

## Greenhouse Study of Maize Root Distribution in Homogeneous and Heterogeneous Soils and its Relationship with Crop Yield

Yalda Seraj Rezaei<sup>1\*</sup>, Amir Hosein Nazemi<sup>2</sup>, Ali Ashraf Sadraddini<sup>2</sup>, Abolfazl Majnooni<sup>3</sup>,  
Shahin Oustan<sup>4</sup>

Received: 15 January 2022 Accepted: 05 June 2022

1-PhD Student in Irrigation and Drainage Engineering, Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2-Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

3-Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

4-Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

\*Corresponding Author Email: yaldarezae11112@gmail.com

### Abstract

**Background and Objective:** The current study was conducted to investigate the effect of homogeneous and heterogeneous soils on root distribution and yield of maize under irrigation without stress and with moisture stress under greenhouse conditions.

**Materials and Methods:** In this study, two soil types of clay (soil A) and silt loam (soil B) were used to prepare homogeneous substrates as single-layer (AA and BB) and heterogeneous substrates as double-layer (AB and BA) inside PVC pipes with a length of 80 cm in the greenhouse. This experiment was performed as a factorial experiment in a completely randomized design (CRD) with three replications. So that the type of soil in the pots with 4 levels (AA, BB, AB and BA) and irrigation conditions with 2 levels (without moisture stress and with moisture stress) were the factors of this experiment. At the end of the growth period, the roots were photographed to evaluate the pixel density of the roots.

**Results:** The results of the present study showed that in drought stress, maize root in homogeneous silt loam soil (BB) was less dense than that in clay homogeneous soil (AA) (15.0 g and 27.6 g, respectively), but in conditions without water stress, its growth was significantly improved (28.7 g). Also, in BA and AB pots, a better substrate for root growth was provided in irrigation conditions with stress and without stress, respectively. For all pots, there was a significant correlation between corn weight and lower half of the root dry weight at the 5% probability level. Based on the analysis of root binary images, pots BB and AB under water stress, with a higher difference between the lower and upper roots pixel density had a lighter corn yields (71.3 g and 85.3 g, respectively).

**Conclusion:** In general, moisture stress had a negative effect on corn weight in all cultivation pots. Under moisture stress condition, root distribution in the lower substrate was more important. Since the homogeneous clay bed and the two-layer bed with clay soil at the bottom had the best root growth and corn weight under water stress conditions, they can be considered for planting maize in water-scarce areas. The root pixel analysis method can be useful along with other common methods of the root distribution assessment.

**Keywords:** Completely Randomized Design, Root Distribution, Root Pixel Density, Root Weight Density, Two-Layer Soil, Water Stress

## بررسی گلخانه‌ای توزیع ریشه گیاه ذرت در خاک‌های همگن و ناهمگن و رابطه آن با عملکرد محصول

یلدا سراج رضائی<sup>۱\*</sup>، امیرحسین ناظمی<sup>۲</sup>، علی‌اشرف صدرالدینی<sup>۳</sup>، ابوالفضل مجنون<sup>۴</sup>، شاهین اوستان<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۱۵

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۴- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\*مسئول مکاتبه: Email: yaldarezae11112@gmail.com

### چکیده

اهداف: این مطالعه به منظور بررسی تأثیر خاک‌های همگن و ناهمگن بر توزیع ریشه و عملکرد گیاه ذرت تحت آبیاری بدون تنش و با تنش رطوبتی در شرایط گلخانه‌ای انجام گرفت.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه از دو نوع خاک با بافت‌های رسی (خاک A) و لوم سیلتی (خاک B) برای تهیه بسترهای همگن بصورت تک‌لایه (AA و BB) و ناهمگن بصورت دولایه (AB و BA) در داخل لوله‌هایی از جنس پی وی سی به طول ۸۰ سانتیمتر در شرایط گلخانه‌ای استفاده گردید. آزمایش به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. به طوری که نوع خاک گلدان با ۴ سطح (AA، BB، AB و BA) و شرایط آبیاری با ۲ سطح (بدون تنش رطوبتی و با تنش رطوبتی) فاکتورهای این آزمایش را تشکیل می‌دادند. در پایان دوره رشد ذرت، به منظور بررسی تراکم پیکسلی ریشه‌ها از آن‌ها عکس‌برداری به عمل آمد.

یافته‌ها: در شرایط تنش آبی وزن کل ریشه ذرت در خاک همگن لوم سیلتی (BB) نسبت به خاک همگن رسی (AA) کمتر بوده (به ترتیب ۱۵/۰ گرم و ۲۷/۶ گرم) اما در آبیاری بدون تنش رشد آن در گلدان BB به طور قابل توجهی بهبود یافت (۲۸/۷ گرم). همچنین در گلدان‌های BA و AB به ترتیب در آبیاری با تنش و بدون تنش، بستر مناسب‌تری برای رشد ریشه فراهم گردید. در مورد تمام گلدان‌ها بین وزن بلال و وزن خشک ریشه نیمه پایین در سطح احتمال ۵ درصد همبستگی معنی‌دار وجود داشت. بر اساس تجزیه تصاویر باینری ریشه‌ها، گلدان‌های BB و AB تحت تنش آبی که اختلاف تراکم پیکسلی در ریشه‌های نیمه پایینی و بالایی آن‌ها بیشتر بود، محصولات ضعیف‌تری از نظر وزن (به ترتیب ۷۱/۳ گرم و ۸۵/۳ گرم) داشتند.

نتیجه‌گیری: به طور کلی تنش رطوبتی تأثیر منفی بر روی وزن بلال تمام بسترهای کشت داشت. در شرایط تنش رطوبتی، توزیع ریشه در لایه زیرین بستر رشد از اهمیت بیشتری برخوردار بود. با توجه به اینکه بستر همگن رسی و بستر دولایه با خاک زیرین رسی بهترین رشد ریشه و محصول ذرت را در شرایط تنش آبی داشتند، می‌توانند برای کاشت ذرت در مناطق کم‌آب در نظر گرفته شوند. استفاده از روش تحلیل پیکسل‌های تصویر ریشه می‌تواند در کنار سایر روش‌های متداول بررسی توزیع ریشه سودمند واقع شود.

واژه‌های کلیدی: تراکم پیکسلی ریشه، خاک دولایه، طرح کاملاً تصادفی، تنش آبی، توزیع ریشه، وزن خشک ریشه

## مقدمه

وجود قشرهای خاک با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوت در مسیر ریشه‌زایی گیاه، نحوه توزیع ریشه و دسترسی آن به آب و عناصر غذایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. عوامل مربوط به جذب املاح توسط گیاه از جمله خاک، آب، نمک و ریشه در تعامل با یکدیگر می‌باشند. پیچیدگی این فرآیند در محیط‌های متخلخل ناهمگن قابل توجه بوده و توزیع ریشه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. میزان جذب آب در عمق‌های مختلف توسعه ریشه متفاوت است؛ به طوری که بیشترین مقدار جذب معمولاً در نزدیکی سطح زمین بوده و با افزایش عمق به تدریج کاهش می‌یابد. این الگو در محیط ناهمگن مانند خاک‌های چند لایه، توزیع معمول و منظم ریشه را مختل کرده و باعث تغییراتی در رشد و توسعه آن می‌گردد (آتول ۱۹۹۳، تاردیو ۱۹۹۴، پاسیورا ۲۰۰۲، آراکی و آییجیما ۲۰۰۵).

به طور کلی اندازه و مورفولوژی سیستم ریشه تعیین کننده توانایی گیاهان در جذب آب و عناصر غذایی (پاسیورا ۱۹۸۸) و اندازه نسبی و سرعت رشد اندام هوایی (وامرالی و همکاران ۲۰۰۳) می‌باشد. توسعه ریشه و تشکیل ماده خشک به شدت به شرایط رشد در ناحیه ریشه مانند کمبود رطوبت بستگی داشته و کاهش رشد ناشی از کمبود رطوبت به طور گسترده‌ای توسط محققین گزارش شده است (سانچز بلانکو و همکاران ۲۰۰۲ و فرانکو و همکاران ۲۰۰۶). نائور (۲۰۰۶) بیان نمود که پتانسیل آبی کمتر ساقه در خاک‌هایی با مقدار رس زیاد نسبت به خاک‌هایی با رس کمتر حتی با وجود آبیاری کامل، نشان دهنده محدودیت ریشه در جذب آب می‌باشد و این ممکن است با جریان اکسیژن کم به منطقه ریشه، مقاومت خاک به نفوذ ریشه و یا هدایت هیدرولیکی کمتر مرتبط باشد. با این حال طبق مطالعات سانتوز و همکاران (۲۰۰۷) وزن خالص ریشه در خاک خشک در مقایسه با خاک مرطوب ممکن است افزایش پیدا کند. زوبل و همکاران (۲۰۰۷) طی آزمایشی روی تأثیر غلظت عناصر غذایی بر اندازه ریشه‌های ریز گیاهان گزارش کردند که اندازه این دسته از ریشه‌های گیاه به غلظت مواد خاک

