

Ameliorating effect of foliar applied proline on morphological and nutritional characteristics of UCB1 pistachio rootstock under drought stress conditions

Masoud Fattahi^{1*}, Abdolrahman Mohammadkhani²

1- Corresponding Author and Instructor of Plant Production Department, Vocational Technical University, Faculty of Agriculture, Shahrekord, Iran.

Ma.fatahi67@gmail.com

2- Associate Professors, Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Mkhani7@yahoo.com

Received Date: 2022/02/06

Accepted Date: 2022/06/07

Abstract

Introduction: Water deficit is the most important stresses that limit the production of many crops and fruits worldwide (Fattahi et al., 2021) and severely impairs plants growth and development through alterations in the physiological, morphological, biochemical, and molecular attributes. As well as, Proline is one of the active amino acids in the osmotic regulation phenomenon and it has an effective role in reducing cell damage and improving drought tolerance. Different plants use different strategies to deal with drought stress which one of them is the use of osmotic substances such as proline. Through foliar application, which reducing significantly the destructive effects of stress on plants. Among these, the use of proline exogenous has been an effective way to reduce the adverse effects of stress (Soroori et al., 2020). The aim of this study was influence of exogenous application of proline on growth and root and leaf nutrient content of drought-stressed UCB1 plants.

Material and methods: The experiment was carried out in factorial format based on completely randomized design in greenhouse conditions of Shahrekord University (in 2019) with 3 replications and 3 samples. The first factor was drought stress in three levels (100% as the control, 70% and 40 % of field capacity as the treatments) for 60 days and second factor was proline application in three levels (0 as the control, 75 and 150 mg. l⁻¹ as the treatments). To measure the dry weight of the aerial and root organs, the samples were kept in an oven at 70 °C and the weight was measured by a digital scale with 0.01 g accuracy. Proline was determined following Bates et al. (1973). The absorbance of the organic phase was recorded at 520 nm. The phosphorus amount was determined by measuring the absorbance at 470 nm using a spectrophotometer (Olsen et al., 1954).

Results and discussion: Water limitation reduced the leaf area, leaf and root DW, also under drought stress conditions, the mineral content (P, K, Ca, Mg, Fe and Zn) of the UCB1 rootstock markedly decreased. The accumulation of minerals in the leaves and roots of sprayed plants was significantly higher than in the non-sprayed plants with proline. Proline foliar application (150 mg. l⁻¹) improved the nutritional status (K, Ca, Fe, Zn in the leaves and roots of the pistachio rootstocks) of the UCB1 under stress conditions (Table 1&2). The significant (p < 0.05) decrease in leaves area, leaf and root dry weights of UCB1 plants (Table 1) under drought stress conditions could be due to the reduction of water absorption from the soil and consequently to decreased cell division and elongation as well as plant growth. On the other hand, reducing the stomatal conductance, reducing carbon stabilization, limiting water absorption and nutrients. Increased growth by proline in drought stress is likely due to increased proline accumulation, which not only protects the enzymes and structures of proteins and organ membranes, but also provides a source of energy for growth and helps plants survive through resistance to stress.

Conclusions: Foliar application of proline increased the dry weight of leaf and root organs, leaf area, as well as improved the nutritional status (P, K, Mg, Ca, Fe and Zn) of the UCB1 under stress conditions. Drought stress also reduced all traits except proline. In general, it can be suggested that foliar application of proline (150 mg L⁻¹) can be used as a defense factor in plants under drought stress.

Keywords: Plant nutrition, Floating system, Lettuce, Soilless culture

تأثیر بهبود دهنده محلول پاشی برگ پرولین بر خصوصیات مورفولوژیکی و تغذیه‌ای پایه پسته UCB1 در شرایط تنش خشکی

مسعود فتاحی^{۱*}، عبدالرحمان محمدخانی^۲

۱- نویسنده مسئول و مربی گروه تولیدات گیاهی، دانشگاه فنی حرفه‌ای شهرکرد، دانشکده کشاورزی، شهرکرد، ایران.

Ma.fatahi67@gmail.com

۲- دانشیار گروه باغبانی، دانشگاه شهرکرد، دانشکده کشاورزی، شهرکرد، ایران.

Mkhani7@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۷

چکیده

استفاده از محلول پاشی اسیدهای آمینه یکی از روش‌های موثر در کاهش اثرات مضر تنش‌ها به ویژه تنش خشکی می‌باشد. به منظور بررسی اثر سطوح مختلف تنش خشکی و پرولین بر خصوصیات مورفولوژیکی و عناصر غذایی پایه پسته UCB1، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار (هر تکرار شامل ۳ گیاه) به صورت گلدانی در سال ۱۳۹۸ در دانشگاه شهرکرد انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل محدودیت در آبیاری شامل سه سطح (۴۰٪، ۷۰٪ و ۱۰۰٪ ظرفیت زراعی) و محلول پاشی برگ پرولین در سه سطح (صفر، ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر) بود. نتایج آزمایش نشان داد تنش خشکی باعث کاهش ارتفاع گیاه به میزان ۳۴/۶ درصد نسبت به شاهد شد. همچنین سطح برگ، وزن خشک برگ و ریشه، غلظت عناصر P، K، Ca، Mg، Fe و Zn نسبت به شاهد کاهش یافت و افزایش محتوای پرولین برگ و ریشه در اثر تنش خشکی مشاهده گردید. محلول پاشی برگ پرولین با غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر باعث افزایش سطح برگ نسبت به شاهد شد و وزن خشک برگ و ریشه در گیاهان محلول پاشی شده با پرولین (۷۵ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر) نسبت به شاهد بیشتر بود. غلظت عناصر P، K، Ca، Mg، Fe و Zn در برگ و عناصر Fe، Ca، K، Zn در ریشه در گیاهان محلول پاشی شده با غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پرولین نسبت به شاهد بیشتر بود. برهمکنش خشکی و محلول پاشی برگ پرولین بر سطح برگ، وزن خشک ریشه، منیزیم برگ و روی ریشه معنی‌دار بود. تنش خشکی و کاربرد برگ پرولین باعث افزایش پرولین برگ و ریشه نسبت به شاهد شدند. به طور کلی بهبود خصوصیات رشد و محتوای عناصر غذایی در گیاهان محلول پاشی شده با پرولین نسبت به گیاهان شاهد مشاهده شد. همچنین استفاده از محلول پاشی پرولین باعث افزایش غلظت پرولین برگ و ریشه گردید. به طور کلی در این آزمایش محلول پاشی پرولین باعث بهبود شرایط تغذیه گیاهان نسبت به گیاهان تیمار نشده گردید.

