم از نظر طول، تعداد و

جدول ۴- تجزیه واریانس پارامترهای رشدی ریشه هشت رقم گندم نان، دو هفته پس از مواجهه با تنش خشکی

Table 4. Variance analysis of root growth parameters of eight bread wheat cultivars two weeks after exposure to drought stress

Source of variance	df	Means of squares			
		Root dry weight	Seminal root length	Root number	Two longest seminal axile roots
Cultivar	7	0.00057**	992**	1.22*	204 **
Drought	1	0.0066**	28846. **	70.1 **	271 **
Drought×Cultivar	7	0.000223**	471**	0.369 ns	81 ns
Error	32	0.000028	45.9	0.379	42.61
(%) CV	-	8/8	6/16	10.11	12.83

n.s: غیر معنی‌دار، * و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

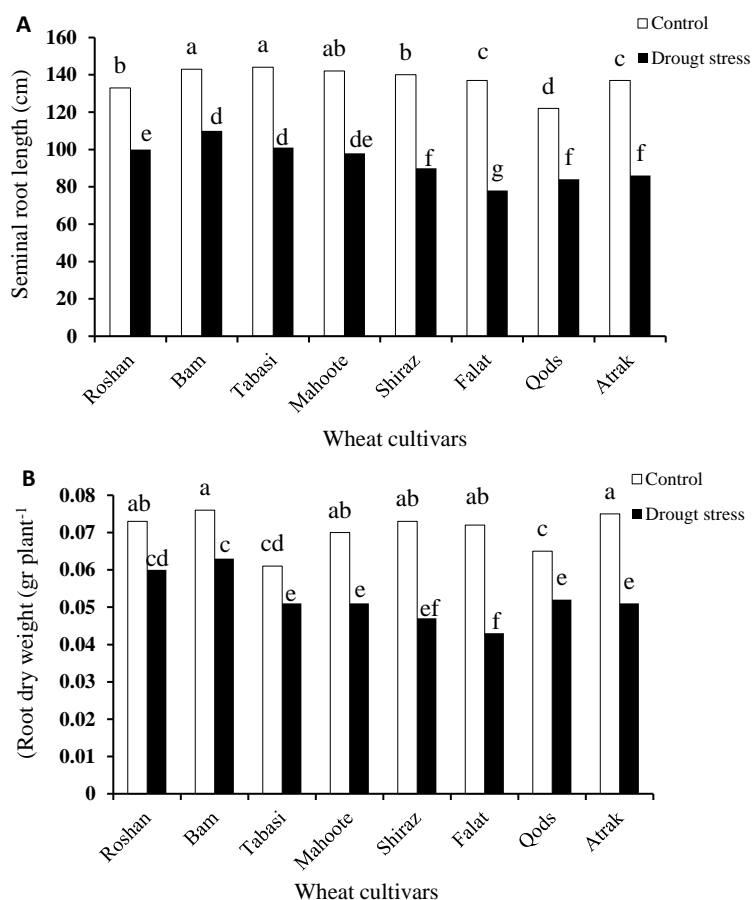
ns: Non-significant, ** and *: significant at 1% and 5% of probability levels, respectively.

وزن خشک ریشه نیز در شرایط تنش در همه ارقام به طور معنی داری کاهش یافت. کمترین میزان کاهش وزن خشک ریشه نسبت به شاهد در رقم متحمل طبسی و بیشترین میزان کاهش، در رقم حساس فلات مشاهده شد (شکل ۱ ب). با توجه به این نتایج مشخص می شود که میزان کاهش ماده خشک ریشه در شرایط تنش در ارقام مختلف متفاوت است و این کاهش در ارقام حساس، به مراتب بیشتر از ارقام متحمل به خشکی بود.