بستگی دارد. طبق گزارش آن‌ها ارزیابی قطر ریشه‌های ریز برای درک دینامیک جذب مواد مغذی ضروری است. همچنین برای هر مقدار معین وزن خشک ریشه، وجود مقدار ریشه‌های ریز که تعیین کننده طول ریشه و سطح تماس با خاک هستند، احتمالاً تفاوت زیادی داشته باشد. ناوارو و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که تنش‌های آبی مختلف منجر به تفاوت در رشد ریشه گیاه مورد<sup>۱</sup> گردید. در شرایط تنش آبی متوسط تغییر قابل توجهی در توسعه ریشه بوجود نیامد اما تنش آبی شدید به طور معنی‌داری آن را تحت تأثیر قرار داد. الوارز و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که هر دو شرایط تنش خشکی و شوری، بر رشد ریشه گیاه گوش‌بره ارغوانی<sup>۲</sup> اثرگذار بوده و وزن خشک ریشه در تیمار شوری و کمبود رطوبت کاهش یافت. نتایج تحقیق کاستیلو (۲۰۱۱) نشان داد که اثرپذیری سیستم ریشه گیاهان پسته مصطکی<sup>۳</sup> و شیشه-شور<sup>۴</sup> از شوری کمتر از شرایط تنش آبی بود. وزن خشک ریشه گیاهان تیمار شده تا ۲۵ درصد ظرفیت نگهداری آب در مقایسه با آبیاری با آب شور (۴ دسی زیمنس بر متر) به طور معنی‌داری کاهش بیشتری نشان داد. نوزالویچز و لیپیک (۲۰۱۴) تأثیر لایه‌های خاک متراکم را بر رشد و جذب آب توسط ریشه گندم مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور طی آزمایشی مقدار جذب آب از هر لایه را بصورت روزانه اندازه‌گیری و نتایج مطالعه آنان نشان داد که تفاوت ایجاد شده در طول ریشه ناشی از لایه‌های خاک نسبت به جرم ریشه بیشتر بود. همبستگی بین جذب آب و طول ریشه‌های ضخیم با افزایش سطح تراکم خاک افزایش و اثرات منفی لایه فشرده زیرین بر روی جذب آب تا حدی با افزایش جذب از لایه‌های سست‌تر خاک رویی جبران شد. در بررسی عاریف و همکاران (۲۰۱۹) بر روی تأثیر شوری بر مورفولوژی و پرزهای ریشه گیاه کلزا مشخص شد که افزایش ۲۰ درصدی مساحت سطح ریشه تحت شرایط تنش شوری بیانگر واکنش گیاه به جذب آب و مواد غذایی بیشتر بوده، به طوری که گیاه را با شرایط پرتنش سازگار نماید.

۳) Pistacia lentiscus

۴) Callistemon citrinus

۱) Myrtle

۲) Phlomis purpurea

عنوان شاهد برای بررسی رطوبت و شوری خاک در نظر گرفته شدند. پس از حدود دو هفته از کاشت بذرهاى ذرت (اواخر خرداد)، نشاهای حاصل به محیط اصلی انتقال داده شدند. به منظور آبیاری گیاهان، ۱۶ گلدان با تخلیه رطوبتی ۵۰ درصد (بدون تنش آبی) و ۱۶ گلدان دیگر با تخلیه رطوبتی ۷۵ درصد (با تنش آبی) آبیاری شدند. در کل طول دوره رشد دو مرتبه از کود حاوی عناصر غذایی کامل با مارک هوگلند<sup>۵</sup> و ازت برای رشد بهتر بوته‌ها استفاده گردید. در هر یک از گلدان‌ها، رطوبت و شوری خاک از ۱۲ نقطه به فواصل قائم حدود ۷ سانتیمتر از یکدیگر به ترتیب با استفاده از رطوبت‌سنج میله‌ای و EC سنسور برند هانا به صورت روزانه اندازه‌گیری شدند. در شکل ۱-۱ طرح شماتیک گلدان‌های کشت و تصاویری از آن‌ها در گلخانه (۱-۲، ۱-۳ و ۱-۴) نشان داده شده است. در طول دوره رشد به طور مرتب عکس‌برداری از فرآیند رشد ریشه در قسمت جدار شیشه‌ای گلدان‌ها انجام گرفت. در پایان پس از حدود ۹۰ روز بلال‌های هر گلدان وزن‌کشی شده و ریشه‌ها نیز پس از شستشو برای عکس‌برداری آماده شدند. پس از آن وزن خشک ریشه‌ها نسبت به عمق خاک و سایر صفات گیاهی اندازه‌گیری شد. همچنین شوری هر عمق از خاک در پایان آزمایش با روش عصاره‌گیری اشباع بدست آمد. برای تجزیه و تحلیل سیستم ریشه از برنامه‌های اندرویدی B&W<sup>۶</sup> و Color Analysis به ترتیب برای تبدیل عکس‌های ریشه به تصاویر ۰ و ۱ (باینری) و شمارش تعداد پیکسل‌ها بهره گرفته شد. به منظور بررسی تأثیر نوع خاک و دولایه بودن بستر رشد گیاه ذرت بر چگالی ریشه و ارتباط بین صفات گیاهی از نرم افزار SPSS استفاده گردید. چهار شاخص رشد ریشه بر اساس وزن خشک ریشه‌های لایه بالا (a) و لایه پایین (b) تعریف گردیدند. این شاخص‌ها با عناوین وزن کل ریشه خشک (a+b)، نسبت وزن خشک ریشه نیمه بالا به پایین ( $\frac{a}{b}$ )، تفاوت نسبی ریشه‌های نیمه بالا و پایین ( $\frac{a-b}{a+b}$ ) و وزن نسبی ریشه نیمه بالا ( $\frac{a}{a+b}$ ) مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند. علاوه بر آن به بررسی صفات گیاهی وزن بلال، وزن تر و خشک بوته و ارتفاع بوته نیز پرداخته شد.

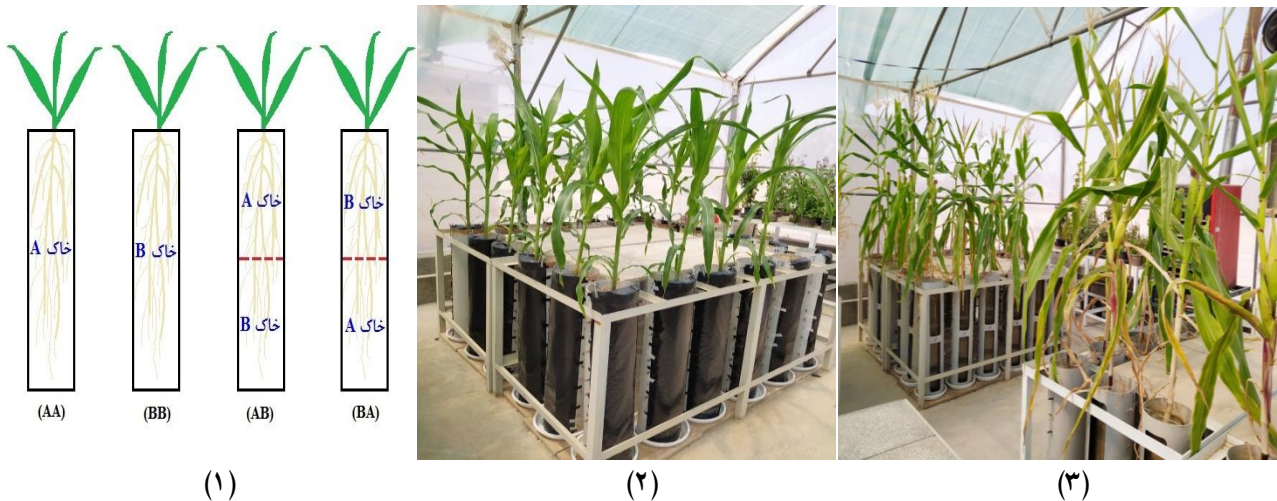
بررسی اثر حالت‌های مختلف قرارگیری لایه‌های مختلف خاک تحت شرایط رطوبتی متفاوت بر توزیع جرم ریشه و عملکرد محصول ذرت و استفاده از روش عکس-برداری و شمارش پیکسل‌های ریشه برای تعیین توزیع ریشه به عنوان یک متدولوژی جدید در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به عامل محدود کننده آب در شرایط تنش آبی و اهمیت آن در مناطق خشک، پایش دقیق تغییرات رطوبت خاک طی مراحل رشد ضرورت داشته، لذا این تحقیق با استفاده از کشت گلدانی گیاه ذرت در شرایط گلخانه‌ای به انجام رسید. مزیت گلخانه علاوه بر سهولت انجام اندازه‌گیری‌ها قابلیت کنترل شرایط محیطی و حذف تأثیرات عوامل ناخواسته روی نتایج آزمایشات می‌باشد.

#### مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تفاوت توزیع ریشه گیاه ذرت در خاک غیر همگن دو لایه و خاک همگن یکدست و تأثیر تنش خشکی بر آن و همچنین ارتباط آن با عملکرد گیاه، آزمایشی در شرایط گلخانه‌ای با دمای تحت کنترل طراحی گردید. این مطالعه در محل تحقیقات دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز بصورت طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. نوع خاک بستر با ۴ سطح (AA، BB، AB و BA) و شرایط آبیاری با ۲ سطح (بدون تنش رطوبتی و با تنش رطوبتی) فاکتورهای این آزمایش را تشکیل می‌دادند. بدین منظور ۳۲ گلدان از جنس پی وی سی به طول ۸۰ سانتیمتر تهیه گردید و برای پایش رشد ریشه بعد از برش قسمتی از لوله‌ها اقدام به نصب شیشه شفاف در آن قسمت گردید. به منظور ریشه‌زائی گیاه در پشت شیشه، از پوشش‌های پلاستیکی مشکی ضخیم برای جلوگیری از عبور نور استفاده شد. نحوه پر کردن گلدان‌ها لایه به لایه به ضخامت ۱۰ سانتیمتر و تراکم تا حد طبیعی با خاک‌های رسی (A) و لوم سیلتی (B) به صورت یکنواخت (AA و BB) و دو لایه (AB و BA) بود (برخی خصوصیات فیزیکی خاک‌ها در جدول یک آمده است). بدین ترتیب در بسترهای مطبق بافت و تخلخل خاک در نیمه‌های بالا و پایین ستون با همدیگر تفاوت داشتند. ۸ گلدان دارای خاک با همان شرایط بافتی، به

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد آزمایش

خاک	چگالی ظاهری (g.cm <sup>-3</sup> )	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	بافت
A	۱/۴۸	۵۹	۱۳	۲۸	رسی
B	۱/۳۶	۲۴	۵۶	۲۰	لوم سیلتی



شکل ۱- گلدان‌های کشت ذرت بصورت طرح شماتیک

(۱)، گلدان‌ها در مرحله میانی رشد گیاه با پوشش پلاستیکی (۲) و گلدان‌ها در پایان آزمایش پس از برداشتن پوشش پلاستیکی (۴)، (A) خاک رسی و (B) خاک لوم سیلتی می‌باشد.

## نتایج و بحث

### تجزیه‌های آماری صفات گیاهی

قبل از انجام تجزیه واریانس یکطرفه (طرح کاملا تصادفی) (جدول ۴) فرضیات تجزیه واریانس مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف و شاپیرو-ویلک برای بررسی نرمال بودن اشتباهات آزمایشی استفاده شد. نتایج نشان

داد که اشتباهات آزمایشی در تیمارهای مورد نظر از توزیع نرمال برخوردار بود (جدول ۲). همچنین آزمون لون (برای بررسی همگنی واریانس‌ها) نشان داد که واریانس تیمارهای مورد بررسی با هم همگن بودند (جدول ۳). از طرف دیگر بررسی میانگین و واریانس تیمارها نشان داد که ارتباطی بین آن‌ها وجود نداشته و این دو مستقل از هم بودند.

جدول ۲- تست نرمال بودن صفات مورد اندازه‌گیری

صفات	کولموگروف-اسمیرنوف		شاپیرو-ویلک	
	آماره	درجه آزادی	سطح معنی‌داری	درجه آزادی
وزن کل ریشه	۰/۱۲۸	۲۴	۰/۲۰۰	۲۴
نسبت وزن خشک ریشه نیمه بالا به پایین	۰/۱۰۹	۲۴	۰/۲۰۰	۲۴
تفاوت نسبی وزن خشک ریشه نیمه بالا و پایین	۰/۰۸۶	۲۴	۰/۲۰۰	۲۴
وزن نسبی ریشه نیمه بالا	۰/۰۸۶	۲۴	۰/۲۰۰	۲۴
وزن بلال	۰/۱۱۷	۲۴	۰/۲۰۰	۲۴
وزن تر شاخه	۰/۱۰۷	۲۴	۰/۲۰۰	۲۴
وزن خشک شاخه	۰/۱۲۲	۲۴	۰/۲۰۰	۲۴
ارتفاع بوته	۰/۱۷۷	۲۴	۰/۰۴۹	۲۴

جدول ۳- تست همگنی واریانس‌ها برای شاخص‌ها و صفات گیاهی اندازه‌گیری شده با استفاده از آزمون لون

صفت	آزمون F	درجه آزادی اول	درجه آزادی دوم	سطح معنی‌داری
وزن کل ریشه	۲/۲۲	۷	۱۶	۰/۰۵۷
نسبت وزن خشک ریشه نیمه بالا به پایین	۱/۹۱	۷	۱۶	۰/۱۵
تفاوت نسبی وزن خشک ریشه نیمه بالا و پایین	۲/۰۲۵	۷	۱۶	۰/۰۵۹
وزن نسبی ریشه نیمه بالا	۲/۲۵	۷	۱۶	۰/۰۵۹
وزن بلال	۱/۴۳۱	۷	۱۶	۰/۲۶
وزن تر شاخه	۱/۷۳	۷	۱۶	۰/۱۷۱
وزن خشک شاخه	۱/۱۳۱	۷	۱۶	۰/۳۹۲
ارتفاع بوته	۲/۸۸	۷	۱۶	۰/۰۳۸

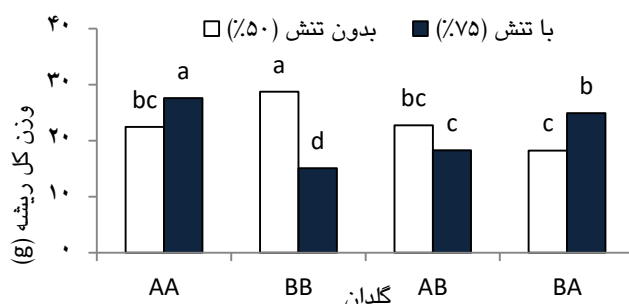
جدول ۴- تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده در ۴ نوع گلدان تحت ۲ تیمار آبیاری با تنش و بدون تنش

صفات	منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات	آزمون F	سطح معنی‌داری
وزن کل ریشه	آبیاری	۱	۱۴/۰۹	۰/۴۵۷	۰/۵۰۹
	خاک	۳	۲۲/۴۰	۰/۷۲۸	۰/۵۵۰
	خاک × آبیاری	۳	۱۳۴/۴۱	۴/۳۵۶	۰/۰۲۰
	خطا	۱۶	۳۰/۸۰		
نسبت وزن خشک ریشه نیمه بالا به پایین	آبیاری	۱	۰/۶۸۷	۴/۷۸	۰/۰۴۴
	خاک	۳	۰/۳۰۳	۲/۱۱	۰/۱۳۹
	خاک × آبیاری	۳	۰/۶۲۶	۴/۳۶	۰/۰۲۰
	خطا	۱۶	۰/۱۴۴		
وزن نسبی ریشه نیمه بالا	آبیاری	۱	۰/۰۰۵	۴/۴۱۰	۰/۰۵۲
	خاک	۳	۰/۰۰۳	۲/۴۲۶	۰/۱۰۳
	خاک × آبیاری	۳	۰/۰۰۶	۵/۲۰۸	۰/۰۱۱
	خطا	۱۶	۰/۰۰۱		
تفاوت نسبی وزن ریشه نیمه بالا و پایین	آبیاری	۱	۰/۰۱۹	۴/۴۱۰	۰/۰۵۲
	خاک	۳	۰/۰۱۰	۲/۴۲۶	۰/۱۰۳
	خاک × آبیاری	۳	۰/۲۲۰	۵/۲۰۸	۰/۰۱۱
	خطا	۱۶	۰/۰۰۴		
وزن بلال	آبیاری	۱	۲۸۱۰/۱۷	۲۳/۷۱	۰/۰۰۱
	خاک	۳	۵۷/۱۹	۰/۴۸۳	۰/۶۹۹
	خاک × آبیاری	۳	۴۴۳/۸۹	۳/۷۳	۰/۰۳۳
	خطا	۱۶	۱۱۸/۴۹		
وزن تر بوته	آبیاری	۱	۶/۳۷	۶۱/۱۳	۰/۰۰۱
	خاک	۳	۰/۰۶۶	۰/۶۴۱	۰/۶۰۰
	خاک × آبیاری	۳	۰/۳۸۰	۳/۶۴	۰/۰۳۵
	خطا	۱۶	۰/۱۰۴		
وزن خشک بوته	آبیاری	۱	۱۹۰/۴۷	۱۷/۷۳	۰/۰۰۱
	خاک	۳	۱۰/۸۴	۱۰/۷	۰/۴۱۴
	خاک × آبیاری	۳	۱۷/۷۳	۱/۶۵	۰/۲۱۶
	خطا	۱۶	۱۰/۷۳		
ارتفاع بوته	آبیاری	۱	۴۲۴۰/۰	۱۱۸/۵۶	۰/۰۰۱
	خاک	۳	۱۱۹/۰۶	۳/۳۳	۰/۰۴۶
	خاک × آبیاری	۳	۸۱/۵۶	۲/۲۸۱	۰/۱۱۸
	خطا	۱۶	۳۵/۷۶		

