

ارزیابی پاسخ ریشه به تنش خشکی در ژنوتیپ‌های هوازی، غرقابی و آپلند برنج (*Oryza sativa* L.)

محبوبه اسماعیل‌زاده مریدانی^۱، مسعود اصفهانی^{۲*}، علی اعلمی^۲، علی مؤمنی^۳ و محمدرضا خالدیان^۴
^۱ گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان، رشت و بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، جیرفت، ایران
^۲ استاد گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان، رشت، ایران
^۳ مؤسسه تحقیقات برنج کشور - معاونت مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، آمل، ایران
^۴ گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان و گروه پژوهشی مهندسی آب و محیط زیست پژوهشکده حوزه آبی دریای خزر، رشت، ایران
 (تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۶، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۷/۲۴)

چکیده

آزمایش در دو سال متوالی (۱۳۹۵ و ۱۳۹۶) در دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان اجرا شد. در هر دو سال، کشت در لوله‌های پلی‌اتیلنی انجام شد. در سال اول، آزمایش با ۱۶ ژنوتیپ برنج (هوازی، آپلند و غرقابی) و شرایط بهینه آبیاری در سه تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. با توجه به نتایج تجزیه خوشه‌ای چهار رقم شامل وندانا، ندا و طارم محلی و یک ژنوتیپ آپلند (IR83141-11) برای آزمایش سال دوم انتخاب شدند. آزمایش سال دوم به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. عوامل شامل ژنوتیپ‌های منتخب برنج و وضعیت آب خاک (آبیاری بهینه و تنش خشکی) بودند. برای توصیف روند ماده خشک ریشه و شاخساره و نسبت ریشه به شاخساره از مدل‌های بتا و نمایی استفاده شد. بر اساس پارامترهای به دست آمده از مدل‌ها، پاسخ ارقام برنج به تنش خشکی به صورت کاهش ماده خشک شاخساره و ریشه و کاهش سرعت رشد شاخساره و ریشه بود. تفاوت در ماده خشک شاخساره در دو شرایط آبیاری در رقم طارم محلی بیشتر (۱۶/۲ گرم در بوته) و در ژنوتیپ آپلند (IR83141-11) کمتر (۶/۷ گرم در بوته) از سایر ژنوتیپ‌ها بود. شاخساره بیشتر از ریشه تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفت و کاهش نشان داد. تفاوت در ماده خشک ریشه در دو شرایط آبیاری در رقم طارم محلی بیشتر (۱ گرم در بوته) و در ژنوتیپ آپلند کمتر (۰/۰۹ گرم در بوته) از سایر ژنوتیپ‌ها بود. تنش خشکی باعث تسریع سه روزه در رسیدن به حداکثر سرعت رشد و شش روزه در زمان وقوع حداکثر تجمع ماده خشک در رقم وندانا شد. در اثر تنش خشکی زمان رسیدن به بیشینه ماده خشک ریشه در ارقام ندا و وندانا (با اختلاف ۴/۶ و ۰/۱۳ روز) کاهش و در ژنوتیپ آپلند و رقم طارم محلی (با اختلاف ۲/۵ و ۶/۵ روز) افزایش داشتند. ارقام ندا تسریع پنج روزه و طارم محلی تأخیر هفت روزه در رسیدن به حداکثر ماده خشک ریشه داشتند. نسبت ریشه به شاخساره در ژنوتیپ‌های هوازی و آپلند، خصوصاً در مراحل اولیه رشد بیشتر از ژنوتیپ‌های غرقابی بود که این موضوع نشان‌دهنده ساختار ریشه گسترده‌تر در این ژنوتیپ‌ها است. غیر از رقم طارم محلی، در بقیه ژنوتیپ‌ها وزن خشک ریشه در

عمق‌های پایین‌تر خاک نسبت به شرایط آبیاری کامل بیشتر بود. ژنوتیپ‌های وندانا، آپلند و ندا که در این آزمایش از نظر صفات ریشه‌ای نظیر حجم، ماده خشک، عمق نفوذ ریشه و انعطاف‌پذیری در شرایط تنش خشکی، برتر بودند، برای مطالعات تکمیلی توصیه می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: برنج، تجزیه خوشه‌ای، رگرسیون غیرخطی و عمق نفوذ ریشه

مقدمه

با توجه به مصرف بالای آب در زراعت برنج با آبیاری پیوسته غرقابی (Khosha *et al.*, 2011) و بالابودن مقدار تصعید گاز متان از شالیزارهای غرقاب، زراعت برنج به صورت هوازی به عنوان یک شیوه جایگزین تولید برنج مورد توجه قرار گرفته است (IPCC, 2013). تولید برنج هوازی شیوه‌ای است که در آن وارته‌های برنج پاسخ‌دهنده به نهاده‌های ورودی در خاک‌های غیر گل‌خرابی و غیراشباع کشت می‌شوند (Zahra *et al.*, 2022). ارقام جدید برنج هوازی خصوصیات ارقام برنج آپلند و غرقابی را به صورت توأم داشته که مانند ارقام غرقابی دارای بازده بالا و مانند ارقام آپلند متحمل به خشکی هستند (Atlin *et al.*, 2006). تنش خشکی یک عامل محدودکننده جدی برای تولید برنج و ثبات عملکرد به‌ویژه در کشت هوازی محسوب می‌شود (Vengatesh and Govindarasu, 2017). اصلاح‌نژاد برای تحمل به خشکی به دلیل پیچیدگی صفات مورد مطالعه، روش غربالگری، عوامل محیطی و تعامل آن‌ها بسیار چالش برانگیز است. ساختار ریشه یکی از اجزای مهم تحمل به خشکی را تشکیل می‌دهد و معمولاً در شرایط هوازی ارزیابی می‌شود (Vijayaraghavareddy *et al.*, 2020). با توجه به اهمیت نقش ریشه در تحمل به تنش‌های محیطی، ویژگی‌های ریشه به‌عنوان یکی از صفات ثانویه در برنامه‌های اصلاحی برنج مورد توجه قرار گرفته‌اند که با عملکرد دانه همبستگی دارند (Bernier *et al.*, 2008). گیاه برنج دارای تنوع ژنتیکی زیادی از نظر ساختار ریشه است، اما پاسخ زیستی آن به محیط رشد در ژنوتیپ‌های مختلف به همان اندازه متنوع است. این موضوع اهمیت مشخص کردن محیط رشد را در تمام مطالعات ریشه برنج برجسته می‌کند. گزارش‌های اولیه در شرایط تنش خشکی نظریه سطحی بودن ریشه برنج را تا

حداکثر عمق ۳۰ سانتی‌متر اثبات کرد. در سال‌های اخیر با اصلاح و انتخاب ژنوتیپ‌هایی با ریشه عمیق، بسیاری از ژنوتیپ‌های برنج تولید شده‌اند که پتانسیل رشد ریشه عمیق را دارند، اما این صفت به‌شدت توسط محیط کنترل می‌شود (Gowda *et al.*, 2011). تنوع ژنتیکی توسعه ریشه نه تنها در پاسخ به شرایط آبیاری کامل به‌عنوان صفات سازنده، بلکه به شرایط مختلف آبیاری به‌عنوان ویژگی‌های تطبیقی مشاهده شده است (Asch *et al.*, 2005; Wade *et al.*, 2000).

در تعدادی از گزارش‌ها شواهدی ارائه شده است که نشان‌دهنده ارتباط مستقیم تحمل به خشکی و صفات ریشه‌ای در برنج است (Wang *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2012; Comas *et al.*, 2013; Matsunami *et al.*, 2013; Uga *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2020). در شرایط غرقابی، ریشه‌های برنج بسیار سطحی است و یک حصیر الیافی (Fibrillate mat) را تشکیل می‌دهد و در لایه زیر سطحی ریشه‌های پراکنده تشکیل می‌شوند (Kato and Okami, 2010). برای سازگاری برنج با شرایط هوازی، ساختار ریشه‌زایی گیاه باید به شکل گیاهان دیم تغییر یابد (Richards, 2008). گسترش ریشه به لایه‌های زیر سطحی ممکن است اثرات سوء کم‌آبی موقت که در فاصله دو آبیاری در کشت هوازی رخ می‌دهد را کاهش دهد. ساختار ریشه برنج در کشت غرقابی، از جمله پویایی رشد فصلی آن، به دلیل اهمیت آن در پایداری عملکرد مدت‌ها پیش مورد مطالعه قرار گرفته است (Sakaigaichi *et al.*, 2007). پویایی رشد ریشه گیاه برنج در شرایط مختلف مدیریت آب از جمله تنش خشکی در شرایط هوازی بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است، اما مطالعه در شرایط هوازی به صورت واقعی (بدون خشک شدن خاک و کاهش عملکرد)، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است (Kato *et al.*, 2006; Kato and

(Okami, 2010). مطالعه تطبیقی الگوهای رشد ریشه در کشت‌های هوازی و غرقابی، توسعه مدل‌های رشد برنج برای کشت هوازی و تولید ارقام سازگار با شرایط هوازی را تسهیل می‌کند. از جمله مطالعات مؤثر در بررسی پویایی رشد ریشه می‌توان به بررسی روند ماده خشک اختصاص یافته به ریشه در طول فصل رشد، نسبت وزن و حجم ریشه به شاخساره در طی فصل رشد و حجم و وزن خشک ریشه در عمق‌های مختلف اشاره کرد (Kato and Okami, 2010; Asch et al., 2005). رشد ریشه برنج، از نظر ماده خشک کل، حداکثر عمق ریشه، و تراکم طول ریشه، تا مرحله گل‌دهی افزایش یافته و سپس در مرحله رسیدگی به شدت کاهش می‌یابد (Kim et al., 2020). Okami و Kato (۲۰۱۰) با مطالعه روی ارقام هوازی، آپلند و غرقابی در شرایط کشت غرقابی و هوازی، روند افزایش ماده خشک ریشه را تا حدود گلدی، صعودی و بعد از آن نزولی گزارش کردند. Kato و همکاران (۲۰۰۶) با مطالعه روی ارقام برنج به روش کشت در سبد (Basket method) و کشت در مزرعه به بررسی صفاتی نظیر طول کل ریشه، طول ریشه‌های عمیق، نسبت ریشه به شاخساره و نسبت ریشه‌های عمیق به شاخساره، قطر ریشه، ظرافت ریشه و زاویه رشد ریشه پرداختند. آن‌ها تفاوت‌های معنی‌داری در رژیم‌های آبیاری غرقابی و آپلند مشاهده کرده و زاویه ریشه‌های تاجی و عمق ریشه در برنج‌های آپلند را صفات تاثیرگذاری معرفی کردند. مطالعات دیگری نیز روی صفات ذکرشده در برنج انجام شده است. ظرافت ریشه، تراکم طول ریشه و عمق ریشه از عوامل تشکیل‌دهنده تحمل به خشکی هستند (Matsui and Singh, 2003). Asch و همکاران (۲۰۰۵) با مطالعه روی ارقام برنج تحت تنش خشکی با استفاده از روش کشت در لوله‌های پلی‌اتیلنی تسهیم ماده خشک بین ریشه و شاخساره را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که تسهیم مواد فتوسنتزی (Assimilat partitioning) بین ریشه و شاخساره، زمانی که گیاه تحت تنش تدریجی قرار گرفت، تحت تنش خشکی قرار نگیرد، اما تنش خشکی در یک رقم آپلند باعث ایجاد ریشه‌های عمیق‌تر شد. بنابراین یکی از واکنش‌های ارقام

آپلند به تنش خشکی که موجب تحمل آن‌ها می‌شود، تشکیل ریشه‌های عمیق‌تر است. درک بهتر ریخت‌شناسی و سازوکارهای فیزیولوژیک تحمل به تنش خشکی می‌تواند برای ایجاد ارقام جدید زراعی به منظور دسترسی به تولید بهتر تحت شرایط تنش خشکی مورد استفاده قرار گیرد (Ghadirnezhad et al., 2023). گزارش‌هایی روی روند تولید ماده خشک شاخساره و ریشه و نسبت ریشه به شاخساره منتشر شده که در آن‌ها کمتر به کمی‌سازی پرداخته شده است (Asch et al., 2005; Kato and Okami, 2010; Yan-da et al., 2010). در این گزارش‌ها صفات و شاخص‌های فیزیولوژیک و مورفولوژیک ریشه مورد توجه قرار گرفته و نیاز به یافتن پارامترهای کمی در مطالعات ریشه، به‌ویژه در شیوه زراعت هوازی، وجود دارد. هدف از این تحقیق بررسی اولیه صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک ریشه در شرایط مطلوب هوازی در سال اول و مطالعه تکمیلی روی ژنوتیپ‌های منتخب با هدف بررسی و کمی‌سازی روند رشد شاخساره و ریشه در شرایط تنش خشکی در سال دوم بود.

