Journal of Wood and Forest Science and Technology

Print ISSN: 2322-2077
Online ISSN: 2322-2786

A comparison of physiological and morphological responses of *Populus deltoides* clones to different watering regimes

Nasrin Farokhi[*1], Davoud Azadfar[2], Zohreh Saeedi[3]

1. Corresponding Author, M.Sc. Graduate, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: nasrinfarokhi@yahoo.com
2. Associate Prof., Dept. of Forestry and Forest Ecology, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: azadfar.d@gmail.com
3. Ph.D. Graduate of Forest Sciences, General Department of Natural Resources and Watershed Management of Golestan Province, Gorgan, Iran. E-mail: saeedizohre@gmail.com

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 12.30.2023
Revised: 04.13.2024
Accepted: 04.20.2024

Keywords:
Physiological and stomatal,
Populus deltoids,
Vegetative characteristics,
Water-deficit stress

ABSTRACT

Background and Objectives: Water scarcity is a major climate factor in Iran, significantly impacting plant growth through internal stress. *Populus deltoides* is a crucial tree species in wood production. To optimize its cultivation, understanding drought stress effects, identifying the wilting threshold, and evaluating drought resistance among *Populus deltoides* clones is essential. This study investigated the effects of drought stress on growth, leaf morphology, physiology, and stomatal characteristics of *Populus deltoides* seedling clones.

Materials and Methods: In March 2016, cuttings from four *Populus deltoides* clones (*P.d* 63.51, *P.d* 67.51, *P.d* 69.55, *P.d* 77.51) were collected and grown in pots filled with a 1:1 forest soil mixture for six months under uniform conditions. Subsequently, seven similar six-month-old seedlings from each clone were transferred to a greenhouse. Drought stress treatments were applied for two weeks at each level (field capacity, 75%, and 50%). Traits related to growth (height, leaf number, fresh/dry weight of stems and roots, water content), leaf morphology (length, width, area, shape factor), stomata (width), pigments (chlorophyll *a*, *b*, total, carotenoid), and antioxidant enzymes (peroxidase and ascorbate peroxidase) were assessed. A two-factor factorial design with seven replicates per level was used for the drought and clone treatments.

Results: Water stress significantly affected various growth and morphological parameters. These included stem height, leaf number, fresh/dry weight of stems and roots, water content, leaf size and shape, and root-to-shoot ratio. Stomatal width was the only drought-responsive micromorphological parameter. Among the clones, *P.d* 77.51 and *P.d* 63.51 displayed superior tolerance to drought stress. Physiologically, drought stress decreased chlorophyll content (*a*, *b*, total) and carotenoids, while increasing peroxidase and ascorbate peroxidase activity. Seedlings coped better at 75% field capacity, exhibiting increased activity of antioxidant enzymes. Clones *P.d* 77.51 and *P.d* 63.51 again displayed greater tolerance.

Conclusion: This study suggests that drought stress response in *Populus deltoides* clones begins at 75% field capacity, becoming critical below

50%. Maintaining soil field capacity above 50% is crucial for cultivating or producing seedlings of the studied *Populus deltoides* clones. *P.d* 77.51 and *P.d* 63.51 emerged as the most drought-resistant clones.

Cite this article: Farokhi, Nasrin, Azadfar, Davoud, Saeedi, Zohreh. 2024. A comparison of physiological and morphological responses of *Populus deltoides* clones to different watering regimes. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 31 (1), 63-93.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/JWFST.2024.22026.2051
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۷۷
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۸۶

مقایسه پاسخ‌های فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی کلن‌های صنوبر دلتوئیدس (*Populus deltoides*) به رژیم‌های مختلف آبیاری

نسرین فرخی*[۱]، داوود آزادفر[۲]، زهره سعیدی[۳]

۱. نویسنده مسئول، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: nasrinfarokhi@yahoo.com

۲. دانشیار گروه جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: azadfar.d@gmail.com

۳. دانش‌آموخته دکتری علوم جنگل، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان، گرگان، ایران. رایانامه: saeedizohre@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

واژه‌های کلیدی:
تنش کم‌آبی،
صنوبر دلتوئیدس،
فیزیولوژیکی و روزنه‌ای،
ویژگی‌های رویشی