### وزن کل ریشه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین دو تیمار آبیاری و همچنین بین چهار نوع گلدان از نظر وزن کل ریشه وجود نداشت. اما اثر متقابل تیمار آبیاری × نوع خاک به طور معنی‌داری وزن کل ریشه را تحت تأثیر قرار داد (جدول ۴). گلدان AA در تیمار آبیاری با تنش (از این پس تیمار ۷۵ درصد نیز نامیده خواهد شد) و گلدان BB در تیمار آبیاری بدون تنش (از این پس تیمار ۵۰ درصد نیز نامیده خواهد شد) بیشترین وزن خشک ریشه را دارا بودند (شکل ۲). بنابراین نمی‌توان به طور قطعی بیان نمود که آبیاری بدون تنش در همه شرایط تأثیر مثبتی روی وزن خشک ریشه داشت. اما هنگامی که

گلدان BB تحت تنش قرار گرفت، وزن کل ریشه در آن به طور چشم‌گیری کاهش پیدا کرد. وزن ریشه گلدان‌های دولایه AB و BA در تیمار آبیاری ۵۰ درصد اختلاف معنی‌داری با هم نداشتند. با افزایش فاصله آبیاری (اعمال تنش)، وزن کل ریشه گلدان AB نسبت به گلدان BA مقدار کمتری نشان داد. به نظر می‌رسد تأخیر در زمان آبیاری هنگامی که خاک B (لوم سیلتی) در قسمت پایین گلدان قرار می‌گیرد (گلدان‌های BB و AB)، بیشترین تأثیر منفی خود را بر روی رشد ریشه می‌گذارد. وقتی گیاه تحت تنش رطوبتی قرار گرفت، دولایه‌ای بودن خاک (گلدان‌های AB و BA) در مقایسه با گلدان همگن BB به طور معنی‌داری موجب افزایش وزن کل ریشه گردید.



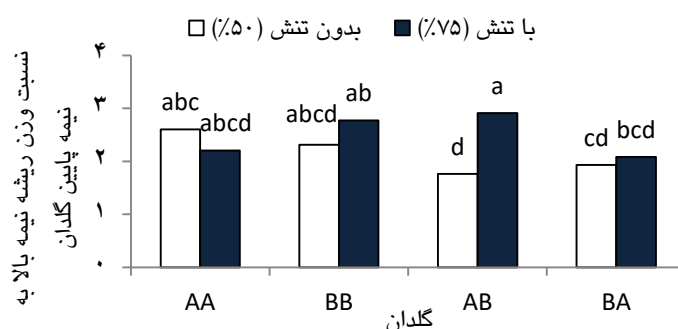
شکل ۲- میانگین وزن کل ریشه در گلدان‌های کشت تحت دو تیمار آبیاری

(AA گلدان پر شده با خاک رسی، BB گلدان پر شده با خاک لوم سیلتی، AB گلدان با خاک رسی در نیمه بالا و خاک لوم سیلتی در نیمه پایین و BA گلدان با خاک لوم سیلتی در نیمه بالا و خاک رسی در نیمه پایین)، ستون‌های دارای حروف مشترک اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

### نسبت وزن خشک ریشه نیمه بالا به پایین

تجزیه واریانس نسبت وزن خشک ریشه نیمه بالا به پایین در گلدان‌های مورد نظر (جدول ۴) نشان داد که اختلاف این نسبت با تغییر در نوع خاک گلدان معنی‌دار نبود. اما نسبت به تیمار آبیاری و همچنین اثر متقابل نوع گلدان × تیمار آبیاری معنی‌دار بود. شاخص نسبت وزن خشک ریشه لایه بالا به لایه پایین گلدان به نوعی نشان دهنده یکنواختی توزیع طولی جرم ریشه در سراسر گلدان می‌باشد. به بیان دیگر هرچه قدر نسبت وزن ریشه بالا به پایین بیشتر باشد یکنواختی توزیع ریشه بین لایه‌های اول و دوم گلدان کمتر می‌باشد. چنین وضعیتی با توجه به میانگین تیمارهای مورد نظر در شکل ۳ در مورد

گلدان AB با تیمار آبیاری ۷۵ درصد اتفاق افتاد. در حالی که با کاهش فاصله آبیاری (بدون تنش)، نسبت وزن ریشه بالا به پایین در گلدان AB به طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد. به بیان دیگر اختلاف این شاخص در گلدان AB نسبت به تیمارهای ۵۰ و ۷۵ درصد معنی‌دار بود. هنگامی که ترتیب قرارگیری خاک‌ها برعکس بود، یعنی در گلدان‌های BA، تغییر در تیمار آبیاری اختلاف معنی‌داری در نسبت وزن خشک ریشه بالا به پایین در آن بوجود نیاورد. مقایسه گلدان‌های AB و BA نیز نشان داد که این دو تنها در تیمار ۷۵ درصد اختلاف معنی‌دار از نظر نسبت وزن ریشه داشتند.



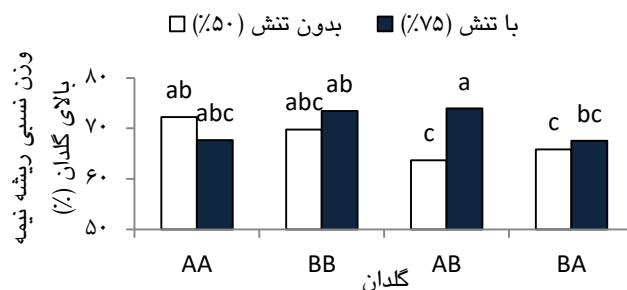
شکل ۳- میانگین نسبت وزن ریشه لایه بالا به پایین در گلدان‌های کشت تحت دو تیمار آبیاری

(AA) گلدان پر شده با خاک رسی، BB) گلدان پر شده با خاک لوم سیلتی، AB) گلدان با خاک رسی در نیمه بالا و خاک لوم سیلتی در نیمه پایین و BA) گلدان با خاک لوم سیلتی در نیمه بالا و خاک رسی در نیمه پایین، ستون‌های دارای حروف مشترک اختلاف معنی-دار در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

نسبت به گلدان BA بیشتر بود. توزیع ریشه بین نیمه‌های بالا و پایین در گلدان‌های AB و BA در تیمار آبیاری ۵۰ درصد، نسبت به گلدان AA و حتی BB از یکنواختی بیشتری برخوردار بود. به نظر می‌رسد در تیمار آبیاری ۷۵ درصد، ریشه‌ها در خاک B هنگامی که در نیمه پایین قرار می‌گیرد، به علت شوری خاک لوم سیلتی رشد ضعیف‌تری دارد. در شرایط تنش آبی علت وزن خشک ریشه کمتر در نیمه پایین نسبت به نیمه بالا در گلدان AA می‌تواند ناشی از ماندابی و کمبود جریان هوا به منطقه ریشه تحتانی باشد. در واقع اثرات بوجود آمده می‌تواند در نتیجه برهم‌کنش همه عوامل باشد اما برخی از آنها بسته به سایر شرایط نقش پررنگ‌تری نشان می‌دهد.

#### وزن نسبی ریشه نیمه بالا

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثرات متقابل نوع خاک × تیمار آبیاری به طور معنی‌داری وزن نسبی ریشه نیمه بالا را تحت تأثیر قرار داد (جدول ۴). گلدان AB تحت تنش آبیاری بیشترین میزان تجمع ریشه را در نیمه بالا نشان داد. گلدان‌های همگن AA و BB در هر دو تیمار آبیاری اختلاف معنی‌داری از نظر وزن نسبی ریشه نیمه بالا با همدیگر نداشتند (شکل ۴). در شرایط آبیاری بدون تنش ترتیب قرارگیری خاک‌های A و B در گلدان-های دولایه تفاوت معنی‌داری در درصد وزن ریشه قسمت بالایی گلدان ایجاد نکرد و با اعمال تنش آبی درصد وزن خشک ریشه نیمه بالای گلدان AB بطور معنی‌داری



شکل ۴- میانگین وزن نسبی ریشه لایه بالا در گلدان‌های کشت تحت دو تیمار آبیاری

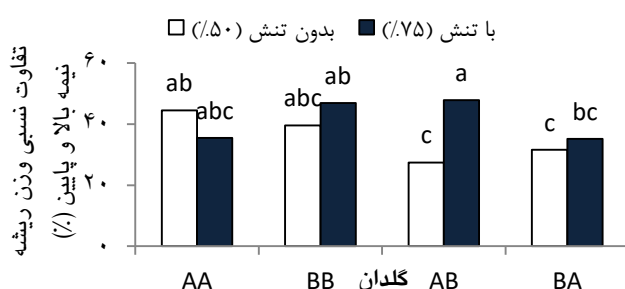
(AA) گلدان پر شده با خاک رسی، BB) گلدان پر شده با خاک لوم سیلتی، AB) گلدان با خاک رسی در نیمه بالا و خاک لوم سیلتی در نیمه پایین و BA) گلدان با خاک لوم سیلتی در نیمه بالا و خاک رسی در نیمه پایین، ستون‌های دارای حروف مشترک اختلاف معنی-دار در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.