مواد و روش‌ها

آزمایش در دو سال متوالی ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ در دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان واقع در عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۱ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۳۹ دقیقه شرقی با ارتفاع ۲۴ متر از سطح دریا انجام شد. مواد گیاهی شامل ژنوتیپ‌های برنج بود که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

سال اول: آزمایش سال اول به صورت طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار و ۱۶ تیمار شامل ژنوتیپ‌های برنج (جدول ۱) بود. به منظور مطالعه صفات ریشه‌ای کشت گیاهان در گلدان‌های استوانه‌ای (لوله‌های پلی‌اتیلنی) در شرایط بهینه آبیاری (ظرفیت زراعی خاک) انجام شد. قطر دهانه لوله‌های استوانه‌ای ۱۶ سانتی‌متر و ارتفاع آن‌ها یک متر بود. برای جلوگیری از چسبندگی، مواد زائد و سنگریزه‌های خاک قبل از ریختن به داخل لوله‌ها حذف شدند. جهت تسهیل در خارج

جدول ۱- شجره، نام اختصاری، مبدأ و نوع سازگاری ژنوتیپ‌های برنج مورد مطالعه آزمایش سال اول

ژنوتیپ‌های برنج	سازگاری	نام اختصاری در متن	مبدأ	سال اول	سال دوم
VANDANA	هوازی	AR1	هند	*	*
IR 78908-193-B-3-B	هوازی	AR2	IRRI	*	*
IR 81429-B-31	هوازی	AR3	IRRI	*	*
IR 78875-176-B-1-B	هوازی	AR4	IRRI	*	*
IR 79971-B-201-2-4	هوازی	AR5	IRRI	*	*
IR 80508-B-194-4-B	هوازی	AR6	IRRI	*	*
IR 80508-B-194-3-B	هوازی	AR7	IRRI	*	*
IR 79907-B-493-3-1	هوازی	AR8	IRRI	*	*
IR 81025-B-347-3	هوازی	AR9	IRRI	*	*
IR 81025-B-327-3	هوازی	AR10	IRRI	*	*
IR88628-B-B-15	آپلند	UR1	IRRI	*	*
IR83141-11	آپلند	UR2	IRRI	*	*
IR88614-B-1	آپلند	UR3	IRRI	*	*
ندا	غرقابی	ندا	ایران (اصلاح شده)	*	*
طارم محلی	غرقابی	طارم محلی	ایران (بومی)	*	*
غریب	غرقابی	غریب	ایران (بومی)	*	*

کردن ریشه‌ها از استوانه‌ها و حداقل آسیب به ریشه‌ها، پلاستیک‌های لوله‌ای شکل ضخیم در لوله‌ها قرار داده شده و سپس خاک مربوط به هر لوله در داخل آن ریخته شد. بذرها از پیش جوانه دار شده در خاک کاشته شدند. در هر لوله چهار بذر کاشته شد و پس از سبز شدن، دو گیاهچه حذف و دو گیاهچه باقی ننگه داشته شدند، بنابراین هر تکرار شامل یک لوله و در هر لوله دو عدد بوته وجود داشت. در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک دانه‌ها برای هر ژنوتیپ، پلاستیک‌های تعبیه شده در لوله‌ها به‌طور کامل خارج شده و ریشه گیاهان هر لوله به صورت جداگانه در تشتک آب قرار داده شدند تا خاک اطراف ریشه از آن جدا شود. تمامی ریشه‌ها بطور کامل با حداقل آسیب دیدگی روی الک قرار داده شده و با استفاده از قلم مو و آب شسته شدند.

صفات ریشه‌ای مورد بررسی در سال اول شامل: حجم ریشه که از طریق اختلاف حجم ایجاد شده پس از قرار دادن در حجم مشخصی از آب محاسبه شد. طول کلی ریشه با

استفاده از خط‌کش و وزن تر ریشه پس از شستشو با ترازوی با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. حجم ریشه (Root Volume) پس از قرار دادن کل ریشه در میزان مشخصی آب در استوانه مدرج و اختلاف حجم اولیه و ثانویه محاسبه شد. جهت اندازه‌گیری وزن خشک، ریشه‌ها در آن در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشکانده شدند. صفات طول کلی ریشه، طول ریشه، قطر ریشه، سطح ریشه، چگالی سطح ریشه و ظرافت ریشه با استفاده از روابط (۵-۱) محاسبه شدند (علیزاده، ۱۳۸۷).

(رابطه ۱)

$$\text{وزن ریشه} = \text{طول ریشه} \times 0.089$$

(رابطه ۲)

$$\text{طول ریشه} = \sqrt[5]{\text{حجم ریشه} \times \pi} \times 2 = \text{سطح ریشه}$$

(رابطه ۳)

$$\text{طول ریشه} = \frac{\text{حجم ریشه}}{\text{طول ریشه}} = \text{چگالی سطح ریشه}$$

(رابطه ۴)

t: زمان (روز پس از کاشت)، w: ماده خشک تجمعی، wmax: حداکثر تجمع ماده خشک، tm: زمان وقوع حداکثر سرعت رشد و te: زمان وقوع حداکثر تجمع ماده خشک هستند. براساس پارامترهای بدست آمده، حداکثر سرعت رشد شاخساره یا ریشه (cm) با استفاده از رابطه ۷ محاسبه شدند. همه پارامترها برای ریشه و شاخساره به صورت جداگانه محاسبه شدند. Maximum CGR) cm (حداکثر رشد در مرحله خطی است و واحد آن گرم در مترمربع در بوته است (غدیریان و همکاران، ۱۳۹۰; Yin et al., 2003). (رابطه ۷)

$$cm = \left(\frac{2te - tm}{te(te - tm)} \right) \left(\frac{tm}{te - tm} \right) wmax$$

Wmax حداکثر مقدار تجمع ماده خشک، K: ضریب سرعت افزایش ماده خشک و Tm: زمانی است که سرعت رشد گیاه به حداکثر مقدار خود می‌رسد (در این زمان مقدار ماده خشک به نصف مقدار حداکثر خود رسیده است). در زمان Tm، RGR برابر است با K/2. برای توصیف رابطه آلومتریک ریشه و شاخساره از مدل نمایی (رابطه ۸) استفاده شد (پوررضا و همکاران، ۱۳۸۶). (رابطه ۸)

$$f = ax^{-b}$$

میزان ماده خشک ریشه در عمق‌های صفر تا ۲۰، ۲۰ تا ۴۰ و ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متری خاک در آخرین مرحله نمونه‌برداری اندازه‌گیری و نمودار آن برای هر ژنوتیپ در دو شرایط آبیاری بهینه و تنش خشکی رسم شد.

نتایج و بحث

نتایج سال اول: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر ژنوتیپ بر وزن خشک ریشه، وزن خشک اندام هوایی، وزن تر ریشه، حجم ریشه، طول کل ریشه، طول ریشه، سطح ریشه، قطر ریشه، چگالی سطح ریشه معنی‌دار بود (جدول ۲).

تجزیه خوشه‌ای: در نمودار درختی (دندروگرام) حاصل از تجزیه خوشه‌ای در سه ناحیه (فاصله ۳، ۴/۵ و ۷/۵) برش ایجاد شد (شکل ۱). از هر کدام از برش‌ها به ترتیب چهار

($\pi \times$ طول ریشه) ÷ وزن تر ریشه = قطر ریشه (رابطه ۵)

وزن تر ریشه ÷ مجموع طول ریشه = ظرفیت ریشه تجزیه داده‌های سال اول با استفاده از رویه GLM در نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش LSD و در سال دوم با نرم‌افزار Excell و رویه Solver به روش مطلوب‌سازی تکراری انجام شد. برای تجزیه خوشه‌ای از نرم‌افزار SPSS و معیار فاصله اقلیدسی و روش حداقل واریانس وارد (WARD) استفاده شد. دندروگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌ها بر اساس میانگین صفات رسم شد. برای تشخیص درست‌ترین گروه‌بندی حاصل از تجزیه خوشه‌ای از روش تجزیه تابع تشخیص استفاده شد (فلاح شمسی و همکاران، ۱۳۹۶).

سال دوم: روش کشت در سال دوم مانند سال اول بود، با این تفاوت که آزمایش دارای تیمار تنش خشکی بود. آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی و به صورت فاکتوریل در سه تکرار انجام شد. عوامل آزمایش شامل ژنوتیپ (چهار ژنوتیپ برنج منتخب از تجزیه کلاستر وندانا، طارم محلی، ندا و UR2) و وضعیت آب خاک (تنش و آبیاری بهینه) بودند. مجموعه واحدهای آزمایشی در شش سری آزمایشی تنظیم و در طول فصل رشد در هر نمونه‌برداری تخریبی (هر ۲۰ روز یک بار) از یک سری کامل استفاده شد. برای تیمار آبیاری بهینه، آبیاری هر روز انجام و رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی حفظ شد. در تیمار تنش با رسیدن آب خاک به ۷۰ درصد ظرفیت زراعی آبیاری مجدد انجام شد. تیمار تنش از روز چهارم پس از کاشت اعمال و تا پایان رشد و رسیدگی محصول دانه ادامه داشت.