بین ارقام نیز از نظر تعداد ریشه اصلی، تفاوت قابل توجهی مشاهده شد و ارقام متحمل به خشکی، دارای تعداد ریشه اصلی بیشتری بودند. تنش خشکی، سبب کاهش تعداد ریشه اصلی شد، به گونه ای که تنش، سبب کاهش ۳۴ درصدی تعداد ریشه اصلی همه ارقام در مقایسه با شاهد شد؛ اگرچه میزان کاهش آن در ارقام متحمل به خشکی نسبت به ارقام حساس کمتر بود (جدول ۵).

به نظر می رسد که ارقام متحمل، با تعداد ریشه اصلی بیشتر، قادرند در شرایط پتانسیل پائین آب خاک، جذب بیشتر آب از خاک را به خوبی حفظ نمایند. در نتیجه، ارقام متحمل به خشکی با حفظ و تولید تعداد ریشه بیشتر، میزان جذب آب را در شرایط تنش، بالا نگه می دارند و از این طریق، قادر به تحمل تنش خواهند بود. تعداد ریشه، یک ویژگی ژنتیکی است که تحت تأثیر شرایط محیطی نیز قرار می گیرد (Manschadi *et al.*, 2006). در ارقام گندم، از نظر تعداد ریشه اصلی، تنوع ژنتیکی وجود دارد و ارقام گندم در شرایط معمول، بین پنج تا هشت ریشه اصلی دارند (Richards, 2008). در پژوهش حاضر و بر مبنای وجود همبستگی مثبت و معنی دار بین تعداد ریشه اصلی با طول ریشه اصلی ($r=0.69^{***}$) (جدول ۶) پیشنهاد می شود که انتخاب ویژگی های ریشه از جمله تعداد ریشه های اصلی ممکن است به شناسایی ژنوتیپ هایی با معماری سیستم ریشه سازگار با تحمل خشکی کمک کند (Manschadi *et al.*, 2006).

نتایج مقایسه میانگین ارقام نشان داد که پتانسیل ۷- بار، سبب کاهش طول ریشه در همه ارقام شد. بین ارقام از نظر میزان رشد ریشه اختلاف معنی داری وجود داشت و ارقام بم و فلات، به ترتیب کمترین و بیشترین میزان کاهش طول ریشه را در بین ارقام دارا بودند. همچنین در مقایسه با شاهد ارقام متحمل به خشکی، دارای میانگین طول ریشه بیشتری نسبت به ارقام حساس بودند (شکل ۱ الف). ارتباطی بین رشد ریشه در شرایط شاهد و تنش خشکی مشاهده نشد؛ به عبارتی ارقامی که در شرایط شاهد دارای رشد ریشه بالایی بودند، لزوماً در شرایط تنش قادر به حفظ مقادیر بالای رشد ریشه خود نبودند. برای مثال، ارقام فلات و شیراز در طی مرحله رشد رویشی و در شرایط شاهد، دارای رشد ریشه بالایی بودند ولی در شرایط تنش، دارای بالاترین میزان کاهش رشد ریشه در مقایسه با شاهد بودند (شکل ۱ الف). به هر روی، تفاوت بین ارقام از نظر طول دوره رشدی و تأثیر آن بر وضعیت رشد ریشه نیز بایستی در نظر گرفته شود. تفاوت ژنتیکی در رشد ریشه گندم نان (Manschadi *et al.*, 2008)، گندم دوروم (Rahnama *et al.*, 2011)، جو (Shelden *et al.*, 2013)، سورگوم و ذرت (Singh *et al.*, 2010) در واکنش به تنش های خشکی و شوری قبلاً نیز گزارش شده است. با توجه به واکنش رشدی متفاوت ریشه گیاه، به نظر می رسد که تفاوت در طول ریشه در شرایط شاهد و تنش، ناشی از تنوع ژنتیکی در پاسخ رشدی ارقام باشد. بنابراین، وجود تنوع ژنتیکی بالا در ویژگی های رشدی ریشه و گزینش ژنتیکی به منظور غلبه بر محدودیت های خاک، این امکان را فراهم می آورد تا در برنامه های به نژادی، از صفات مورفولوژیکی ریشه به منظور بهبود جذب آب عمقی خاک استفاده شود (Wasson *et al.*, 2012). به همین علت، استفاده از ویژگی های رشدی ریشه در راستای حفظ طول ریشه و در نتیجه حفظ جذب آب می تواند به عنوان اولین هدف برنامه های به نژادی در شرایط تنش های خشکی و شوری در نظر گرفته شود.