کلمات کلیدی: اسمولیت، زیست‌توده، عناصر غذایی، کم‌آبی

مقدمه

پسته یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی در ایران است و مهم‌ترین مناطق پسته کاری در قسمت‌های خشک و نیمه‌خشک با منابع آب محدود وجود دارند (Fattahi et al., 2021). پسته برای رسیدن به عملکرد اقتصادی نیازمند پایه مناسب و مقاوم به شرایط نامساعد محیطی مانند خشکی هستند زیرا تأثیر پایه بر جذب عناصر غذایی و متعاقباً کمیت و کیفیت محصول در شرایط تنش به اثبات رسیده است (Tavallai and Rahemi, 2007; Paymaneh et al., 2019). هیبرید UCB1 که حاصل از تلاقی پسته آتلانتیکا (ماده) و ایتنگریما (نر) می‌باشد از مهم‌ترین پایه‌ها در کالیفرنای آمریکا است که در چند سال اخیر در مناطق پسته‌کاری ایران و کشت‌های جدید مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از ویژگی‌های مهم پایه UCB1 این است که توانایی تکثیر رویشی آن از طریق کشت بافت وجود دارد و می‌توان از این هیبرید کلون ایجاد کرد (Gijon et al., 2020; Jacygrad et al., 2010). استفاده از پایه مناسب یکی از راهکارهای اصلی مقابله در برابر تنش خشکی است زیرا در این شرایط بسیاری از خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی گیاه از جمله خصوصیات رویشی (Khoyerd et al., 2016) و جذب عناصر غذایی (Bagheri et al., 2012; Fattahi et al., 2021) را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

خشکی یکی از مشکلات عمده در جهان است که کشت و کار محصولات مختلف از جمله پسته را تحت تأثیر قرار داده است. محدودیت آب باعث کاهش رشد و عملکرد گیاهان با تأثیر بر خصوصیات مختلف گیاهی از جمله کاهش گسترش ریشه و سطح فتوسنتز کننده می‌گردد (Khoyerd et al., 2016). تنش خشکی ابتدا توسط ریشه گیاهان دریافت می‌شود و منجر به ایجاد تنش هایپراسموتیک می‌گردد که اثرات ثانویه آن باعث آسیب به غشای سلولی مانند لیپیدها، پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و در نتیجه اختلالات متابولیکی می‌شود (Zhu, 2016). یکی

از واکنش‌های متداول گیاهان در برابر تنش خشکی تجمع اسمولیت‌هایی مانند پرولین است که منجر به تنظیم اسمزی سلول شده و نقش محافظتی در برابر تنش اکسیداتیو و رادیکال‌های آزاد را دارد (Kumar et al., 2017). استفاده از محلول‌پاشی پرولین در غلظت‌های پایین می‌تواند تحمل به تنش‌های محیطی را تا حد زیادی بهبود بخشد (Deivanai et al., 2011) همچنین اثر آن بر گیاهان مختلف بستگی به گونه گیاهی، مرحله رشد گیاه، زمان استفاده و غلظت پرولین دارد (Dawood et al., 2014).

مطالعات متعددی در ارتباط با کاربرد پرولین در گیاهان جهت کنترل اثرات مضر تنش انجام شده است. محلول‌پاشی پرولین در گل حنا در شرایط تنش شوری باعث افزایش فعالیت‌های فیزیولوژیکی مانند محتوای کلروفیل و کاروتنوئید و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز شد همچنین خصوصیات رویشی مانند ارتفاع بوته، تعداد و سطح برگ، وزن تر و خشک ریشه و برگ افزایش یافت (Roosbehani et al., 2018). همچنین در مطالعه دیگر، در شرایط تنش خشکی محلول‌پاشی پرولین بر روی گیاه بابونه باعث افزایش محتوای کلروفیل، تعداد گل و وزن خشک گل‌ها شد (Kumar et al., 2010). در بررسی تأثیر محلول‌پاشی پرولین بر مقاومت به خشکی گیاه همیشه بهار نتایج نشان داد استفاده از پرولین خارجی باعث بهبود خصوصیات مورفولوژیکی مانند وزن تر و خشک گیاه و ریشه، ارتفاع گیاه، طول ریشه، رنگ‌دانه‌های گیاهی و پرولین برگ گردید (Soroori et al., 2020). علی و همکاران (Ali et al., 2007) در پژوهشی که بر روی ذرت انجام شد بیان داشتند که تنش خشکی باعث کاهش رشد، میزان کلروفیل a و b گردید اما کاربرد خارجی پرولین باعث بهبود رشد و افزایش رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی گردید. در پژوهشی تأثیر محلول‌پاشی پرولین بر مقاومت به شوری نهال‌های زیتون بررسی شد که نتایج آن نشان داد در اثر تنش شوری روابط آبی، فعالیت فتوسنتزی و محتوای کلروفیل کاهش یافت و استفاده از پرولین باعث شد که

پرولین برون‌زاد بر خصوصیات مورفولوژیکی و تغذیه‌ای پایه هیبرید UCB1 و تعیین میزان تحمل این گیاه در برابر سطوح مختلف تنش آبی انجام شد. همچنین در این پژوهش بررسی می‌گردد که ممکن است پرولین برون‌زاد به عنوان یک روش کارآمد برای کاهش اثرات نامطلوب تنش خشکی بر خصوصیات رویشی و تغذیه‌ای پایه UCB1 مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال ۱۳۹۸ به صورت فاکتوریل با دو فاکتور تنش خشکی در سه سطح (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی (شاهد)، ۷۰ درصد ظرفیت زراعی و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) و محلول پاشی پرولین در سه سطح (صفر به عنوان شاهد، ۷۵ و ۱۵۰ میلی گرم در لیتر) در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار (هر تکرار شامل ۳ گیاه) به صورت گلدانی در گلخانه دانشگاه شهرکرد انجام شد. خاک مورد استفاده در این آزمایش مخلوطی از دو سوم خاک مزرعه و یک سوم ماسه بود (هدایت الکتریکی ۰/۸، پ‌هاش ۷/۲۴). دانه‌های کشت بافتی UCB1 تهیه شده از یک آزمایشگاه کشت بافت معتبر، پس از سازگار شدن به محیط گلخانه، در گلدان‌های ۵ لیتری کاشته شدند و به مدت ۳ ماه در گلخانه با میانگین دمای ۲۸ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۲۸/۵ درصد رشد کردند. تنش خشکی بعد از سه ماه بر اساس ظرفیت زراعی بصورت وزنی با محدودیت آب آبیاری به مدت ۶۰ روز اعمال گردید. پرولین استفاده شده در این آزمایش از شرکت مرک آلمان با خلوص ۹۵ درصد بود. محلول پاشی پرولین در سه مرحله، به ترتیب یک مرحله قبل از آغاز اعمال تنش خشکی (۳ ماه پس از کاشت) و دو مرحله در طول اعمال تنش (۲۰ و ۴۰ روز پس از اعمال تنش) انجام شد گیاهان شاهد نیز در این سه مرحله با آب مقطر بدون پرولین اسپری شدند.

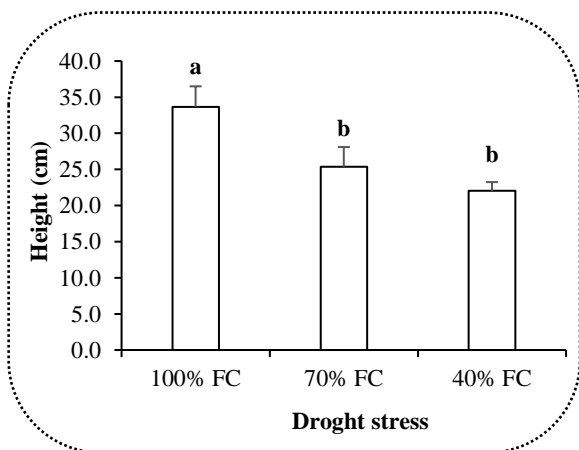
فعالیت فتوسنتزی و خصوصیات رشدی نسبت به گیاهانی که با پرولین تیمار نشده بودند بیشتر باشد و میزان کاهش در آن‌ها کمتر اتفاق بیفتد (Ben Ahmed et al., 2010). در مطالعه دیگر تأثیر محلول پاشی پرولین بر خصوصیات آنتی اکسیدانی سه گونه مرکبات در شرایط تنش دمایی بررسی شد که نتایج نشان داد محلول پاشی پرولین باعث کاهش اثرات دمای بالا گردید و سطح پرولین درون‌زا افزایش یافت (Mohammadrezakhani et al., 2019).