وزن خشک ریشه و شاخساره به تفکیک اجزا هر ۲۰ روز یک بار اندازه‌گیری شد. برای تعیین روند رشد افزایش ماده خشک ریشه و شاخساره و تعیین پارامترها از مدل رگرسیونی لجستیک استفاده شد. (رابطه ۶)

$$w = wmax \left(1 + \frac{te - t}{te - tm} \right) \left(\frac{t}{te} \right)^{\frac{te}{te - tm}}$$

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات ریشه‌ای و اندام هوایی ژنوتیپ‌های هوازی، غرقابی و آپلند برنج

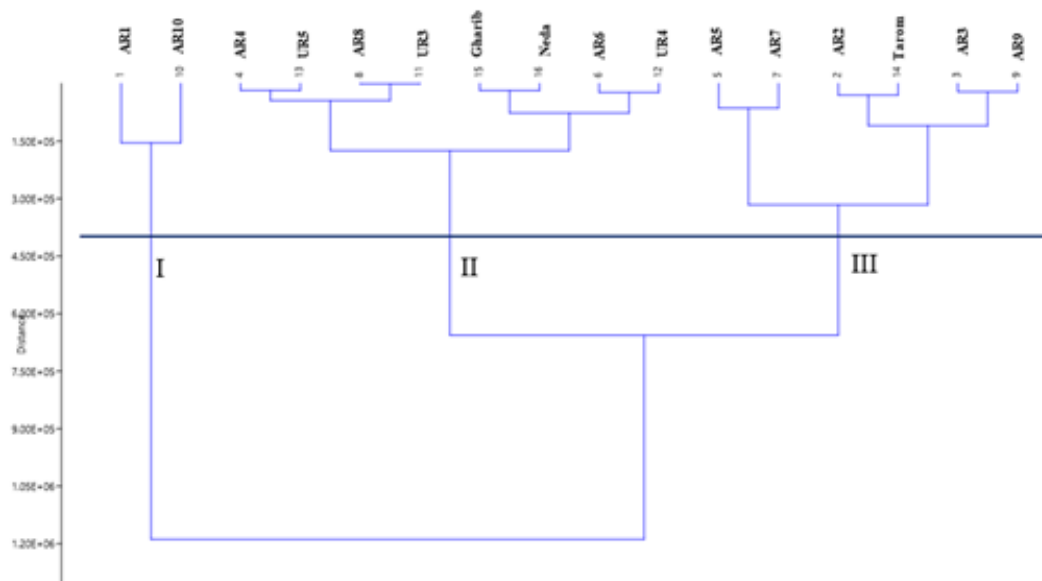
منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		ماده خشک ریشه	ماده خشک اندام هوایی	وزن تر ریشه	حجم ریشه
ژنوتیپ	۱۵	۹/۱۴۲**	۳/۲۶۳**	۵۵/۲۶۴**	۱۴۸/۲**
خطا	۳۲	۰/۱۶۲	۰/۲۲۴	۱۰/۸۱۱	۱/۹۶
ضریب تغییرات (%)		۱۳/۳۲	۱۴/۰۹	۳۲/۸۹	۶/۲۴۵
طول کل ریشه					۰/۰۱۱**
ضریب تغییرات (%)					۲/۷۵

** نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد و ns نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است.

ادامه جدول ۲-

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		طول ریشه	سطح ریشه	قطر ریشه	چگالی سطح ریشه
ژنوتیپ	۱۵	۷۲۴۱۰۹۴/۴**	۱/۰۷**	۰/۰۰۰۰۰۰۱**	۰/۰۰۸**
خطا	۳۲	۱۲۸۷۱۶/۷	۰/۰۳۶	۰/۰۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۱
ضریب تغییرات (%)		۱۳/۳۲	۱۹/۷۶	۱۸/۷۸	۱۷/۴۲
ظرافت ریشه					۱۵/۷۸ ^{ns}
ضریب تغییرات (%)					۶۲/۹۳

** نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد و ns نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است.



شکل ۱- نمودار درختی (دندروگرام) مربوط به صفات ریشه‌ای در ژنوتیپ‌های هوازی، غرقابی و آپلند برنج

در سه گروه قرار گرفتند (جدول ۴). گروه اول شامل ژنوتیپ‌های AR1 (رقم وندانا) و AR10 بود. گروه دوم شامل ژنوتیپ‌های طارم محلی، AR2، AR3، AR5، AR7 و AR9 و گروه سوم شامل ژنوتیپ‌های ندا، غریب، AR4، AR6، AR8، AR5 و UR4 بود (جدول ۵).

گروه، سه گروه و دو گروه حاصل شد. بر اساس آزمون تابع تشخیص و معنی‌داری لامبدای ویلکس (جدول ۳) برش ناحیه ۴/۵ با ایجاد سه گروه انتخاب شد. نتایج تجزیه تابع تشخیص نشان داد بین دو تابع شناسایی شده اختلاف معنی‌داری وجود داشت. بر اساس این گروه‌بندی ۱۶ ژنوتیپ برنج مورد بررسی

جدول ۳- آزمون تابع تشخیص با استفاده از لامبدای ویلکس

معنی داری	درجه آزادی	کای اسکوئر	لامبدای ویلکس	آزمون توابع
۰/۰۰۰	۶	۵۲/۳۷	۰/۰۱۳	تابع اول از درون تابع دوم
۰/۰۰۰	۲	۱۹/۸۹	۰/۱۹	تابع دوم

جدول ۴- گروه‌های حاصل از تجزیه خوشه‌ای بر اساس صفات ریشه‌ای ژنوتیپ‌های برنج

اعضای گروه	تعداد اعضای گروه	گروه‌های برنج
AR1, AR10	۲	I
طارم محلی، AR2, AR3, AR5, AR7, AR9	۶	II
ندا، غریب، AR4, AR6, AR8, UR5, UR4	۸	III
	۰/۸۴	ضریب کوفتیک

نظر میانگین این صفات، حد واسط دو گروه اول و سوم و شامل ژنوتیپ‌های هوازی AR5, AR3, AR2, AR7, AR9، و رقم غرقابی طارم محلی بود.

از نظر صفات قطر ریشه، چگالی سطح ریشه و ظرافت ریشه اگر چه بین سه گروه اختلاف معنی دار وجود نداشت، اما گروه سوم دارای میانگین‌های بالاتر از گروه‌های اول و دوم بود. به‌طور کلی ژنوتیپ‌های هوازی دارای صفات حجمی، طولی و وزنی بالاتر ریشه و ژنوتیپ‌های آپلند دارای صفات ظرافت، قطر و چگالی سطح بالاتر ریشه بودند که سه ژنوتیپ هوازی AR8, AR6, AR4 و دو رقم ندا و غریب نیز با ژنوتیپ‌های آپلند در یک گروه قرار گرفتند. در مجموع گروه اول به دلیل معنی داری اختلاف بین گروهی و فاصله بیشتر با میانگین کل و برتری در تعداد صفات بیشتر نسبت به دو گروه دیگر برتری داشت. این گروه شامل دو ژنوتیپ هوازی وندانا و AR10 بود.

در نتایج تعدادی از آزمایش‌ها، حجم ریشه در ارقام برنج در شرایط هوازی و آپلند از صفات تأثیرگذار بر تحمل به خشکی معرفی شده است (Kanbar et al., 2009; Himasha et al., 2021). گزارش شده است که ارقام برنج با حجم ریشه بیشتر، تحمل بهتری به تنش خشکی نسبت به ارقام با حجم ریشه کم داشتند (Ramamoorthy et al., 2018). افزایش قطر ریشه باعث بهبود تحمل به خشکی می‌شود، زیرا با تولید

نتایج آزمون مقایسه میانگین گروه‌های حاصل از تجزیه خوشه‌ای از نظر صفات ریشه‌ای در (جدول ۵) ارائه شده است. گروه I شامل ژنوتیپ‌های AR1 (رقم وندانا) و AR10 بود که در همه صفات غیر از چگالی سطح ریشه و قطر ریشه دارای میانگین‌های بالاتر و اختلاف معنی دار بودند. گروه II از نظر صفات حجم ریشه، طول کل ریشه، قطر ریشه، چگالی سطح ریشه و ظرافت ریشه با گروه I اختلاف معنی دار داشت و دارای میانگین‌های کمتری بود. گروه III از نظر صفات ماده خشک ریشه، نسبت ریشه به شاخساره، طول ریشه و سطح ریشه با گروه II اختلاف معنی دار داشت و دارای میانگین‌های کمتری بود (جدول ۵).

در اکثر صفات شامل وزن خشک ریشه، وزن خشک شاخساره، وزن تر ریشه، حجم ریشه، طول کل ریشه، نسبت ریشه به شاخساره، طول ریشه و سطح ریشه اختلاف میانگین کل و میانگین گروه اول بیشتر از اختلاف میانگین کل با میانگین دو گروه دیگر بود (جدول ۵). بنابراین دو ژنوتیپ گروه اول شامل AR10 و وندانا دارای میانگین‌های بالاتر از میانگین کل بودند. این دو ژنوتیپ از ژنوتیپ‌های هوازی بودند. اختلاف میانگین کل با میانگین گروه سوم در صفات ذکر شده منفی بود. بدین معنی که در این صفات ژنوتیپ‌های گروه سوم شامل ندا، غریب، UR5, AR8, AR6, AR4, UR5، دارای میانگین کمتر از میانگین کل بودند. گروه دوم از

جدول ۵- مقایسه میانگین گروه‌های حاصل از تجزیه خوشه‌ای بر اساس صفات ریشه‌ای ژنوتیپ‌های هوازی، غرقابی و آپلند برنج

RT	RSD	RD	RS	RL	R/S	RTL	RV	RFW	SDW	RDW	
۶/۹۸ ^a	۰/۱۸۸ ^a	۰/۰۰۱۰۵ ^a	۱۰۶۰۰۸۷ ^a	۶۲۰۹/۷ ^a	۱/۶۹ ^a	۵۴/۱۶ ^a	۲۷/۶۱ ^a	۱۸/۸۰ ^a	۴/۴۷ ^a	۷/۹۶ ^a	I
۵/۵۰ ^a	۰/۲۰۰ ^a	۰/۰۰۱۲۱ ^a	۴۸۹۱۴۰ ^b	۲۷۴۵/۳ ^b	۱/۰۸ ^b	۵۲/۶۶ ^a	۲۸/۲۹ ^a	۱۰/۱۴ ^b	۳/۴۹ ^b	۳/۰۸ ^b	II
۶/۸۶ ^a	۰/۲۱۷ ^a	۰/۰۰۱۴ ^a	۱۹۳۴۲۳ ^c	۱۷۷۳/۷ ^c	۰/۶۹ ^c	۴۹/۷۱ ^b	۱۶/۸۹ ^b	۷/۶۷ ^b	۲/۹۷ ^b	۱/۹۹ ^c	III
۶/۳۷	۰/۲۰۷	۰/۰۰۱۳	۴۱۲۳۴۹/۶	۲۶۹۲/۵۵	۰/۹۶	۵۱/۳۷	۲۲/۵۰	۹/۹۹	۳/۳۵	۳/۰۲	میانگین کل
۰/۴۱۷	-۰/۰۱۹	-۰/۰۰۰۲	۶۴۷۴۳۷/۴	۳۵۱۷/۱۵	۰/۷۳	۲/۷۹	۵/۱۰	۸/۸۱	۱/۱۱	۳/۹۵	I- میانگین
-۰/۸۶۴	-۰/۰۰۶	-۰/۰۰۰۰	۷۶۴۹۰/۳۹	۵۲/۷۴	۰/۱۲	۱/۲۹	۵/۷۸	۰/۱۵	۰/۱۳۶	۰/۰۵۹	II- میانگین
۰/۴۹۴	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰۱	۲۱۹۲۲۷	-۹۸۱/۸۵	-۰/۲۷	-۱/۶۶	-۵/۶۱	-۲/۳۱	-۰/۳۸۱	-۱/۰۳	III- میانگین

