Plant Prod., 2026, 49(1), 65- 84
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.49757.2273
Received: 25 May 2025
Accepted: 06 September 2025

Plant Productions

Research Article

The effect of prolonged drought stress on dry matter accumulation and nutrient uptake in seedling and clonal rootstocks of pear (*Pyrus* spp.) and two commercial quince rootstocks (*Cydonia oblonga* Mill)

Ali Rezaei[1], Kazem Arzani[1*], Hamid Abdollahi[2], Ali Mokhtassi Bidgoli [3], Nima Ahmadi [1]

1- Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2-Temperate Fruits Research Center, Horticultural Science Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
3- Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Citation: Rezaei, A., Arzani, K., Abdollahi, H., Mokhtassi Bidgoli, A., Ahmadi, N. (2026). The effect of prolonged drought stress on dry matter accumulation and nutrient uptake in seedling and clonal rootstocks of pear (*Pyrus* spp.) and two commercial quince rootstocks (*Cydonia oblonga* Mill). *Plant Productions*, 49(1), 65- 84.

Abstract

Introduction

Iran is a major center of pear (Pyrus) germplasm diversity, offering strong potential for selecting drought-tolerant genotypes. This study aimed to assess the effects of drought stress on biomass accumulation and nutrient uptake in seedlings of different Pyrus species and commercial pear rootstocks.

Materials and Methods

The collected seeds were sown in trays under greenhouse conditions. After germination, seedlings were transplanted into the growth bags filled with a suitable medium. After nine months' establishment, the uniform plants were randomly assigned to two groups: a control group with regular irrigation every 3 days, and a drought-stress group with irrigation withheld for 21 days. At the end of the drought period, shoots and roots were separated, fresh weights measured, and samples oven-dried at 50°C for two weeks to determine dry weights. Macronutrients (N, P, K) and micronutrients (Mg, Ca, S) were analyzed in roots and shoots. The experiment followed a factorial design within a completely randomized design, involving two irrigation regimes and 14 *Pyrus* genotypes.

Results and Discussion

Data from the interaction effects of drought stress on root fresh and dry weights revealed that the Q1 and the Dargazi had the highest root fresh weight, while the Pyrodwarf showed the lowest fresh and dry root weights. Mean comparisons indicated that in *P. nivalis*, *P. hyrcana*, *P. syriaca*, *P. betulifolia*, and the seedling genotypes LGI477 and LGI456 (derived from *P. communis*), the shoot dry weight under drought stress was higher than control. These genotypes may possess superior physiological, biochemical, and molecular adaptation mechanisms to drought. Moreover, *P. pashia*, *P. betulifolia*, *P. amygdaliformis*, Q1, the promising LGI477 genotype, and the quince rootstock BA29 exhibited higher

* **Corresponding Author:** Kazem Arzani
E-mail: arzani_k@modares.ac.ir

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

root dry weight under drought stress than control, indicating stronger root growth under drought condition. In *P. nivalis*, *P. syriaca*, Q1, Dargazi, LGI477, and BA29 rootstock, root nitrogen did not decrease under drought, while in other genotypes, a reduction was observed. However, leaf nitrogen increased under drought in most genotypes, except for *P. pashia*, *P. hyrcana*, *P. amygdaliformis*, and BA29 rootstock, where it declined. Drought stress also generally increased root phosphorus content in most species and rootstocks, except for *P. hyrcana*, *P. calleryana*, and LGI477, which did not show such increases. In contrast, leaf phosphorus responses under drought were variable: increases in *P. amygdaliformis* and *P. nivalis*, decreases in Dargazi, and no significant change in *P. hyrcana*, *P. syriaca*, and LGI456. Root potassium content responded differently across genotypes, decreasing in *P. nivalis*, *P. betulifolia*, hybrid Q1, Dargazi, and Pyrodwarf rootstock, but increasing in others. Leaf potassium levels showed wide variation, with *P. syriaca* having the highest and Dargazi and LGI456 having the lowest values under drought stress. Dargazi showed the highest root magnesium content, while *P. nivalis* had the lowest; EMA and BA29 rootstocks showed no significant differences. The quince rootstock EMA had the highest root sulfur content under drought. Overall, drought stress had less pronounced effects on magnesium and sulfur than on other nutrients.

Conclusion

The findings of this study reveal clear differences among species and rootstocks in their responses to drought stress, particularly regarding their capacity to absorb and retain essential mineral nutrients under water-deficit conditions. Analysis of mean trait values revealed significant variation in how different genotypes and rootstocks cope with drought. Previous studies have reported that drought conditions typically reduce the number of lateral roots and overall root volume while promoting deeper vertical root growth. Furthermore, terminal buds tend to enter a dormancy phase, halting the plant's longitudinal growth. As a consequence of drought stress, various growth indices decline, with the severity of reduction differing among the evaluated genotypes and rootstocks. Besides, according to the results of this study, rootstocks that demonstrated the highest dry matter accumulation in their roots during drought, along with relatively sustained growth performance, may serve as promising candidates for future breeding programs aimed at drought tolerance. Although drought stress generally led to reduced absorption of most mineral elements in both leaves and roots, the efficiency of nutrient uptake did not appear to be severely disrupted.

Keywords: Germplasm, Local pear of Iran, Root dry weight, Root to shoot relationship, Withholding irrigation

تولیدات گیاهی، ۱٤۰۵، ٤۹(۱)، ٦۵ - ۸٤
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.49757.2273
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/ ۰۳/ ۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/ ۰۶/ ۱۵

تولیدات گیاهی
مقاله پژوهشی

اثر تنش خشکی طولانی مدت بر تجمع مادۀ خشک و غلظت عناصر غذایی در پایه‌های دانهالی و رویشی گلابی (*Pyrus* spp.) و دو پایۀ تجاری به (*Cydonia oblonga* Mill)

علی رضائی[۱]، کاظم ارزانی[۱*]، حمید عبداللهی[۲]، علی مختصی بیدگلی[۳]، نیما احمدی[۱]

۱- گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲- پژوهشکده میوه‌های معتدله و سردسیری، موسسه تحقیقات علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۳- گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

پتانسیل ژنتیکی گونه‌های وحشی جنس *Pyrus* فرصت ارزشمندی را برای به‌نژادگران فراهم می‌کند تا پایه‌های گلابی متحمل به خشکی را در میان ژرم‌پلاسم درختان میوه شناسایی کنند. این پژوهش با هدف ارزیابی تحمل به خشکی گونه‌های وحشی *Pyrus* به‌عنوان پایه‌های دانهالی، همراه با برخی پایه‌های رویشی گلابی و به، در شرایط آبیاری مطلوب و تنش خشکی انجام شد. مواد گیاهی شامل دانهال‌های ۱۰ گونۀ بومی و وارداتی گلابی (*Pyrus*)، یک هیبرید بین‌گونه‌ای تجاری (Q1)، پایۀ رویشی پیرودوارف (متحمل به بیماری آتشک)، و دو پایۀ رویشی به نام‌های کوئینس EMA و BA29 از گونه به (*Cydonia oblonga* Mill.) بود. پس از ۲۷۰ روز استقرار در گلخانۀ تحقیقاتی دانشکدۀ کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، گیاهان یکنواخت از نظر طول و قطر انتخاب شدند و در سال زراعی ۱٤۰۰-۱٤۰۱ تحت دو تیمار آبیاری شامل آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، شاهد) و تنش خشکی (قطع آبیاری به مدت ۲۱ روز) قرار گرفتند. در این آزمایش، وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه و نیز غلظت عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، پتاسیم، گوگرد، منیزیم و کلسیم در برگ و ریشه به صورت جداگانه برای ۱۱ گونۀ گلابی، پایۀ رویشی پیرودوارف و دو پایۀ EMA و BA29 اندازه گیری شد. نتایج نشان داد وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه به صورت معنی‌داری تحت اثر تنش خشکی قرار گرفت. در این میان، دانهال‌های گونۀ *P. communis* عملکرد بهتری نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها داشتند و کمترین مقادیر در پایه‌های رویشی به مشاهده گردید. بیشترین و کمترین وزن تر ریشه تحت تنش خشکی به ترتیب در گونه Q1 و پایه پیرودوارف ثبت شد. گونه *P. nivalis* کاهش کمتری در میزان نیتروژن ریشه نسبت به شرایط شاهد از خود نشان داد، درحالی‌که *P. amygdaliformis* کمترین میزان نیتروژن را در شرایط تنش دارا بود. بیشترین میزان نیتروژن برگ نیز در *P. nivalis* و کمترین آن در پایۀ رویشی و پاکوتاه کننده EMA و تحت تنش خشکی مشاهده شد. در شرایط تنش، غلظت فسفر ریشه در اغلب ژنوتیپ‌ها افزایش یافت و جذب عناصری مانند فسفر، پتاسیم، منیزیم و گوگرد در برگ بسته به ژنوتیپ متفاوت بود. تنش خشکی اثر معنی‌داری بر فسفر، پتاسیم و کلسیم داشت، اما بر منیزیم و گوگرد

نویسنده مسئول: کاظم ارزانی
رایانامه: arzani_k@modares.ac.ir

تأثیر قابل‌توجهی نشان نداد. پایه کوئینس EMA نیز توانست بیشترین میزان گوگرد و کلسیم را در ریشه و برگ تحت تنش حفظ کند. به طور کلی گونه‌ها و پایه‌های رویشی مورد مطالعه واکنش‌های متفاوتی نسبت به تنش خشکی و جذب و نگه‌داشت عناصر معدنی نشان دادند. تنش خشکی موجب کاهش وزن خشک اندام هوایی در برخی گونه‌ها و تمامی پایه‌های رویشی شد، اما دانهال‌های *P. nivalis*، *P. hyrcana*، *P. syriaca*، *P. betulifolia*، LGI477 و LGI456 کمتر تحت تأثیر قرار گرفتند. بنابراین، این ژنوتیپ‌ها می‌توانند به‌عنوان گزینه‌های امیدوارکننده برای مطالعات آینده در زمینهٔ تحمل به خشکی مورد توجه قرار گیرند.

کلید واژه‌ها: ارتباط ریشه با شاخه، ژرم‌پلاسم، گلابی بومی ایران، قطع آبیاری، وزن خشک ریشه

مقدمه

تغییرات اقلیمی تهدید جدی برای تولید محصولات کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک در سطح جهانی به شمار می‌آیند (Arzani, 2015). از میان تنش‌های محیطی، تنش‌های غیرزیستی مانند خشکی، شوری و دماهای بالا بیشترین خسارت را به محصولات کشاورزی وارد می‌کنند؛ ازاین‌رو، مطالعه و پژوهش در این زمینه از اهمیت و اولویت بالایی برخوردار است (Shan *et al.*, 2014; Rahnama *et al.*, 2026). ایران با متوسط بارندگی حدود ۲۵۰ میلی‌متر در سال (کمتر از یک‌سوم متوسط بارندگی جهان) در زمرهٔ مناطق خشک جهان طبقه‌بندی می‌شود. به عبارت دیگر بیش از ۶۵ درصد از مساحت کشور دارای متوسط بارندگی سالانه حدود ۱۵۰ میلی‌متر هستند، که این موضوع، اهمیت برنامه‌ریزی برای مقابله با اثرات تنش خشکی بر تولیدات کشاورزی و امنیت غذایی را بیش از پیش ضروری می‌سازد (Heidari Sharif Abad, 2001).