شکل ۱- تغییرات (A) طول ریشه اصلی و (B) وزن خشک ریشه هشت رقم گندم نان، دو هفته پس از مواجهه با تنش خشکی. میانگین‌های دارای حرف مشترک، با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد دارای اختلاف معنی دار نیستند.

Figure 1. Changes in (A) seminal root length and (B) root dry weight of eight bread wheat cultivars two weeks after exposure to drought stress. Means with the same letter are not significantly different ($P = 0.05$), according to Duncan's Multiple Range Test.

جدول ۵- مقایسه میانگین پارامترهای رشدی ریشه هشت رقم گندم نان دو هفته پس از مواجهه با تنش خشکی
Table 5. Mean comparison of root growth parameters of eight bread wheat cultivars two weeks after exposure to drought stress

	Means	
	Root number	Two longest seminal axile roots (cm)
Drought stress		
Control	7.2 a	58.38 a [†]
~ - 7 bar	4.8 b	43.33 b
Cultivars		
Roshan	5.33 b	57.41 a
Bam	6.16 ab	56.31 a
Tabasi	6.16 ab	51.31 ab
Mahoti	6.20 ab	53.71 ab
Shiraz	5.5 ab	46.08 bc
Falat	6.5 b	40.37 c
Qods	5.6 ab	52.72 a
Atrak	6.6 a	48.13 ab

[†] میانگین‌های دارای حرف مشترک برای هر صفت، با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، دارای اختلاف معنی دار نیستند.

Means followed by the same letter for each trait are not significantly different ($P = 0.05$), according to Duncan's Multiple Range Test.

جدول ۶- ضرایب همبستگی پارامترهای رشدی ریشه هشت رقم گندم دو هفته پس از مواجهه با خشکی

Table 6. Correlation parameters of root growth characteristic of eight bread wheat cultivars two weeks after drought stress

Characteristic	1	2	3	4
1 Seminal root length	1			
2 Two longest seminal axile roots	0.73**	1		
3 Root number	0.69**	0.21 ^{ns}	1	
4 Root dry weight	0.49**	0.39*	0.44**	1

ns: غیر معنی‌دار، * و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد
ns: Non-significant, ** and *: significant at 0.01 and 0.05 probability levels

احتمال یک درصد نشان داد. همچنین تفاوت معنی‌داری در تمامی پارامترهای ذکر شده، به‌جز برای فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه، طول دو ریشه بلندتر و تعداد ریشه اصلی بین ارقام مشاهده شد. اثر برهم‌کنش بین رقم و سطوح خشکی بر وزن خشک ریشه، طول انشعابات ریشه و سطح ریشه نیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۷).

آزمایش سوم: انشعاب زنی ریشه در پاسخ به تنش خشکی
نتایج حاصل از تجزیه واریانس ویژگی‌های رشدی سیستم ریشه شامل طول دو ریشه بلندتر، طول ریشه اصلی و انشعابات، تعداد ریشه اصلی، سطح ریشه، فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه و وزن خشک ریشه، تفاوت معنی‌داری را بین دو سطح خشکی در سطح

جدول ۷- تجزیه واریانس پارامترهای رشدی ریشه چهار رقم گندم نان، سه هفته پس از مواجهه با تنش خشکی

Table 7- Variance analysis of root growth parameters of four wheat cultivars three weeks after exposure to drought stress