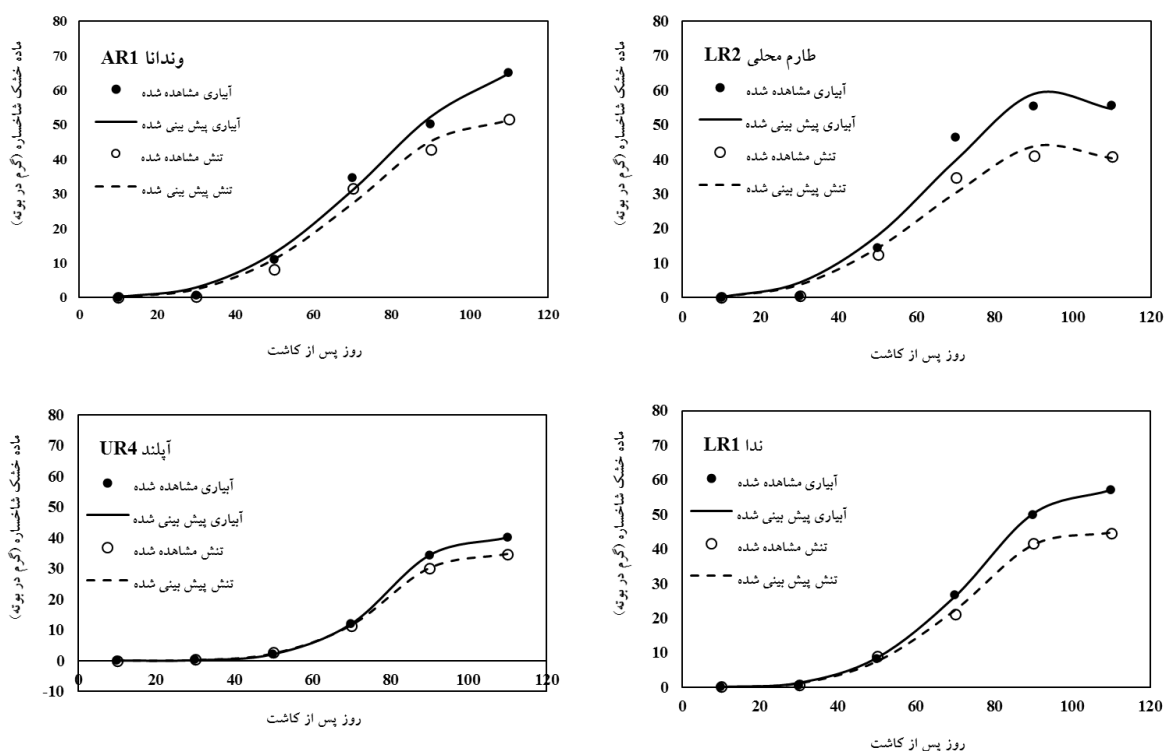
RDW: وزن خشک ریشه؛ SDW: وزن خشک شاخساره؛ RFW: وزن تر ریشه؛ RV: حجم ریشه؛ RTL: طول کل ریشه؛ R/S: نسبت ریشه به شاخساره؛ RL: طول ریشه؛ RS: سطح ریشه؛ RD: قطر ریشه؛ RSD: چگالی سطح ریشه؛ RT: ظرافت ریشه. سه ردیف آخر جدول نشان‌دهنده اختلاف میانگین هر یک از گروه‌ها از میانگین کل است.

گروه III و آپلند) و ندا (از گروه III و غرقابی اصلاح‌شده) به‌عنوان نماینده هر گروه جهت مطالعه روند رشد ریشه در طول دوره رشد انتخاب شدند. صفات مورد بررسی شامل وزن خشک ریشه و وزن خشک کل شاخساره بود که روند تغییرات آن‌ها و روند نسبت وزن خشک ریشه به شاخساره در طول دوره رشد با استفاده از توابع رگرسیون غیرخطی توصیف و پارامترهای به‌دست آمده تفسیر شدند.

ماده خشک شاخساره: افزایش ماده خشک شاخساره در ژنوتیپ‌ها و دو شرایط آبیاری کامل و تنش دارای الگوی مشابهی بود. به‌طوری‌که از تابع بتا برای توصیف روند افزایش ماده‌خشک در طول دوره رشد استفاده شد (شکل ۲). برازش تابع در چهار ژنوتیپ مورد بررسی (وندانا، طارم محلی، آپلند و ندا) و در هر ژنوتیپ در دو شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی انجام شد. تفاوت ژنوتیپ‌ها و شرایط آبیاری و تنش در (شکل ۲) و پارامترهای حاصل از برازش کاملاً مشهود است (جدول ۶). میزان نهایی ماده خشک اندام هوایی (Wmax) از ۳۸/۳۷ گرم در بوته در ژنوتیپ آپلند در شرایط تنش تا ۶۴/۸ گرم در بوته در رقم وندانا در شرایط آبیاری کامل متغیر بود. در همه ژنوتیپ‌ها میزان نهایی ماده خشک کل در دو شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی متفاوت و در شرایط تنش کمتر بود. این تفاوت در رقم طارم محلی بیشتر از سایر

شاخه‌های بیشتر و بزرگتر تراکم طول ریشه و جذب آب افزایش می‌یابد. این شاخص‌ها با ماده خشک ریشه مرتبط هستند. در برنج صفات ریشه از جمله طول ریشه، حجم ریشه و ضخامت ریشه با عملکرد دانه همبستگی مثبت و با تراکم ریشه همبستگی منفی دارند (Quadri et al., 2023). ژنوتیپ‌های برنج متحمل به خشکی نسبت به ژنوتیپ‌های حساس، ضخامت ریشه، حجم ریشه و ساختار ریشه عمیق بیشتری داشتند. عمق ریشه با حجم ریشه، ضخامت ریشه، وزن تر اندام هوایی و ریشه و وزن خشک اندام هوایی و ریشه همبستگی مثبت و معنی‌دار دارد (Ramamoorthy et al., 2018). ریشه‌های ضخیم آوندهای چوبی بزرگتری دارند، طولانی‌تر باقی می‌مانند، ریشه‌های شاخه‌های بیشتر و بزرگ‌تر تولید می‌کنند و در نتیجه باعث افزایش طول ریشه و ظرفیت جذب آب در برنج می‌شوند (Sandar et al., 2022).

نتایج سال دوم: آزمایش سال دوم مانند سال اول در لوله‌های پلی‌اتیلنی اجرا شد. با این تفاوت که چهار ژنوتیپ منتخب بر اساس آزمایش قبلی که بررسی صفات ریشه‌ای در شرایط آبیاری کامل بود، مورد مطالعه قرار گرفتند. با توجه به گروه‌بندی بر اساس تجزیه خوشه‌ای و همچنین سه تیپ مورد مطالعه (هوازی، غرقابی و آپلند)، ارقام وندانا (از گروه I و هوازی)، طارم محلی (از گروه II و غرقابی بومی)، UR4 (از



شکل ۲- برازش مدل رگرسیونی بتا به داده‌های ماده خشک شاخساره در برابر روز پس از کاشت در چهار ژنوتیپ برنج (وندانا، آپلند، طارم محلی و ندا). نقاط نشان‌دهنده داده‌های مشاهده‌شده و خط نشان‌دهنده پیش‌بینی مدل بتا هستند. هر نمودار مربوط به یک ژنوتیپ که شامل روند ماده خشک در شرایط آبیاری کامل (آبیاری) و تنش خشکی (تنش) است.

رسیدن به حد اکثر رشد گیاه (tm) در رقم طارم محلی در شرایط تنش (۶۶/۲ روز) و آبیاری کامل (۶۷/۸ روز) زودتر از سایر ژنوتیپ‌ها رخ داد. te و tm روند مشابهی در ژنوتیپ‌های مختلف داشتند. تنش خشکی باعث تسریع سه روزه در رسیدن به حداکثر سرعت رشد و شش روزه در زمان وقوع حداکثر تجمع ماده خشک در رقم وندانا شد. در سایر ژنوتیپ‌ها در اثر تنش خشکی تسریع چند ساعته تا ۱/۵ روز در tm و te به وجود آمد. میزان رطوبت خاک بر تعداد پنجه و در نتیجه تولید ماده خشک در برنج مؤثر است (*Khonghintaionsg et al.*, 2020). آزمایش‌های ذکرشده روی ارقام آپلند (*Singh et al.*, 2005; *Asch et al.*, 2000)، غرقابی دیم (*Banoc et al.*, 2000) انجام شده است.

با استفاده از این مدل پارامترهای حداکثر ماده خشک تولید شده در ریشه (Wmax)، زمان رسیدن به حداکثر سرعت رشد ریشه (tm)، زمان وقوع حداکثر تجمع ماده خشک ریشه (te) و

ژنوتیپ‌ها بود (۱۶/۲۸ گرم در بوته). کمترین تفاوت در دو شرایط آبیاری کامل و تنش مربوط به ژنوتیپ آپلند بود (۶/۷۱ گرم در بوته). از آنجایی که ماده خشک نهایی برآیند مجموع عوامل و سازوکارهای به کار رفته در گیاه در مقابل تنش است، این اختلاف نشان‌دهنده حساسیت رقم طارم محلی و تحمل ژنوتیپ آپلند در شرایط تنش خشکی است. اگر چه ژنوتیپ آپلند به دلیل کوتاهی ارتفاع بوته دارای میزان ماده خشک کمتری بود اما کمتر تحت تأثیر تنش قرار گرفت که شاخصی برای انعطاف‌پذیری گیاه در شرایط تنش خشکی است.

حداکثر سرعت رشد گیاه (cm) از ۰/۸۳ گرم در بوته در روز در شرایط تنش در رقم طارم محلی تا ۱/۲۵ گرم در بوته در روز در شرایط آبیاری کامل در ژنوتیپ آپلند متغیر بود. بیشترین کاهش در سرعت رشد گیاه در اثر تنش خشکی در رقم طارم محلی (۰/۳۳ گرم در بوته در روز) و کمترین کاهش مربوط به ژنوتیپ وندانا (۰/۱۴ گرم در بوته در روز) بود. زمان

جدول ۶- پارامترهای حاصل از برازش مدل بتا به داده‌های ماده خشک شاخساره در برابر زمان (روز پس از کاشت) در ژنوتیپ‌های هوازی، غرقابی و آپلند برنج در شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی

R ²	RMSE	cm (g.m ⁻² . d ⁻¹)	tm (day)	te (day)	Wmax (g.m ⁻²)	ژنوتیپ‌های برنج	
۱/۹۱	۱/۰۸	۷۷/۸۰	۱۱۱/۵۹	۶۴/۸۰	۶۴/۸۰	وندانا (AR1)	آبیاری کامل
۳/۷۸	۱/۱۶	۶۷/۸۵	۹۸/۳۳	۶۱/۷۱	۶۱/۷۱	طارم محلی (LR2)	
۰/۰۹۴	۱/۲۵	۸۶/۸۰	۱۰۳/۴۴	۴۵/۰۸	۴۵/۰۸	آپلند (UR4)	
۰/۳۹۶	۱/۲۴	۷۹/۶۵	۱۰۴/۲۹	۵۹/۲۱	۵۹/۲۱	ندا (LR1)	
۲/۴۹	۰/۹۴	۷۵/۰۵	۱۰۵/۶۴	۵۱/۹۹	۵۱/۹۹	وندانا (AR1)	تنش
۲/۵۷	۰/۸۳	۶۶/۲۴	۹۷/۹۵	۴۵/۴۳	۴۵/۴۳	طارم محلی (LR2)	
۰/۲۲۲	۱/۰۱	۸۵/۵۴	۱۰۳/۴۰	۳۸/۳۷	۳۸/۳۷	آپلند (UR4)	
۰/۸۱۲	۰/۹۸	۷۸/۰۲	۱۰۳/۱۱	۴۷/۲۲	۴۷/۲۲	ندا (LR1)	
		۰/۱۴	۲/۷۵	۵/۹۵	۱۲/۸۱	وندانا (AR1)	اختلاف آبیاری و تنش
		۰/۳۳	۱/۶۱	۰/۳۸	۱۶/۲۸	طارم محلی (LR2)	
		۰/۲۴	۱/۲۶	۰/۰۴	۶/۷۱	آپلند (UR4)	
		۰/۲۶	۱/۶۳	۱/۱۸	۱۱/۹۹	ندا (LR1)	

Wmax: حداکثر ماده خشک، te: زمان رسیدن به حداکثر ماده خشک، tm: زمان تا رسیدن به بیشینه سرعت رشد گیاه، cm: سرعت رشد گیاه، RMSE: جذر میانگین مربعات خطا و R²: ضریب تبیین هستند.