چکیده

سابقه و هدف: محدودیت آب یکی از مهم‌ترین عوامل اقلیمی در ایران است که باعث ایجاد تنش‌های درونی در گیاه شده و نهایتاً رشد آن را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به سهم قابل‌توجه صنوبر دلتوئیدس (*Populus deltoides*) در زراعت چوب، آگاهی از اثرات تنش کم‌آبی، تعیین آستانه پژمردگی و نیز میزان مقاومت کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس نسبت به سطوح مختلف تنش خشکی ضروری به نظر می‌رسد. در پژوهش پیش‌رو، تأثیر تیمارهای تنش کم‌آبی بر روی ویژگی‌های رویشی، مورفولوژیک برگ، فیزیولوژیکی و روزنه‌ای نهال‌های کلن‌های صنوبر دلتوئیدس مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: به‌منظور انجام این پژوهش در اسفند سال ۱۳۹۴ به تعداد ۶۰ قلمه از چهار کلن صنوبر دلتوئیدس (*P.d* 63/51، *P.d* 67/51، *P.d* 69/55 و *P.d* 77/51) موجود در جنگل شصت‌کلاته تهیه و در نهالستان این جنگل در گلدان‌های پلاستیکی با خاک جنگلی، خاک‌برگ به نسبت ۱:۱ کشت و به مدت ۶ ماه در شرایط مشابه پرورش داده شدند. سپس ۷ نهال گلدانی ۶ ماهه مشابه از کلن‌های مورد مطالعه صنوبر دلتوئیدس انتخاب و به گلخانه انتقال داده شد و تیمارها براساس ظرفیت زراعی موردنظر، آبیاری و بعد به‌صورت هر روز از طریق توزین در حد ظرفیت مربوطه نگهداری شدند. تجزیه‌وتحلیل صفات مربوط به آنزیم‌ها (آنزیم پراکسیداز و آنزیم آسکوربات پراکسیداز)، رنگدانه‌ها (کلروفیل *a*، *b*، کل و کارتنوئید)، زنده‌مانی و نیاز آبی به کمک آزمایش فاکتوریل دو عامله (تجزیه واریانس دو عامله) با هفت تکرار در هر سطح در قالب طرح کاملاً تصادفی و سایر صفات با استفاده از تجزیه

واریانس یک عامله (*ANOVA*) با هفت تکرار در هر سطح در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. اعمال تیمارهای تنش کم‌آبی از شهریورماه به‌مدت دو هفته در هر سطح تنش در شرایط گلخانه‌ای در دانشکده منابع طبیعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد.

یافته‌ها: بر اساس نتایج حاصل از مطالعات ویژگی‌های رویشی، تنش کم‌آبی باعث تغییرات صفات ارتفاع ساقه، تعداد برگ، وزن‌تر ساقه، وزن خشک ساقه، میزان آب ساقه، وزن‌تر ریشه، وزن خشک ریشه، میزان آب ریشه، نسبت وزن ریشه به ساقه گردید. هم‌چنین تنش از میان ویژگی‌های مورفولوژیکی برگ بر طول برگ، عرض برگ، نسبت طول به عرض برگ، ضریب شکل برگ، مساحت برگ، شاخص سطح برگ تأثیر معنی‌داری داشت درحالی‌که از پارامترهای ریز ریخت‌شناسی تنش کم‌آبی فقط باعث تغییرات عرض روزنه متفاوتی بین کلن‌های مورد مطالعه شد و نتایج این بخش از مطالعات کلن‌های *P.d* 77/51 و *P.d* 63/51 را به‌عنوان کلن‌های موفق‌تر نسبت به تنش کم‌آبی نشان داد. بر طبق نتایج حاصل از آزمایش‌های فیزیولوژیکی با افزایش شدت تنش خشکی، میزان کلروفیل *a*، *b*، کل و کارتنوئید کاهش یافت ولی میزان آنزیم پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز افزایش یافت، نهال‌ها از ۷۵ درصد ظرفیت زراعی به پایین تحت‌تأثیر تنش کم‌آبی قرار گرفتند و از طریق افزایش عکس‌العمل‌های فیزیولوژیکی مانند افزایش میزان آنزیم پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز تنش را تعدیل نموده و گیاه به‌خوبی با تنش‌های سطح ۷۵٪ و ۵۰٪ مقابله کرده است در این بخش کلن‌های *P.d* 77/51 و *P.d* 63/51 موفق‌تر از بقیه عمل نمودند.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی نتایج این پژوهش نشان داد که شروع فرایندهای پاسخ به تنش کم‌آبی از سطح ۷۵٪ ظرفیت زراعی بوده به‌طوری‌که اگر به زیر ۵۰ درصد ظرفیت زراعی برسد مرگ‌آور می‌باشد بنابراین آبیاری نهال‌ها برای زراعت چوب یا تولید نهال در نهالستان با کلن‌های مورد مطالعه صنوبر دلتوئیدس باید به‌گونه‌ای باشد که ظرفیت زراعی خاک از ۵۰ درصد، کاهش نیابد و در مقایسه بین کلن‌های مورد مطالعه، کلن *P.d* 77/51 و *P.d* 63/51 به‌عنوان کلن‌های مقاوم‌تر به تنش کم‌آبی معرفی شدند.

استناد: فرخی، نسرین، آزادفر، داوود، سعیدی، زهره (۱۴۰۳). مقایسه پاسخ‌های فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی کلن‌های صنوبر دلتوئیدس (*Populus deltoides*) به رژیم‌های مختلف آبیاری. *نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*، ۳۱ (۱)، ۹۳-۶۳.
DOI: 10.22069/JWFST.2024.22026.2051

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
© نویسندگان.