این پژوهش به منظور بررسی تأثیر تنش کم آبی و کاربرد این پژوهش در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان مجهز به سیستم گرمایش و سرمایش هوا ساز و لامپ LED سفید (۲۰۰ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه) به منظور بررسی اثر روش‌های جایگزینی محلول غذایی بر غلظت عناصر غذایی در سه رقم کاهو در سیستم کشت شناور به صورت فاکتوریل با دو فاکتور روش جایگزینی محلول غذایی (جایگزینی کامل، جایگزینی بر اساس هدایت الکتریکی و جایگزینی بر اساس نیاز گیاه) و رقم (کازرون، بادبان قرمز و کاهوی چینی بیکلو F1) در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در پاییز سال ۱۳۹۶ انجام شد.

بذور سه رقم کاهوی کازرون (نوعی کاهوی پیچ)، بادبان قرمز (کاهو برگ‌ی) و کاهوی چینی (نوعی کاهوی پیچ) درون گلدان‌های یونولیتی حاوی بستر پرلایت با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۵ (ارتفاع×طول×عرض) کشت شدند. بذرها پس از سه روز شروع به جوانه زنی کردند. در هفته اول بذرها هر روز در دو نوبت صبح و عصر با ۲۰۰ میلی لیتر (به ازای هر گلدان) آب مقطر آبیاری شدند. با شروع هفته دوم ۲۰۰ میلی لیتر محلول غذایی نیم غلظت هوگلند و آرنون (Hoagland and Arnon, 1950) جایگزین آب شد. ۲۸ روز پس از جوانه زنی بذور، وقتی گیاهچه‌های جوان چهار برگ حقیقی داشتند، نشاءها به گلدان‌های پلاستیکی مشبک ۲۵ میلی لیتری حاوی پرلایت انتقال داده شده و این گلدان‌های کوچک در منافذ یونولیت شناور بر روی محلول

نتایج و بحث

نتایج نشان داد اثر ساده تیمار خشکی بر ارتفاع گیاهان معنی دار بود و محلول پاشی پرولین بر ارتفاع گیاه تاثیر معنی داری نداشت. ارتفاع گیاهان UCB1 در هر دو سطح تنش خشکی (سطح ۷۰٪ و سطح ۴۰٪ ظرفیت زراعی) نسبت به شاهد کمتر بود و بیشترین میانگین ارتفاع گیاه مربوط به شاهد با میانگین ۳۳/۷ سانتی متر بود. ارتفاع گیاهان تحت تنش خشکی ۴۰٪ ظرفیت زراعی به میزان ۳۴/۶٪ نسبت به گیاهان شاهد کمتر بود (شکل ۱). ارتفاع کمتر در گیاهان تحت تنش خشکی در مقایسه با گیاهان رشد کرده در شرایط طبیعی (شاهد) در مطالعات خویردی و همکاران (Khoeyrdi et al., 2016) و باقری و همکاران (Bagheri et al., 2012) بر روی پسته نیز گزارش شده که نتایج این آزمایش با آنها همسو است. کمتر بودن ارتفاع در شرایط تنش ممکن است به علت کاهش در تقسیم سلول، اختلال در فتوسنتز و کاهش مواد تولیدی فتوسنتز برای تغذیه مناطق رشد باشد (Kaya et al., 2007).



شکل ۱- تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی بر ارتفاع پایه

UCB1

Fig 1- The effect of different levels of drought stress on the height of UCB1 rootstock

در بررسی تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی و محلول پاشی برگی پرولین بر خصوصیات رویشی گیاه UCB1 نتایج نشان داد اثرات ساده تیمارها بر سطح برگ، وزن خشک برگ و ریشه معنی دار بود همچنین بر همکانش

پس از پایان تنش خشکی اندام‌های مختلف (شاخساره و ریشه) برداشت و پس از اندازه‌گیری سطح برگ جهت محاسبه وزن خشک برگ و ریشه به مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. برای اندازه‌گیری سطح برگ در پایان آزمایش، برگ را با استفاده از دستگاه سنجش سطح برگ (LAM; Leaf Area Meter- C1-2002, USA) اسکن کرده و سطح برگ بر اساس سانتی متر مربع به دست آمد.

میزان پرولین برگ به روش بیتس و همکاران (Bates et al., 1973) با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری عنصرهای غذایی، در آغاز ۰/۵ گرم نمونه خشک‌شده ریشه و شاخساره را آسیاب کرده و در کوره به مدت یک ساعت در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و سه ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا نمونه‌ها خاکستر شدند. پس از خنک شدن، ۵ میلی‌لیتر اسیدکلریدریک ۲ نرمال به هر نمونه اضافه و با آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانیده شد. این عصاره به‌طور مستقیم برای اندازه‌گیری پتاسیم، منیزیم، کلسیم، آهن و روی استفاده شد. عنصرهای منیزیم، کلسیم، روی و آهن با استفاده از دستگاه جذب اتمی (GBA, Avanta, USA) و پتاسیم با استفاده از دستگاه شعله‌سنج نوری (فلیم‌فوتومتر) (Flame photometer, PFP7, USA) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری فسفر، ۵ میلی‌لیتر از عصاره تهیه‌شده را با ۱۰ میلی‌لیتر از محلول آمونیوم مولیبدات مخلوط کرده و با آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانیده شد. پس از صاف کردن میزان فسفر با استفاده از طیف‌سنج نوری (اسپکتروفتومتر) در طول موج ۴۷۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Olsen et al., 1954).

تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۵ و مقایسه بین میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد ($P < 0.05$) صورت گرفت و نمودارها توسط نرم‌افزار اکسل رسم شدند.

کاهش فتوسنتز و در نتیجه کم شدن کربوهیدرات‌ها باشد. از طرفی ریزش برگ در شرایط تنش یکی از واکنش‌های معمول گیاهان است که متعاقباً منجر به کاهش سطح برگ و وزن برگ نسبت به شاهد خواهد شد (Fatthi et al., 2017). همچنین در شرایط تنش خشکی به‌واسطه بسته شدن روزنه‌ها تعرق کاهش می‌یابد و باعث کاهش جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه مانند P, K, Ca, Mg, Fe و Zn می‌گردد (Khojerd et al., 2016; Fattahi et al., 2021). که این عامل باعث کاهش در رشد و کاهش سطح برگ و وزن خشک برگ خواهد شد (Vimal et al., 2017). محلول‌پاشی پرولین باعث افزایش سطح برگ و وزن خشک شد که با نتایج آزمایش‌های دیگر مطابقت دارد (Ali et al., 2007; Ben hamed et al., 2010; Khalis Soha and El-Noemani, 2012). مکانیسم‌های متفاوتی برای تأثیر پرولین بر خصوصیات رویشی ذکر شده است اما محلول‌پاشی پرولین در شرایط تنش خشکی باعث افزایش پرولین داخلی گیاه شده و تنظیم اسمزی در این شرایط را بهبود می‌بخشد. همچنین افزایش رشد توسط پرولین در شرایط کم‌آبی ممکن است به نقش پرولین در بهبود فتوسنتز، ساختار پروتئین، غشاءهای اندام‌ها و آنزیم‌های مختلف برگردد اما اسیدآمینه پرولین در تأمین انرژی برای رشد نیز کمک کرده و می‌تواند در شرایط تنش خشکی مقاومت گیاه را بیشتر کند (Ashraf and Foolad, 2007; Soroori et al., 2020).