است که به وضوح در نتایج (جدول ۸) قابل مشاهده است. بر خلاف نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل رشد شاخساره، در اثر تنش خشکی زمان رسیدن به بیشینه سرعت رشد در ریشه افزایش یافت. در اثر تنش خشکی زمان رسیدن به بیشینه ماده خشک ریشه (te) در ارقام ندا و وندانا کاهش (با اختلاف ۴/۶۵ و ۰/۱۳ روز) و در ژنوتیپ آپلند و رقم طارم محلی افزایش یافت (با اختلاف ۲/۵ و ۶/۵۶). بنابراین ارقام ندا تسریع پنج روزه و طارم محلی تأخیر هفت روزه در رسیدن به حداکثر ماده خشک ریشه داشتند. رشد ریشه برنج از نظر ماده خشک کل، حداکثر عمق ریشه و تراکم طول ریشه تا مرحله گلدهی افزایش می‌یابد و سپس تا رسیدن به بلوغ به شدت کاهش می‌یابد (Liu, Kim et al., 2020). همکاران (۲۰۲۲) گزارش دادند که ریشه‌های تولیدشده پس از گلدهی ممکن است نقش مهمی در طول دوره پر شدن دانه برنج ایفا کنند. اساس برخی از آزمایش‌ها تغییرات ماده خشک ریشه برنج بیش از اینکه تحت تیمار تنش خشکی قرار گیرد، تحت تأثیر

سرعت رشد ریشه (cm) حاصل شد که نتایج در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج برازش مدل نشان داد که میزان بیشینه ماده خشک ریشه در رقم وندانا در هر دو شرایط آبیاری (۶/۲۶ گرم در بوته) و تنش خشکی (۵/۲۲ گرم در بوته) از سایر ژنوتیپ‌ها بیشتر بود. اختلاف ماده خشک نهایی ریشه در شرایط آبیاری و تنش در ژنوتیپ آپلند از سایر ژنوتیپ‌ها کمتر بود (۰/۰۹ گرم در بوته). همچنین در رقم ندا اختلاف کمتری نسبت به دو ژنوتیپ وندانا و طارم محلی از نظر بیشینه ماده خشک در شرایط آبیاری و تنش مشاهده شد (۰/۰۴۹ گرم در بوته).

در اثر تنش خشکی زمان رسیدن به بیشینه سرعت رشد ریشه (tm) افزایش یافت. تنش خشکی باعث کاهش سرعت رشد ریشه (cm) در همه ژنوتیپ‌ها شد. این کاهش در ژنوتیپ‌های آپلند و ندا کمتر از سایر ژنوتیپ‌ها بود و این دو رقم سازوکار تقویت ریشه در برابر تنش خشکی را در پیش گرفتند. افزایش tm به معنی کاهش سرعت رشد ریشه (cm)

جدول ۷- پارامترهای حاصل از برازش مدل بتا به داده‌های ماده خشک شاخساره در برابر زمان (روز پس از کاشت) در ژنوتیپ‌های برنج در شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی

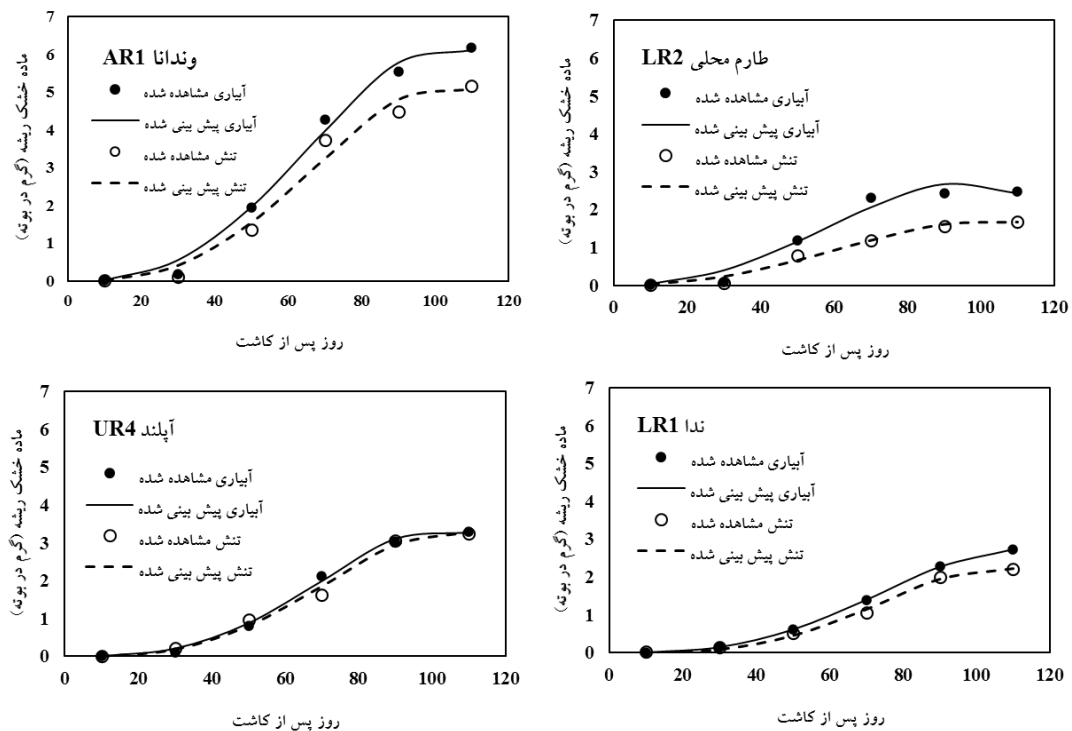
R ²	RMSE	cm (g.m ⁻² . d ⁻¹)	tm (day)	te (day)	Wmax (g.m ⁻²)	ژنوتیپ‌های برنج
۰/۲۲۶	۰/۱۰۴	۶۶/۹۹	۱۰۳/۴۲	۶/۲۶	۶/۲۶	وندانا (AR1)
۰/۱۹۷	۰/۰۴۶	۵۸/۲۹	۹۶/۲۲	۲/۷۱	۲/۷۱	طارم محلی (LR2)
۰/۰۸۰	۰/۰۶۱	۷۱/۱۱	۱۰۲/۸۰	۳/۴۱	۳/۴۱	آپلند (UR4)
۰/۰۱	۰/۰۴۵	۷۵/۴۸	۱۱۰/۴۵	۲/۷۴	۲/۷۴	ندا (LR1)
۰/۲۸	۰/۰۸۸	۶۸/۱۲	۱۰۳/۲۹	۵/۲۲	۵/۲۲	وندانا (AR1)
۰/۰۸۸	۰/۰۲۶	۶۰/۹۹	۱۰۲/۷۸	۱/۷۱	۱/۷۱	طارم محلی (LR2)
۰/۱۲۵	۰/۰۵۸	۷۲/۶۴	۱۰۵/۳۰	۳/۳۲	۳/۳۲	آپلند (UR4)
۰/۰۵۸	۰/۰۴۱	۷۵/۷۹	۱۰۵/۸۰	۲/۲۵	۲/۲۵	ندا (LR1)
	۰/۰۱۶	-۱/۱۳	۰/۱۳	۰/۹۸	۰/۹۸	وندانا (AR1)
	۰/۰۳۸	-۲/۷	-۶/۵۶	۱	۱	طارم محلی (LR2)
	۰/۰۰۳	-۱/۵۳	-۲/۵	۰/۰۹	۰/۰۹	آپلند (UR4)
	۰/۰۰۴	-۰/۳۱	۴/۶۵	۰/۴۹	۰/۴۹	ندا (LR1)

Wmax: حداکثر ماده خشک، te: زمان رسیدن به حداکثر ماده خشک، tm: زمان تا رسیدن به بیشینه سرعت رشد ریشه، cm: سرعت رشد ریشه، RMSE: جذر میانگین مربعات خطا و R²: ضریب تبیین هستند.

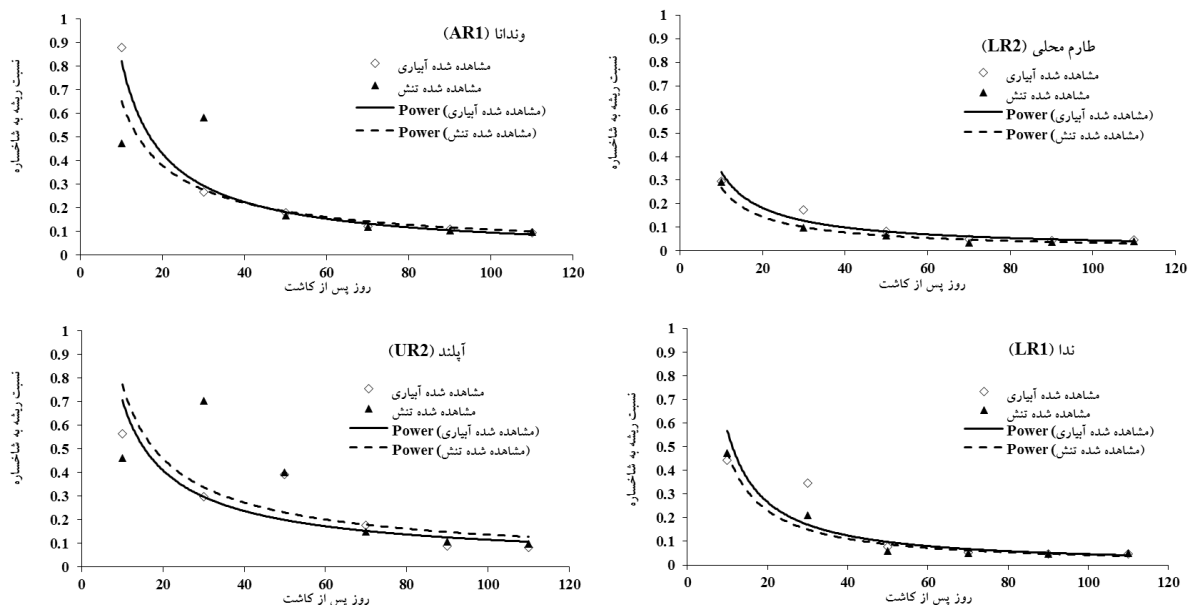
چهار ژنوتیپ و در هر دو شرایط آبیاری کامل و تنش، به صورت کاهشی بود (شکل ۴). این نسبت به صورت نمایی در ژنوتیپ‌های مختلف کاهش یافت. در شروع فصل رشد و در حدود ۱۰ روز پس از کاشت (مرحله سبز شدن) این نسبت از حدود ۰/۳ در رقم طارم محلی تا ۰/۹ در رقم وندانا متغیر بود که نشان‌دهنده ریشه‌های اولیه بیشتر و عمیق‌تر در رقم وندانا است (جدول ۸). با گذشت فصل رشد تا حدود ۴۰ روز پس از کاشت، نسبت ماده خشک ریشه به اندام هوایی با شیب تندی کاهش یافت. این در حالی است که رشد ریشه و شاخساره (صورت و مخرج کسر) هر دو در حال افزایش بود، اما به دلیل تخصیص مواد فتوسنتزی بیشتر به شاخساره در دوره شروع پنجه‌زنی، نسبت ریشه به اندام هوایی کاهش یافت. حدود ۶۰-۵۰ روز پس از کاشت (اواسط پنجه‌زنی) این نسبت شروع به ثابت شدن کرد. در ژنوتیپ آپلند روند کاهش از شروع تا پایان فصل به ویژه در شرایط تنش به صورت خطی بود و داده‌های مشاهده شده در شرایط آبیاری کامل و تنش بر