ایران به عنوان یکی از مراکز غنی ژرم پلاسم درختان میوه در جهان شناخته می‌شود (Arzani, 2015). تنوع ژنتیکی به‌عنوان کارآمدترین ابزار زیستی برای گزینش ارقام متحمل به تنش خشکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک شناخته می‌شود. به‌طوری‌که پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند دسترسی به منابع ژنتیکی غنی، امکان شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش‌های خشکی، شوری و سرما را فراهم می‌کند (Arji and Arzni, 2003). گونه‌های مختلف جنس *Pyrus*، به عنوان یکی از منابع ژنتیکی ارزشمند، در مناطق مختلف ایران به صورت وحشی یافت می‌شوند، به‌طوری که میوهٔ این گونه‌ها در برخی مناطق مصرف محلی و منطقه‌ای دارد. به‌علاوه برخی از گونه‌های وحشی گلابی به دلیل تحمل بالا به تنش‌های محیطی، به عنوان پایه برای پیوند ارقام تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرند، همچنین از نظر صفات مختلف به‌نژادی پتانسیل بسیار بالایی بین گونه‌های مختلف جنس *Pyrus* وجود دارد (Abdollahi, 2010). حدود ۲۲ گونهٔ مختلف از جنس *Pyrus* شناخته شده است که از این میان، وجود ۱۲ گونه در ایران گزارش شده است که در قسمت‌های شمال، شمال شرق، شمال غرب، غرب و جنوب غرب پراکنده هستند (Rezaei et *al.*, 2023a). ژرم‌پلاسم گونه‌ها و ژنوتیپ‌های مختلف گلابی به عنوان مخزن ژنی برای اهداف به‌نژادی همواره جایگاه ویژه و ارزشمندی در برنامه‌های به‌نژادی این گیاه ایفا می‌کنند، زیرا ژن‌های مقاومت به تنش‌های مختلف زیستی و غیرزیستی نهفته در این مخازن ژنتیکی، پتانسیل بسیار خوبی برای اهداف به‌نژادی درختان میوه دارد (Rezaei *et al.*, 2025). از طرفی انتخاب از میان تنوع موجود در ژرم‌پلاسم طبیعی درختان میوه، موجب سرعت بخشیدن به برنامه‌های به‌نژادی از نظر کارآیی انتخاب شده، و همچنین این کار دقت بالایی داشته و از نظر مسائل اقتصادی مقرون به صرفه است (Liang *et al.*, 2015).

گیاهان در سطوح مختلف مورفولوژیک، فیزیولوژیک، آنزیمی و مولکولی واکنش‌های متفاوتی به تنش خشکی نشان می‌دهند (Teshome *et al.*, 2020; Hasan *et al.*, 2021). ویژگی‌های رشدی و عملکردی درختان میوه شامل

کاهش ارتفاع، وزن تر و خشک گیاهان و همچنین تغییرات در تعداد و سطح برگ‌ها و دیگر شاخص‌های مورفولوژیک می‌تواند تحت اثر تنش خشکی قرار گیرد (Tatari *et al.*, 2020). تنش خشکی به عنوان یکی از مهم ترین مخاطرات غیرزیستی، می‌تواند به‌شدت به اجزای فتوسنتزی آسیب وارد کرده، ساختار و عملکرد سلولی را تغییر دهد. از طرفی فرآیندهای متابولیک را مختل کرده و جذب و انتقال مواد مغذی را از ریشه به ساقه کاهش دهد، از طرف دیگر مصرف انرژی سلولی را افزایش، رشد را مهار کرده، طول عمر گیاه را کوتاه، کیفیت محصول تولیدی را کاهش داده و در نهایت به مرگ گیاه منجر می‌شود (Xie *et al.*, 2021). تحت شرایط تنش خشکی، روزنه‌های گیاهان به‌سرعت بسته می‌شوند و در صورت تداوم این شرایط، رشد متوقف شده، جذب و مصرف کربن دی اکسید خالص کاهش می‌یابد، به‌طوری که، سلول‌ها کوچک‌تر شده، برگ‌ها کمتر توسعه پیدا کرده و عملکرد ماده خشک به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد (Salisbury and Ross, 1992).

در درختان میوه سازوکارهای متفاوت برای پاسخ به تنش خشکی اتخاذ می‌شود، بسته به ژنتیک رقم و پایه پاسخ‌های دفاعی به تنش خشکی می‌تواند به صورت لحظه‌ای یا به صورت پایدار و دائمی ایجاد شود (Liang *et al.*, 2015). براساس گزارش‌ها، هنگامی که تنش خشکی به گیاهان آسیب وارد می‌کند، آن‌ها با ایجاد تغییرات در ساختارهای مورفو-فیزیولوژیک و فرآیندهای متابولیک خود به این شرایط سازگار شده و سعی در تحمل تنش می‌نمایند، به‌طوری که گزارش شده است گیاهان در مواجهه با تنش خشکی ریشه‌های عمیق‌تری تولید می‌کنند، روزنه‌های خود را برای حفظ آب درون سلولی می‌بندند و اسمولیت‌ها را برای محافظت از خود تولید می‌کنند (Teshome *et al.*, 2020).

پایه درختان میوه نقشی کلیدی در کارآیی و پایداری عملکرد باغ ایفا می‌کند و در باغداری مدرن، استفاده از پایه مناسب ضروری است (Rufato *et al.*, 2021). پایه در درختان میوه می‌تواند بر شاخص‌های مختلف رشد رویشی، پتانسیل آبی درختان و اندازه نهایی تاج آن‌ها اثر گذار باشد. به‌علاوه، گونه‌ها و ارقام مختلف گلابی ممکن است کارآیی متفاوتی در جذب آب و مواد معدنی از خود نشان دهند (Arzani, 2004). از طرفی، جذب مواد غذایی با در دسترس بودن آن در سطح ریشه گیاه تنظیم می‌شود که این موضوع به مقدار و حرکت آب در خاک و سیستم ریشه‌ای گیاه بستگی دارد (Martinez *et al.*, 2020). سیستم ریشه، تحت شرایط خشکی تغییرات ساختاری و عملکردی قابل توجهی را تجربه می‌کند که به طور مستقیم بر مقاومت گیاه در برابر این تنش تأثیر می‌گذارد (Sandeep *et al.*, 2023)، به‌طوری که یک سیستم ریشه توسعه یافته می‌تواند جذب عناصر غذایی از خاک را به‌طور مؤثری انجام دهد و رشد و تولید محصول نهایی گیاه را به‌ویژه در دوران مواجهه با تنش خشکی افزایش دهد (White and Kirkegaard, 2010; Guo *et al.*, 2024). همچنین گزارش‌ها نشان می‌دهند که پایه‌های دانهالی و رویشی مورد استفاده در باغ‌های گلابی با توجه به نوع سیستم ریشه‌ای (افقی یا راست) به‌طور متفاوتی به تنش خشکی پاسخ می‌دهند (Karbasi and Arzani, 2021; Maleki-Asayesh *et al.*, 2021).

یکی از چالش‌های عمده در کشت گلابی در ایران، عدم دسترسی به پایه‌هایی است که با شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک کشور سازگاری داشته باشند. در حال حاضر، در کنار پایه‌های *Pyrus*، گونه‌هایی از جنس‌های دیگر مانند *Malus*، *Cydonia*، *Crataegus* و *Mespilus* نیز برای پیوند گلابی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Abdollahi, 2010). از این بین، پایه‌های مربوط به جنس *Cydonia* برای ایجاد باغ‌های نیمه متراکم و افزایش بهره‌وری در خاک‌های غیرآهکی و غنی، رایج‌ترین و مناسب‌ترین انتخاب هستند، اما این پایه‌ها به شدت به خاک‌های آهکی حساس بوده و دچار کلروز ناشی از آهک خاک می‌شوند (Devyatov, 1994)، که به دلیل آهکی بودن خاک‌های ایران، محدودیتی جدی در استفاده از آن‌ها در باغداری نوین

گلابی به وجود آورده است. از طرفی فلات ایران مرکز پیدایش و تنوع گونه‌های مختلف گلابی است که به صورت وحشی در طبیعت وجود دارند (Abdollahi, 2010)، گونه‌های وحشی به دلیل برخورداری از برخی مزایا مانند تحمل بالا به تنش‌های زیستی و غیرزیستی به عنوان منابع ژنتیکی بسیار خوبی برای برنامه‌های به‌نژادی تلقی می‌شوند، از این گونه‌ها در برخی کشورها به عنوان پایه برای ارقام مختلف بهره‌برداری می‌شود. به‌طوری که از گونه گلابی *P. betulifolia* به دلیل دارا بودن سیستم ریشه‌ای مناسب، قدرت رشدی بالا و مقاومت به انواع تنش‌های زیستی و غیرزیستی به عنوان یک پایه مناسب برای درصد زیادی از ارقام تجاری گلابی در کشور چین استفاده می‌شود (Dong *et al*., 2020)، همچنین گزارش‌ها نشان می‌دهد که هر ساله درصد قابل توجهی از گلابی‌های تجاری در کشور ترکیه بر روی گونه *P. elaeagrifolia* و *P. amygdaliformis*، در کشور سوریه و لبنان بر روی گونه *P. syriaca*، در کشورهای یوگسلاوی و یونان برروی گونه *P. amygdaliformis*، در مناطق جنوبی کشور روسیه بر روی گونه *P. Salicifolia* و در کشور الجزایر و مراکش برروی گونه *P. longipes* پیوند می‌شوند (Tatari *et al*., 2020). در ایران نیز بخش قابل توجهی از نهالستان‌ها از دانهال‌های گلابی اروپایی حاصل از بذرهای رقم بومی و مقاوم به آتشک درگزی به عنوان پایه برای تولید نهال پیوندی گلابی استفاده می‌کنند (Abdollahi, 2010)، پایه درگزی سازگاری بسیار خوبی با ارقام و خاک‌های موجود در مناطق گلابی کاری کشور دارد، به‌علاوه گزارش‌ها نشان می‌دهد که پایه درگزی در مقایسه با پایه‌های رویشی گلابی نظیر پیرودوارف در برابر تنش خشکی طولانی مدت تحمل بهتری از خود نشان می‌دهد (Asayesh *et al*., 2023). درختان گلابی به کمبود مواد معدنی بسیار حساس بوده و پایه‌های مختلف ممکن است کارآیی جذب عناصر متفاوتی داشته باشند (Esmaeili *et al*., Ikinci *et al*., 2014 ; 2021). گزارش‌ها نشان داده است که در گونه‌های علفی عناصر درشت مغذی نیتروژن، فسفر و پتاس در کنار عناصر کلسیم، منیزیم و گوگرد بیشتر از سایر عناصر تحت اثر منفی تنش خشکی قرار می‌گیرند (Farooq *et al*., 2012). نیتروژن به عنوان مهم ترین عنصر تاثیر گذار بر رشد و نمو گیاه، جذب آن به شدت تحت تاثیر میزان رطوبت خاک قرار دارد، به طوری که در شرایط تنش خشکی جذب نیتروژن بدلیل کاهش معدنی سازی آن در خاک و در نتیجه کاهش نیتروژن در دسترس به شدت کاهش می‌یابد (; Huang *et al*., 2018Garwood and Williams, 1967).

تنوع ژرم‌پلاسم گلابی وحشی و بومی فلات ایران، به دلیل مقاومت در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی، منبعی ارزشمند برای برنامه‌های به‌نژادی و بهبود عملکرد گلابی است. با توجه به تنوع ژنتیکی گسترده گونه‌های *Pyrus* در ایران، ارزیابی دقیق سازگاری آن‌ها با شرایط مختلف خاک و جذب عناصر غذایی ضروری است. این پژوهش با هدف شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل و توسعه پایه‌ها و ارقام جدید، به بررسی رشد اندام‌های هوایی و ریشه و تغییرات جذب عناصر غذایی در دانهال‌های گونه‌های مختلف گلابی و چند پایه تجاری پرداخت.