### تفاوت نسبی وزن ریشه نیمه بالا و پایین

بر اساس تجزیه واریانس داده‌های تفاوت نسبی ریشه نیمه بالا و پایین در تیمارهای مورد نظر (جدول ۴) مشاهده شد که اختلاف شاخص مذکور نسبت به اثر متقابل نوع خاک × تیمار آبیاری معنی‌دار بود. با توجه به شکل ۵ گلدان‌های همگن AA و BB در هر دو تیمار آبیاری اختلاف معنی‌داری از نظر تفاضل نسبی وزن

ریشه نیمه بالا و پایین با همدیگر نداشتند. در شرایط بدون تنش تفاوت معنی‌داری بین تفاضل نسبی ریشه‌های نیمه بالا و پایین گلدان‌های AB و BA وجود نداشت. در حالی که با اعمال تنش آبی مقدار این شاخص در گلدان AB با افزایش معنی‌داری نسبت به گلدان BA همراه بود. بیشترین غیریکنواختی توزیع ریشه بین لایه‌های بالا و پایین در گلدان AB تحت تنش آبی مشاهده شد.



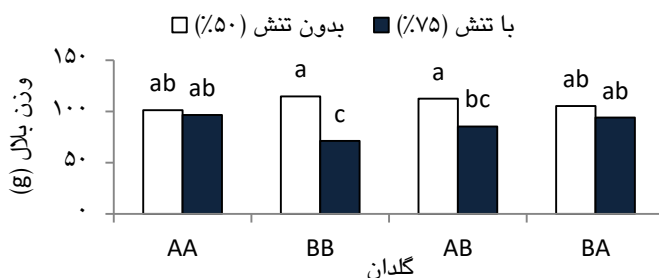
شکل ۵- میانگین تفاوت نسبی وزن ریشه لایه بالا و پایین در گلدان‌های کشت تحت دو تیمار آبیاری

(AA گلدان پر شده با خاک رسی، BB گلدان پر شده با خاک لوم سیلتی، AB گلدان با خاک رسی در نیمه بالا و خاک لوم سیلتی در نیمه پایین و BA گلدان با خاک لوم سیلتی در نیمه بالا و خاک رسی در نیمه پایین)، ستون‌های دارای حروف مشترک اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

### وزن بلال

وزن بلال به طور معنی‌داری از اثر تنش آبی متأثر شده و نوع گلدان تأثیر معنی‌داری روی متوسط وزن بلال نداشت. همچنین اثر متقابل آبیاری × نوع گلدان به طور معنی‌داری متوسط وزن بلال را تحت تأثیر قرار داد (جدول ۴). به نحوی که بیشترین وزن تر بلال در مرتبه

اول در گلدان BB در تیمار آبی ۵۰ درصد مشاهده شد. کمترین وزن متوسط بلال در آبیاری با تنش و گلدان BB و AB مشاهده شد. مقایسه چهار گلدان در تیمار آبیاری ۵۰ درصد نشان داد که هرچند وزن بلال در گلدان BB و AB نسبت به AA و BA بیشتر بود اما این اختلاف معنی‌دار نبود (شکل ۶).



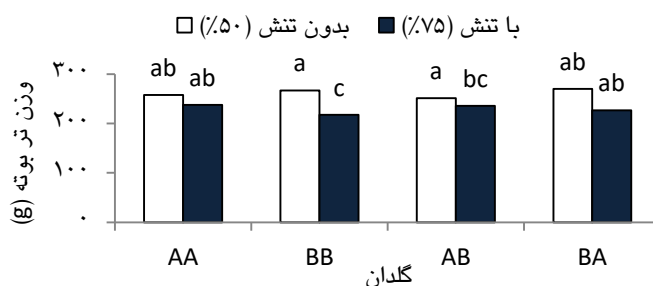
شکل ۶- میانگین وزن بلال در گلدان‌های کشت تحت دو تیمار آبیاری

(AA گلدان پر شده با خاک رسی، BB گلدان پر شده با خاک لوم سیلتی، AB گلدان با خاک رسی در نیمه بالا و خاک لوم سیلتی در نیمه پایین و BA گلدان با خاک لوم سیلتی در نیمه بالا و خاک رسی در نیمه پایین)، ستون‌های دارای حروف مشترک اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

### وزن تر و خشک بوته

سطوح آبیاری از نظر وزن تر بوته ذرت اختلاف معنی‌داری ایجاد کرده و اثر متقابل آبیاری  $\times$  نوع گلدان بر مقدار وزن تر شاخه معنی‌دار بود (جدول ۴). بیشترین وزن تر شاخه به گلدان‌های BB و BA تحت آبیاری بدون تنش مربوط بود. با اعمال تنش خشکی در این گلدان‌ها متوسط وزن تر شاخه به طور معنی‌داری کاهش پیدا

کرد. بوته گلدان BB در تیمار تحت تنش، کمترین وزن تر را بین گلدان‌ها داشت. ترتیب قرارگیری خاک‌های A و B در گلدان‌های دولایه در هیچ کدام از تیمارهای آبیاری اختلاف معنی‌داری در وزن تر شاخه ایجاد نکرد و متوسط وزن تر شاخه در چهار نوع گلدان برابر بود (شکل ۷).



شکل ۷- میانگین وزن تر بوته در گلدان‌های کشت تحت دو تیمار آبیاری

(AA گلدان پر شده با خاک رسی، BB گلدان پر شده با خاک لوم سیلتی، AB گلدان با خاک رسی در نیمه بالا و خاک لوم سیلتی در نیمه پایین و BA گلدان با خاک لوم سیلتی در نیمه بالا و خاک رسی در نیمه پایین)، ستون‌های دارای حروف مشترک اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

درصد و ۷۵ درصد به ترتیب برابر با ۱۶۴/۷ cm و ۱۳۷/۵ cm). از نظر تأثیر نوع خاک بلندترین بوته ذرت به گلدان BA (با ارتفاع ۱۵۶/۶ cm) مربوط بود. هرچند ارتفاع بوته‌ها در گلدان‌های BB و AB کمتر از گلدان BA بود اما اختلاف معنی‌داری محسوب نمی‌شد. کوتاه‌ترین قد بوته نیز در گلدان AA (با ارتفاع ۱۴۵/۷ cm) مشاهده شد. در واقع می‌توان گفت گلدان دولایه BA نسبت به گلدان با خاک همگن AA به طور معنی‌داری موجب بهبود رشد طولی بوته گردید.

### همبستگی بین صفات گیاهی

بین وزن ریشه نیمه بالا و پایین گلدان در تیمار تحت تنش آبی، همبستگی معنی‌داری ( $r=0.719^{**}$ ) وجود داشت. در حالی که این همبستگی در تیمار بدون تنش معنی‌دار نبود ( $r=0.247^{ns}$ ). به طور کلی بدون در نظر گرفتن تیمار آبیاری، همبستگی بین وزن ریشه در قسمت بالای گلدان با وزن ریشه در قسمت پایین گلدان نشان داد که این همبستگی مثبت و معنی‌دار بود ( $r=0.627^*$ ).

طبق جدول ۴ اختلاف متوسط وزن خشک بوته گلدان‌ها تنها نسبت به تیمار آبیاری معنی‌دار بود. در صورتی که اثرپذیری آن از نوع خاک گلدان با توجه به سطح معنی‌داری بیش از ۵ درصد قابل قبول نبود. به علاوه اثر متقابل آبیاری  $\times$  گلدان نیز معنی‌دار نبود. میانگین وزن خشک بوته‌ها در گلدان‌های تحت تنش آبی (۵۶/۳ g) با مقدار آن در گلدان‌های بدون تنش (۶۱/۹ g)، اختلاف معنی‌داری داشت. در واقع تنش خشکی، موجب کاهش تجمع ماده در شاخه‌ها گردید.

### ارتفاع بوته

تجزیه واریانس ارتفاع بوته‌های ذرت در گلدان‌های مورد نظر (جدول ۴) نشان داد که این پارامتر نسبت به تیمار آبیاری و همچنین نوع خاک اثرپذیری معنی‌داری داشت. در حالی که اثر متقابل گلدان  $\times$  آبیاری بر روی آن معنی‌دار نبود. بوته‌های گلدان‌ها تحت تنش آبی به طور معنی‌داری کوتاه‌تر از بوته‌های تیمار بدون تنش آبی بودند (میانگین ارتفاع بوته‌ها در تیمارهای آبیاری ۵۰

ریشه نیمه بالایی گلدان نشان داد ( $r=0/504^{**}$ ). وزن بلال با وزن تر شاخه و همچنین وزن بلال با ارتفاع گیاه همبستگی معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد داشتند (به ترتیب  $r=0/693^{**}$  و  $r=0/613^{**}$ ). همچنین همبستگی بین وزن تر شاخه و ارتفاع گیاه نیز در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود ( $r=0/745^{**}$ ).