دو فاکتور خشکی و محلول‌پاشی پرولین بر سطح برگ و وزن خشک ریشه معنی‌دار، اما بر وزن خشک برگ غیرمعنی‌دار بود (جدول ۱). در اثر تنش خشکی (۴۰٪ ظرفیت زراعی) سطح برگ، وزن خشک برگ و وزن خشک ریشه به ترتیب به میزان ۴۲/۱٪، ۴۸/۸٪ و ۲۲/۲٪ در مقایسه با شاهد کاهش یافت. بیشترین میزان سطح برگ با میانگین ۶۴ سانتی‌متر مربع و وزن خشک برگ با میانگین ۶/۸ گرم در تیمار ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پرولین ثبت شد که با شاهد دارای تفاوت معنی‌دار بود اما تفاوت معنی‌داری بین شاهد و تیمار ۷۵ میلی‌گرم در لیتر پرولین مشاهده نشد. از طرف دیگر بیشترین وزن خشک ریشه (۱۶/۱ گرم) زمانی ثبت شد که گیاهان با غلظت ۷۵ میلی‌گرم در لیتر پرولین محلول‌پاشی برگ‌ی شدند. در بررسی اثرات متقابل تنش خشکی و محلول‌پاشی پرولین، نتایج نشان داد محلول‌پاشی پرولین با غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر باعث افزایش سطح برگ در گیاهان شاهد شد و بیشترین سطح برگ با میانگین ۷۲/۳ سانتی‌متر مربع ثبت گردید. همچنین بیشترین سطح برگ در شرایط تنش خشکی ۷۰٪ و ۴۰٪ مربوط به تیمار پرولین ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر بود. بیشترین میانگین وزن خشک ریشه به میزان ۱۸/۹ گرم در تنش خشکی شدید و پرولین ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر وجود داشت. کاهش در سطح برگ، وزن خشک برگ و ریشه ممکن است به دلیل بسته شدن روزنه‌ها در شرایط تنش خشکی و

جدول ۱- تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی و محلول‌پاشی پرولین بر سطح برگ، وزن خشک برگ و ریشه پایه پسته UCB1

Table 1- Effect of different levels of drought stress and proline foliar application on leaf area, leaf and root dry weight on UCB1 pistachio rootstock.

| Treatment | Leaf area (cm ²) | Leaf dry weight (g) | Root dry weight (g) |
|-------------|------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Irrigation | | | |
| 100% FC | 69.1±2.4 ^a | 8.6±0.63 ^a | 14.4±0.81 ^a |
| 70% FC | 45.6±4.7 ^b | 5.0±0.69 ^b | 13.5±1.5 ^{ab} |
| 40% FC | 40.1±6.3 ^b | 4.4±0.96 ^b | 11.2±1.8 ^b |
| Proline | | | |
| 0 PPm | 42.1±6.1 ^b | 4.6±1.1 ^b | 10.6±1.2 ^b |
| 75 PPm | 48.7±6.0 ^b | 6.6±1.0 ^{ab} | 16.1±1.1 ^a |
| 150 PPm | 64.0±3.4 ^a | 6.8±0.7 ^a | 12.4±1.7 ^b |
| Interaction | | | |
| 100% FC | | | |
| 0 PPm | 67.7±4.9 ^a | 8.1±1.7 | 10.4±2.0 ^{cd} |
| 75 PPm | 67.3±5.6 ^a | 9.3±0.9 | 13.2±1.6 ^{bc} |
| 150 PPm | 72.3±2.5 ^a | 8.5±0.6 | 10.2±0.5 ^{cd} |

| | | | |
|-------------------|------------------------|---------|------------------------|
| 70% FC | | | |
| 0 Ppm | 37.0±1.2 ^{cd} | 4.6±0.0 | 13.8±2.2 ^{bc} |
| 75 Ppm | 37.3±2.9 ^{cd} | 5.8±1.9 | 18.6±2.2 ^a |
| 150 Ppm | 62.3±6.1 ^a | 4.7±1.1 | 8.2±0.0 ^d |
| 40% FC | | | |
| 0 Ppm | 21.7±1.2 ^d | 1.2±0.1 | 7.6±0.2 ^d |
| 75 Ppm | 41.3±7.5 ^{bc} | 4.6±1.1 | 16.6±0.8 ^{ab} |
| 150 Ppm | 57.3±4.9 ^{ab} | 7.3±0.5 | 18.9±1.7 ^a |
| Significance | | | |
| Drought | *** | ** | * |
| Proline | *** | * | ** |
| Drought × Proline | * | ns | *** |

ns و *, **, ***: non-significant and significant at the 5%, 1% and 0.1% of probability level, respectively.

افزایش غلظت P, Ca, Mg, Fe و Zn در برگ پایه UCB1 نسبت به شاهد شد. عناصر P, Ca, Mg, Fe و Zn برگ تحت تاثیر تیمار ۷۵ میلی گرم در لیتر پرولین قرار نگرفتند و غلظت این عناصر در مقایسه با شاهد از نظر آماری یکسان بود. همچنین با محلول پاشی پرولین با هر دو غلظت ۷۵ و ۱۵۰ میلی گرم در لیتر محتوای K برگ نسبت به شاهد افزایش معنی داری در سطح احتمال ۱٪ داشت (جدول ۲). برهمکنش تیمارها تنها در ارتباط با Mg برگ معنی دار بود به طوری که کمترین میزان آن در سطح ۴۰٪ تنش خشکی و عدم محلول پاشی پرولین وجود داشت. با افزایش غلظت پرولین محلول پاشی شده میزان Mg برگ در سطح ۴۰٪ ظرفیت زراعی افزایش یافت (شکل ۲).

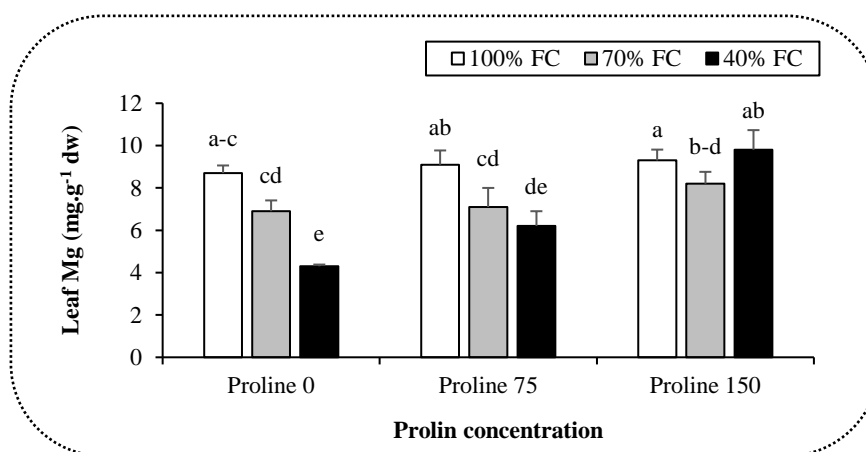
در این پژوهش پس از اعمال تیمارها به مدت ۶۰ روز غلظت عناصر غذایی برگ مورد مطالعه قرار گرفت (جدول ۲). با اعمال تنش خشکی غلظت P, K, Ca, Mg و Zn در برگ کاهش یافت. بیشترین غلظت عناصر اندازه گیری شده در شاهد (عدم اعمال تنش خشکی) دیده شد و با محدودیت در آبیاری کاهش معنی داری در سطح احتمال ۰/۱ درصد در غلظت این عناصر برگ (P, K, Ca, Mg و Zn) رخ داد اما بین سطح ۷۰٪ و ۴۰٪ ظرفیت زراعی تنش تفاوت معنی داری مشاهده نشد. در ارتباط با Fe برگ تنش خشکی در سطح ۴۰٪ باعث کاهش ۴۹ درصدی آن نسبت به شاهد شد همچنین سطح ۷۰٪ ظرفیت زراعی باعث کاهش معنی دار Fe برگ نسبت به شاهد گردید. محلول پاشی پرولین با غلظت ۱۵۰ میلی گرم در لیتر باعث