مواد و روش‌ها

میوهٔ گونه‌های مورد بررسی در این پژوهش در بازه زمانی مرداد تا شهریور ماه سال ۱۴۰۰، در مرحلهٔ رسیدگی کامل میوه‌ها از چندین منطقهٔ از ایران جمع‌آوری شد. جدول ۱ نام گونه‌ها، محل جمع‌آوری آن‌ها، برخی ویژگی های کلی و مختصات جغرافیایی گونه‌های مورد مطالعه را نشان می دهد. گونه‌های مورد بررسی عمدتاً به‌صورت وحشی بودند و بر اساس منابع موجود، گزارش‌های پیشین، اطلاعات مراکز تحقیقاتی، طرح پرسش از محققین، باغداران و افراد بومی هر منطقه، انتخاب و جمع‌آوری گردید. در فرآیند نمونه‌برداری میوه‌ها سعی شد میوه‌ها از تک درخت هر گونه برداشت شوند، تا علاوه بر فراهم بودن امکان مطالعات بعدی بر روی همان درخت، خلوص ژنتیکی نمونه‌ها تا حد امکان حفظ گردد. پس از برداشت، میوه‌ها به آزمایشگاه پومولوژی گروه علوم و مهندسی

باغبانی دانشگاه تربیت مدرس منتقل شدند. سپس بذور استخراج، شست‌وشو و در سایه خشک شدند و تا زمان کاشت در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در یخچال نگهداری گردید.

بذور حاصل از گونه‌های مورد بررسی، پس از ضدعفونی با قارچ‌کش بنومیل ۲ درصد، در شرایط گلخانه‌ای (گلخانه‌های تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس) و در سینی‌های کاشت ۲۸ حفره‌ای کشت شدند. پس از جوانه‌زنی و ظهور ۲ تا ۳ برگچه، گیاهچه‌های سالم و عاری از هر گونه آلودگی به کیسه‌های رشد (با ابعاد ۳۰ × ۶۰ سانتی‌متر؛ قطر × ارتفاع) که با بستر یکنواختی شامل خاک زراعی، کود دامی پوسیده و پرلیت دانه متوسط (به نسبت حجمی ۱:۱:۱) پر شده بودند، منتقل شدند.

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است. برای انجام این آزمایش از هر یک از گونه‌های مورد بررسی بیش از ۵۰ گیاهچه تولید شد. در مرحله انتقال به کیسه‌های رشد، برخی از دانهال‌هایی که از نظر ظاهری ناهمگن بوده و رشد متعادل و یکنواختی نداشتند، از ادامه روند پژوهش حذف شدند. همچنین، گیاهچه‌های کشت بافتی سازگار شده با اندازهٔ یکسان پایه پیرودوارف، از پژوهشکده میوه‌های معتدله و سردسیری و پایه‌های رویشی کوئینس BA29 و EMA متعلق به گونه *C. oblonga* از شرکت کشاورزی و باغداری کشت و صنعت فجر اصفهان تهیه شد.

جدول ۱- فهرست گونه‌های گلابی (*Pyrus* spp.) مورد مطالعه همراه با مکان‌های جمع‌آوری

Table 1. List of pear species (*Pyrus* spp.) studied along with their collection locations.

Species/cultivar name	Local name	Fruit uses	Collection site	Longitude	Latitude	Altitude (m)
P nivalis	Wild pear	Unusable	Alborz-Kamalshahr	50°51'55.6"	35°51'16.9"	1262
P. pashia	Hermeh	Fresh/dried fruit	North Khorasan - Ashkhane	56°48'35.03"	37°25'23.6"	1400
P. hyrcana	Hermeh	Fresh/dried fruit	North Khorasan - Ashkhane	56°48'35.03"	37°25'23.6"	1400
P. syriaca	Wild pear	Unusable	Kurdistan	46°25'38.28"	36°12'32.04"	1432
P. betulifolia	Wild pear	Unusable	Alborz-Kamalshahr	50°51'55.6"	35°51'16.9"	1262
P. calleryana	Wild pear	Unusable	Alborz-Kamalshahr	50°51'55.6"	35°51'16.9"	1262
P. amygdaliformis	Wild pear	Unusable	Research Institute of Forests and Rangelands	51°09'55.2"	35°44'27.1"	1275
Q1 (*Pyrus* spp)	Qazvin	Unusable	Alborz-Kamalshahr	50°51'55.6"	35°51'16.9"	1262
P. communis (Dargazi)	DareGazi	Fresh/dried fruit	Alborz-Kamalshahr	50°51'55.6"	35°51'16.9"	1262
P. communis (LGI477)	Khoj pear	Fresh/dried fruit	Gilan-Lahijan	50°2'0.4"	37°12'8.3"	34
P. communis (LGI456)	Khoj pear	Fresh/dried fruit	Gilan-Lahijan	50°2'0.4"	37°12'8.3"	34

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بستر مورد استفاده در گلدان‌ها طی دوره رشد و تنش خشکی برای گونه‌ها و پایه‌های مورد مطالعه

Table 2. Physical and chemical properties of the substrate used in pots during the growth period and drought stress for the studied species and rootstocks

Soil texture	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	TNV (%)	EC ($ds.m^{-1}$)	pH -	O.C (%)	N (%)	P (ppm)	K (ppm)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)
Loam	12	42	46	14.5	1.3	7.9	2.2	0.22	17	385	1.6	7.6	9.8	1.1

مهم ترین شرایط اقلیمی موجود در گلخانه تحقیقاتی محل اجرای آزمایش شامل، دمای ۳۳–۲۵ درجه سانتی‌گراد (روز/شب) و تقریباً ۱۶ ساعت نور و ۸ ساعت تاریکی، شدت نور ۱۰۰±۲۵۰۰ لوکس (در ساعت ۱۲ ظهر) و رطوبت نسبی ۴۵ تا ۵۵ درصد بود، که تا حدود بسیار زیادی قابل کنترل بود. مدیریت به‌زراعی اعمال شده بر روی گیاهان قبل از شروع تیمار تنش خشکی شامل، آبیاری منظم (هر سه روز یکبار)، کوددهی به مقدار ۱۵ گرم به ازای هر گیاه با کود NPK (20:20:20+micro) در سه نوبت، مدیریت یکنواخت آفات و بیماری‌ها برای تمام گونه‌ها و پایه‌های رویشی از آبان ۱۴۰۰ تا مرداد ۱۴۰۱ انجام گرفت. این اقدامات به منظور یکسان‌سازی شرایط محیطی و به حداقل رساندن اثر سایر تنش‌های احتمالی در طول دورهٔ ارزیابی صورت پذیرفت. لازم به ذکر است کلیه گونه‌ها و پایه‌های رویشی مورد استفاده در این پژوهش، پیش از اعمال تیمار تنش خشکی در وضعیت مطلوب از نظر استقرار و رشد قرار داشتند.

پس از گذشت ۹ ماه از استقرار مواد گیاهی در شرایط گلخانه، گیاهانی که از نظر همگنی در ارتفاع و قطر ساقه مشابه بودند (دارای حدود ۲۵ میانگره و ارتفاع متوسط ۸۰ سانتی‌متر)، برای اعمال تیمار تنش خشکی انتخاب شدند. این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو سطح تنش خشکی و ۱۴ سطح گونه و پایه‌های رویشی گلابی اجرا شد. اعمال تنش خشکی به روش قطع آبیاری (Withholding irrigation) صورت گرفت؛ به‌گونه‌ای که گونه‌ها و پایه‌های رویشی مورد مطالعه به‌طور تصادفی به دو گروه شاهد (آبیاری منظم هر سه روز یکبار) و گروه تنش خشکی شدید (قطع آبیاری به مدت ۲۱ روز) تقسیم شدند. به عبارت دیگر برای اعمال تنش خشکی، یک مجموعه از دانهال‌ها و پایه‌های رویشی در طول آزمایش به‌صورت منظم و هر سه روز یک‌بار آبیاری شدند و به‌عنوان گروه شاهد در نظر گرفته شدند، در حالی که مجموعه دیگری از دانهال‌ها و پایه‌های رویشی طی ۲۱ روز از زمان آغاز آزمایش بدون آبیاری باقی ماندند و به‌عنوان گروه تنش خشکی شدید در نظر گرفته شدند. این آزمایش از روز اول مرداد ماه ۱۴۰۱ آغاز و در روز ۲۱ مرداد ماه با نمونه‌برداری از گیاهان به پایان رسید. لازم به ذکر است که مبنای پایان آزمایش و زمان نمونه‌برداری، مشاهده علائم بارز تنش خشکی در بیش از ۵۰ درصد برگ‌های گیاهان تحت تیمار بود. این علائم شامل پژمردگی، تغییر رنگ و نکروز برگ‌ها بودند. به‌علاوه محتوای آب خاک دانهال‌ها و پایه‌های رویشی گروه شاهد در طول آزمایش در حدود ۲۹/۶–۲۷ درصد ظرفیت زراعی حفظ شد تا رشد و توسعه طبیعی پایه‌های مورد مطالعه تضمین گردد. برای محاسبه محتوای رطوبت خاک برای هر تیمار، از فرمول ۱ استفاده شد.

فرمول ۱: ((وزن خاک مرطوب – وزن خاک خشک) / وزن خاک خشک) × ۱۰۰

در پایان دورهٔ تنش خشکی (۲۱ روز پس از شروع قطع آبیاری) اندام هوایی و ریشه گیاهان مورد مطالعه از یکدیگر جدا شدند. نمونه‌های گیاهی پس از اندازه‌گیری وزن تر، به مدت دو هفته در آون (مدل UM500، Memmert، آلمان) با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و پس از اطمینان از خشک شدن کامل، وزن خشک آن‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شد.

به‌منظور ارزیابی اثر تنش خشکی بر تغذیه گیاه، غلظت عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم، کلسیم و گوگرد در اندام هوایی و ریشه گونه‌ها و پایه‌های رویشی مورد مطالعه تحت هر دو تیمار (شاهد با آبیاری منظم و تنش خشکی با قطع آبیاری) ارزیابی شد. به این منظور در انتهای آزمایش تعداد ۵ برگ کاملاً توسعه یافته از قسمت میانی شاخه‌ها به همراه نمونه‌های ریشه همان گیاهان برداشت شدند. نمونه‌های مورد استفاده برای اندازه‌گیری عناصر غذایی برگ و ریشه، پس از

شستشو با آب مقطر، به مدت ۷۲ ساعت در آون (مدل، UM 500 کمپانی Memmert، آلمان) در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و در داخل پاکت کاغذی به طور کامل خشک شد. به منظور آماده سازی نمونه‌های برگی و ریشه‌ای جهت اندازه‌گیری غلظت عناصر فسفر، پتاسیم، منیزیم، کلسیم و گوگرد براساس روش رئیسی-منفرد و یاوری (Raeisi Monfared and Yavari, 2020) استفاده گردید. اندازه‌گیری میزان عناصر ذکر شده (به جز نیتروژن) با استفاده از دستگاه پلاسمای جفت شده القائی (مدل Agilent Technologies, Varian 700-es ICP-OES, USA) انجام شد. برای تعیین میزان نیتروژن کل از دستگاه کجلدال و روش هضم نمونه استفاده شد (Rezaei *et al*., 2023b).

داده‌های مربوط به صفات فیزیولوژیک و غلظت عناصر معدنی اندام هوایی و ریشه، داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخهٔ ۹/۲) مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف انجام شد. مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) صورت پذیرفت.