Source of variance	df	Means of squares						
		Root dry weight	Root area	Branch root length	Distance between root tip and the first root branch	Root number	Two longest seminal axile roots	Seminal root length
Cultivar	3	0.0023**	588361**	40665**	0.67 ^{ns}	1.152 ^{ns}	136 ^{ns}	865*
Drought	1	0.0053**	8119252**	262069**	10.93**	51.04**	1713**	10024**
Cultivar Drought×	3	0.0002*	625758**	13086**	0.40 ^{ns}	0.152 ^{ns}	150 ^{ns}	287 ^{ns}
Error	16	0.000056	896.9	761.005	0.39	40.0	53	227
(%) CV		10.37	1.7	6.3	16.1	9.6	9.6	10.8

ns: غیر معنی‌دار، * و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.
ns: Non-significant, ** and *: significant at 1% and 5% of probability levels, respectively.

معنی‌داری بر کاهش طول ریشه یا عمق ریشه دهی داشته باشد (Wang *et al.*, 2009). تنش خشکی در پتانسیل ۷- بار، باعث کاهش معنی‌دار تعداد ریشه نسبت به شاهد شد؛ اگرچه مقایسه میانگین چهار رقم، نشان‌دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین ارقام حساس و متحمل بود (جدول ۸). نتایج سایر تحقیقات، بیانگر کاهش تعداد ریشه اصلی گندم در شرایط تنش شوری (Shelden *et al.*, 2006) بود. تنش خشکی سبب کاهش قدرت انشعاب‌زنی ریشه در همه ارقام شد. همچنین بین ارقام از نظر طول انشعابات، تفاوت ژنتیکی مشاهده شد

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که طول ریشه اصلی و طول دو ریشه بلندتر در شرایط تنش نسبت به شاهد، به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. همچنین در مجموع طول ریشه اصلی، تفاوت معنی‌داری بین ارقام مشاهده شد و ارقام متحمل، دارای میانگین طول ریشه بیشتری نسبت به ارقام حساس بودند. در بین ارقام متحمل، رقم بم بیشترین و رقم اترک کمترین میزان طول ریشه اصلی را به خود اختصاص دادند، اما برای طول دو ریشه بلندتر، تفاوت معنی‌داری بین ارقام مشاهده نشد (جدول ۸). این نتیجه بیانگر آن است که با ادامه روند کاهش پتانسیل آب خاک در طی مدت زمان طولانی‌تر، تنش خشکی می‌تواند تاثیرات

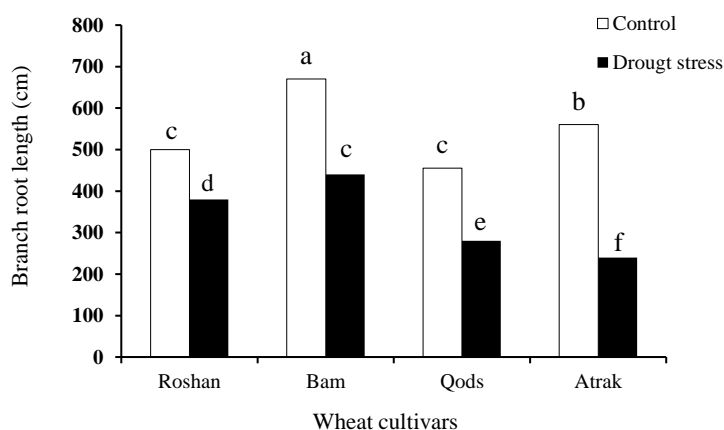
و مقایسه میانگین ارقام نشان داد که کاهش طول انشعابات در ارقام متحمل بم و روشن در مقایسه با ارقام حساس اترک و قدس، کمتر بود (شکل ۲).