جدول ۲- تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی و محلول پاشی پرولین بر محتوای عناصر غذایی در برگ پایه UCB1

Table 2- Effect of different levels of drought stress and proline foliar application on leaf nutrient content of UCB1 rootstock

| Treatment | Leaf P (mg.g-1 dw) | Leaf K (mg.g-1 dw) | Leaf Ca (mg.g-1 dw) | Leaf Mg (mg.g-1 dw) | Leaf Fe (mg.kg-1 dw) | Leaf Zn (mg.kg-1 dw) |
|-------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Irrigation | | | | | | |
| 100% FC | 3.5±0.2 ^a | 9.3±0.1 ^a | 3.1±0.3 ^b | 7.8±0.4 ^a | 137.8±6.6 ^a | 29.7±1.7 ^a |
| 70% FC | 2.4±0.1 ^b | 0.73±0.4 ^b | 2.2±0.2 ^b | 5.4±0.5 ^b | 108.8±12.4 ^b | 14.4±1.6 ^b |
| 40% FC | 2.2±0.1 ^b | 0.68±0.4 ^b | 2.3±0.2 ^b | 4.8±0.8 ^b | 70.1±14.9 ^c | 11.9±2.0 ^b |
| Proline | | | | | | |
| 0 Ppm | 2.3±0.1 ^b | 7.0±0.5 ^b | 2.3±0.2 ^b | 4.6±0.6 ^b | 83.1±14.4 ^b | 16.9±2.9 ^b |
| 75 Ppm | 2.6±0.2 ^b | 7.9±0.4 ^a | 2.4±0.2 ^b | 5.8±0.7 ^b | 112.0±16.1 ^{ab} | 16.8±1.9 ^b |
| 150 Ppm | 3.1±0.3 ^a | 8.4±0.3 ^a | 2.8±0.3 ^a | 7.6±0.5 ^a | 131.7±11.1 ^a | 22.4±1.5 ^a |
| Significance | | | | | | |
| Drought | *** | *** | *** | *** | *** | *** |
| Proline | ** | ** | * | ** | * | * |
| Drought × Proline | ns | ns | ns | * | ns | ns |

ns و *, **, ***: non-significant and significant at the 5%, 1% and 0.1% of probability level, respectively.



شکل ۲- برهمکنش سطوح مختلف تنش خشکی و محلول پاشی پرولین بر محتوای منیزیم برگ پایه UCB1

Fig 2-Interaction of different levels of drought stress and proline foliar application on leaf Mg content of UCB1 rootstock

بر اساس نتایجی که در جدول ۳ آمده است غلظت عناصر P, K, Ca, Fe و Zn در ریشه در اثر تنش خشکی (هر دو سطح ۴۰٪ و ۷۰٪ ظرفیت زراعی) کاهش یافت و با شاهد دارای تفاوت معنی دار بود. در عناصر P, K, Ca و Fe تفاوت معنی داری بین سطوح ۴۰٪ و ۷۰٪ تنش خشکی از نظر آماری وجود نداشت در حالی که در ارتباط با روی ریشه چنین نتایجی ثبت نشد و هر دو سطح تنش خشکی باعث کاهش روی ریشه نسبت به شاهد گردید. تنش شدید خشکی (سطح ۴۰٪ ظرفیت زراعی) باعث کاهش P, K,

Mg و Ca ریشه به ترتیب به میزان ۶۸، ۱۸، ۳۵ و ۴۲ درصدی نسبت به شاهد (۱۰۰٪ ظرفیت زراعی) گردید. محلول پاشی برگ پرولین تنها بر غلظت عناصر K, Ca, Fe و Zn ریشه اثر معنی دار داشت به طوری که باعث افزایش غلظت این عناصر (بویژه در غلظت ۱۵۰ میلی گرم در لیتر) در مقایسه با شاهد شد. بیشترین میزان پتاسیم و کلسیم ریشه به ترتیب با میانگین های ۷۳ و ۲۳ درصد در سطح ۱۵۰ میلی گرم در لیتر پرولین وجود داشت که اختلاف آن با شاهد معنی دار بود.

جدول ۳- تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی و محلول پاشی پرولین بر محتوای عناصر غذایی در ریشه پایه پسته UCB1

Table 3- Effect of different levels of drought stress and proline foliar application on root nutrient content of UCB1 rootstock

| Treatment | Root P (mg.g ⁻¹ dw) | Root K (mg.g ⁻¹ dw) | Root Ca (mg.g ⁻¹ dw) | Root Mg (mg.g ⁻¹ dw) | Root Fe (mg.kg ⁻¹ dw) | Root Zn (mg.kg ⁻¹ dw) |
|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Irrigation | | | | | | |
| 100% FC | 6.3±1.8 ^a | 7.4±0.2 ^a | 2.6±0.1 ^a | 4.8±0.2 | 93.3±3.7 ^a | 21.7±0.6 ^a |
| 70% FC | 2.2±0.1 ^b | 6.6±0.3 ^b | 2.0±0.1 ^b | 3.4±0.3 | 59.5±6.1 ^b | 14.2±1.8 ^b |
| 40% FC | 2.0±0.1 ^b | 6.1±0.4 ^b | 1.7±0.1 ^b | 2.8±0.2 | 46.1±10.2 ^b | 10.3±2.1 ^c |
| Proline | | | | | | |
| 0 ppm | 4.5±0.9 | 6.2±0.3 ^b | 1.9±0.2 ^b | 2.6±0.1 | 51.0±11.3 ^b | 12.6±2.5 ^b |
| 75 ppm | 3.6±1.1 | 6.6±0.4 ^{ab} | 2.1±0.2 ^{ab} | 3.8±0.2 | 61.5±10.4 ^b | 14.0±2.3 ^b |
| 150 ppm | 2.5±0.1 | 7.3±0.2 ^a | 2.3±0.1 ^a | 3.6±0.1 | 86.3±5.4 ^a | 19.7±1.1 ^a |
| Significance | | | | | | |
| Drought | * | ** | ** | ns | ** | *** |
| Proline | ns | * | * | ns | ** | *** |
| Drought * Proline | ns | ns | ns | ns | ns | * |

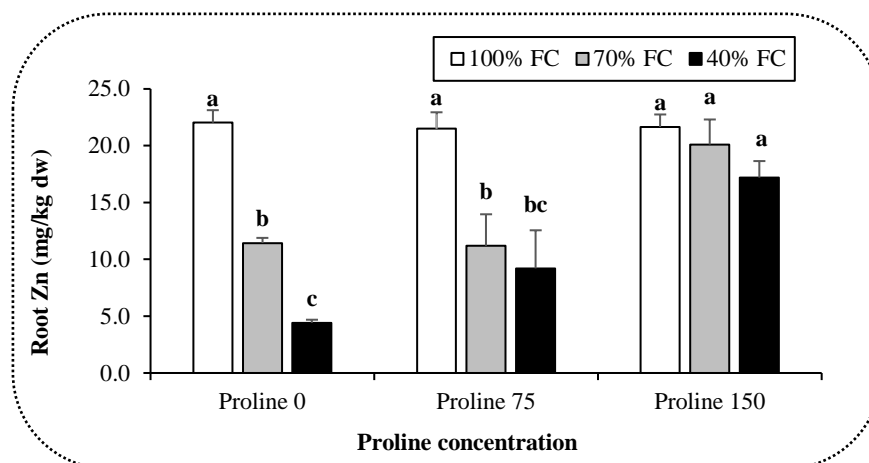
ns و *, **, ***: نبود اختلاف معنی دار و وجود اختلاف معنی دار در سطح ۵، ۱ و ۰/۱ درصد
ns, *, **, ***: non-significant and significant at the 5%, 1% and 0.1% of probability level, respectively.