این بدان معنی است که در کل اگر حجم ریشه در نیمه بالایی گلدان بیشتر باشد در قسمت پایین نیز بیشتر خواهد بود.

همبستگی بین صفات وزن ریشه با وزن بلال و ارتفاع گیاه مطابق جدول ۵ مثبت و معنی‌دار بود. وزن بلال با وزن ریشه نیمه پایین همبستگی بیشتری نسبت به وزن

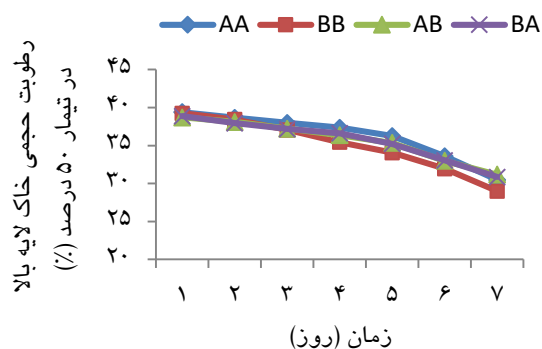
جدول ۵- همبستگی صفات ریشه با وزن بلال و ارتفاع گیاه

ارتفاع گیاه	وزن بلال	صفات ریشه
۰/۴۷۳*	۰/۴۴۸**	وزن ریشه کل
۰/۵۶۴*	۰/۴۱۹*	نسبت وزن ریشه بالا به پایین
۰/۴۲۵*	۰/۴۱۴*	وزن ریشه بالا
۰/۵۳۴**	۰/۵۰۴**	وزن ریشه پایین

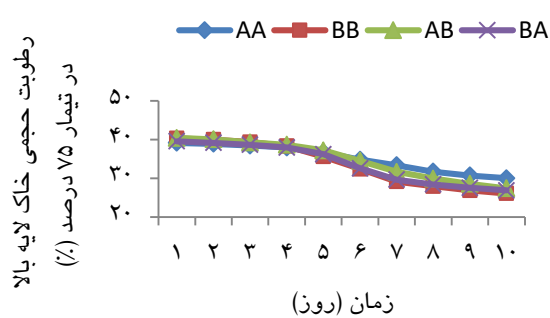
\* و \*\* به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد

یکدیگر بودند (شکل ۸-۱). بر این اساس میانگین وزن کل ریشه بیشتر در گلدان AA نسبت به گلدان BB در تیمار آبی ۷۵ درصد (شکل ۲)، می‌تواند ناشی از نگهداشت رطوبت بیشتر توسط خاک رسی در طول دور آبیاری باشد. در مورد رطوبت خاک لایه پایین در تیمار آبی ۷۵ درصد نیز مشاهده شد که گلدان‌های AA، BB، AB و BA در بازه زمانی ده روزه به ترتیب پس از روز هفتم، چهارم، پنجم و پنجم شروع به از دست دادن رطوبت خود نمودند اما در تیمار ۵۰ درصد به ترتیب پس از روز پنجم، ششم، ششم و پنجم این اتفاق افتاد (به ترتیب شکل‌های ۸-۴ و ۸-۳). در گلدان دو لایه BA که خاک A در زیر خاک B قرار داشت، به نظر می‌رسد به علت وجود یک مانع هیدرولیکی ناشی از نفوذپذیری کم خاک A آب با سرعت کمتری از خاک B خارج می‌شود. در حالت برعکس یعنی گلدان دو لایه AB یک مانع موئینه در سمت خاک A وجود دارد که انتقال آب به سمت خاک B را کندتر می‌کند.

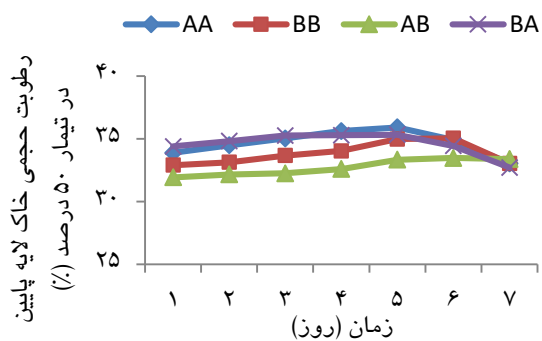
در تیمار با تنش آبی که گلدان‌ها با تأخیر زمانی بیشتری آبیاری می‌شدند لایه خاک بالایی نسبت به لایه بالایی تیمار بدون تنش، خشک‌تر بوده در حالی که لایه‌های زیرین در تمام گلدان‌ها به علت حرکت آب ثقی و تبخیر کمتر، رطوبت بیشتری نسبت به نیمه بالایی داشتند. در واقع می‌توان گفت نوع بافت خاک به ویژه در نیمه بالا به منظور نگهداشت آب، از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد. در شکل ۸ تغییرات رطوبت لایه‌های خاک پس از آبیاری به طور میانگین در طول دوره رشد گیاه نشان داده شده است. در تیمار آبی ۷۵ درصد، شیب کاهش رطوبت در نیمه بالایی گلدان AA نسبت به سایر گلدان‌ها کمتر و رطوبت بیشتری در این لایه ذخیره شده است. این موضوع به ویژه در روزهای آخر دور آبیاری که تنش خشکی اثر خود را نشان می‌دهد کاملاً واضح است. بیشترین شیب کاهش رطوبت نیز به گلدان BB مربوط بود (شکل ۸-۲). این رفتار در تیمار آبیاری ۵۰ درصد نیز مشاهده شد ولی اختلاف چندانی بین منحنی‌های رطوبت لایه بالایی گلدان‌ها دیده نشد و تقریباً مشابه



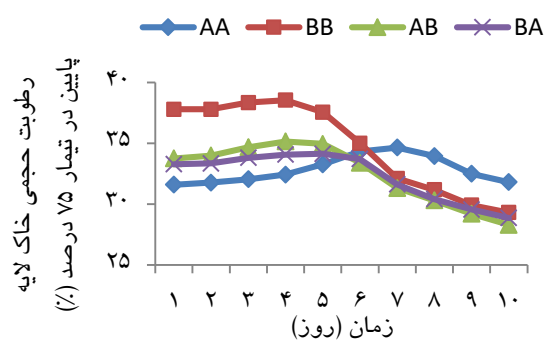
(۱)



(۲)



(۳)



(۴)

شکل ۸- تغییرات رطوبت خاک پس از آبیاری در لایه بالا با تیمار آبیاری ۵۰ درصد و ۷۵ درصد (۲ و ۱)، لایه پایین با تیمار آبیاری ۵۰ درصد و ۷۵ درصد (۳ و ۴)

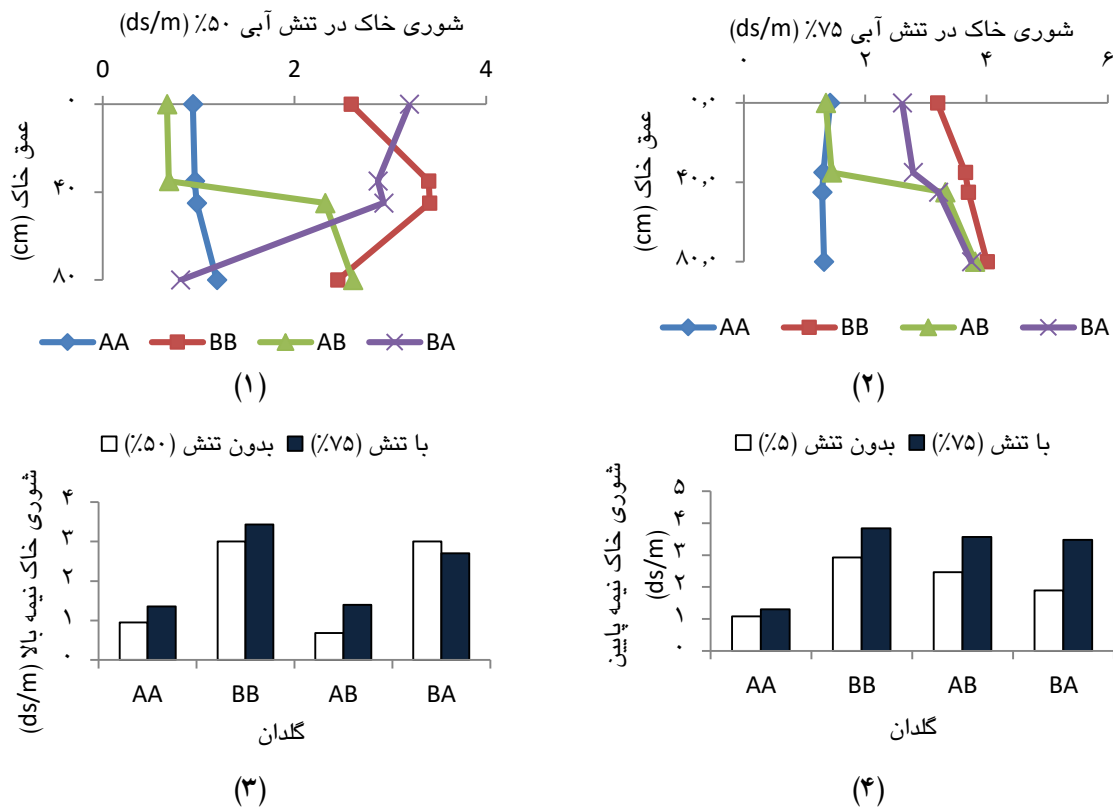
(AA گلدان پر شده با خاک رسی، BB گلدان پر شده با خاک لوم سیلتی، AB گلدان با خاک رسی در نیمه بالا و خاک لوم سیلتی در نیمه پایین و BA گلدان با خاک لوم سیلتی در نیمه بالا و خاک رسی در نیمه پایین)