جدول ۸- مقایسه میانگین پارامترهای رشدی ریشه چهار رقم گندم، نان سه هفته پس از مواجهه با تنش خشکی
Table 8. Mean comparison of root growth parameters of four wheat cultivars three weeks after exposure to drought stress

	Distance between root tip and the first root branch (cm)	Root number	Two longest seminal axile roots (cm)	Seminal root length (cm)
Cultivars				
Roshan	2.88 a	7 a	82.65 a	156 b [†]
Bam	2.43 a	7 a	74.55 b	173 a
Qods	1.93 a	6.3 a	70.90 b	147 c
Atrak	1 a	6.16 a	70.40 b	140 cd
Drought stress				
Control	3.09 a	8.08 a	84.83 a	156.33 a
~ -7 bar	1.74 b	5.16 b	67.50 b	127.99 b

[†] میانگین های دارای حرف مشترک برای هر صفت، با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، دارای اختلاف معنی دار نیستند.

Means followed by the same letter for each trait are not significantly different ($P = 0.05$), according to Duncan's Multiple Range Test.



شکل ۲- تغییرات طول انشعابات ریشه چهار رقم گندم نان، سه هفته پس از مواجهه با تنش خشکی. میانگین های دارای حرف مشترک، با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معنی داری ندارند.

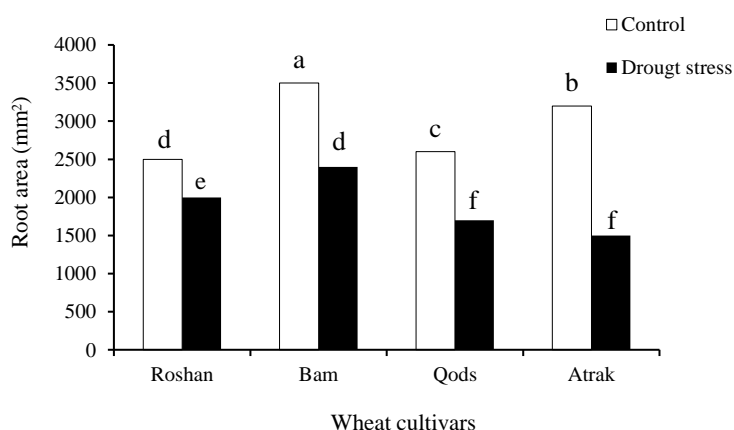
Figure 2. Changes of branch root length of four bread wheat cultivars three weeks after exposure to drought stress. Means with the same letter are not significantly different ($P = 0.05$), according to Duncan's Multiple Range Test.

این کنترل را بر عهده دارند (Rahnama *et al.*, 2011). پتانسیل اسمزی پایین خاک، سبب تغییر حجم و عمق توسعه سیستم ریشه، میزان طویل شدن ریشه و تعداد ریشه های جانبی در تعداد زیادی از گونه های گیاهی از جمله آرابیدوپسیس می شود (Deak & Malamy, 2005) و گیاهان دارای ریشه اصلی طویل تر و تعداد ریشه های جانبی بیشتر، تحمل بالاتری به شرایط تنش دارند.

جلوگیری از رشد ریشه های جانبی در اثر شرایط تنش خشکی (Sánchez-Calderón *et al.*, 2013) و تحریک انشعاب زنی ریشه در شرایط تنش شوری (Rahnama *et al.*, 2011)، به عنوان یک واکنش انطباقی برای تضمین بقای گیاه در شرایط نامناسب رشد پذیرفته شده است (Sánchez-Calderón *et al.*, 2013). تنش اسمزی سبب کاهش طول ریشه و آغازش ریشه جانبی می شود و مشخص شده است که پیام های هورمونی،

ارقام حساس، در سایر مطالعات نیز گزارش شده است (Dargahi *et al.*, 2012). اگرچه در بررسی تأثیر تنش آبی بر توزیع و پراکندگی ریشه سویا بین شرایط آبیاری و تنش خشکی، اختلاف معنی‌داری برای سطح ریشه مشاهده نشد (Benjamin & Nielsen, 2006). بیشترین میزان کاهش سطح ریشه در شرایط تنش، در رقم حساس اترک و کمترین میزان کاهش در رقم متحمل روشن مشاهده شد.