خشک ریشه در شرایط تنش خشکی می‌تواند به علت کاهش رشد ریشه باشد. از طرفی در شرایط تنش خشکی ریشه گیاهان فقط قادر به جذب مواد غذایی اطراف ریزوسفر است و به منابع محدودی از عناصر غذایی دسترسی دارد. بنابراین در چنین شرایطی به علت کاهش رشد ریشه و محدودیت آب و مواد معدنی، جذب عناصر P, K, Ca, Mg, Fe و Zn کاهش می‌یابد (Kucukyumuk et al., 2014).

محلول‌پاشی پرولین با افزایش پرولین داخلی گیاه به‌عنوان یک مکانیسم دفاعی عمل کرده و منجر به کاهش پتانسیل اسمزی سلول می‌شود در چنین شرایطی جذب آب انجام شده و بر جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه تأثیرگذار است (Soroori et al., 2020). مطالعات گذشته نشان داده‌اند که پرولین باعث افزایش سطح عناصر معدنی مانند K و P شده است که برای تقسیم سلولی و نمو بافت‌های مرستمی ضروری می‌باشند و نتایج این آزمایش با آن‌ها مطابقت دارد (Foyer and Spancer, 1986; Maiato et al., 2004). استفاده از تیمار پرولین باعث افزایش پرولین برگ و ریشه گیاه شد. تجمع پرولین علاوه بر تنظیم اسمزی با جلوگیری از تخریب آنزیم‌ها، پروتئین‌ها و حفظ ثبات غشای سلولی به رشد مؤثر گیاه و جذب بهتر عناصر غذایی کمک می‌کند (Kocheva and Georgive, 2003; Chen and Dickman, 2005) علاوه بر این پرولین در متابولیسم نیتروژن نیز مؤثر می‌باشد (Hashem et al., 2015). بنابراین محلول‌پاشی پرولین با تأثیر بر غلظت پرولین داخلی گیاه و افزایش آن، باعث کاهش چندین اثر فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی از جمله تخریب دیواره سلول، کاهش محتوای آب بافت، کاهش فتوسنتز و کاهش تبادلات گازی در گیاهان تحت تنش شده و انرژی لازم جهت جذب و انتقال عناصر غذایی را فراهم می‌کند (Wal et al., 2020).

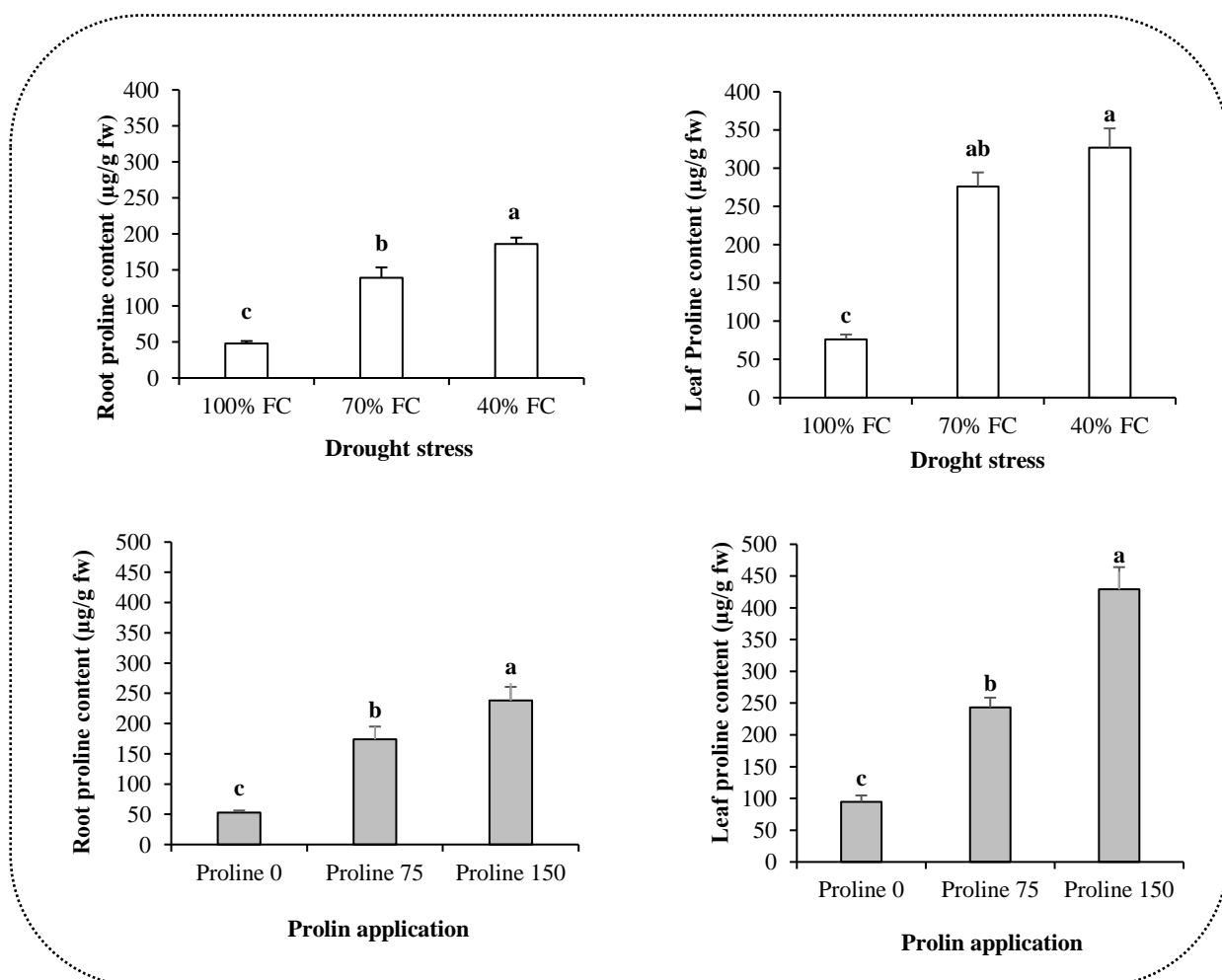
اثر متقابل تیمارهای خشکی و محلول‌پاشی پرولین تنها بر غلظت Zn ریشه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. بیشترین غلظت Zn ریشه در تیمار ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر پرولین وجود داشت و تفاوت معنی‌داری بین سطوح تنش خشکی در این غلظت از پرولین وجود نداشت. در غلظت‌های صفر و ۷۵ میلی‌گرم در لیتر پرولین غلظت Zn ریشه نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (شکل ۳). نتایج این پژوهش نشان داد در اثر تنش خشکی غلظت عناصر در برگ و ریشه در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد کاهش یافت که با گزارش‌های متعدد قبلی (Bagheri et al., 2012; Zrig et al., 2016; Abdel-salam et al., 2018; Fattahi et al., 2021) همسو است.