مقدمه

کشور ایران با متوسط بارندگی ۲٤۰ میلی‌متر (معادل یک‌سوم میانگین جهانی) جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌گردد (۱). کاهش سطح جنگل‌های طبیعی کشور و محدودیت استفاده از این منابع، با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران کاشت گونه‌هایی با رشد سریع، سازگار به خشکی و دارای نیاز آبی کم برای زراعت چوب را در اولویت قرار داده است. صنوبرها به‌دلیل رشد سریع و دامنه اکولوژیکی وسیع خود و مصارف مختلف چوب، یکی از مناسب‌ترین درختان برای زراعت چوب می‌باشند. با توجه به محدودیت آبی مناطق مختلف کشور ضرورت دارد تا نیاز آبی کلن‌های مختلف صنوبر و میزان مقاومت این‌گونه نسبت به سطوح متفاوت تنش کم‌آبی مطالعه شود. سازش گیاهان به تنش کم‌آبی نتیجه تغییر بسیاری از مکانیسم‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی است که منجر به تغییراتی در سرعت رشد گیاه، هدایت روزنه‌ای، سرعت فرایند فتوسنتز، فعالیت‌های آنزیمی و ... می‌شود. نخستین واکنش گیاهان در برابر تنش کم‌آبی، کاهش رشد و عملکردهای مورفولوژیکی گیاه است (۲). واکنش‌های مختلف مورفولوژیکی ازجمله باعث کاهش تعداد و سطح برگ، کاهش رویش اندام هوایی، افزایش رشد ریشه و کاهش وزن‌تر و خشک اندام‌های مختلف می‌شود (۳). وقتی گیاهان در معرض تنش کم‌آبی قرار می‌گیرند، محتوای آب بافت‌های خود را به‌وسیله برخی مکانیسم‌های فیزیولوژیکی برای افزایش جذب آب تنظیم می‌نمایند (٤). کاهش محتوای نسبی آب برگ باعث بسته شدن روزنه‌ها و کاهش هدایت روزنه‌ای برای ورود دی‌اکسید کربن به مزوفیل برگ شده و درنهایت راندمان فتوسنتزی گیاه کاهش می‌یابد (۵). دوام فتوسنتز و حفظ کلروفیل برگ تحت شرایط تنش ازجمله شاخص‌های فیزیولوژیک مقاومت به تنش است (٦). گیاهان سبز در فرایند فتوسنتز با کمک رنگیزه‌های خود، انرژی نورانی را به انرژی شیمیایی تبدیل می‌کنند. خشکی سبب کاهش محتوای رنگیزه‌های سلول‌های گیاهی (کلروفیل‌ها و کارتنوئیدها) می‌شود (۷). کارتنوئیدها در بافت‌های فتوسنتزی به‌عنوان رنگیزه کمکی عمل می‌کنند اما دارای نقش آنتی‌اکسیدانی و جمع‌کنندگی رادیکال‌های آزاد اکسیژن نیز می‌باشد (۸). گونه‌هایی که بتوانند محتوای کارتنوئید بیش‌تری داشته باشند، در مقابل گونه‌های اکسیژن فعال، نقش بازدارنده موفق‌تری خواهند داشت و در مقابل تنش کمبود آب تحمل بیش‌تری از خود نشان می‌دهند (۹). گیاهان برای از بین بردن رادیکال‌های آزاد اضافی و کاهش آسیب ناشی از تنش اکسیداتیو بر سلول‌ها به انواع مکانیسم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی (آنزیمی و غیرآنزیمی) مجهز شده‌اند (۱۰). گیاهان تحت تنش در برابر تأثیرات مخرب رادیکال‌های آزاد اکسیژن به‌وسیله آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز، گایاکول پراکسیداز) محافظت می‌شوند این آنزیم‌ها شاخص‌های ارزیابی مقاومت به خشکی در گیاهان محسوب می‌شوند (۱۱). آزمایش‌های مختلفی در مورد مقاومت به خشکی صنوبرها در داخل و خارج کشور انجام‌شده است.