ریشه در این نوع گلدان در تیمار آبیاری ۵۰ درصد به علت شستشوی بیشتر نمک‌ها از خاک به طرز چشم‌گیری بهبود یافته است. وزن ریشه کمتر در لایه بالایی گلدان AA در تیمار ۵۰ درصد نسبت به تیمار ۷۵ درصد می‌تواند به علت کمبود اکسیژن در منطقه ریشه و محدودیت رشد گیاه باشد.

#### توزیع پیکسلی ریشه

تجزیه و تحلیل دقیق تصاویر سیستم ریشه گیاه نیاز به استفاده از ابزارهای نرم افزاری دارد. در سال‌های اخیر برنامه‌های متنوعی در این زمینه توسعه داده شدند که برخی از آن‌ها مختص تحلیل مشخصات ریشه بوده و برخی دیگر کاربرد عمومی دارد. پس از تهیه عکس ریشه‌ها با استفاده از دوربین با کیفیت ۴۸ مگاپیکسل، به منظور پیش‌پردازش تصاویر خام گرفته شده از ریشه‌ها و متمایز کردن آن از تصویر زمینه از برنامه اندرویدی

علاوه بر تنش خشکی، به نظر می‌رسد شوری خاک نیز بر جرم ریشه اثرگذار باشد. در این آزمایش براساس اندازه‌گیری شوری خاک لایه‌های گلدان‌ها با استفاده از روش عصاره اشباع، نمودارهای شکل ۹ بدست آمدند. به طور کلی شوری خاک لوم سیلتی نسبت به خاک رسی بیشتر بود. در تیمار آبی ۷۵ درصد شوری خاک گلدان‌ها به جز گلدان AA نسبت به عمق افزایش نشان داد (شکل ۹-۲). به نظر می‌رسد کاهش شوری خاک در نیمه پایین گلدان BB در آبیاری بدون تنش ناشی از جذب زیاد نمک توسط ریشه باشد (شکل ۹-۱). همچنین شوری خاک لایه‌های بالا و پایین (به ترتیب شکل‌های ۹-۳ و ۹-۴) در تیمار آبی ۷۵ درصد بیشتر از شوری خاک با تیمار آبی ۵۰ درصد بود. بنابراین می‌توان گفت گلدان BB که شوری آن زیادتر است، نسبت به گلدان‌های دیگر بیشتر تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفته و ریشه‌های آن ضعیف‌ترین رشد را در تیمار ۷۵ درصد داشتند. اما رشد



شکل ۹- تغییرات شوری خاک نسبت به عمق تحت تنش آبی ۵۰ درصد و ۷۵ درصد (۲و۱) و نوع خاک در لایه‌های بالا و پایین (۳و۴)

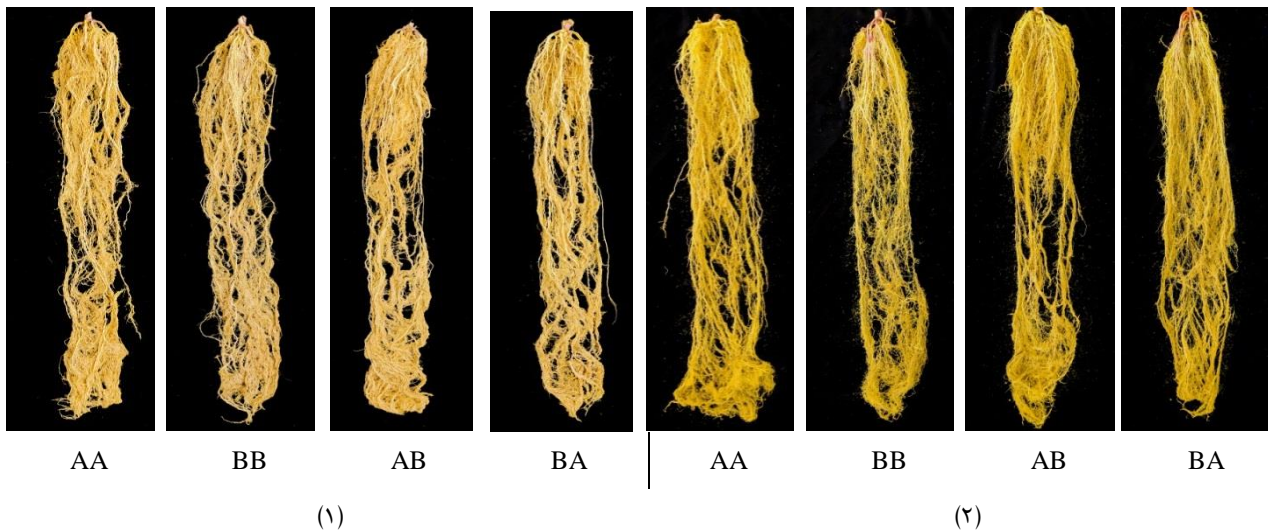
AA گلدان پر شده با خاک رسی، BB گلدان پر شده با خاک لوم سیلتی، AB گلدان با خاک رسی در نیمه بالا و خاک لوم سیلتی در نیمه پایین و BA گلدان با خاک لوم سیلتی در نیمه بالا و خاک رسی در نیمه پایین

پیکسل‌های اشغال شده توسط ریشه با رنگ سفید نشان داده شده است.

پس از محاسبه نسبت وزن خشک و تعداد پیکسل‌های ریشه نیمه بالا به نیمه پایین، نمودار انحراف از میانگین کل گلدان‌ها مطابق شکل ۱۲ حاصل گردید. انحراف از میانگین مثبت در دو گلدان BB و AB و همچنین گلدان AA به ترتیب در تیمارهای آبیاری ۷۵ درصد و ۵۰ درصد نشان دهنده اختلاف زیاد بین ریشه‌های نیمه پایین و بالا در هر دو روش وزنی و پیکسلی می‌باشد. به طور مثال در گلدان AB در تیمار ۵۰ درصد، مقدار منفی نشان دهنده یکنواختی بیشتر در توزیع عمقی ریشه در طول گلدان بوده و این مطلب بر اساس رتبه‌بندی آماری گلدان‌ها از نظر وزن نسبی ریشه

YPs استفاده گردید. به عنوان نمونه شکل‌های ۱۰-۱ و ۱۰-۲ به ترتیب تصاویر ریشه چهار نوع گلدان از تیمارهای آبیاری ۵۰ درصد و ۷۵ درصد را پس از متمایزسازی تصویر ریشه و زمینه نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، ضعف ریشه در گلدان BB و نیمه پایینی گلدان AB تحت تنش آبی به وضوح قابل مشاهده است (۱۰-۲).

پس از مرحله پیش‌پردازش، تصاویر حاصل با استفاده از برنامه B&W به تصاویر سیاه و سفید مطلق یعنی باینری تبدیل شده و برای تجزیه و تحلیل درصد پیکسل‌ها آماده شدند. شکل ۱۱ نتایج تجزیه و تحلیل تصاویر باینری ریشه‌های ۴ گلدان تحت تنش رطوبتی را به عنوان نمونه در برنامه Color Analysis نشان می‌دهد.