انتقال مواد معدنی و حلالیت آن‌ها در خاک‌ها رابطه معکوسی با کمبود آب خاک دارد، به‌طوری‌که کمبود آب تأثیر منفی در جذب مواد معدنی و انتقال آن‌ها از خاک به گیاه دارد. بنابراین محدودیت آبیاری باعث کاهش دسترسی به عناصر P, K, Ca, Mg, Fe و Zn شده است. همچنین جذب عناصر معدنی توسط گیاه به میزان جریان آب از راه زنجیره خاک - ریشه - شاخساره بستگی دارد و تعرق برگی شیب لازم برای جذب آب و عناصر محلول را فراهم می‌کند (Keller, 2005). همچنین بسته شدن روزنه‌ها در شرایط تنش خشکی به علت کاهش پتانسیل اسمزی سلول‌ها، یکی از واکنش‌های اصلی گیاهان است، بنابراین در چنین شرایطی این زنجیره مختل شده و انتقال مواد معدنی کم یا متوقف می‌شود که می‌تواند دلیلی بر کاهش غلظت عناصر در برگ و ریشه پایه UCBI باشد. کاهش P, K, Ca, Mg, Fe و Zn ممکن است به علت کاهش رشد ریشه باشد زیرا بر قدرت جذب آب و مواد غذایی اثر منفی می‌گذارد همچنین نتایج نشان داد در اثر اعمال تیمار خشکی وزن خشک کل ریشه کاهش یافت، کاهش وزن



شکل ۳- برهمکنش سطوح مختلف تنش خشکی و محلول پاشی پرولین بر محتوای روی ریشه پایه UCB1

Fig 3- Interaction of different levels of drought stress and proline foliar application on root Zn content of UCB1 rootstock



شکل ۴- تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی و محلول پاشی پرولین بر محتوای پرولین برگ و ریشه پایه پسته UCB1

Fig 4- The effect of different levels of drought stress and foliar application of proline on the leaf and root proline content of UCB1 rootstock

Roozbehani et al., 2018; Mohammadrezakhani et al., 2019).
 (al., 2019) مطابقت دارد.

به‌طورکلی نتایج این آزمایش نشان داد تنش خشکی باعث کاهش خصوصیات رویشی پایه UCB1 مانند ارتفاع، سطح برگ، وزن خشک برگ و ریشه شد. همچنین محتوای عناصر غذایی مانند P، K، Ca، Mg، Fe و Zn در اثر تنش خشکی در برگ و ریشه کاهش یافت. محلول‌پاشی برگی پرولین باعث بهبود خصوصیات رشدی و عناصر غذایی در گیاهان تحت تنش شد. به نظر می‌رسد استفاده از محلول‌پاشی پرولین می‌تواند یک راهکار کمکی در جهت افزایش تحمل گیاهان UCB1 در برابر تنش خشکی باشد. بنابراین محلول‌پاشی اسیدآمین پرولین (۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر) می‌تواند به‌عنوان یک عامل تقویت‌کننده برای گیاه در شرایط کم‌آبی به‌منظور صرفه‌جویی در مصرف آب مؤثر باشد و از خسارت‌های ناشی از تنش رطوبتی مانند کاهش رشد و عملکرد گیاه بکاهد.

منابع

- Ali, Q., Ashraf, M., and H. R. Athar. 2007. Exogenously applied proline at different growth stages enhances growth of two maize cultivars grown under water deficit conditions. *Pakistan Journal of Botany*. 39: 1133-1144.
- Abdel-Salam, E., Alatar, A., and M. A. El-Sheikh. 2018. Inoculation with arbuscular mycorrhiza fungi alleviates harmful effects of drought stress on damask rose. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 25: 1772-1780.
- Ashraf, M., and M. R. Foolad. 2007. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress tolerance. *Environmental and Experimental Botany*. 59(2): 206-216.
- Bagheri, V., Shamshiri, M.H., Shirani, H., and H. R. Roosta. 2012. Nutrient uptake and distribution in mycorrhizal pistachio seedlings under drought stress. *Journal of Agriculture Science Technology*. 14: 1591-1604.
- Bates L. S., Waldran, R. P., and I. D. Teare. 1973. Rapid determination of free proline for water studies. *Plant Siol*. 39: 205-207.

اثرات ساده تیمارهای تنش خشکی و محلول‌پاشی برگی پرولین بر محتوای پرولین برگ و ریشه پایه UCB1 معنی‌دار بود (شکل ۴). نتایج نشان داد با افزایش شدت تنش خشکی غلظت پرولین برگ و ریشه افزایش یافت و با شاهد دارای تفاوت معنی‌دار بود. بیشترین پرولین برگ و ریشه در سطح تنش شدید (۴۰٪ ظرفیت مزرعه) وجود داشت. استفاده از محلول‌پاشی پرولین در هر دو غلظت ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر باعث افزایش محتوای پرولین برگ و ریشه شد که با شاهد دارای تفاوت معنی‌دار بود. افزایش در محتوای پرولین در اثر تنش خشکی ممکن است به این علت باشد که پرولین مهم‌ترین و متغیرترین اسیدآمین در شرایط تنش خشکی است که نقش تعیین‌کننده در پروتئین‌ها، ساختار غشاء سلول و از بین بردن گونه‌های فعال اکسیژن دارد (Chun et al., 2018). پرولین با از بین بردن گونه‌های فعال اکسیژن باعث محافظت از DNA، میتوکندری و کلروپلاست‌ها می‌شود و از آسیب اکسیداتیو جلوگیری می‌کند از طرفی با محافظت از کلروپلاست و بهبود فرآیند فتوسنتز باعث تجمع قندهای محلول و تنظیم اسمزی بهتر می‌گردد (Farooq et al., 2009). پرولین علاوه بر نقش تنظیم‌کننده اسمزی به عنوان یک منبع تغذیه‌ای عمل می‌کند و می‌تواند منبع نیتروژن و کربن باشد. از طرفی پرولین با کم کردن پتانسیل اسمزی، کاهش پتانسیل آب برگ و حفظ فشار تورگر باعث می‌شود گیاهان فتوسنتز را حفظ کنند (Chun et al., 2018). نتایج این آزمایش در ارتباط با افزایش پرولین در اثر تیمار خشکی با نتایج آزمایش‌های گذشته مطابقت دارد (Khojerd et al., 2017; Kumar et al., 2016). همچنین افزایش در محتوای پرولین در اثر تنش خشکی ممکن است به علت تجزیه پروتئین باشد زیرا در شرایط تنش گیاه نیاز دارد با تجمع مواد محلول سازگار پتانسیل اسمزی را کاهش دهد تا آب به داخل سلول جذب گردد (Soroori et al., 2020) در این مطالعه پرولین خارجی باعث افزایش میزان پرولین داخلی گیاه در برگ و ریشه شد که با نتایج آزمایشات دیگر