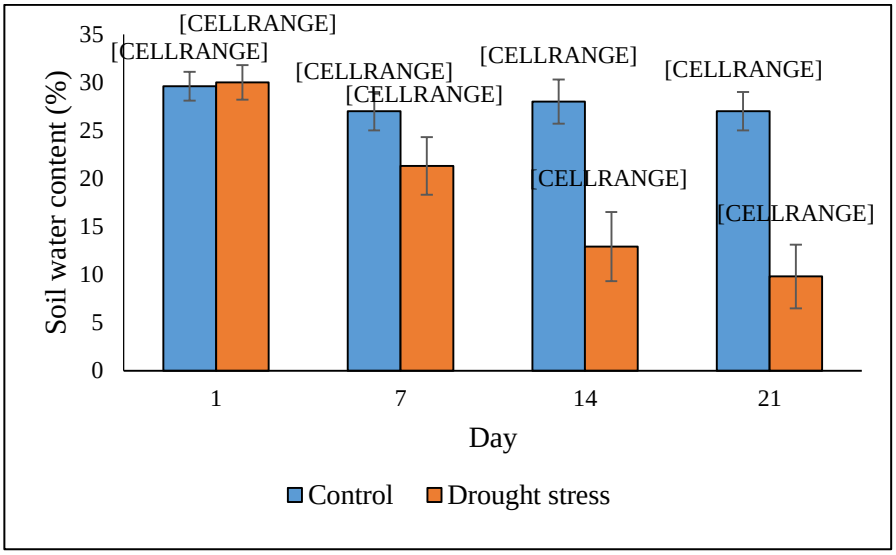
نتایج و بحث

محتوای آب خاک

در شرایط تنش خشکی، محتوای آب خاک در روز پایانی آزمایش برابر با ۰/۵± ۹/۸ درصد ثبت شد (شکل ۱). در طول دورهٔ اعمال تنش خشکی، شدت بروز علائم مورفو-فیزیولوژیک مرتبط با خشکی ارتباط مستقیمی با کاهش محتوای آب خاک داشت، این علائم شامل توقف رشد، تغییر رنگ برگ‌ها به سبز تیره، نکروزه شدن برگ‌ها و در نهایت سبز خشک شدن آن‌ها به دلیل کاهش رطوبت برگ بود. نتایج نشان داد که محتوای آب خاک از ۳۰ درصد ظرفیت زراعی در ابتدای آزمایش، به ۹/۸ درصد در روز پایانی کاهش یافت. کاهش محتوای آب خاک در روزهای اول، هفتم و چهاردهم آزمایش به صورت نزولی و معنی‌دار بود؛ اما از روز چهاردهم تا بیست‌ویکم (پایان آزمایش)، روند کاهش ملایم‌تر شد و اختلاف آماری معنی‌داری بین روز چهاردهم و بیست‌ویکم مشاهده نشد (شکل ۱). در تیمار شاهد (آبیاری منظم) به دلیل انجام آبیاری مستمر و جلوگیری از بروز تنش خشکی، محتوای آب خاک در طول دوره آزمایش در محدوده ۲۷/۶ تا ۲۹ درصد ظرفیت زراعی باقی ماند و اختلاف معنی‌داری بین روزهای مختلف نمونه‌برداری مشاهده نشد (شکل ۱).

وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی

نتایج حاصل نشان داد که تفاوت میان گونه‌ها در اغلب صفات مورد بررسی از لحاظ آماری معنی‌دار بوده و هر پایهٔ، راهبرد متفاوتی را در پاسخ به تنش خشکی اتخاذ کرده است. برهمکنش اثر تنش خشکی با گونه‌ها و پایه‌های رویشی بر صفت وزن خشک اندام هوایی در سطح احتمال پنج درصد و برای صفات وزن تر اندام هوایی و وزن تر و خشک ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). به عبارت دیگر تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار وزن تر اندام هوایی در تمامی گونه‌ها و پایه‌های رویشی مورد مطالعه در سطح احتمال یک درصد شد. بررسی نتایج مقایسه میانگین اثر برهمکنش تیمارها با گونه‌ها و پایه-های رویشی نشان داد که بیشترین وزن تر اندام هوایی (۱۳۴ گرم) در دانهال رقم درگزی تحت شرایط بدون تنش مشاهده شد، همچنین در شرایط تنش خشکی، دانهال های حاصل از ارقام گلابی اروپایی مورد مطالعه شامل دانهال رقم درگزی و گلابی‌های خوج با کد LGI477 و LGI456 به ترتیب با ۸۸/۴۰، ۷۹/۳۳ و ۶۰/۰۸ گرم، بیشترین وزن تر اندام هوایی را داشتند (جدول ۳).



شکل ۱- تغییرات رطوبت خاک در طی تیمار تنش خشکی. ستون‌ها میانگین رطوبت خاک را در روزهای ۱، ۷، ۱٤ و ۲۱ تنش خشکی در گلدان‌های چهارده پایه گلابی همراه با انحراف معیار نشان می‌دهند. حروف متفاوت روی نقاط بیانگر اختلاف معنی‌دار بین زمان‌های نمونه‌برداری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

Figure 1. Changes in soil water content during drought stress treatment. Bars represent the mean soil water content at days 1, 7, 14, and 21 of drought stress in pots of fourteen pear rootstocks ± standard deviation. Different letters above the points indicate significant differences between sampling times using the LSD test at the 5% probability level.

در شرایط شاهد، دانهال حاصل از رقم درگزی با ۷۶/۲۴ گرم بیشترین وزن خشک اندام هوایی را داشت و پس از آن دانهال‌های LGI477 و *P. calleryana* به ترتیب با ۶۱/۳۳ و ۴۸/۰۰ گرم در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند (جدول ۳). همچنین در شرایط تنش خشکی، دانهال رقم گلابی درگزی در کنار دو ژنوتیپ امیدبخش دیگر (LGI477 و LGI456) از گونهٔ *P. communis* بیشترین وزن خشک اندام هوایی را دارا بودند (جدول ۳). کمترین وزن تر اندام هوایی در شرایط تنش (۱۴/۲۸ گرم) و در شرایط فاقد تنش (۲۲/۷۳ گرم) مربوط به پایه‌های رویشی کوئینس BA29 و EMA بود. علاوه بر این، پایهٔ کوئینس EMA با ۸/۰۶ گرم کمترین وزن خشک اندام هوایی را داشت که از نظر آماری با پایهٔ کوئینس BA29 اختلاف معنی‌داری نشان نداد. در میان گونه‌ها، *P. syriaca* نیز به عنوان یکی از گونه‌های کم رشد، در شرایط با آبیاری منظم تنها ۷/۹۳ گرم وزن خشک اندام هوایی تولید کرد (جدول ۳). به طور کلی، تنش خشکی باعث کاهش وزن خشک اندام هوایی در اغلب گونه‌ها و تمام پایه‌های رویشی گردید، اما گونه‌های *P. nivalis*، *P. hyrcana*، *P. syriaca*، *P. betulifolia*، LGI477 و LGI456 تحت تنش خشکی دچار کاهش وزن خشک اندام هوایی نشدند (جدول ۳)، که این مورد نشان دهنده پتانسیل بالای این گونه‌ها در تحمل به تنش خشکی است. بررسی برهمکنش تنش خشکی و گونه‌ها و پایه‌های رویشی بر صفت وزن تر ریشه نشان داد که بیشترین وزن تر ریشه (۱۱۷/۶۷ گرم) در شرایط بدون تنش مربوط به گونه *P. calleryana* و پس از آن به دانهال گلابی درگزی از گونه گلابی اروپایی تعلق داشت. کمترین میزان وزن تر ریشه (۳۰/۳۳ گرم) در شرایط بدون تنش در گونه *P. pashia* مشاهده شد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که هیبرید بین گونه‌ای Q1 با ۱۰۹/۶۳ گرم، بیشترین وزن تر ریشه را تولید کرد و پس از آن دانهال رقم درگزی در رتبه بعدی قرار گرفت. در مقابل، پایهٔ نیمه پاکوتاه کننده پیرودوارف کمترین وزن تر

(۲۳/۲۰ گرم) و خشک (۶/۹۸ گرم) ریشه را داشت (جدول ۳). به جز گونه‌های *P. pashia* و LGI477 از گونهٔ *P. communis* که تحت تنش خشکی کاهش معنی‌داری در وزن تر ریشه نشان ندادند، سایر گونه‌ها و پایه‌ها کاهش قابل‌توجهی در این صفت داشتند (جدول ۳). تغییرات وزن خشک ریشه در گونهٔ *P. pashia* و پایهٔ BA29 در مواجهه با تنش خشکی، از نظر آماری معنی‌دار نبود. جالب توجه این که تنش خشکی باعث افزایش معنی‌دار صفت وزن خشک ریشه در گونه‌های *P. betulifolia*، *P. amygdaliformis*، Q1 (*Pyrus* spp) و LGI477 از گونه *P. communis* شد (جدول ۳). تنش خشکی یکی از عوامل محدود کننده رشد و تولید گلابی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌آید. این تنش از طریق کاهش فتوسنتز، کاهش تورژسانس سلولی، کاهش سطح برگ، و افزایش نیاز به مصرف انرژی برای تنظیم اسمزی و تولید هورمون‌هایی مانند اسید آبسیزیک، به طور مستقیم بر رشد و عملکرد گیاه اثر منفی می گذارد (Chaves and Oliveira, 2004 ; Tatari *et al.*, 2020). رشد گیاه در سطح مورفولوژیک به‌شدت تحت تأثیر خشکی قرار می‌گیرد و اندام هوایی مانند شاخه، برگ و ریشه که نقش کلیدی در سازگاری به تنش دارند، بیش از سایر اندام ها تحت تأثیر قرار می‌گیرند (Sircelj *et al.*, 2007). وجود ریشه‌های عمیق و ضخیم این امکان را فراهم می‌آورد که گیاه بتواندآب را از اعماق بیشتر خاک جذب کرده و تحمل نسبی در برابر خشکی از خود نشان دهد (Farooq *et al.*, 2012).

نتایج این پژوهش بیانگر آن است که گونه‌ها و پایه‌های رویشی مورد مطالعه از نظر وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، در شرایط تنش خشکی تفاوت‌های قابل توجهی داشتند. هیبرید بین گونه‌ای Q1 و رقم درگزی بیشترین میزان وزن تر ریشه را تولید کردند و پایهٔ نیمه پاکوتاه کننده پیرودوارف کمترین میزان وزن تر و خشک ریشه را دارا بود. این یافته با مشاهدات میدانی از باغ‌های قدیمی گلابی در دشت قزوین که در آن پایه Q1 به دلیل قطر طوقه بیشتر و حجم بالاتر ریشه عملکرد مطلوبی داشت، همخوانی کامل دارد. همچنین نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در برخی از گونه‌ها از جمله *P. nivalis*، *P. hyrcana*، *P. syriaca*، *P. betulifolia* و دانهال-های حاصل از گونه *P.communis* با نام LGI477 و LGI456 وزن خشک اندام هوایی در شرایط تنش خشکی حتی بیشتر از شرایط آبیاری منظم بود، این امر احتمالاً نشان دهنده توانایی بالای فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و مولکولی این ژنوتیپ‌ها در سازگاری با تنش خشکی است. از سوی دیگر گونه‌ها و پایه‌هایی مانند *P. pashia* ، *P. betulifolia*، *P. amygdaliformis*، هیبرید بین گونه‌ای Q1، ژنوتیپ امیدبخش خوج با نام LGI477 و پایهٔ کوئینس BA29 در شرایط تنش خشکی دارای وزن خشک ریشه بیشتری نسبت به شرایط شاهد بودند که حاکی از قدرت بالای رشد ریشه و راهبرد سازگاری مؤثرتر در شرایط کم‌آبی است. به‌طور کلی، این نتایج با گزارش‌های پیشین مبنی بر نقش تعیین‌کننده سیستم ریشه در تحمل خشکی مطابقت دارد؛ به‌گونه‌ای که گیاهان دارای شبکه ریشه‌ای عمیق‌تر و گسترده‌تر، توانایی بیشتری در بهره‌برداری از منابع آب خاک داشته و سازگاری بالاتری به شرایط کمبود آب را نشان می‌دهند (Karbasi and Arzani, 2021).

جدول ۳- نتایج آزمون F و مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش خشکی، گونه‌ها و ارقام مورد بررسی بر وزن تازه و خشک شاخه‌ها و ریشه‌ها. داده‌ها میانگین ۱۰ تکرار را نشان می‌دهند.

Table 3. Results of the *F-test* and mean comparison for the interaction effects of drought stress, species, and studied clones on fresh and dry weight of shoots and roots. Data represent the mean of 10 replications.