به‌رغم حساسیت به خشکی در تمام گونه‌های متعلق به صنوبر، تنوع گسترده‌ای در حساسیت به تنش خشکی و سطوح تحمل به خشکی آن‌ها، الگوهای پاسخ آن‌ها به کمبود آب و هم‌چنین در کارایی مصرف آب آن‌ها گزارش‌شده است (۱۲). در این پژوهش ماروِن و همکاران (۲۰۰۲) بر روی واکنش نهال‌های صنوبر (اورآمریکن) کلن‌های *Luisa Avanzo* و *Dorskamp* به آبیاری و کم‌آبی را مورد مقایسه قرار دادند. پس از ۲۹ روز تنش کم‌آبی در هر دو کلن باعث بسته شدن روزنه‌ها، کاهش سرعت رشد برگ و

پایین آمدن پتانسیل آب برگ و محتوای نسبی آب برگ شد (۱۳). در پژوهش ساداتی (۲۰۱۱) مشخص شد که گونه *P. caspica Bornm* تحت تنش خشکی تا ٤٠ درصد ظرفیت زراعی را تحمل کرده و تنش خشکی موجب کاهش رشد و کاهش فتوسنتز خالص در نهال‌های آن می‌شود (١٤). نتایج مطالعه معینی‌فر و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد رطوبت بهینه برای حصول بهترین رشد اندام‌های هوایی و ریشه گونه صنوبر دلتوئیدس ٤٠ درصد رطوبت اشباع می‌باشد (۱۵). ساداتی و طبری (۲۰۱۳) نشان دادند که تنش خشکی در سال دوم موجب کاهش پتانسیل آبی و کاهش رشد نهال‌های *P. caspica* می‌شود (١٦). ژانگ و همکاران (٢٠٠٤) تفاوت جمعیت‌ها در سازگاری فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی نهال‌های (*Populus davidiana*) در پاسخ به خشکی افزایشی را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که در مقایسه با جمعیت آب‌وهوای مرطوب، جمعیت آب‌وهوای خشک ارتفاع کل، بیوماس کل، مساحت برگ کل و سطح ویژه برگ کم‌تر و نسبت ریشه به ساقه بیش‌تری داشت (۱۷). یین و همکاران (۲۰۰۵) پاسخ‌های سازگاری گونه *Populus kangdingensis* به تنش خشکی تحت سه رژیم آبیاری (۱۰۰، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی) را مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که تنش خشکی ارتفاع، قطر ساقه، تعداد و مساحت کل برگ، سطح ویژه برگ را افزایش و وزن خشک‌ریشه، ساقه و برگ را کاهش داد و درواقع مانع رشد شد. هم‌چنین کاهش هدایت روزنه‌ای به‌طور مؤثری اتلاف آب را کنترل کرد و راندمان مصرف آب را افزایش داد (۱۸). ساداتی و همکاران (۲۰۱۹) تحمل به خشکی نونهال‌های پنج کلن صنوبر دلتوئیدس را بررسی کردند نتایج نشان داد که تنش کم‌آبی باعث کاهش زنده‌مانی، رشد، زی‌توده، فتوسنتز و تعرق نونهال صنوبر دلتوئیدس شد (۱۹). پاسخ‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی به تنش خشکی در دو جمعیت متضاد گونه *Populus przewalskii* توسط لی و همکاران (٢٠٠٦) بررسی شد نتایج نشان داد که جمعیت آب‌وهوای خشک نسبت به جمعیت آب‌وهوای مرطوب تحت سه رژیم آبیاری مشابه محتوای کلروفیل و کارتنوئید بیش‌تری داشت و بیوماس بیش‌تری را به ریشه‌ها تخصیص داد. هم‌چنین تحت تنش خشکی در هر دو جمعیت ارتفاع ساقه، قطر یقه، وزن خشک کل، کلروفیل کل، *a* و *b* و کارتنوئید به‌طور معنی‌داری کاهش و فعالیت آنزیم پراکسیداز افزایش یافت (۲۰). خو و همکاران (۲۰۰۸) پاسخ‌های فتوسنتز مربوط به جنس را نسبت به تنش کم‌آبی در گونه‌های دوپایه *Populus cathayana Rehd* تحت دو رژیم آبیاری (۱۰۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی) بررسی کردند آن‌ها مشاهده کردند که کم‌آبی به‌طور معنی‌داری سطح برگ، تعداد برگ کل، سطح ویژه برگ و محتوای نسبی آب را کاهش و محتوای غلظت کلروفیل کل و فعالیت آنزیم پراکسیداز را افزایش داد (۲۱). سعیدی و آزادفر (۲۰۰۹) سه گونه مختلف صنوبر شامل *P. euramericana* 476، *P. deltoides* 63/51، *P. nigra* 64/13 را ازنظر تأثیر تنش‌های غرقابی و خشکی بر نرخ خالص فتوسنتز و درصد زنده‌مانی مقایسه کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که تنش آبی باعث کاهش نرخ فتوسنتز خالص و درصد زنده‌مانی نهال‌های صنوبر نسبت به شاهد شد. هم‌چنین *P. euramericana* 476 ازنظر نرخ فتوسنتز خالص و درصد زنده‌مانی نسبت به دو گونه دیگر در شرایط تنش‌های خشکی و غرقابی موفق‌تر بود و دو گونه دیگر مقاومت بیش‌تری را به تنش خشکی نسبت به تنش غرقابی از خود نشان دادند (۲۲). گوا و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی اثرات تنش کم‌آبی در سه کلن صنوبر (اورآمریکن) در ظرفیت