خصوصیات ژنتیکی ارقام است. به طوری که در اثر تنش خشکی امکان تغییرات مورفولوژیک و تسهیم ماده خشک ریشه برای تنظیم آب و مواد معدنی از خاک وجود دارد (Himasha et al., 2021). البته در مقابل در آزمایشی Asch و همکاران (۲۰۰۵) با مطالعه روی ارقام آپلند برنج کاهش ۸۰-۲۲ درصدی ماده خشک ریشه در تیمارهای تنش خشکی را گزارش کردند. آن‌ها روند افزایش ماده خشک ریشه را مشابه با روند افزایش ماده خشک شاخساره گزارش کردند. در آزمایشی گزارش شده است که ژنوتیپ‌های هوازی برنج به دلیل طول ریشه و زیست‌توده ریشه بهتر در شرایط محدود آب عملکرد بهتری داشتند (Sandhu et al., 2012). نتایج آزمایش حاضر برای ماده خشک ریشه و شاخساره با یافته‌های Patel و همکاران (۲۰۱۰) مبنی بر صفات ریشه‌ای و عملکرد ریشه بهتر در ژنوتیپ‌های هوازی مطابقت داشت.

نسبت ماده خشک ریشه به اندام هوایی: روند نسبت ماده خشک ریشه به ماده خشک اندام هوایی در طی فصل رشد در



شکل ۳- برازش مدل رگرسیونی بتا به داده‌های وزن خشک ریشه در برابر روز پس از کاشت در چهار ژنوتیپ برنج (وندانا، طارم محلی، آپلند و ندا) نقاط نشان‌دهنده داده‌های مشاهده شده و خط نشان‌دهنده پیش‌بینی مدل بتا هستند. هر نمودار مربوط به یک ژنوتیپ که شامل روند ماده خشک در شرایط آبیاری کامل (آبیاری) و تنش خشکی (تنش) است.



شکل ۴- روند نسبت ریشه به اندام هوایی ژنوتیپ‌های هوایی، غرقابی و آپلند برنج در طی فصل رشد. تابع نمایی به داده‌ها در هر ژنوتیپ و دو شرایط دسترسی به آب برازش شده است. نقاط نشان‌دهنده داده‌های مشاهده شده و خط نشان‌دهنده پیش‌بینی مدل نمایی است. هر نمودار مربوط به یک ژنوتیپ که شامل روند نسبت وزن خشک ریشه به اندام‌هوایی در شرایط آبیاری کامل (آبیاری) و تنش خشکی (تنش) است.

جدول ۸- پارامترهای حاصل از برازش تابع توانی به داده‌های نسبت ماده خشک ریشه به اندام هوایی در چهار ژنوتیپ هوازی، غرقابی و آپلند برنج (AR1, UR4, LR1, LR2) در شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی

R ²	b	a	ژنوتیپ‌های برنج	
۰/۹۹	-۰/۹۳	۷/۰۵	وندانا	آبیاری کامل
۰/۹۴	-۰/۸۸	۲/۵۴	طارم محلی	
۰/۷۷	-۰/۷۸	۴/۳۱	UR4	
۰/۹۱	-۱/۰۵	۵/۴۴	ندا	
۰/۷۷	-۰/۷۳	۳/۹۲	وندانا	تنش خشکی
۰/۹۴	-۰/۸۹	۲/۱۱	طارم محلی	
۰/۶۳	-۰/۷۵	۴/۳۷	UR4	
۰/۸۶	-۱/۰۹	۷/۰۷	ندا	

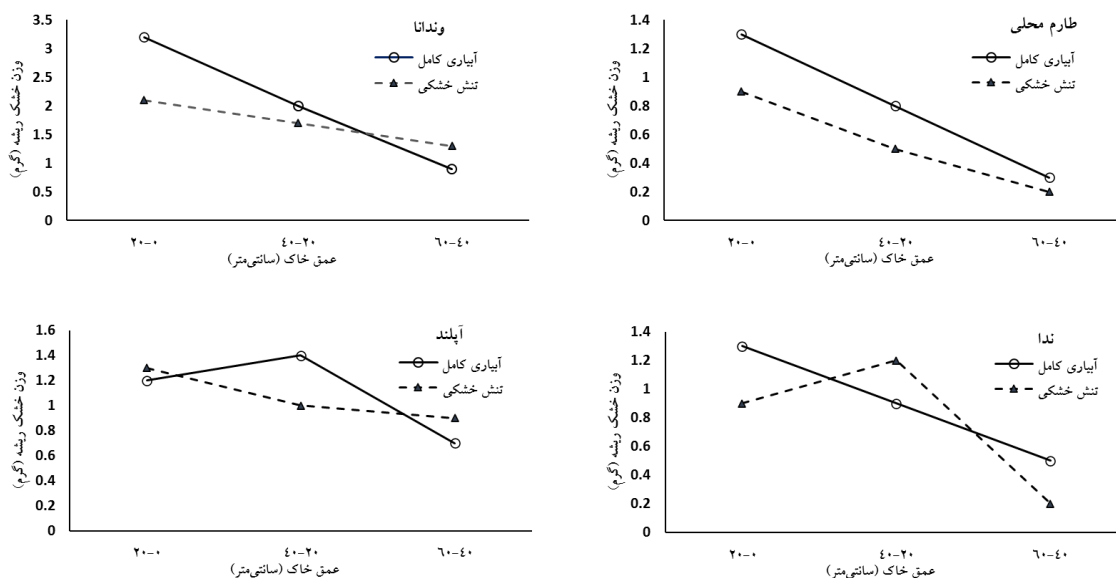
افزایش قابل‌توجهی در تجمع زیست‌توده رویشی و وزن خشک دانه در هر خوشه می‌شود. بنابراین، پتانسیل عملکرد ارقام برنج فعلی را می‌توان با افزایش عملکرد ساختار ریشه احتمالاً از طریق افزایش رشد ریشه نسبت به اندام هوایی یا بهبود ظرفیت جذب آب و نیتروژن بافت‌های ریشه با تغییر ژن، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بهبود بخشید (Woo *et al.*, 2007; Nada and Abogadallah, 2016). در آزمایشی که در مقایسه شرایط کشت‌های هوازی و غرقابی برنج انجام شد، گزارش شد که نسبت طول ریشه به ساقه در شرایط هوازی در هر دو ژنوتیپ مورد بررسی بیشتر و رشد ریشه نسبتاً بالاتر بود که نشان‌دهنده بهبود شرایط رشد ریشه و جذب مؤثرتر مواد مغذی در کشت هوازی است (Phule *et al.*, 2019).

ماده خشک ریشه در عمق‌های مختلف خاک: تغییرات

ماده خشک ریشه در سه عمق مختلف (صفر تا ۲۰، ۲۰ تا ۴۰ و ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متر) در دو شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی در چهار ژنوتیپ برنج ارائه شده است (شکل ۵). در ژنوتیپ طارم محلی ماده خشک ریشه در شرایط آبیاری کامل در هر سه عمق بیشتر از شرایط تنش بود. در این رقم بیشترین تجمع ماده خشک در عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری بود که نشان‌دهنده سطحی بودن ریشه در هر دو شرایط است. در رقم وندانا روند تغییرات در عمق‌های مختلف مشابه رقم طارم محلی بود با این تفاوت که با اعمال تنش در عمق ۴۰ تا ۶۰

هم منطبق بود. این امر ناشی از عدم افت نسبت ریشه به اندام هوایی در دوره پنجه‌زنی در این ژنوتیپ است. این روند در سایر آزمایش‌ها روی برنج گزارش شده است (Asch *et al.*, 2005; Kato *et al.*, 2006; Matsui and Singh, 2003).

نسبت ریشه به شاخساره در ژنوتیپ‌های غرقابی ندا و طارم محلی کمتر از وندانا و آپلند بود (شکل ۴). عملکرد مطلوب رقم وندانا و ژنوتیپ آپلند از نظر صفات تحمل به خشکی در آزمایش‌های دیگر نیز گزارش شده است (Esmaeilzadeh-Moridani *et al.*, 2023). ارقام غرقاب بومی و بعضی از ارقام بهبود یافته، ساختار ریشه کوچک و هدایت هیدرولیکی پایین همراه با نرخ تعرق روزنه‌ای و غیرروزنه‌ای بالا از برگ‌ها دارند که منجر به محدود کردن تجمع زیست‌توده و عملکرد می‌شود (Nada and Abogadallah, 2016). Parent و همکاران (۲۰۱۰) به این نتیجه رسیدند که برگ‌های برنج مانند ذرت و سایر گیاهان به تقاضای تبخیری و کمبود آب حساس نیستند و حساسیت بالای برنج به عدم تعادل آبی می‌تواند نتیجه ویژگی‌های ساختار ریشه باشد تا فیزیولوژی اندام هوایی، اما داده‌های کمی که این نتیجه را تأیید کند وجود ندارد. در چند آزمایش نشان داده شد که افزایش نسبت ریشه به شاخساره با حذف پنجه‌ها یا استفاده از ژنوتیپ‌های با تعداد پنجه کم، هدایت روزنه‌ای، فتوسنتز و محتوای پروتئین برگ را در طول مراحل رویشی و زایشی افزایش می‌دهد، که منجر به



شکل ۵- ماده خشک ریشه در عمق‌های مختلف خاک در ژنوتیپ‌های مختلف در شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی

تا با حفظ وضعیت آب و مواد مغذی، اثر سوء تنش خشکی را کاهش دهد (Kato et al., 2006). Martin و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کرد که ارقام مگا برنج (ADT 39 و PMK 3) که برای کشت در شرایط هوایی بر اساس عملکرد، رشد و ثبات عملکرد مناسب بودند، در مقایسه با سایر ارقام برنج، سیستم ریشه‌ای طولی‌تر و عمیق‌تر داشتند. توانایی رشد ریشه‌های عمیق در حال حاضر پذیرفته‌شده‌ترین صفت هدف برای بهبود تحمل به خشکی در گیاه برنج است، اما تنوع ژنتیکی برای تعدادی از صفات گزارش شده است که ممکن است بر پاسخ به خشکی تأثیر بگذارد (Gowda et al., 2011). از مشاهدات مورفولوژیکی ریشه برنج در یک آزمایش استنباط شد که طول ریشه و وزن خشک ریشه پارامترهای کلیدی برای ایجاد سازگاری در کشت هوایی هستند. بنابراین، بهبود در برنج هوایی را می‌توان با شناسایی لاین‌ها یا ارقامی که دارای ساختار ریشه عمیق‌تر هستند، به دست آورد که به حداکثر جذب آب و در نهایت افزایش عملکرد دانه در شرایط محدود آب کمک می‌کند (Phule et al., 2019).