بر اساس نتایج به دست آمده، بین ارقام مورد بررسی و تیمار خشکی، اختلاف معنی‌داری از لحاظ سطح ریشه وجود داشت. میانگین سطح ریشه در ارقام متحمل به خشکی، به مراتب بیشتر از ارقام حساس بود. هم‌چنین با کاهش پتانسیل آب خاک، میانگین سطح ریشه در همه ارقام، به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و میزان کاهش در ارقام متحمل، به مراتب بیشتر از ارقام حساس به خشکی بود (شکل ۳). کاهش سطح ریشه در شرایط تنش و برتری ارقام متحمل نسبت به

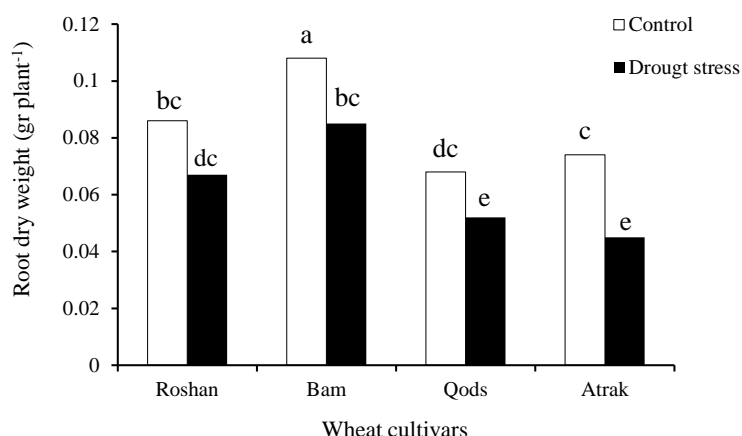


شکل ۳- تغییرات سطح ریشه چهار رقم گندم نان، سه هفته پس از مواجهه با تنش خشکی. میانگین‌های دارای حرف مشترک، با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معنی‌داری ندارند.

Figure 3. Changes in root area of four bread wheat cultivars three weeks after exposure to drought stress. Means with the same letter are not significantly different ($P = 0.05$), according to Duncan's Multiple Range Test.

تنش خشکی، سبب کاهش فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه شد و میزان کاهش برای همه ارقام در حدود ۴۴ درصد بود؛ اگرچه بین ارقام نیز از نظر فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه، تفاوت قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد (جدول ۸). در شرایط شوری نیز فاصله بین نوک ریشه و موقعیت ناحیه تمایز بافت، تغییر می‌کند (Rahnama *et al.*, 2011)؛ اگرچه کوتاه‌تر شدن فاصله بین نوک و سلول‌های ناحیه توسعه و تمایز در سایر تنش‌ها نیز مشاهده شده است. برای مثال، دمای پایین خاک، میزان رشد طولی ریشه و میزان تمایز ریشه‌های مویین و انشعابات ریشه‌ای نزدیک به نوک ریشه را در گندم و ذرت تحت تأثیر قرار داد (Watt *et al.*, 2006).

نتایج مقایسه میانگین نیز نشان داد که در تیمارهای مورد بررسی، وزن خشک ریشه در تمام ارقام در شرایط تنش خشکی نسبت به شاهد کاهش یافت (شکل ۴)؛ اگرچه در شرایط عدم تنش نیز تفاوت معنی‌داری از نظر وزن خشک ریشه بین ارقام مشاهده شد. بیشترین و کمترین میزان کاهش وزن خشک ریشه در شرایط تنش خشکی، به‌ترتیب در رقم حساس قدس و رقم متحمل روشن مشاهده شد (شکل ۴). به‌نظر می‌رسد که کاهش ماده خشک ریشه می‌تواند به دنبال کاهش میزان رشد ریشه یا کاهش فتوسنتز در گیاه رخ دهد (Fakhri, 2013). کاهش وزن خشک ریشه گندم به دلیل کاهش طول ریشه در شرایط شوری نیز قبلاً مشخص شده است (Grewal, 2010).