زراعی مختلف پرداختند، نتایج نشان داد که تیمارهای کم‌آبی (ظرفیت زراعی ۵۰٪، ٤۰٪ و ۳۰٪) باعث کاهش سرعت فتوسنتز، ارتفاع ساقه، میزان تعرق، هدایت روزنه و محتوای کلروفیل در هر سه کلن (*OP-367, R-247, DN-34*) و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شد (۲۳). لیائو و همکاران (۲۰۱۸) به مطالعه پاسخ‌های فتوسنتزی و واکنش‌های فیزیولوژیکی به تنش کم‌آبی و آبیاری در جمعیت تریپلوئید صنوبر *Cathayana Rehed* نشأت گرفته از سه تریپلوئید و یک دیپلوئید با والدین یکسان اما با منشأ گامت مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که تنش کم‌آبی به‌طور قابل‌توجهی باعث کاهش محتوای نسبی آب برگ، فتوسنتز و افزایش نشت الکترولیت و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، مانند سوپر اکسید دیسموتاز، پراکسیداز و کاتالاز در چهار جمعیت موردبررسی گردید (۲٤). در پژوهش کوماری و همکاران (۲۰۱۷) آزمایش‌هایی برای ارزیابی تحمل به خشکی تحت سطوح مختلف تنش آبی در درختان صنوبر انجام شد. قلمه‌های *P. deltoides* کلن (*Kranti*) در معرض چهار رژیم آبیاری مختلف (۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی) قرار گرفت و تغییرات در پارامترهای فیزیولوژیکی مرتبط باتحمل به خشکی ثبت شد. نتایج آزمایش نشان داد که گیاهان صنوبر فقط می‌توانند رشد و زیست‌توده خود را ۷۵ تا ۵۰ درصد ظرفیت زراعی حفظ کنند که فراتر از آن، تنش شدید شده است و هدف گیاهان به‌جای نگهداری زیست‌توده به بقا تغییر کرده است. (۲۵).

با توجه به محدودیت آبی مناطق مختلف کشور ضرورت دارد تا نیاز آبی کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس و میزان مقاومت این‌گونه نسبت به سطوح متفاوت تنش کم‌آبی مطالعه شود. ازاین‌رو در این پژوهش برای آگاهی از نیاز دقیق آبی این‌گونه، با اعمال سطوح مختلف تنش خشکی تغییرات رویشی، مورفولوژیک برگ، فیزیولوژیکی و روزنه‌ای کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس موردبررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مطالعه پیش‌رو در نظر دارد تنش آبی کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس در سطوح متفاوت تنش کم‌آبی مورد ارزیابی قرار دهد. به‌منظور انجام این پژوهش در اسفند سال ۱۳۹٤ چهار کلن صنوبر دلتوئیدس (*P.d* 69/55 با جنسیت ماده و کلن‌های *P.d* 67/51، *P.d* 63/51 و *P.d* 77/51 با جنسیت نر) با مبدأ ایتالیا به تعداد ٦۰ قلمه به ارتفاع حدود ۲۰ سانتی‌متر و قطر ۲ سانتی‌متر از هر کلن موجود در جنگل آموزشی- پژوهشی شصت‌کلاته واقع در ۱۷ کیلومتر گرگان تهیه و در نهالستان این جنگل به روش غیرجنسی با قلمه شاخه در گلدان‌های پلاستیکی با اندازه ۳۰ سانتی‌متر به‌طوری‌که حدود ۳-٤ سانتی‌متر از نوک قلمه‌ها بیرون از خاک قرار گیرد و با ۲ الی ۳ جوانه کاشته شد خاک گلدان‌ها حاوی خاک جنگلی، خاک‌برگ به نسبت ۱:۱ و به‌مدت ٦ ماه در شرایط مشابه پرورش داده شدند. گلدان‌ها در شهریورماه ۱۳۹۵ به گلخانه با نور طبیعی و تهویه مناسب که از بارندگی محافظت می‌کند در دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان منتقل و تحت تنش کم‌آبی قرار گرفتند. صفات مربوط به (تعداد برگ، ارتفاع ساقه، قطر ساقه، طول برگ، عرض برگ، نسبت طول به عرض برگ، محیط برگ، مساحت برگ، ضریب شکل برگ، شاخص سطح برگ، سطح ویژه برگ، وزن‌تر برگ، وزن خشک برگ، میزان آب برگ، وزن‌تر ساقه، وزن خشک ساقه، میزان آب ساقه، وزن‌تر ریشه، وزن خشک ریشه، نسبت وزن خشک ریشه به ساقه، میزان آب ریشه، طول روزنه، عرض روزنه، مساحت روزنه، تراکم روزنه و نشت الکترولیت) بعد از تنش کم‌آبی و صفات مربوط

به آنزیم‌ها (آنزیم پراکسیداز و آنزیم آسکوربات پراکسیداز)، رنگدانه‌ها (کلروفیل *a*، *b*، کل و کارتنوئید)، زنده‌مانی و نیاز آبی در سطوح مختلف تنش کم‌آبی اندازه‌گیری و محاسبه شدند.