Treatments	Species / Clone	Shoot fresh weight (g)	Shoot dry weight (g)	Root fresh weight (g)	Root dry weight (g)
Control	*P. nivalis*	53.00f-i	23.67g	65.37ef	31.69fg
	P. pashia	42.00kl	20.67g-i	30.33lm	11.47o
	P. hyrcana	44.67j-l	21.55gh	70.33e	27.62h-j
	P. syriaca	26.67op	7.93m	51.97h	28.67g-i
	P. betulifolia	58.00e-g	36.67ef	55.53gh	18.10m
	P. calleryana	63.33e	48.00d	117.67a	39.47cd
	P. amygdaliformis	33.39mn	18.08g-j	63.33ef	19.30lm
	Q1 (*Pyrus* spp)	54.33f-h	39.67ef	109.63b	36.23de
	P. communis cv. Dargazi	134.00a	76.24a	114.33ab	59.12a
	P. communis cv. LGI477	101.41b	61.33c	54.67gh	19.02m
	P. communis cv. LGI456	76.63d	42.24d-f	54.37gh	24.25jk
	Clone of Pyrodwarf	34.00mn	16.13h-k	35.67i-l	13.41o
	Clone of EMA	22.73pq	10.04k-m	52.63gh	31.00gh
	Clone of BA29	22.96p	13.27j-m	95.67c	26.35i-k
Drought stress	*P. nivalis*	45.92i-l	35.57f	41.67i	23.09k
	P. pashia	29.09n-p	15.83h-l	32.43kl	11.96o
	P. hyrcana	38.84lm	22.55gh	29.03lm	11.68o
	P. syriaca	15.67qr	9.00lm	34.10j-l	14.07no
	P. betulifolia	51.41g-j	38.82ef	39.50i-k	25.11i-k
	P. calleryana	55.46f-h	39.67ef	82.33d	35.01ef
	P. amygdaliformis	24.99p	16.00h-l	49.73h	25.29i-k
	Q1 (*Pyrus* spp)	48.88h-k	37.60ef	78.30d	41.88c
	P. communis cv. Dargazi	88.40c	70.00ab	65.07ef	47.37b
	P. communis cv. LGI477	79.33d	64.97bc	59.27fg	22.71kl
	P. communis cv. LGI456	60.08ef	43.18de	39.43i-k	18.77m
	Clone of Pyrodwarf	28.00n-p	14.24i-m	23.20m	6.98p
	Clone of EMA	15.33r	8.06m	42.33i	17.46mn
	Clone of BA29	14.28r	8.14m	39.67ij	24.61jk
F-test		**	*	**	**
CV (%)		8.95	14.00	7.25	8.87

علائم ns، * و ** به ترتیب نشان‌دهنده غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵، و معنی‌دار در سطح احتمال *۱ درصد* هستند. مقادیر میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) می‌باشد.

ns, * and **: Non-significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively
Means followed by the same letters are not significantly different at the 5% probability level, based on the Least Significant Difference (LSD) test.

میزان عناصر غذایی ریشه و برگ

یافته‌های پژوهش نشان داد که برهمکنش اثر تنش خشکی و گونه‌ها و پایه‌های رویشی بر میزان عناصر غذایی اندازه‌گیری شده در ریشه و برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). بررسی‌ها نشان داد که تنش خشکی موجب کاهش میزان نیتروژن ریشه در تمامی گونه‌ها و پایه‌های مورد مطالعه شد، با این وجود در گونه‌های *P. nivalis*، *P. syriaca*، Q1، دانهال رقم درگزی، ژنوتیپ LGI477 و پایه رویشی BA29 این کاهش مشاهده نشد. بیشترین میزان نیتروژن ریشه در شرایط تنش خشکی در گونه *P. nivalis* با میزان ۲/۲۰ درصد مشاهده شد، در حالی که گونهٔ *P. amygdaliformis* با یک درصد کمترین درصد نیتروژن ریشه را داشت (جدول ۴). در میان پایه‌های تجاری پیرودوارف، BA29 و EMA تفاوت معنی‌داری از نظر واکنش به تنش خشکی در میزان نیتروژن ریشه مشاهده نشد (جدول ۴). علاوه بر این تنش خشکی نتوانست میزان نیتروژن ریشه را در گونه‌های *P. nivalis*، *P. syriaca*، دانهال درگزی و دانهال ژنوتیپ امید بخش LGI477 از سری گونه‌های گلابی اروپایی، نسبت به شرایط آبیاری منظم کاهش دهد، اما در سایر گونه‌ها و پایه‌های رویشی میزان نیتروژن ریشه در مواجهه با تنش خشکی کاهش یافت (جدول ۴). بیشترین نیتروژن برگ (۴/۰۱ درصد) در گونهٔ *P. nivalis* تحت تنش خشکی و کمترین مقدار آن (۱/۹۸ درصد) در پایه رویشی کوئینس EMA مشاهده شد (جدول ۴).

در خصوص مقدار فسفر، تنش خشکی اثر معنی‌داری در

سطح احتمال یک درصد بر غلظت فسفر ریشه داشت؛ به‌گونه ای‌که دامنه تغییرات آن در گونه‌ها و پایه‌ها بین ۰/۲۲–۰/۱۰ درصد بود (جدول ۴). میزان فسفر ریشه در بین تمامی گونه‌ها و پایه‌های رویشی به جز گونه‌های *P. hyrcana*، *P. calleryana* و دانهال LGI477 از گونهٔ گلابی اروپایی، افزایش یافت. در حالی که دو پایه کوئینس (BA29 و EMA)، تفاوت معنی‌داری بین تیمار شاهد و تنش خشکی نشان ندادند. بیشترین فسفر برگ (۰/۹ درصد) در گونه‌های *P. amygdaliformis* و *P. nivalis* و کمترین آن (۰/۰۹ درصد) در دانهال رقم درگزی مشاهده شد. در گونه‌های *P. hyrcana*، *P. syriaca* و گلابی امید بخش خوج با نام LGI456 اختلاف معنی‌داری بین شرایط شاهد و تنش وجود نداشت (جدول ۴). در مورد پتاسیم، نتایج نشان داد که پایهٔ رویشی BA29 بیشترین غلظت پتاسیم ریشه (۱/۰۲ درصد) را در شرایط تنش خشکی حفظ کرد، در حالی که کمترین مقدار آن به گونه *P. nivalis* اختصاص یافت. الگوی تغییرات پتاسیم ریشه در گونه‌ها متنوع بود؛ به‌گونه‌ای که در گونه‌های *P. nivalis*، *P. betulifolia*، Q1، دانهال درگزی و پایهٔ پیرودوارف کاهش یافت، اما در سایر گونه‌ها افزایش نشان داد. بیشترین پتاسیم برگ (۱/۸۲ درصد) در گونه P. syriacaو کمترین مقدار (۰/۸۳ درصد) در دانهال رقم درگزی و ژنوتیپ LGI456 مشاهده شد (جدول ۴).

جدول ٤- نتایج آزمون F و مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش خشکی، گونه‌ها و ارقام مورد بررسی بر محتوای عناصر غذایی ریشه و برگ. داده‌ها میانگین ۳ تکرار را نشان می‌دهند.

Table 4. Results of the F-test and mean comparison for the interaction effects of drought stress, species, and studied rootstocks on root and shoot nutrient content. Data represent the mean of 3 replications.

Treatments	Species / Clone	Root Nitrogen (percent)	Shoot Nitrogen (percent)	Root Phosphorus (percent)	Shoot Phosphorus (percent)	Root Potassium (percent)	Shoot Potassium (percent)
Control	*P. nivalis*	1.28^{ef}	2.57^{e-g}	0.08^{k}	0.08^{o}	0.54^{j}	0.38^{o}
	P. pashia	1.78^{c}	3.14^{bc}	0.09^{j}	0.15^{c}	0.44^{r}	1.64^{d}
	P. hyrcana	2.29^{a}	4.10^{a}	0.24^{a}	0.14^{de}	0.57^{i}	0.82^{j}
	P. syriaca	1.17^{f-i}	2.09^{ij}	0.14^{g}	0.13^{fg}	0.51^{im}	1.76^{c}
	P. betulifolia	1.15^{g-k}	2.17^{h-j}	0.08^{k}	0.12^{g-i}	0.56^{i}	2.15^{a}
	P. calleryana	1.16^{f-j}	2.17^{h-j}	0.12^{i}	0.14^{de}	0.47^{pq}	0.95^{i}
	P. amygdaliformis	1.15^{g-k}	2.52^{e-h}	0.10^{j}	0.09^{o}	0.45^{r}	1.52^{e}
	Q1 (*Pyrus* spp)	1.18^{f-i}	2.22^{g-i}	0.08^{k}	0.11^{kl}	0.52^{kl}	0.56^{n}
	P. communis cv. Dargazi	1.13^{h-k}	2.19^{h-j}	0.12^{i}	0.11^{kl}	0.53^{jk}	1.63^{d}
	P. communis cv. LGI477	1.24^{f-h}	2.41^{f-i}	0.15^{ef}	0.12^{i-k}	0.78^{d}	0.59^{mn}
	P. communis cv. LGI456	1.14^{h-k}	2.18^{h-j}	0.12^{i}	0.11^{kl}	0.26^{u}	0.62^{lm}
	Clone of Pyrodwarf	1.13^{h-k}	2.14^{ij}	0.08^{k}	0.12^{h-j}	0.74^{e}	0.63^{lm}
	Clone of EMA	1.12^{j-l}	1.98^{j}	0.13^{g}	0.13^{fg}	0.32^{qr}	0.74^{k}
	Clone of BA29	1.39^{e}	2.63^{d-f}	0.19^{d}	0.24^{b}	0.54^{j}	1.51^{e}
Drought stress	*P. nivalis*	2.20^{a}	4.01^{a}	0.12^{h}	0.90^{a}	0.40^{s}	1.29^{f}
	P. pashia	1.53^{d}	2.99^{cd}	0.22^{b}	0.10^{mn}	0.66^{g}	0.85^{j}
	P. hyrcana	1.96^{b}	3.42^{b}	0.19^{c}	0.14^{de}	1.00^{b}	1.55^{e}
	P. syriaca	1.27^{e-g}	2.40^{f-i}	0.15^{g}	0.13^{gh}	0.92^{c}	1.82^{b}
	P. betulifolia	0.18^{i-l}	0.15^{f-j}	0.80^{j}	0.74^{mn}	0.14^{qr}	0.10^{i}
	P. calleryana	1.03^{kl}	2.39^{f-i}	0.10^{j}	0.10^{mn}	0.66^{g}	0.66^{l}
	P. amygdaliformis	1.00^{l}	2.41^{f-i}	0.11^{i}	0.90^{a}	0.63^{c}	0.93^{i}
	Q1 (*Pyrus* spp)	1.24^{f-h}	2.86^{c-e}	0.20^{c}	0.10^{mn}	0.47^{op}	1.02^{h}
	P. communis cv. Dargazi	1.17^{f-i}	2.22^{g-j}	0.16^{e}	0.09^{o}	0.49^{op}	0.83^{j}
	P. communis cv. LGI477	1.79^{c}	3.09^{bc}	0.14^{g}	0.14^{de}	0.79^{d}	1.14^{g}
	P. communis cv. LGI456	1.06^{i-l}	2.32^{f-j}	0.12^{i}	0.11^{kl}	0.50^{mn}	0.83^{j}
	Clone of Pyrodwarf	1.06^{i-l}	2.43^{f-i}	0.15^{ef}	0.10^{mn}	0.73^{f}	1.02^{h}
	Clone of EMA	1.12^{j-l}	2.26^{g-j}	0.14^{g}	0.15^{cd}	0.72^{f}	1.01^{h}
	Clone of BA29	1.21^{f-h}	2.21^{g-j}	0.18^{d}	0.13^{fg}	1.02^{a}	0.94^{i}
F-test		**	**	**	**	**	**
CV (%)		5.82	8.63	4.33	2.96	1.43	2.95

علائم ns، * و ** به ترتیب نشان‌دهنده غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال پنج، و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد هستند. مقادیر میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) می‌باشد.

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

Means followed by the same letters are not significantly different at the 5% probability level, based on the Least Significant Difference (LSD) test.