شکل ۴- تغییرات وزن خشک ریشه چهار رقم گندم نان، سه هفته پس از مواجهه با تنش خشکی. میانگین‌های دارای حرف مشترک، با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معنی داری ندارند.

Figure 4. Changes of root dry weight of four bread wheat cultivars three weeks after exposure to drought stress. Means with the same letter are not significantly different ($P = 0.05$), according to Duncan's Multiple Range Test.

طویل‌تر و انشعابات ریشه ای بیشتر، تحمل بالاتری به تنش‌های محیطی (Shelden *et al.*, 2013; Rahnama *et al.*, 2011) دارند، از این تفاوت بین ژنوتیپ‌ها می‌توان جهت‌گزینش ارقام و ژنوتیپ‌های کارآمد در جذب آب و مواد غذایی از خاک و نیز ارقام متحمل به تنش‌های محیطی از جمله خشکی استفاده کرد. به هر روی، به‌نظر می‌رسد که توسعه گیاهان زراعی با صفات مطلوب ریشه در مناطق خشک و دارای محدودیت آبی، یکی از راه‌های غلبه بر محدودیت‌های محیطی و دستیابی به عملکرد مطلوب محصولات کشاورزی باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود که جهت اطمینان از نتایج این پژوهش، ارزیابی واکنش رشدی ریشه ارقام گندم در سایر مراحل رشدی گیاه نیز انجام شود.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که تنش خشکی در پتانسیل آب خاک پایین‌تر از ۵- بار، سبب کاهش معنی‌دار پارامترهای رشدی ریشه شد. همچنین بین ارقام از نظر رشد ریشه و واکنش به تنش خشکی، تفاوت ژنتیکی وجود داشت، به‌گونه‌ای که ارقام متحمل و حساس به خشکی، واکنش متفاوتی به تنش خشکی نشان دادند. بنابراین، یک عامل مهم در میزان تحمل به خشکی گیاه گندم، چگونگی واکنش و توسعه سیستم ریشه‌ای آن است که می‌تواند تحت تأثیر تنش خشکی قرار گیرد و تفاوت موجود در بین ارقام، به لحاظ صفات رشدی ریشه ممکن است تفاوت آن‌ها را در مقاومت به تنش خشکی آشکار سازد. با توجه به این که ارقام گندم و جو دارای ریشه اصلی

REFERENCES

1. 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 (1): 59-68.
2. Benjamin, J. G. & Nielsen, D. C. (2006). Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea. *Field Crops Research*, 97: 248-253.
3. Dargahi, Y., Asghari, A., Shokrpour, M. & Rasoulzadeh, A. (2012). Effect of water deficit stress on root morphological characters in sesame cultivars. *Electronic Journal of Crop Production*, 5 (4): 151-172.
4. Deak, K. I., & Malamy, J. (2005). Osmotic regulation of root system architecture. *The Plant Journal*, 43: 17-28.
5. Ehdai, B., Layne, A. P. & Waines, J. G. (2012). Root system plasticity to drought influences grain yield in bread wheat. *Euphytica*, 186: 219-232.