صفات مربوط به آنزیم‌ها (آنزیم پراکسیداز و آنزیم آسکوربات پراکسیداز)، رنگدانه‌ها (کلروفیل *a*، *b*، کل و کارتنوئید) و زنده‌مانی از طریق آزمایش فاکتوریل دو عامله (تجزیه واریانس دو عامله شامل عامل ۱: ظرفیت زراعی در چهار سطح، تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی (شاهد)، تیمار آبیاری ۷۵ درصد ظرفیت زراعی (تنش ملایم)، تیمار آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش متوسط) و تیمار آبیاری ۲۵ درصد ظرفیت زراعی (تنش شدید) و عامل دوم کلن‌های مختلف صنوبر در چهار سطح (*P.d* 63/51، *P.d* 67/51، *P.d* 69/55 و *P.d* 77/51)) با هفت تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی و صفت نیاز آبی از طریق تجزیه واریانس دو عامله در قالب طرح کاملاً تصادفی شامل عامل اول: تنش کم‌آبی در سه سطح (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) و عامل ۲: کلن‌ها در چهار سطح انجام شد و مدل خطی بود:

$$X_{ijk} = \mu + \delta_j + \delta_k + \delta_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

که در آن، X_{ijk} مقدار عددی هر مشاهده، μ میانگین جمعیت، δ_j اثر عامل اول، δ_k اثر عامل دوم، δ_{jk} اثر متقابل دو عامل و ε_{ijk} خطای آزمایش است.

آنالیز واریانس یک عامله (*ANOVA*) بر روی صفات مربوط به (تعداد برگ، ارتفاع ساقه، قطر ساقه، طول برگ، عرض برگ، نسبت طول به عرض برگ، محیط برگ، مساحت برگ، ضریب شکل برگ، شاخص سطح برگ، سطح ویژه برگ، وزن‌تر برگ، وزن خشک برگ، میزان آب برگ، وزن‌تر ساقه، وزن خشک ساقه، میزان آب ساقه، وزن‌تر ریشه، وزن خشک ریشه، نسبت وزن خشک ریشه به ساقه، میزان آب ریشه، طول روزنه، عرض روزنه، مساحت روزنه، تراکم روزنه و نشت الکترولیت) در سطوح کلن‌ها با هفت تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. مدل خطی بود:

$$X_{ij} = \mu + \delta_j + \varepsilon_{ij}$$

که در آن، X_{ij} مقدار عددی هر مشاهده، μ میانگین جمعیت، δj اثر تیمار و ε_{ij} خطای آزمایش

تعیین ظرفیت زراعی و اعمال تیمار کم‌آبی: بافت خاک گلدان‌ها که از نوع لومی رسی بود به روش هیدرومتری تعیین و ظرفیت زراعی کامل به روش وزنی تعیین شد. به این منظور سه نمونه خاک مشابه گلدان‌های مورد استفاده تهیه، توزین و بعد در آون خشک گردیدند. در مرحله بعد نمونه‌ها با آب اشباع شده و ٤٨ ساعت بعد، از اختلاف آب ورودی و خروجی میزان آب باقی‌مانده در خاک که همان ظرفیت زراعی کامل می‌باشد مشخص شد (۲٦). تیمارهای آبیاری شامل تیمار آبیاری ۱۰۰٪ ظرفیت زراعی (شاهد)، تیمار آبیاری ۷۵٪ ظرفیت زراعی (تنش ملایم)، تیمار آبیاری ۵۰٪ ظرفیت زراعی (تنش متوسط) و تیمار آبیاری ۲۵٪ ظرفیت زراعی (تنش شدید) در نظر گرفته شدند (۲۷). وزن مرجع گلدان‌ها در هر یک از تیمارهای آبیاری بر اساس وزن خشک خاک، وزن گلدان و وزن اولیه نهال‌ها، برای تیمارهای آبیاری ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ٤۷۰۰، ٤۳۳۲، ۳۹٦٤ و ۳۵۹٦ برحسب گرم مشخص شد. به‌منظور ثابت نگه‌داشتن وزن گلدان‌ها در طول اجرای آزمایش، نهال‌های تیمارها بر اساس ظرفیت زراعی موردنظر، آبیاری و بعد به‌صورت هر روز از طریق توزین به‌وسیله ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ گرم و مقایسه آن با وزن مرجع تیمار آبیاری مربوطه، میزان آب مورد نیاز هر گلدان مشخص و با

استفاده از استوانه مدرج یک لیتری در اختیار گلدان‌ها قرار گرفت. اعمال تیمارهای تنش کم‌آبی از شهریورماه به‌مدت دو هفته در هر سطح تنش در نظر گرفته شد (۲۸) نهال‌های تیمار ۲۵ درصد ظرفیت زراعی ظرف ٦ روز و با رسیدن ظرفیت زراعی خاک به ٤۰٪ در حدود نصف نهال‌های کلن‌ها به سمت پژمردگی پیش رفتند بنابراین آزمایش متوقف و نمونه‌برداری‌های آخر تنش انجام و مطالعه شد.