بررسی برهم‌کنش گونه‌ها و پایه‌های رویشی با تنش خشکی نشان داد که ژنوتیپ LGI477 با ۰/۹۵ درصد بیشترین میزان کلسیم ریشه را در بین پایه‌های مورد مطالعه داشت، که این مقدار با پایه پیرودوارف در شرایط آبیاری مناسب اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۵). بیشترین میزان گوگرد ریشه (۰/۹۰ درصد) در پایهٔ رویشی کوئینس EMA مشاهده شد که از این نظر با سایر گونه‌ها و پایه‌ها تفاوت معنی‌داری داشت (جدول ۵). دانهال گونه‌های *P. syriaca*، *P. betulifolia*، *P. amygdaliformis* و ژنوتیپ LGI477 اختلاف معنی‌داری از نظر میزان گوگرد ریشه تحت تنش خشکی نشان ندادند (جدول ۵).

میزان کلسیم و منیزیم برگ در برهم‌کنش گونه‌ها با تنش خشکی متفاوت بود؛ به‌گونه‌ای که پایهٔ رویشی کوئینس EMA بیشترین کلسیم و ژنوتیپ *P. betulifolia* بیشترین منیزیم برگ را حفظ کردند. بررسی میزان گوگرد نیز نشان داد که پایه کوئینس EMA به‌طور معنی‌داری مقدار بیشتری گوگرد در برهم‌کنش با تنش خشکی داشت، در حالی‌که ژنوتیپ‌های Q1 (*Pyrus* spp.)، *P. pashia* و پایه BA29 کمترین میزان جذب گوگرد را نشان دادند و تفاوت معنی‌داری میان آن‌ها وجود نداشت (جدول ۵).

در شرایط تنش خشکی، دانهال رقم درگزی بیشترین و گونهٔ *P. nivalis* کمترین میزان منیزیم ریشه را داشتند، در حالی‌که پایه‌های کوئینس EMA و BA29 از نظر منیزیم ریشه تفاوت معنی‌داری نداشتند. پایهٔ کوئینس EMA بیشترین گوگرد ریشه را در بین پایه‌ها تحت تنش خشکی دارا بود (جدول ۵). به طور کلی، اثر تنش خشکی بر منیزیم و گوگرد نسبت به سایر عناصر کمتر محسوس بود. نتایج آزمون آماری نشان داد که تنش خشکی اثر معنی‌داری بر نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم داشت، اما اثر آن بر گوگرد و منیزیم معنی‌دار نبود. ژنوتیپ LGI477 بیشترین میزان کلسیم ریشه را در شرایط تنش خشکی داشت که از نظر آماری با پایهٔ پیرودوارف تفاوت معنی‌داری نشان نداد (جدول ۵). بیشترین گوگرد ریشه در پایهٔ کوئینس EMA مشاهده شد، در حالی که گونه‌های *P. syriaca*، *P. betulifolia*، *P. amygdaliformis* و ژنوتیپ LGI477 تحت تنش خشکی از نظر گوگرد ریشه تفاوت معنی‌داری نداشتند. در برگ، پایهٔ کوئینس EMA بیشترین کلسیم و ژنوتیپ *P. betulifolia* بیشترین منیزیم را تحت تنش خشکی حفظ کردند. همچنین، پایهٔ کوئینس EMA بیشترین گوگرد برگ را داشت، در حالی که ژنوتیپ‌های Q1، *P. pashia* و پایهٔ BA29 کمترین میزان جذب گوگرد را تحت تنش خشکی نشان دادند (جدول ۵).

توانایی گیاه در جذب و بهره‌برداری بهینه از عناصر غذایی در شرایط تنش خشکی، یکی از ویژگی‌های کلیدی برای انتخاب ژنوتیپ‌ها و پایه‌ها در برنامه‌های به‌نژادی محسوب می‌شود، به طوری که درختان گلابی که دارای کارآیی بالاتری در جذب مواد مغذی از خاک‌های کم‌آب هستند، می‌توانند تا حد زیادی اثرات منفی تنش خشکی را جبران کنند. با این حال، تنش کم‌آبی موجب تغییر در دسترسی، انتقال و توزیع عناصر غذایی در گیاه شده و در نهایت بر کیفیت و کمیت محصول نهایی تأثیر می‌گذارد (Maleki Asayesh *et al.*, 2023). یافته‌های مطالعات پیشین نشان داده است که دسترسی به عناصر غذایی در شرایط خشکی به عوامل متعددی چون ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، نوع پایه مورد استفاده، میزان ماده آلی خاک و pH آن بستگی دارد. در چنین شرایطی، کاهش کارآیی ریشه در جذب عناصر ضروری، همراه با تغییر در فرآیندهای متابولیک، می‌تواند منجر به عدم تعادل تغذیه‌ای در گیاه شود. بنابراین، بهینه‌سازی راهبردهای مدیریتی مانند انتخاب پایه‌های مقاوم در برنامه‌های به‌نژادی، بهبود ویژگی‌های خاک و کاربرد روش‌های کارآمد آبیاری، می‌تواند نقش مهمی در پایداری تولید محصولات باغی در مناطق خشک ایفا کند (Farhadi *et al.*, 2020). یکی

از دلایل کاهش میزان جذب عناصر غذایی در شرایط خشکی، کاهش رشد و توسعهٔ ریشه گیاهان است، به‌طوری که Martins و همکاران (۲۰۰۳)، در پژوهشی نشان دادند که تنش آبی در ذرت سبب توقف فعالیت ریشه‌های مسن‌تر شده و جذب عناصر غذایی صرفاً توسط نوک ریشه‌ها صورت گرفت. همچنین گزارش‌ها نشان می‌دهد که پایه‌های مختلف پسته واکنش‌های متفاوتی نسبت به جذب عناصر غذایی در شرایط تنش خشکی دارند، برای مثال، Ferguson (1995)، گزارش کرد که پایه آتلانتیکا نسبت به پایهٔ اینتگیرما، علائم کمتری از کمبود عناصر روی، بر و کلسیم نشان داد.

گزارش‌ها نشان داده‌اند که در شرایط تنش خشکی، کاهش سرعت تعرق موجب کاهش انتقال نیتروژن از ریشه به اندام‌های هوایی شده و در نتیجه جذب نیتروژن را محدود می‌کند (Tanguilig *et al.*, 1987). جذب فسفر نیز همانند نیتروژن تحت تأثیر خشکی کاهش می‌یابد و این امر سبب اختلال در فرآیندهای متابولیکی سلول می‌شود. فسفر ترکیبی از اسیدهای نوکلئیک، فسفولیپیدها، فسفوپروتئین‌ها، دی نوکلئوتیدها و آدنوزین تری فسفات است. از این رو، فسفر برای فرآیندهایی از جمله ذخیره و انتقال انرژی، فتوسنتز، تنظیم برخی آنزیم‌ها و انتقال کربوهیدرات‌ها مورد نیاز گیاه است (Marschner, 2012).

پتاسیم نیز در فرآیندهای متعدد فیزیولوژیک از جمله فتوسنتز، فعال‌سازی آنزیم‌ها، سنتز پروتئین، تنظیم اسمزی و آماس سلولی، هموستازی یونی، وضعیت انرژی و همچنین رقابت با سدیم در شرایط شوری اهمیت دارد. علاوه بر این، پاسخ گیاه به تنش خشکی از طریق بستن روزنه‌ها وابسته به تنظیم غلظت پتاسیم است (Fournier *et al.*, 2005). بالا بودن میزان پتاسیم برگ در گونه‌های مختلف تحت تنش خشکی طولانی‌مدت می‌تواند بیانگر نقش آن در تنظیم اسمزی، حفظ تورژسانس و کاهش اتلاف آب در شرایط تنش باشد.

کلسیم نیز به عنوان یکی از عناصر کلیدی در سازگاری با تنش خشکی عمل می‌کند و نقشی تنظیمی و تعدیلی در این فرآیند دارد (da Silva *et al.*, 2011). این عنصر علاوه بر ایفای نقش‌های ساختاری در دیوارهٔ سلولی و غشاها، به عنوان پیام‌رسان درون‌سلولی در سیتوزول نیز مورد نیاز است (Marschner, 2012).

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

تحلیل مؤلفه‌های اصلی به‌منظور ارزیابی اثر تنش خشکی بر میزان عناصر غذایی ریشه و اندام هوایی پایه‌های مختلف گلابی نشان داد که دو مؤلفه نخست (F1 و F2) به‌ترتیب با ۲۰/۳۹ و ۱۶/۲۶ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین می‌کنند (شکل ۲). بای‌پلات حاصل بیانگر توزیع الگوی توزیع متمایز صفات فیزیولوژیک و عناصر غذایی اندازه‌گیری شده در پاسخ به تنش خشکی بود. صفات مرتبط با عناصر معدنی ریشه و اندام هوایی، شامل کلسیم (A و G)، پتاسیم (B و H)، منیزیم (I و C)، فسفر (J و D)، گوگرد (E و K) و نیتروژن (L و F)، الگوهای همبستگی متفاوتی با مؤلفه‌های اصلی نشان دادند. علاوه بر این، صفات مرتبط با زیست‌تودهٔ گیاه، شامل وزن تر و خشک اندام‌های هوایی و ریشه (P، O، N و M)، نیز از عوامل کلیدی در تفکیک پاسخ پایه‌های مختلف به تنش بودند. پایه‌های با تحمل بالاتر به تنش خشکی، همبستگی مثبت با نیتروژن، کلسیم و منیزیم در برگ و ریشه داشتند که بیانگر بهبود سازوکارهای تنظیم اسمزی و افزایش کارآیی جذب عناصر غذایی در شرایط تنش است. این در حالی است که پایه‌های حساس به خشکی با کاهش وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی، همراه با کاهش محتوای برخی عناصر غذایی کلیدی، ارتباط نزدیکی داشتند که بیانگر تأثیر منفی تنش بر رشد و توسعهٔ فیزیولوژیک آن‌ها است. علاوه بر این، بردارهای هم‌راستا نشان دادند که برخی عناصر معدنی در برگ و ریشه الگوهای همبستگی مشابهی دارند که می‌تواند بیانگر نقش هم‌افزایی این عناصر در تحمل گیاه به شرایط تنش‌زا باشد (شکل ۲).

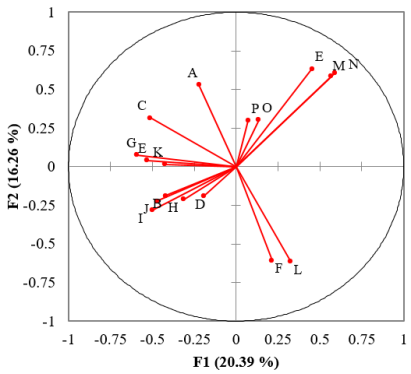
جدول ۵- نتایج آزمون F و مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش خشکی، گونه‌ها و ارقام مورد بررسی بر محتوای عناصر غذایی ریشه و برگ. داده‌ها میانگین سه تکرار را نشان می‌دهند.

Table 5. Results of the F-test and mean comparison for the interaction effects of drought stress, species, and studied rootstocks on root and shoot nutrient content. Data represent the mean of three replications.