6. Fakhri, S. (2013). *The study of root growth in bread wheat by screening method under salt stress conditions*. MSc. Thesis. Department of Agronomy and Plant Breeding, Shahid Chamran University of Ahvaz.
7. Grewal, H. S. (2010). Water uptake, water use efficiency, plant growth and ionic balance of wheat, barley, canola and chickpea plants on a sodic vertosol with variable subsoil NaCl salinity. *Agricultural Water Management*, 97, 148-156.
8. Karami, E. & Rokhzadi, A. (2012). An identification of drought tolerant genotypes in wheat using analysis of drought resistance indices. *Agronomy Journal (Pajouhesh & Sazandegi)*, 96: 78-83.
9. Klute, A. & Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In: Klute A. (Ed). *Method of soil analysis, Part 1. Agronomy Soil Science Society of America Madison, W.I*, pp. 687-734.
10. Lopes, M. S. & Reynolds, M. P. (2010). Partitioning of assimilates to deeper roots is associated with cooler canopies and increased yield under drought in wheat. *Functional Plant Biology*, 37: 147-156.
11. Maghsoudi, K. & Maghsoudi Moud, A. A. (2007). Assessment of osmoregulation capability in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars using response of projected pollen grains to drought stress. *Iranian Journal of Crop Sciences*. 10 (1): 1-14.
12. Manschadi, A. M., Hammer, G. L., Christopher, J. T. & deVoil, P. (2008). Genotypic variation in seedling root architectural traits and implications for drought adaptation in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant and Soil*, 303: 115-129.
13. Manschadi, A. M., Christopher, J., deVoil, P. & Hammer, G. L. (2006). The role of root architectural traits in adaptation of wheat to water-limited environments. *Functional Plant Biology*, 33: 823-837.
14. Mortazavian, M., Ramshini, H., Mohseni, M., Nabavi, T. (2015). Assessment of wheat yield response to water shortage using various tolerance indices. *Philippine Agricultural Scientist*, 98(3): 262-269.
15. Rahnema, A., Munns, R., Poustini, K. & Watt, M. (2011). A screening method to identify genetic variation in root growth response to a salinity gradient. *Journal of Experimental Botany*, 62: 69-77.
16. Richards, R. A. (2008). Genetic opportunities to improve cereal root systems for dryland agriculture. *Plant Production Science*, 11(1): 12-16.
17. Sánchez-Calderón, L., Ibarra-Cortés, M. E. & Zepeda-Jazo, I. (2013). Root Development and Abiotic Stress Adaptation, Abiotic Stress Kouros Vahdati, *IntechOpen*. DOI: 10.5772/55043.
18. Schweiger, P., Petrsek, R. & Hartl, W. (2009). Root distribution of winter wheat cultivars as affected by drought. International Symposium "Root Research and Applications". Vienna, Austria.
19. Shelden, M. C., Roessner, U., Sharp, R. E., Tester, M. & Bacic, A. (2013). Genetic variation in the root growth response of barley genotypes to salinity stress. *Functional Plant Biology*, 40: 516-530.
20. Singh, V., van Oosterom, E. J., Jordan, D. R., Messina, C. D., Cooper, M. & Hammer, G. L. (2010). Morphological and architectural development of root systems in sorghum and maize. *Plant and Soil*, 333: 287-299.
21. Wang, H., Siopongco, J., Wade, L. & Yamauchi, A. (2009). Fractal analysis on root systems of rice plants in response to drought stress. *Environment Journal of Experimental Botany*, 65: 338-344.
22. Wasson, A. P., Richards, R. A., Chatrath, R., Misra, S. C., Sai Prasad, S. V., Rebetzke, G. J., Kirkegaard, J. A., Christopher, J. & Watt, M. (2012). Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. *Journal of Experimental Botany*, 63(9): 3485-3498.
23. Watt, M., Silk, W. K. & Passioura, J. B. (2006). Rates of root and organism growth, soil conditions, and temporal and spatial development of the rhizosphere. *Annals of Botany*, 97: 839-855.
24. Whitmore, A. P. & Whalley, W. R. (2009). Physical effects of soil drying on roots and crop growth. *Journal of Experimental Botany*, 60(10): 2845-2857.
25. Yan, L. & Shi, Y. (2013). Effect of drought stress on growth and development in winter wheat with aquasorb-fertilizer. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 5(11): 1502-1504.