به‌منظور بررسی نیاز آبی کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس آزمایشی به‌صورت فاکتوریل دو عامله در قالب طرح کاملاً تصادفی شامل عامل اول ظرفیت زراعی در ۳ سطح (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) و عامل دوم کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس در چهار سطح و با هفت تکرار در هر سطح انجام شد. مدت‌زمان اعمال تیمارها ۹ روز در هر سطح تنش (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) در نظر گرفته شد. نهال‌های تیمارها بر اساس ظرفیت زراعی موردنظر، آبیاری و بعد به‌صورت هر روز از طریق توزین در حد ظرفیت مربوطه نگهداری شدند. نهال‌ها در تیمار کم‌تر از ۵۰ درصد ظرفیت زراعی دچار خشکیدگی و صدمه شدند ازاین‌رو آزمایش متوقف و آنالیز انجام شد.

صفات ریخت‌شناسی: در ابتدا و انتهای آزمایش صفات ارتفاع ساقه توسط خط‌کش با دقت میلی‌متر و قطر یقه توسط کولیس با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر اندازه‌گیری گردید و تفاوت آن‌ها به‌عنوان رشد ارتفاعی و قطری نهال‌ها در نظر گرفته شد. تعداد برگ‌های هر نهال قبل و بعد از اعمال تنش اندازه‌گیری و تغییرات آن‌ها ثبت گردید. جهت اندازه‌گیری مساحت، محیط، طول، عرض، نسبت طول به عرض و ضریب شکل برگ، برگ‌های نهال‌ها در انتهای تنش، اسکن شد و مشخصات فوق به‌وسیله دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ[1] مدل CI-202 ساخت شرکت CID قرائت گردید. برای تعیین شاخص سطح برگ، در پایان اعمال تیمارها مساحت برگ‌های هر نهال توسط دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ اندازه‌گیری و با هم جمع گردیدند. جهت اندازه‌گیری سطح ویژه برگ، نسبت به انتخاب یک برگ متوسط از هر نهال اقدام گردید. سطح برگ‌های برداشت‌شده توسط دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ اندازه‌گیری گردید سپس برگ‌ها به مدت ٢٤ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و پس از خارج کردن از آون بلافاصله توزین و وزن خشک آن‌ها یادداشت گردید. با داشتن وزن خشک و سطح برگ، سطح ویژه برگ از رابطه زیر محاسبه گردید (۲۹).

وزن خشک برگ (گرم) / سطح برگ (سانتی‌مترمربع) = سطح ویژه برگ (سانتی‌مترمربع/ گرم)

به‌منظور اندازه‌گیری وزن‌تر، زی‌توده و میزان آب برگ، ساقه و ریشه، در پایان اعمال تیمارها، برگ‌های کل هر نهال شمارش و وزن‌تر آنها توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری گردید سپس به‌مدت ٤٨ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و وزن خشک آن‌ها نیز یادداشت گردید. بعد از جدا کردن برگ‌ها، ساقه را با قیچی باغبانی از محل یقه از ریشه جدا کرده و وزن‌تر ساقه و ریشه توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری و یادداشت گردید و بعد به‌مدت ٤٨ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و وزن خشک آن‌ها نیز یادداشت گردید و برای جداسازی ریشه از بستر خاک، کیسه‌های پلاستیکی نهال‌ها شکافته شده و سپس با فشار دست توسط آب شیلنگ با فشار شستشو صورت گرفت و مراقبت شد تا حد امکان ریشه‌ای از نهال جدا نشود.

1- Leaf Area Meter

هم‌چنین نسبت زی‌توده ریشه به ساقه از تقسیم اعداد اندازه‌گیری شده محاسبه گردید و با داشتن وزن‌تر و خشک برگ‌ها، ریشه و ساقه و کسر وزن‌تر از وزن خشک، میزان آب آن‌ها مشخص گردید (۳۰).