Treatments	Species / Clone	Root Magnesium (percent)	Shoot Magnesium (percent)	Root Calcium (percent)	Shoot Calcium (percent)	Root Sulfur (percent)	Shoot Sulfur (percent)
Control	*P. nivalis*	0.11^{j}	0.57^{b}	0.46^{k}	0.62^{j-m}	0.06^{k}	0.08^{j-l}
	P. pashia	0.07^{a}	0.16^{bc}	0.35^{m}	0.49^{o}	0.06^{k}	0.08^{i-l}
	P. hyrcana	0.14^{efg}	0.08^{lm}	0.77^{c}	0.51^{no}	0.14^{d}	0.06^{l}
	P. syriaca	0.19^{b}	0.14^{h-j}	0.82^{b}	1.43^{b}	0.12^{e}	0.13^{b-d}
	P. betulifolia	0.13^{gh}	0.13^{j-k}	0.45^{k}	0.98^{ef}	0.08^{i}	0.09^{h-k}
	P. calleryana	0.11^{j}	0.15^{g-i}	0.70^{ef}	1.07^{e}	0.08^{j}	0.12^{c-f}
	P. amygdaliformis	0.12^{i}	0.05^{n}	0.71^{e}	0.52^{m-o}	0.10^{g}	0.12^{c-f}
	Q1 (*Pyrus* spp)	0.08^{l}	0.26^{d}	0.43^{l}	1.26^{j-l}	0.09^{h}	0.10^{g-i}
	P. communis cv. Dargazi	0.18^{c}	0.09^{l}	0.74^{b}	0.77^{hi}	0.13^{d}	0.11^{e-g}
	P. communis cv. LGI477	0.09^{l}	0.06^{mn}	0.48^{j}	0.66^{ik}	0.08^{i}	0.08^{j-l}
	P. communis cv. LGI456	0.11^{j}	0.17^{g}	0.67^{g}	1.18^{d}	0.11^{f}	0.09^{h-k}
	Clone of Pyrodwarf	0.14^{gh}	0.23^{e}	0.94^{a}	1.74^{a}	0.11^{f}	0.14^{a-c}
	Clone of EMA	0.06^{o}	0.19^{f}	0.34^{m}	1.30^{c}	0.06^{l}	0.15^{ab}
	Clone of BA29	0.18^{c}	0.15^{g-i}	0.94^{a}	0.64^{j-l}	0.14^{c}	0.12^{c-f}
Drought stress	*P. nivalis*	0.07^{m}	0.04^{n}	0.45^{k}	0.61^{k-n}	0.06^{k}	0.11^{e-g}
	P. pashia	0.10^{k}	0.13^{jk}	0.50^{j}	0.65^{j-l}	0.13^{e}	0.07^{i-l}
	P. hyrcana	0.14^{efg}	0.31^{c}	0.45^{j}	1.02^{ef}	0.08^{j}	0.12^{d-g}
	P. syriaca	0.11^{j}	0.16^{gh}	0.67^{g}	1.34^{bc}	0.10^{g}	0.10^{g-i}
	P. betulifolia	0.11^{j}	0.59^{a}	0.74^{d}	0.92^{fg}	0.10^{g}	0.10^{g-j}
	P. calleryana	0.08^{l}	0.13^{jk}	0.71^{e}	1.03^{e}	0.09^{h}	0.10^{g-j}
	P. amygdaliformis	0.13^{h}	0.09^{l}	0.69^{f}	0.83^{gh}	0.10^{g}	0.11^{gh}
	Q1 (*Pyrus* spp)	0.10^{k}	0.08^{l}	0.55^{i}	0.56^{l-o}	0.13^{e}	0.07^{kl}
	P. communis cv. Dargazi	0.20^{a}	0.05^{n}	0.14^{n}	0.52^{m-o}	0.17^{b}	0.09^{h-k}
	P. communis cv. LGI477	0.17^{d}	0.20^{f}	0.95^{a}	0.98^{ef}	0.10^{g}	0.13^{b-e}
	P. communis cv. LGI456	0.13^{gh}	0.05^{n}	0.75^{cd}	0.79^{hi}	0.09^{h}	0.14^{a-d}
	Clone of Pyrodwarf	0.17^{d}	0.11^{k}	0.83^{b}	0.71^{ij}	0.13^{d}	0.08^{i-l}
	Clone of EMA	0.19^{b}	0.27^{d}	0.63^{h}	1.83^{a}	0.90^{a}	0.16^{a}
	Clone of BA29	0.18^{c}	0.15^{gh}	0.66^{g}	0.85^{gh}	0.15^{c}	0.07^{kl}
F-test		**	**	**	**	**	**
CV (%)		2.17	7.70	1.89	6.64	1.76	11.86

علائم ns، * و ** به ترتیب نشان‌دهنده غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵، و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد هستند. مقادیر میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) می‌باشد.

ns, * and **: Non-significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively
Means followed by the same letters are not significantly different at the 5% probability level, based on the Least Significant Difference (LSD) test.

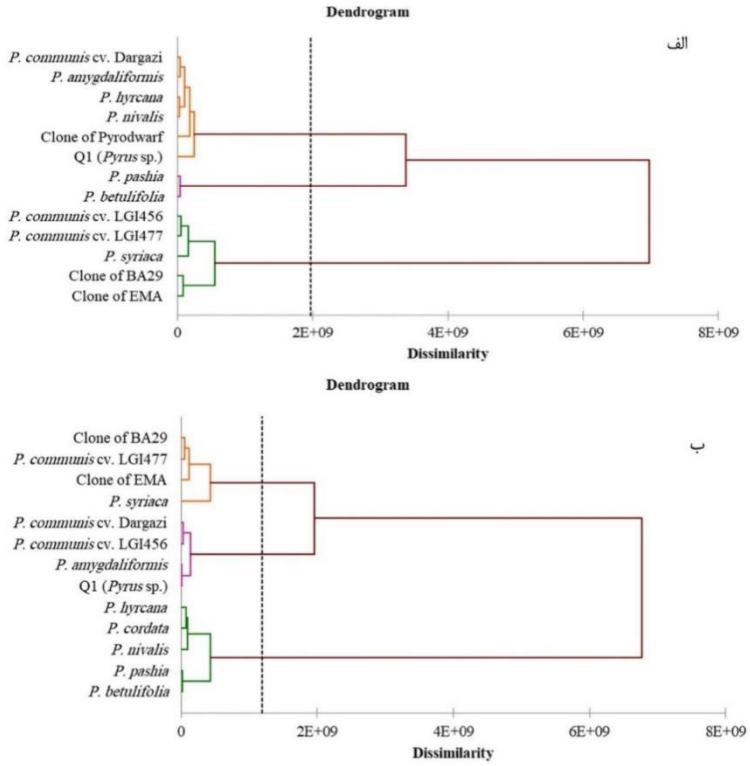


شکل ۲- تحلیل بای‌پلات گونه‌ها و پایه‌های مورد مطالعه . A:کلسیم ریشه، B: پتاسیم ریشه، C:منیزیم ریشه، D:فسفر ریشه، E: گوگرد ریشه، F:نیتروژن ریشه، G:کلسیم برگ، H:پتاسیم برگ، I:منیزیم برگ، J:فسفر برگ، K:گوگرد برگ، L: نیتروژن برگ، M:وزن‌تر ساقه، N:وزن خشک ریشه، O: وزن‌تر ریشه، P:وزن خشک ساقه

Figure 2. Biplot analysis of the studied species and rootstocks. A: Root calcium, B: Root potassium, C: Root magnesium, D: Root phosphorus, E: Root sulfur, F: Root nitrogen, G: Leaf calcium, H: Leaf potassium, I: Leaf magnesium, J: Leaf phosphorus, K: Leaf sulfur, L: Leaf nitrogen, M: Shoot fresh weight, N: Root dry weight, O: Root fresh weight, P: Shoot dry weight

آنالیز خوشه‌بندی

نتایج تجزیه خوشه‌ای گونه‌ها و پایه‌های رویشی بر اساس دندوگرام ارائه شده (شکل ۳-الف)، نشان‌دهنده تنوع ژنتیکی قابل‌توجه در میان نمونه‌های مورد بررسی بود. گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها در سه خوشه متمایز بیانگر روابط خویشاوندی آن‌ها است؛ به‌گونه‌ای که گونه‌هایی نظیر *P. hyrcana*، *P. amygdaliformis*، *P. communis* cv. Dargazi و *P. nivalis* قرابت ژنتیکی بیشتری با یکدیگر داشتند، در حالی که گونه‌هایی مانند *P. betulifolia* و *P. pashia*، فاصلهٔ ژنتیکی بیشتری از سایر ارقام نشان دادند. همچنین، خوشه‌ای متشکل از *P. communis* cv. LGI477، *P. communis* cv. LGI456 و *P. syriaca* نیز به وضوح از سایر گروه‌ها تفکیک شده است (شکل ۳-الف). دندروگرام حاصل از شرایط تنش خشکی نیز گونه‌ها و پایه‌های رویشی را در سه خوشه متمایز گروه‌بندی کرد (شکل ۳-ب). در این شرایط، پایه‌هایی مانند EMA، *P. communis* cv. LGI477، BA29 و *P. syriaca* در یک خوشه قرار گرفتند که نشان‌دهنده شباهت ژنتیکی و احتمالاً پاسخ‌های مشابه آن‌ها به خشکی است. در مقابل، گونه‌هایی مانند *P. betulifolia* و *P. pashia* در یک گروه مجزا قرار گرفتند، که فاصله ژنتیکی بیشتر آن‌ها می‌تواند بیانگر ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن‌ها در سازگاری به خشکی باشد (شکل ۳-ب).



شکل ۳- تحلیل خوشه‌ای گونه‌ها و کلون‌های مورد مطالعه: (الف) شرایط آبیاری معمول (شاهد)، (ب) شرایط قطع آبیاری (تنش خشکی)

Figure 3. Cluster analysis of the studied species and clones: (A) normal irrigation conditions (control), (B) withholding irrigation conditions (drought stress)

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که گونه‌ها و پایه‌های رویشی گلابی واکنش‌های متفاوتی به تنش خشکی داشته و از نظر جذب و نگهداشت عناصر معدنی ضروری تحت شرایط کم‌آبی تفاوت قابل‌توجهی نشان دادند. مقایسه میانگین صفات بیانگر تفاوت قابل‌توجه بین گونه‌ها و پایه‌های رویشی در واکنش به خشکی بود. ژنوتیپ پایه‌هایی که در شرایط آبیاری منظم وزن تر و خشک کمتری داشتند، در شرایط خشکی نیز کاهش رشد بیشتری نشان دادند. در میان پایه‌های پررشد، اگرچه دانهال درگزی از گونه *P. communis* به‌طور نسبی کاهش کم‌تری در رشد و توسعه ریشه و اندام هوایی در دوره تنش نشان داد. با این حال تنش خشکی باعث کاهش وزن خشک اندام هوایی در برخی از گونه‌ها و تمام پایه‌های رویشی شد، به جز گونه‌های *P. nivalis*، *P. hyrcana*، *P. syriaca*، *P. betulifolia*، و ژنوتیپ‌های LGI477 و LGI456 که کاهش محسوسی نشان ندادند. دندروگرام حاصل از شرایط تنش خشکی نیز ژنوتیپ‌ها را در سه خوشه متمایز گروه‌بندی کرد (شکل ۳-ب). به‌طور کلی، به‌نظر می‌رسد پایه‌هایی که توانایی بالاتری در ذخیره‌سازی ماده خشک در ریشه طی دورهٔ تنش دارند از رشد نسبی مناسب‌تری برخوردار بوده بودند، می‌توانند به عنوان ژنوتیپ‌های امیدبخش برای تحمل به تنش خشکی در پژوهش‌های بعدی مد نظر قرار گیرند. هرچند جذب اغلب عناصر غذایی در برگ و ریشه تحت تنش خشکی کاهش یافت، اما به نظر نمی‌رسد که این شرایط موجب اختلال شدید در کارایی جذب عناصر شده باشد، زیرا کمبود عناصر طی ۲۱ روز اعمال تنش چندان مشهود نبود. در مجموع، نتایج این پژوهش می‌تواند در تدوین راهبردهای مؤثر برای مدیریت منابع ژنتیکی گلابی و حفاظت از تنوع ژنتیکی آن نقش کلیدی ایفا کند. بهره‌گیری از ژنوتیپ‌های متمایز در برنامه‌های به‌نژادی به‌منظور ایجاد ارقام جدید با ویژگی‌های مطلوب، از جمله تحمل به تنش‌های زیستی و غیرزیستی، می‌تواند عملکرد و پایداری تولید گلابی را در شرایط مختلف محیطی ارتقا دهد. همچنین، استفاده از نشانگرهای مولکولی و مطالعات ژنومی می‌تواند به درک بهتر ساختار ژنتیکی این گونه‌ها کمک کرده و در بهبود برنامه‌های به‌نژادی پایه‌های گلابی نقش مؤثری ایفا کند.