- Gijon, C. M., Gimenez, C., Perez-Lopez, D., Guerrero, J., Couceiro, J. F., and A. Moriana. 2010. Rootstock influences the response of pistachio (*Pistacia vera* L. cv. Kerman) to water stress and rehydration. *Scientia Horticulturae*. 125: 666–671.
- Hashem, A., Abd Allah, E. F., Alqarawi, A. A., and D. Egamberdieva. 2015. Bioremediation of adverse impact of cadmium toxicity on *Cassia italica* Mill. by arbuscular mycorrhizal fungi. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 23(1): 39-47.
- Jacygrad, E., Preece, J. E., Palmer, W. J., Michelmore, R., and D. Golino. 2020. Phenotypic segregation of seedling UCB 1 hybrid pistachio rootstock. *Trees*. 34:531–541. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01934-2>
- Kaya, C., Levent Tuna, A., Ashraf, M., and H. Altunlu. 2007. Improved salt tolerance of melon (*Cucumis melo* L.) by the addition of proline and potassium nitrate. *Environmental and Ex-perimental Botany*. 60(3): 397–403.
- Keller, M. 2005. Deficit Irrigation and Vine Mineral Nutrition. *American Journal of Enology of Viticulture*. 56(3): 267-283.
- Khalil Soha, E., and A. A. El-Noemani. 2012. Effect of irrigation intervals and exogenous proline application in improving tolerance of garden cress plant (*Lepidium sativum* L.) to water stress. *Journal of Applied Sciences Research*. 8(1):157-167.
- Khoyardi, F. F., Shamshiri, M. H., and A. Estaji. 2016. Changes in some physiological and osmotic parameters of several pistachio genotypes under drought stress. *Scientia Horticulture*. 198: 44–51.
- Kocheva, K., and G. Georgive. 2003. Evaluation of the reaction of two contrasting barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars in response to osmotic stress with PEG6000. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*. 1(1): 290-294.
- Kucukyumuk, Z., Kucukyumuk, C., Erdal, İ., and F. Eraslan. 2014. Effects of different sweet cherry rootstocks and drought stress on nutrient concentrations. *Journal of Agricultural Sciences*. 21: 431-438.
- Kumar, D., Al Hassan, M., Naranjo, M. A., Agrawal, V., Boscaiu, M., and O. Vicente. 2017. Effects of salinity and drought on growth, ionic relations, compatible solutes and activation of antioxidant systems in oleander (*Nerium oleander* L.). *PLoS ONE*. 12(9). e0185017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185017>.
- Ben Ahmed, C., Ben Rouina, B., Sensoy, S., Boukhriss, M., and F. Ben Abdullah. 2010. Exogenous proline effects on photosynthetic performance and antioxidant defense system of young olive tree. *Journal of Agriculture Food Chemistry*. 58(7): 4216-22. <https://doi.org/10.1021/jf9041479>
- Chen, C., and M. B. Dickman. 2005. Proline suppresses apoptosis in the fungal pathogen *Colletotrichum trifolii*. *Proceedings of the National Academy of Sciences. United States of America*. 102(9): 3459-3464.
- Chun, S. C., Paramasivan, M., and M. Chandrasekaran. 2018. Proline Accumulation Influenced by Osmotic Stress in Arbuscular Mycorrhizal Symbiotic Plants. *Frontier Microbiology*. 9: 2525. doi: 10.3389/fmicb.2018.02525
- Dawood, M. G., Taie, H. A. A., Nassar, R. M. A., Abdelhamid, M. T., and U. Schmidhalter. 2014. The changes induced in the physiological, biochemical and anatomical characteristics of *Vicia faba* by the exogenous application of proline under seawater stress. *South African Journal of Botany*. 93: 54–63.
- Deivanai, S., Xavier, R., Vinod, V., Timalata, K., and O.F. Lim. 2011. Role of exogenous proline in ameliorating salt stress at early stage in two rice cultivars. *Journal of Stress Physiology and Biochemistry*. 7(4): 157-174.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., and S. M. A. Basra. 2009. Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy Sustainable Development*. 29: 185–212.
- Fattahi, M., Mohammadkhani, A., Shiran, B., Baninasab, B., Ravash, R., and Y. Gogorcena. 2021. Beneficial effect of mycorrhiza on nutritional uptake and oxidative balance in pistachio (*Pistacia* spp.) rootstocks submitted to drought and salinity stress. *Scientia Horticulturae*. 281:67-82.
- Fathi, H., Imani, A., Amiri, M. E., Hajilou, J., and J. Nikbakht. 2017. Response of almond genotypes/cultivars grafted on GN15 ‘Garnem’ rootstock in deficit-irrigation stress conditions. *Journal of Nuts*. 8 (2): 123-135.
- Foyer, C., and C. Spancer. 1986. The relationship between phosphate status and photosynthesis in leaves effects on intracellular orthophosphate distribution photosynthesis and assimilate partitioning. *Planta*. 167(3): 369-375.

- Soroori, S., Danaee, E., Hemmati K., and A. Ladan Moghadam. 2020. Effect of Foliar Application of Proline on Morphological and Physiological Traits of *Calendula officinalis* L. under Drought Stress. *Journal of Ornamental Plants*. 1: 13-30.
- Tavallali, V., and M. Rahemi. 2007. Effects of rootstock on nutrient acquisition by leaf, kernel and quality of pistachio (*Pistacia vera* L.). *American–Eurasian Journal of Agriculture Environment Science*. 2(3): 240–246.
- Vimal, S. R., Singh, J. S., Arora, N. K., and S. Singh. 2017. Soil-plant-microbe interactions in stressed agriculture management. *Soil Science Society China*. 27(2): 177–192.
- Wael, M. S., Abdelsattar, A., Mohamed O. A. R., Refat, A., Marey, T. A., and A. El-Mageed. 2020. Exogenously applied proline enhances growth and productivity of drought stressed onion by improving photosynthetic efficiency, water use efficiency and up-regulating osmoprotectants. *Scientia Horticulturae*. 272.
- Zhu, J. K. 2016. Abiotic stress signaling and responses in plants. *Cell*. 167: 313–324.
- Zrig, A., Mohamed, H. B., Tounekti, T., Khemira, H., Serrano, M., Valeroc, D., and A. M. Vadel. 2016. Effect of rootstock on salinity tolerance of sweet almond (cv. Mazzetto). *South African Journal of Botany*. 102: 50–59.
- Kumar, N., Pal, M., Singh, A., Sairam R. K., and G. C. Srivastava. 2010. Exogenous proline alleviates oxidative stress and increase vase life in rose (*Rosa hybrida* L. ‘Grand Gala’). *Scientia Horticulture*. 127(1): 79–85.
- Maiato, H., DeLuca, J., Salmon, E., and W. C. Earnshaw. 2004. The dynamic kinetochore-microtubule interface. *Journal of Cell Science*. 117(23): 5461-5477.
- Mohammadrezakhani, S., Hajilou, J., Rezanejad, F., and F. Zaare-Nahandi. 2019. Assessment of exogenous application of proline on antioxidant compounds in three Citrus species under low temperature stress, *Journal of Plant Interactions*. 14(1): 347-358. DOI: 10.1080/17429145.2019.1629033
- Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanable, F. S., and Dean, L. A. 1954. Estimation of available phosphorous in soil by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circ. 939, U. S. Govern. Prin. Office, Washington, D. C., U. S. A.
- Paymaneh, Z., Sarcheshmehpour, M., Bukovska, P., and J. Jansa. 2019. Could indigenous arbuscular mycorrhizal communities be used to improve tolerance of pistachio to salinity and/or drought? *Symbiosis*. 79: 269–283.
- Roosbehani, F., Mosavi Fard, S., and A. Rezaeinejad. 2018. The effect of proline on some morphophysiological, physiological and biochemical properties of two varieties of *Impatiens walleriana* under salinity stress. M.Sc. thesis. University of Lorestan.