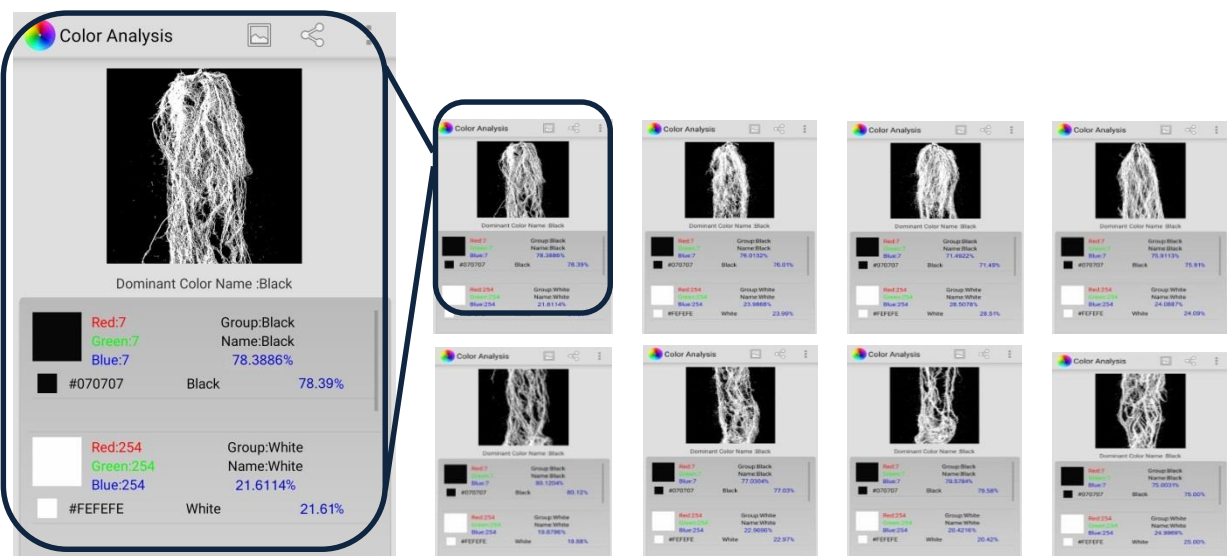


شکل ۱۰- تصاویر عکس برداری شده از ریشه‌ها در تیمار آبی ۵۰ درصد (۱) و تیمار آبی ۷۵ درصد (۲)

(AA گلدان پر شده با خاک رسی، BB گلدان پر شده با خاک لوم سیلتی، AB گلدان با خاک رسی در نیمه بالا و خاک لوم سیلتی در نیمه پایین و BA گلدان با خاک لوم سیلتی در نیمه بالا و خاک رسی در نیمه پایین)

روش پیکسلی این پرزها در شمارش تعداد پیکسل‌ها تأثیر قابل توجهی دارند. به همین جهت در روش تراکم پیکسلی بر خلاف روش وزنی، اختلاف ریشه نیمه بالا و پایین چندان زیاد نیست.

لایه بالا (شکل ۴) نیز قابل تأیید می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود روش‌های وزن خشک ریشه و تحلیل تراکم پیکسلی به طور کلی رفتار مشابه و هماهنگی نشان دادند. در محاسبه وزن خشک ریشه، پرزهای ریز به علت سبکی تأثیر چندانی روی وزن نداشته، اما در



شکل ۱۱- تجزیه و تحلیل پیکسل‌های نیمه‌های بالا و پایین ریشه ۴ گلدان تحت تنش آبی در برنامه Color Analysis



شکل ۱۲- نمودار انحراف از میانگین نسبت ریشه‌های نیمه بالا به پایین

(AA) گلدان پر شده با خاک رسی، BB) گلدان پر شده با خاک لوم سیلتی، AB) گلدان با خاک رسی در نیمه بالا و خاک لوم سیلتی در نیمه پایین و BA) گلدان با خاک لوم سیلتی در نیمه بالا و خاک رسی در نیمه پایین)

رطوبتی نسبت به شرایط بدون تنش در تمام گلدان‌ها مشاهده شد اما این کاهش در گلدان‌های BB و AB معنی‌دار بود. وزن بلال با وزن ریشه لایه پایین گلدان، همبستگی بیشتری نسبت به وزن ریشه لایه بالا نشان داد. ریشه‌های نیمه بالایی به علت ضخامت بیشتر به خودی خود از وزن بیشتر برخوردار بوده و هنگامی که ریشه‌های نیمه پایین قوی‌تر می‌شود، در عملکرد محصول تأثیر بسیار مطلوبی می‌گذارد. روش تحلیل تراکم پیکسلی به طور کلی اطلاعات مفیدی در مورد توزیع ریشه نسبت به عمق بدست داد. نتایج این تحقیق می‌تواند در جهت اقدامات مدیریتی بستر کشت گیاه ذرت به ویژه در مناطقی که با محدودیت منابع آب مواجه هستند، مورد استفاده قرار گیرد.

#### سپاسگزاری

بدینوسیله از زحمات اساتید محترم گروه باغبانی دانشگاه تبریز جناب آقایان دکتر مطلبی آذر و دکتر پناهنده بواسطه راهنمایی‌های علمی ارزشمند ایشان صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

#### نتیجه‌گیری

ریشه ذرت در خاک همگن رسی در شرایط تنش خشکی نسبت به خاک همگن لوم سیلتی رشد بهتری داشت. به علت شوری زیاد خاک لوم سیلتی، تأثیر منفی تنش رطوبتی نسبت به خاک رسی بیشتر خود را نشان داد. اما هنگامی که در زیر خاک لوم سیلتی یک لایه خاک رسی قرار گرفت، سرعت زهکشی آب از خاک لوم سیلتی کاهش یافته و بنابراین ریشه گیاه رشد بهتری پیدا کرد. حتی هنگامی که ترتیب قرارگیری لایه‌ها برعکس شد، شرایط بهتری نسبت به خاک یکنواخت لوم سیلتی برای ریشه فراهم گردید. در شرایط آبیاری بدون تنش ترتیب قرارگیری خاک‌های رسی و لوم سیلتی در گلدان‌های دو-لایه، تفاوت معنی‌داری در درصد وزن ریشه نیمه بالایی گلدان ایجاد نکرد. با اعمال تنش آبی وزن خشک ریشه نیمه بالای گلدان AB بطور معنی‌داری نسبت به گلدان BA بیشتر بود. رشد بهتر ریشه در خاک یکنواخت لوم سیلتی در آبیاری بدون تنش می‌تواند ناشی از دسترسی بیشتر به آب و اصلاح نسبی شوری خاک باشد. به نظر می‌رسد خاک یکنواخت رسی، متأثر از کمبود جریان هوا به منطقه ریشه بود. هرچند کاهش وزن بلال تحت تنش

#### منابع مورد استفاده

- Alvarez S, Navarro A, Banon S and Sanchez Blanco MJ. 2009. Regulated deficit irrigation in potted dianthus plants: effects of severe and moderate water stress on growth and physiological responses. *Scientia Horticulturae*, 122: 579-585.
- Araki H and Iijima M. 2005. Stable isotope analysis of water extraction from subsoil in upland rice (*Oryza sativa L.*) as affected by drought and soil compaction. *Plant and Soil*, 270(1-2): 147-157.

- Arif MR, Islam MT and Robin A. 2019. Salinity stress alters root morphology and root hair traits in *Brassica napus*. *Plants (Basel)*, 8(7): 192.
- Atwell BJ. 1993. Response of roots to mechanical impedance. *Environmental and Experimental Botany*, 33: 27-40.
- Castillo, MA. 2011. Establishment of tolerance levels to deficit irrigation and use of saline water in Mediterranean autochthonous plants for ornamental purposes. Ph.D. thesis. Technical University of Cartagena, p 186.
- Franco JA, Martinez-Sanchez JJ, Fernandez JA and Banon S. 2006. Selection and nursery production of ornamental plants for landscaping and xero gardening in semi-arid environments. *Journal Horticultural Science of Biotechnology*, 81: 3-17.
- Naor A. 2006. Irrigation scheduling and evaluation of tree water status in deciduous orchards. *Horticultural Reviews*, 32: 111-166.
- Navarro A, Alvarez S, Castillo M, Banon S and Sanchez Blanco MJ. 2009. Changes in tissue-water relations, photosynthetic activity, and growth of *Myrtus communis* plants in response to different conditions of water availability. *Horticultural Science of Biotechnology*, 84: 541-547.
- Nosalewicz A and Lipiec J. 2014. The effect of compacted soil layers on vertical root distribution and water uptake by wheat. *Plant and soil*, 375(1): 229-240.
- Passioura JB. 1988. Water transport in and to roots. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 39: 245-265.
- Passioura JB. 2002. Soil conditions and plant growth. *Plant, Cell and Environment*, 25: 311-318.
- Sanchez Blanco MJ, Rodriguez P, Morales MA, Ortuno MF and Torrecillas A. 2002. Comparative growth and water relation of *Cistus albidus* and *Cistus monspeliensis* plants during water deficit conditions and recovery. *Plant Science*, 162: 107-113.
- Santos TP, Lopes CM, Rodrigues ML, Souza CR, Silva JR, Maroco JP, Pereira JS and Chaves MM. 2007. Effects of deficit irrigation strategies on cluster microclimate for improving fruit composition of Moscatel field-grown grapevines. *Scientia Horticulturae*, 112: 321-330.
- Tardieu F. 1994. Growth and functioning of roots and of root systems subjected to soil compaction: towards a system with multiple signaling. *Soil and Tillage Research*, 30(2-4): 217-243.
- Vamerli T, Saccomani M, Bona S, Mosca G, Guarise M and Ganis A. 2003. A comparison of root characteristics in relation to nutrient and water stress in two maize hybrids. *Plant and Soil*, 255: 157-167.
- Zobel RW, Kinraide TB and Baligar VC. 2007. Fine root diameters can change in response to changes in nutrient concentrations. *Plant and Soil*, 297: 243-254.