سپاس گزاری

از مساعدت و حمایت آزمایشگاه درختان میوه (پومولوژی) گروه علوم باغبانی دانشگاه تربیت مدرس جهت فراهم آوردن امکانات مالی و اجرایی این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از حمایت بنیاد ملی نخبگان و طرح رویش هسته‌های فناور پارک علم و فناوری دانشگاه تربیت مدرس نیز قدردانی می‌گردد.

References

Abdollahi, H. (2010). *Pear: Botany, Cultivars and Rootstocks*. Ministry of Agriculture, Tehran, Iran. 210pp. [In Persian].

Arji, I., & Arzani, K. (2003). Evaluation of the growth responses and proline accumulation in three Iranian native olive cultivars under drought stress. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 10 (2), 91-101. https://doi.org/10.22059/ijhs.2018.246776.1356 [In Persian].

Arzani, K. (2004). The effect of European pear (*Pyrus communis* L.) and quince (*Cydonia oblonga* Mill L.) seedling rootstocks on growth and performance of some Asian pear (*Pyrus serotina* Rhed.) cultivars. *Acta Horticulturae*, 658, 93-97. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.658.10

Arzani, K. (2015). *The impact of environment changes and conditions on fruit trees germplasm and yield of established orchards in Iran*, in: In: Proceedings of the 3rd World Biodiversity Congress (WBC2015). Mecavnik – Mokra Gora, Serbia, p. 40.

Asayesh, Z. M., Arzani, K., Mokhtassi-Bidgoli, A., & Abdollahi, H. (2023). Enzymatic and non-enzymatic response of grafted and ungrafted young European pear (*Pyrus communis* L.) trees to drought stress. *Scientia Horticulturae*, 310, 111745. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111745

Chaves, M.M., & Oliveira, M.M. (2004). Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. *Journal of Experimental Botany*, 55, 2365–2384. https://doi.org/10.1093/jxb/erh269

Da Silva, E. C., Nogueira, R. J. M. C., Da Silva, M. A., & De Albuquerque, M. B. (2011). Drought stress and plant nutrition. *Plant stress*, 5(1), 32-41.

Devyatov, A. S. (1994). Development of root system of pear trees on seedling and quince rootstocks. *Journal of plant nutrition*, *17*(11), pp. 1963-1973. https://doi.org/10.1080/01904169409364858

Dong, X., Wang, Z., Tian, L., Zhang, Y., Qi, D., Huo, H., Xu, J., Li, Z., Liao, R., Shi, M., Wahocho, S.A., Liu, C., Zhang, S., Tian, Z., & Cao, Y. (2020). De novo assembly of a wild pear (*Pyrus betuleafolia*) genome. *Plant biotechnology journal*, 18(2), 581–595. https://doi.org/10.1111/pbi.13226

Esmaeili, A., Abdollahi, H., Bazgir, M., & Abdossi, V. (2021). Growth and nutrient uptake in commercial pear cultivars on seedling, Pyrodwarf®, and OH × F69 Rootstocks. *Seed and Plant Journal*, 36(4): 403-420. https://doi.org/10.22092/sppi.2021.123892 [In Persian].

Farhadi, H., Sharifani, M. M., Alizadeh, M., Hokmabadi, H. & Aliniaifard, S. (2020). Investigating the Effect of Different Drought Levels on the Concentration of Low-Consumption and High-Consumption Mineral Elements of Pistachio Rootstocks and Interstitial Hybrids of Pistachio (*Pistacia vera* L.). *Journal of Pistachio Science and Technology*, 5(9), 46-69. [In Persian].

Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., & Siddique, K.H.M. (2012). Drought Stress in Plants: An Overview. In: Aroca, R. (eds) Plant Responses to Drought Stress. Springer, Berlin, Heidelberg.

Ferguson, L. (1995). Pistachio production. Center of Fruit and Nut Crop Research and Information. University of California at Davis. Department of Pomology, USA. Pp: 160.

Fournier, J. M., Roldán, Á. M., Sánchez, C., Alexandre, G., & Benlloch, M. (2005). K^+ starvation increases water uptake in whole sunflower plants. *Plant Science*, 168(3), 823-829. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.10.015

Garwood, E. A., & Williams, T. B. (1967). Growth, water use, and nutrient uptake from the subsoil by grass swards. *The Journal of Agricultural Science*, 69(1), 125-130. https://doi.org/10.1017/S002185960001652X

Guo, C., Zhu, L., Sun, H., Han, Q., Wang, S., Zhu, J., Zhang, Y., Zhang, K., Bai, Z., Li, A., Liu, L., & Li, C. (2024). Evaluation of drought-tolerant varieties based on root system architecture in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *BMC Plant Biol*, 24, 1–18. https://doi.org/10.1186/s12870-024-04799-x

Hasan, M.M., Skalicky, M., Jahan, M.S., Hossain, M.N., Anwar, Z., Nie, Z., Alabdallah, N.M., Brestic, M., Hejnak, V., & Fang, X.W. (2021). Spermine: Its emerging role in regulating drought stress responses in plants. *Cells*, 10, 1–15. https://doi.org/10.3390/cells10020261

Heidari Sharif Abad, H. (2001). *Plant, drought, and aridity*. Research Institute of Forest and Rangelands. Tehran edition. [In Persian].

Huang, L., Li, M., Zhou, K., Sun, T., Hu, L., Li, C., & Ma, F. (2018). Uptake and metabolism of ammonium and nitrate in response to drought stress in *Malus prunifolia*. *Plant Physiology and Biochemistry* 127: 185-193. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.03.031

Ikinci, A., Bolat, I., Ercisli, S., & Kodad, O. (2014). Influence of rootstocks on growth, yield, fruit quality, and leaf mineral element contents of pear cv. 'Santa Maria' in semi-arid conditions. *Biological Research*, 47: 1-8. https://doi.org/10.1186/0717-6287-47-71

Karbasi, M., & Arzani, K. (2021). Asian and European pear scion-rootstock interactions and Pyrodwarf rootstock root growth and distribution, in: Acta Horticulturae. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, pp. 63–68.

Liang, W., Dondini, L., De Franceschi, P., Paris, R., Sansavini, S., & Tartarini, S. (2015). Genetic diversity, population structure, and construction of a core collection of apple cultivars from Italian germplasm. *Plant Molecular Biology Reporter*, 33, 458-473. https://doi.org/10.1007/s11105-014-0754-9

Maleki Asayesh, Z., Arzani, K., Mokhtassi-Bidgoli, A., & Abdollahi, H. (2021). Macronutrients Uptake and Nitrogen Utilization Efficiency in Dargazi Seedling and Pyrodwarf Clonal Pear Rootstocks Under Drought Stress Conditions. *Seed and Plant Journal*, 37(4), 489-511. https://doi.org/10.22092/spj.2022.360009.1274 [In Persian].

Maleki Asayesh, Z.M., Arzani, K., Mokhtassi-Bidgoli, A., & Abdollahi, H. (2023). Gas Exchanges and Physiological Responses Differ Among 'Pyrodwarf' Clonal and 'Dargazi' Seedling Pear (*Pyrus communis* L.) Rootstocks in Response to Drought Stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23, 6469–6484. https://doi.org/10.1007/s42729-023-01502-1

Marschner, P. (2012). Marschner's mineral nutrition of higher plants. Academic, London, p 651.

Martinez, H. E., de Souza, B. P., Caixeta, E. T., de Carvalho, F. P., & Clemente, J. M. (2020). Water deficit changes nitrate uptake and expression of some nitrogen-related genes in coffee plants (*Coffea arabica* L.). *Scientia Horticulturae*, 267: 109254. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109254

Martins, A. L. C., Batagha, O.C., Camargo, O.A. & Conarella, H. (2003). Corn yield and uptake of Cu, Fe, Mn, and Zn from sewage sludge-amend soil with and without liming. *Revista-Basilica-Deciencia*, 27, 563-574. https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000300018

Raeisi Monfared, A., & Yavari, A. (2020). Study on nutrient elements in the soil and plants of some *salvia santolinifolia* natural habitats. *Journal of Plant Process and Function*, 9(39), pp. 215-229. [In Persian].

Rahnama, A., Khajavi, M., Meskarbashee, M., Moosavi, S. A, & Harrison M.T. (2026). Cytokinin modulates photosynthesis, antioxidant profiles and fatty acid composition in sunflower plants subjected to extreme heat stress. *Plant Growth Regulation*, 106, 16. https://doi.org/10.1007/s10725-025-01413-4

Rezaei, A., Abdollahi, H., Arzani, K., Mokhtassi-Bidgoli, A., & Ahmadi, N. (2023a). Preliminary Selection of Different Species of Genus Pear (*Pyrus*) for Dwarfing and Nutrient Uptake. *Seed and Plant Journal*, 39(2), 282-253. https://doi.org/10.22092/spj.2024.364714.1347

Rezaei, A., Arzani, K., & Sarikhani, S. (2023b). The assessments of biochemical characteristics for the superior walnut (*Juglans regia* L.) genotypes. *European Journal of Horticultural Science*, 88(4), 1611-4434. https://doi.org/10.1007/s10681-024-03358-7

Rezaei, A., Arzani, K., Abdollahi, H., Mokhtassi-Bidgoli, A., & Ahmadi, N. (2025). Genotypic differences in morphological and physiological traits of the genus *Pyrus* and clonal pear rootstocks under prolonged drought stress. *Scientia Horticulturae*, 350, 114338. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.114338

Rufato, L., Da Silva, P. S., Kretzschmar, A. A., Bogo, A., De Macedo, T. A., Welter, J. F., Fazio, G., & Petry, D. (2021). Geneva® series rootstocks for apple trees under extreme replanting conditions in Southern Brazil. *Frontiers in Plant Science*, 12, 712162. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.712162

Salisbury, F.B. & Ross, C.W. (1992). Plant physiology (4th edition). Wadsworth Publishing Company, California, USA.

Sandeep, Dubey, A.K., Sharma, N., Awasthi, O.P., Sharma, R.M., & Dahuja, A. (2023). Genotypic differences in root architecture and physiological characteristics in mango (*Mangifera indica*) under drought. *Indian Journal of Agricultural Science*, 93, 868–874. https://doi.org/10.56093/ijas.v93i8.138850

Shan, W., Liang, D., & Ma, F. (2014). Leaf micromorphology and sugar may contribute to differences in drought tolerance for two apple cultivars. *Plant Physiology and Biochemistry*, 80, 249-258. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.04.012

Sircelj, H., Tausz, M., Grill, D., & Batic, F. (2007). Detecting different levels of drought stress in apple trees (*Malus domestica* Borkh.) with selected biochemical and physiological parameters. *Scientia Horticulturae*, 113, 362-369. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.04.012

Tanguilig, V. C., Yambao, E. B., O'Toole, J. C., & De Datta, S. K. (1987). Water stress affects leaf elongation, leaf water potential, transpiration, and nutrient uptake of rice, maize, and soybean. *Plant and Soil*, 103, 155-168. https://doi.org/10.1007/BF02370385

Tatari, M., Jafari, A., Shirmardi, M., & Mohamadi, M. (2020). Using morphological and physiological traits to evaluate drought tolerance of pear populations (*Pyrus* spp.). *International Journal of Fruit Science*. 20, 837–854. https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1697410

Teshome, D. T., Zharare, G. E., & Naidoo, S. (2020). The threat of the combined effect of biotic and abiotic stress factors in forestry under a changing climate. *Frontiers in Plant Science*, 11, 601009. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.601009

White, R. G., & Kirkegaard, J. A. (2010). The distribution and abundance of wheat roots in a dense, structured subsoil–implications for water uptake. *Plant, cell & environment*, 33(2), 133-148. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02059.x

Xie, H., Li, M., Chen, Y., Zhou, Q., Liu, W., Liang, G., & Jia, Z. (2021). Important physiological changes due to drought stress on oat. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 644726. https://doi.org/10.3389/fevo.2021.644726