نتیجه‌گیری

بر اساس تجزیه خوشه‌ای صفات ریشه‌ای در سال اول به‌طور

سانتی‌متری افزایش ماده خشک قابل‌توجهی مشاهده شد. در ژنوتیپ آپلند و رقم ندا شیب تغییرات ماده خشک در عمق‌های مختلف کمتر بود که حاکی از تخصیص سهم بیشتری از ماده خشک ریشه در قسمت‌های پایین‌تر نیم‌رخ خاک است. در ژنوتیپ ندا با اعمال تنش، سهم ماده خشک در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری نسبت به آبیاری کامل افزایش یافت. در ژنوتیپ آپلند در شرایط آبیاری کامل، سهم ماده خشک ریشه در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری بیشتر بود. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت همه ژنوتیپ‌ها بجز رقم طارم محلی از نظر تنظیم عمق ریشه از انعطاف‌پذیری مطلوبی برخوردار بودند که می‌توان با بررسی‌های مولکولی و آنزیمی از آن‌ها در برنامه‌های اصلاحی برای صفات ریشه‌ای استفاده کرد. انتخاب بر اساس ضخامت و عمق ریشه برای شناسایی ارقام برای استفاده در اصلاح برنج آپلند برای تحمل به خشکی بسیار مناسب است (Ramamoorthy et al., 2018). سیستم ریشه عمیق و ضخیم قادر به استخراج آب در عمق و پاسخگویی به تقاضای تبخیر، به شرط وجود آب در نیم‌رخ، از مرتبط‌ترین صفاتی است که حداقل در شرایط آپلند و هوایی به اجتناب از خشکی کمک می‌کند (Kim et al., 2020). پارامترهای ریشه که نشان‌دهنده ساختار ریشه عمیق و توسعه یافته است، به گیاه کمک می‌کند

هفت روزه در رسیدن به حداکثر ماده خشک ریشه داشتند. نسبت ریشه به شاخساره در ژنوتیپ‌های هوازی و آپلند خصوصاً در مراحل اولیه رشد بیشتر از ژنوتیپ‌های غرقابی بود که نشان‌دهنده ساختار ریشه گسترده‌تر در این ژنوتیپ‌ها است. در اثر تنش خشکی الگوی توزیع ریشه در عمق‌های مختلف خاک در ژنوتیپ آپلند و ارقام ندا و وندانا تغییر قابل‌توجهی داشت. به طوری که وزن خشک ریشه در عمق‌های ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتی‌متری خاک نسبت به شرایط آبیاری کامل افزایش یافت. صفات ریشه‌ای از جمله عمق توسعه ریشه و نسبت ریشه به شاخساره از مهم‌ترین صفات برای افزایش پتانسیل عملکرد برنج محسوب می‌شوند که در برنامه‌های اصلاحی به‌ویژه برای تحمل به خشکی می‌توان از آن‌ها برای تولید ارقام متحمل استفاده کرد. ژنوتیپ‌های وندانا، آپلند و ندا که در این آزمایش از نظر صفات ریشه‌ای برتری داشتند، برای مطالعات تکمیلی توصیه می‌شوند. برای اعتبار سنجی مدل‌های ریاضی بتا و نمایی و مقایسه آن‌ها با سایر مدل‌های ریاضی در توصیف روند رشد ریشه، انجام آزمایش‌ها در شرایط مزرعه به‌صورت تکراردار توصیه می‌شود.

تشکر و قدردانی

از دانشگاه گیلان برای حمایت مالی از اجرای آزمایش تشکر و قدردانی می‌شود.

کلی ژنوتیپ‌های برنج هوازی دارای صفات حجمی، طولی و وزنی بالاتر ریشه و ژنوتیپ‌های آپلند دارای صفات ظرافت، قطر و چگالی سطح بالاتر ریشه بودند که سه ژنوتیپ هوازی AR4، AR6، AR8 و دو رقم ندا و غریب نیز با ژنوتیپ‌های آپلند در یک گروه قرار گرفتند. در مجموع گروه اول به دلیل معنی‌داری اختلاف بین گروهی و فاصله بیشتر با میانگین کل و برتری در تعداد صفات بیشتر نسبت به دو گروه دیگر برتری داشت. این گروه شامل دو ژنوتیپ هوازی وندانا و AR10 بود. با توجه به گروه‌بندی بر اساس تجزیه خوشه‌ای و همچنین سه تیپ مورد مطالعه (هوازی، غرقابی و آپلند)، ارقام وندانا (از گروه I و هوازی)، طارم محلی (از گروه II و غرقابی بومی)، UR4 (از گروه III و آپلند) و ندا (از گروه III و غرقابی اصلاح‌شده) به‌عنوان نماینده هر گروه جهت مطالعه روند رشد ریشه در طول دوره رشد انتخاب شدند. در آزمایش سال دوم، ارقام برنج با کاهش ماده خشک کل شاخساره و ریشه و کاهش سرعت رشد شاخساره و ریشه به تنش خشکی پاسخ دادند. شاخساره بیشتر از ریشه تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفت. ژنوتیپ‌های هوازی و آپلند کاهش کمتری نسبت به ژنوتیپ‌های غرقابی نشان دادند. تنش خشکی باعث تسریع سه روزه در رسیدن به حداکثر سرعت رشد و شش روزه در زمان وقوع حداکثر تجمع ماده خشک در رقم وندانا شد. در اثر تنش خشکی زمان رسیدن به بیشینه ماده خشک ریشه در ارقام ندا و وندانا کاهش (با اختلاف ۴/۶۵ و ۰/۱۳ روز) و در ژنوتیپ آپلند و رقم طارم محلی افزایش یافت (با اختلاف ۲/۵ و ۶/۵۶). بنابراین ارقام ندا تسریع پنج روزه و طارم محلی تأخیر

منابع

پوررضا، جعفر، سلطانی، افشین، راحمی کاریزکی، علی، گالشی، سراله، و زینلی، ابراهیم (۱۳۸۶). روابط آلومتریک میان ارتفاع بوته و صفات رویشی در گیاه نخود (*Cicer arietinum*). *علوم کشاورزی و منابع طبیعی*، ۱۴:۵. (ویژه‌نامه زراعت و اصلاح نباتات)

<https://sid.ir/paper/8877/fa>. ۱۹۹-۱۹۱

علیزاده، امین (۱۳۸۷). رابطه آب و خاک و گیاه. دانشگاه امام رضا (ع). https://press.um.ac.ir/index.php?option=com_k2&view=item&id=791:f-57&Itemid=714&lang=fa

غدیریان، رحمان، سلطانی، افشین، زینلی، ابراهیم، کلاته عربی، مهدی، و بخشنده، اسماعیل (۱۳۹۰). ارزیابی مدل‌های رگرسیون غیرخطی برای استفاده در آنالیز رشد گندم. *مجله الکترونیک تولید گیاهان زراعی*، ۴، ۷۷-۵۵.

https://ejcp.gau.ac.ir/article_94.html

فلاح شمسی، ارحامه، پیردشتی، همت اله، عبادی، علی اکبر، اصفهانی، مسعود، و رائینی، محمود (۱۳۹۴). پاسخ ویژگی های ریشه و تسهیم ماده خشک ۴۰ ژنوتیپ اصلاح شده و بومی برنج (*Oryza sativa* L.) در شرایط کم آبیاری. *پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی*، ۹(۲۲). doi:10.29252/jcb.9.22.63

- Asch, F., Dingkuhn, M., Sow, A., & Audebert, A. (2005). Drought-induced changes in rooting patterns and assimilate partitioning between root and shoot in upland rice. *Field Crops Research*, 93(2-3), 223-236. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.10.002>
- Atlin, G. N., Lafitte, H. R., Tao, D., Laza, M., Amante, M., & Courtois, B. (2006). Developing rice cultivars for high-fertility upland systems in the Asian tropics. *Field Crops Research*, 97(1), 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.08.014>
- Banoc, D. M., Yamauchi, Y., Kamoshita, A., Wade, L. J., & Pardales, J. R. (2000) 'Genotypic variations in response to lateral root development to fluctuating soil moisture in rice'. *Plant Production Science*, 3(3), 335-343. <https://doi.org/10.1626/pss.3.335>
- Bernier, J., Atlin, G. N., Serraj, R., Kumar, A., & Spaner, D. (2008). Breeding upland rice for drought resistance. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(6), 927-939. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3153>
- Chen, N. L., Sun, X. M., Zhang, Y. X., Zhang, T., & Gao, S. M. (2012). Influence of soil moisture and nitrogen on water and nitrogen use efficiency of spring wheat. *Journal of Natural Resources*, 27, 74-81.
- Comas, L., Becker, S., Cruz, V. M. V., Byrne, P. F., & Dierig, D. A. (2013). Root traits contributing to plant productivity under drought. *Frontiers in Plant Science*, 4, 442. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00442>
- Esmailzadeh-Moridani, M., Esfahani, M., Aalami, A., Moumeni, A., Khaledian, M., & Chaleshtori, M. H. (2023). Expression profiling of yield related genes in rice cultivars under terminal drought stress. *Molecular Biology Reports*, 50(11), 8867-8875. <https://doi.org/10.1007/s11033-023-08683-z>
- Ghadirnezhad Shiade, S. R., Fathi, A., Taghavi Ghasemkheili, F., Amiri, E., & Pessarakli, M. (2023). Plants' responses under drought stress conditions: Effects of strategic management approaches—A review. *Journal of Plant Nutrition*, 46(9), 2198-2230. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.2025033>
- Gowda, V. R., Henry, A., Yamauchi, A., Shashidhar, H. E., & Serraj, R. (2011). Root biology and genetic improvement for drought avoidance in rice. *Field Crops Research*, 122(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.03.001>
- Himasha, P. S. S., Millawithanachchi, M. C., Nashath, M. N. F., & Mubarak, A. N. M. (2021). Evaluation of root morphology of selected rice varieties under anaerobic and aerobic conditions in Sri Lanka. 10th Annual Science Research Session – FAS. Faculty of Applied Sciences, South Eastern University of Sri Lanka, Sammanthurai, Sri Lanka. <http://ir.lib.seu.ac.lk/handle/123456789/5858>
- IPCC, Summary for Policymakers. In: Climate change (2013). The physical science basis. Contribution of working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kanbar, A., Toorchi, M., & Shashidhar, H. E. (2009). Relationship between root and yield morphological characters in rainfed low land rice (*Oryza sativa* L.). *Cereal Research Communications*, 37, 261-268. <https://doi.org/10.1556/CRC.37.2009.2.14>
- Kato, Y., & Okami, M. (2010). Root growth dynamics and stomatal behaviour of rice (*Oryza sativa* L.) grown under aerobic and flooded conditions. *Field Crops Research*, 117(1), 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.12.003>
- Kato, Y., Abe, J., Kamoshita, A., & Yamagishi, J. (2006). Genotypic variation in root growth angle in rice (*Oryza sativa* L.) and its association with deep root development in upland fields with different water regimes. *Plant and Soil*, 287(1), 117-129. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9008-4>
- Khonghintaiong, J., Songsri, P., & Jongrunklang, N. (2020). Root characteristics of individual tillers and the relationships with above-ground growth and dry matter accumulation in sugarcane. *Pakistan Journal of Botany*, 52, 101-109.
- Khosa, M. K., Sidhu, B. S., & Benbi, D. K. (2011). Methane emission from rice fields in relation to management of irrigation water. *Journal of Environmental Biology*, 32(2), 169-172. https://www.jeb.co.in/journal_issues/201103_mar11/paper_05.pdf
- Kim, Y., Chung, Y. S., Lee, E., Tripathi, P., Heo, S., & Kim, K. H. (2020). Root response to drought stress in rice (*Oryza sativa* L.). *International Journal of Molecular Sciences*, 21(4), 1513. <https://doi.org/10.3390/ijms21041513>
- Liu, K., Zhou, S., Li, S., Wang, J., Wang, W., Zhang, W., ... & Liu, L. (2022). Differences and mechanisms of post-anthesis dry matter accumulation in rice varieties with different yield levels. *Crop and Environment*, 1(4), 262-272.
- Martin, G., James Padmanathan, P. K., & Subramanian, E. (2007). Identification on suitable rice variety adaptability to aerobic irrigation. *Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 2(2), 1-3. http://www.arpnjournals.com/jabs/volume_03_2007.htm
- Matsui, T., & Singh, B. B. (2003). Root characteristics in cowpea related to drought tolerance at the seedling stage.

- Experimental Agriculture*, 39(1), 29-38. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0014479703001108>
- Matsunami, M., Matsunami, T., Kon, K., Ogawa, A., Kodama, I., & Kokubun, M. (2013). Genotypic variation in nitrogen uptake during early growth among rice cultivars under different soil moisture regimes. *Plant Production Science*, 16(3), 238-246. <https://doi.org/10.1626/pp.s.16.238>
- Parent, B., Suard, B., Serraj, R., & Tardieu, F. (2010). Rice leaf growth and water potential are resilient to evaporative demand and soil water deficit once the effects of root system are neutralized. *Plant, Cell and Environment*, 33(8), 1256-1267. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2010.02145.x>
- Nada, R. M., & Abogadallah, G. M. (2016). Restricting the above ground sink corrects the root/shoot ratio and substantially boosts the yield potential per panicle in field-grown rice (*Oryza sativa* L.). *Physiologia Plantarum*, 156(4), 371-386. <https://doi.org/10.1111/ppl.12377>
- Patel, D. P., Das, A., Munda, G. C., Ghosh, P. K., Bordoloi, J. S., & Kumar, M. (2010). Evaluation of yield and physiological attributes of high-yielding rice varieties under aerobic and flood-irrigated management practices in mid-hills ecosystem. *Agricultural Water Management*, 97(9), 1269-1276. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.02.018>
- Phule, A. S., Barbadikar, K. M., Madhav, M. S., Subrahmanyam, D., Senguttuvel, P., Babu, M. P., & Kumar, P. A. (2019). Studies on root anatomy, morphology and physiology of rice grown under aerobic and anaerobic conditions. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 25, 197-205. <https://doi.org/10.1007/s12298-018-0599-z>
- Ramamoorthy, P., Manonmani, S., & Robin, S. (2018). Studies on yield, root characters related to drought tolerance and their association in upland rice genotypes. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 9(3), 856-862. <https://www.ejplantbreeding.org/index.php/EJPB/article/view/2560>
- Quadri, S. S., Naik, S. N., Reddy, U. G., Vishwanath, R. H., Lamani, K., & Siddaiah, A. M. (2023). Screening of rice (*Oryza sativa* L.) genotypes for root characters related to drought tolerance and its association with yield under aerobic condition. *Journal of Cereal Research*, 15(1), 56-64. <https://epubs.icar.org.in/index.php/JWR/article/view/132461>
- Richards, R. A. (2008). Genetic opportunities to improve cereal root systems for dryland agriculture. *Plant Production Science*, 11(1), 12-16. https://www.jstage.jst.go.jp/article/pp.s/11/1/11_1_12/_article/-char/ja/
- Sakaigaichi, T., Morita, S., Abe, J., & Yamaguchi, T. (2007). Diurnal and phenological changes in the rate of nitrogen transportation monitored by bleeding in field-grown rice plants (*Oryza sativa* L.). *Plant Production Science*, 10(3), 270-276. <https://doi.org/10.1626/pp.s.10.270>
- Sandar, M. M., Ruangsiri, M., Chutteang, C., Arunyanark, A., Toojinda, T., & Siangliw, J. L. (2022). Root characterization of Myanmar upland and lowland rice in relation to agronomic and physiological traits under drought stress condition. *Agronomy*, 12(5), 1230. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051230>
- Sandhu, N., Raman, K. A., Torres, R. O., Audebert, A., Dardou, A., Kumar, A., & Henry, A. (2016). Rice root architectural plasticity traits and genetic regions for adaptability to variable cultivation and stress conditions. *Plant Physiology*, 171(4), 2562-2576. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00705>
- Singh, R. K., Singh, C. V., Sinha, P. K., Singh, V. P., Maiti, D., & Prasad, K. (2000). Effect of soil texture, moisture regimes and cultivars on root and shoot development in upland rice (*Oryza sativa*). *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 70(11), 730-735. <https://epubs.icar.org.in/index.php/IJAgS/article/view/28701>
- Uga, Y., Sugimoto, K., Ogawa, S., Rane, J., Ishitani, M., Hara, N., ... & Yano, M. (2013). Control of root system architecture by Deeper Rooting 1 increases rice yield under drought conditions. *Nature Genetics*, 45(9), 1097-1102. <https://doi.org/10.1038/ng.2725>
- Vengatesh, M., & Govindarasu, R. (2017). Studies on root traits for drought tolerance in aerobic rice (*Oryza sativa* L.) using polythene bags. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 8(2), 708-711. <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ejpb&volume=8&issue=2&article=046>
- Vijayaraghavareddy, P., Xinyou, Y. I. N., Struik, P. C., Makarla, U., & Sreeman, S. (2020). Responses of lowland, upland and aerobic rice genotypes to water limitation during different phases. *Rice Science*, 27(4), 345-354. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2020.05.009>
- Wade, L. J., Kamoshita, A., Yamauchi, A., & Azhiri-Sigari, T. (2000). Genotypic variation in response of rainfed lowland rice to drought and rewatering. *Plant Production Science*, 3(2), 173-179. <https://doi.org/10.1626/pp.s.3.173>
- Wang, H., Siopongco, J., Wade, L. J., & Yamauchi, A. (2009). Fractal analysis on root systems of rice plants in response to drought stress. *Environmental and Experimental Botany*, 65(2-3), 338-344. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.10.002>
- Woo, Y. M., Park, H. J., Su'udi, M., Yang, J. I., Park, J. J., Back, K., ... & An, G. (2007). Constitutively wilted 1, a member of the rice YUCCA gene family, is required for maintaining water homeostasis and an appropriate root to shoot ratio. *Plant Molecular Biology*, 65, 125-136. <https://doi.org/10.1007/s11103-007-9203-6>
- Yan-da, L., Liang, T., Qing-chun, C., Yu-ping, Z., Wei-xing, C., & Yan, Z. (2010). Dry matter accumulation in rice aboveground part: Quantitative simulation. *Yingyong Shengtai Xuebao*, 21(6). <https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Aagd%3A12%3A28065628/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsc>

o%3Agcd%3A52527501&crl=c

- Yin, X., Goudriaan, J. A. N., Lantinga, E. A., Vos, J. A. N., & Spiertz, H. J. (2003). A flexible sigmoid function of determinate growth. *Annals of Botany*, *91*(3), 361-371. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg029>
- Zahra, N., Hafeez, M. B., Nawaz, A., & Farooq, M. (2022). Rice production systems and grain quality. *Journal of Cereal Science*, *105*, 103463. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2022.103463>
- Zhang, Y. J., Xu, J. N., Cheng, Y. D., Chen, W. A. N. G., Liu, G. S., & Yang, J. C. (2020). The effects of water and nitrogen on the roots and yield of upland and paddy rice. *Journal of Integrative Agriculture*, *19*(5), 1363-1374. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62811-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62811-X)

Evaluation of root response to drought stress in aerobic, flooded and upland rice genotypes (*Oryza sativa* L.)

Mahjoubeh Esmaeilzadeh-moridani¹, Masoud Esfahani^{2*}, Ali Aalami², Ali Moumeni³,
Mohammadreza Khaledian⁴

¹ Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht and Crop and Horticultural Science Research Department, Southern Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Jiroft, Iran

² Department of Agronomy and Plant Breeding, University of Guilan, Rasht, Iran

³ Rice Research Institute of Iran, Mazandaran Branch, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Amol, Iran

⁴ Department of Water Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran and Department of Water Engineering and Environment, Caspian Sea Basin Research Center, Rasht, Iran

(Received: 2024/08/06, Accepted: 2024/10/15)

Abstract

The experiment was conducted in two consecutive years (2015 and 2016) at the Faculty of Agriculture of Guilan University, Rasht, Iran. Cultivation was done in polyethylene pipes in both years. In the first year, the experiment was conducted with 16 (aerobic, upland and lowland) rice genotypes under optimal irrigation conditions, using a completely randomized design with three replicates. Based on cluster analysis results four cultivars Vandana, Neda, Tarom Mahalli, and one upland (IR83141-11) genotype were selected for the second year experiment. The second-year experiment was a factorial design conducted with complete randomization and three replications. The factors were included four rice genotypes and soil water conditions (full irrigation and drought stress). The results indicated that drought stress reduced both the dry matter and growth rates of shoots and roots in rice cultivars. The difference in shoot dry matter between the two irrigation conditions was greater in the Tarom Mahalli (16.2 g.plant⁻¹) compared to the upland genotype (6.7 g.plant⁻¹) and other genotypes. The shoot was more affected by drought stress than the root. The difference in root dry matter between the two irrigation conditions was greater in the Tarom mahalli (1 g.plant⁻¹) and upland genotype (0.09 g.plant⁻¹) and other genotypes. The root dry matter variation between the two irrigation conditions was greatest in the Tarom Mahalli (1 g.plant⁻¹) and lowest in the upland (0.09 g.plant⁻¹). Drought conditions led to a shorter timeframe for the Vandana cultivar to reach maximum growth rate and achieve maximum dry matter accumulation, with growth rate accelerating by three days and accumulation occurring six days earlier. Due to drought stress, the time to reach maximum root dry matter decreased in Neda and Vandana cultivars (with a difference of 4.65 and 0.13 days) and increased in upland genotype and Tarom Mahalli cultivar (2.5 and 6.5 days). Drought stress caused a five-day acceleration and a seven-day delay in reaching the maximum accumulation of root dry matter in Neda and Tarom Mahalli cultivars, respectively. Aerobic and upland genotypes displayed a greater root-to-shoot ratio compared to lowland genotypes, particularly during the initial growth stages, suggesting a more extensive root system in these genotypes. Except for the Tarom Mahalli, drought stress increased root dry weight in other genotypes at most soil depths compared to full irrigation. These traits play a crucial role in breeding programs, particularly those focused on drought tolerance, in order to develop resilient cultivars that can withstand challenging conditions. In this experiment, it is suggested that further research could be conducted on the Vandana, upland, and Neda genotypes due to their superior root traits.

Keywords: Cluster analysis, Nonlinear regression, Rice and Root penetration depth

Corresponding author, Email: esfahani@guilan.ac.ir