برای بررسی زنده‌مانی در هریک از کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس نسبت تعداد نهال‌های باقی‌مانده در پایان بررسی (S) به نهال‌های اولیه در هر تیمار (SI) به‌صورت درصد زنده‌مانی (SP) منظور و تجزیه‌وتحلیل شد.

$$Sp = \frac{S}{SI} \times 100$$

صفات فیزیولوژی: کلروفیل *a*، *b* و کارتنوئید به روش آرنون (۱۹٦۷) اندازه‌گیری گردید. مقدار ۰/۲۵ گرم برگ را در هاون چینی ریخته، سپس با استفاده از نیتروژن مایع آن را خرد کرده و ۵ میلی‌لیتر استن ۸۰ درصد به نمونه اضافه و سپس در دستگاه سانتریفیوژ با سرعت ۳۰۰۰ دور (در دقیقه) به‌مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شد. عصاره جداشده فوقانی حاصل از سانتریفیوژ به لوله آزمایش منتقل گردید. سپس مقداری از نمونه داخل لوله آزمایش به داخل کووت شیشه‌ای اسپکتروفتومتر مدل unico 2100 uv ساخت آمریکا ریخته و بعد به‌طور جداگانه در طول موج‌های ٦٦٣ نانومتر برای کلروفیل *a* و ٦٤٥ نانومتر برای کلروفیل *b* و ٤٧٠ نانومتر برای کارتنوئیدها مقدار جذب قرائت گردید. در نهایت با استفاده از رابطه‌های زیر میزان کلروفیل *a*، کلروفیل *b* و کارتنوئید برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر نمونه به دست آمد (۳۱).

Chlorophyll a = ((12.25 × A663) - (2.79 × A645)) V / 100 W

Chlorophyll b = ((21.5 × A645) - (5.1 × A663)) V / 100 W

Carotenoids = ((1000 × A470) - (1.82 × A663) - (85.02 × A645)) / 198

که در آن، A جذب نور در طول موج‌های ٦٦٣ و ٦٤٥ نانومتر، V حجم محلول صاف‌شده (محلول فوقانی حاصل از سانتریفیوژ) و W وزن‌تر نمونه برحسب گرم.

به‌منظور مطالعه آنزیم پراکسیداز برگ ابتدا از برگ‌ها عصاره‌گیری شد. جهت عصاره‌گیری، ابتدا ۰/۱ گرم برگ را در هاون چینی ریخته، سپس با استفاده از نیتروژن مایع آن را خرد کرده و با یک میلی‌لیتر محلول عصاره‌گیری (اسید آسکوربیک ۲ گرم، اسید اتیلن دی آمین ترا استیک ۲ گرم، بوراکس ۳/۸ گرم، پلی‌اتیلن گلیکول ۵۰ گرم، تریس بیس ۱/۲ گرم و کلرید سدیم ۳/٦ گرم) با نسبت ۱ به ۳ مخلوط و در لوله آزمایش ریخته شد. نمونه‌های عصاره‌گیری شده به مدت ٢٤ ساعت در دمای ٤ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد سپس نمونه‌ها با سرعت ۳۰۰۰ دور (در دقیقه) به‌مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شدند و قسمت رویی محلول برداشته شد. جهت قرائت کمی آنزیم پراکسیداز، ابتدا دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۳۰ نانومتر تنظیم شد. پس از کالیبره کردن دستگاه، ۲ سی‌سی بافر استات ۰/۰۱ مولار (A و B) و ۲۰۰ مایکرولیتر بنزدین ۰/۰۱ مولار درون کووت ریخته شد. سپس ۵۰ ماکرولیتر عصاره توسط سرنگ هامیلتون به آن افزوده شد و در نهایت ٤ سی‌سی پراکسید هیدروژن ۳٪ به ترکیب اضافه شد. کووت در

جایگاه خود در دستگاه اسپکتروفتومتر قرار داده شد و عدد فعالیت کمی آنزیم در ۱۰، ٦۰ و ۱۲۰ ثانیه قرائت شد (۳۲).

مطالعات کمی آنزیم آسکوربات پراکسیداز طبق روش رانیری و همکاران (۲۰۰۳) و با استفاده از سوبسترا شامل (٦۰۰ میکرولیت EDTA ۰/۱ مولار، ۱۵۰۰ میکرولیتر بافر فسفات ۰/۰۵ مولار، ٤۰۰ میکرولیتر آسکوربیک اسید ۰/۵ میلی‌مولار و ۰/۳ میکرولیتر آب‌اکسیژنه ۳۰ درصد) انجام گردید. جهت قرائت کمی آنزیم آسکوربات پراکسیداز، ابتدا دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۲۹۰ نانومتر تنظیم شد. پس از کالیبره کردن دستگاه، ٦۰۰ میکرولیت EDTA ۰/۱ مولار و ۱۵۰۰ میکرو لیتر بافر فسفات ۰/۰۵ مولار درون کووت ریخته شد. سپس ۵۰ ماکرولیتر عصاره توسط سرنگ هامیلتون به آن افزوده شد و در نهایت ٤۰۰ میکرولیتر آسکوربیک اسید ۰/۵ میلی‌مولار و ۰/۳ میکرولیتر آب اکسیژنه ۳۰ درصد به ترکیب اضافه شد. کووت در جایگاه خود در دستگاه اسپکتروفتومتر قرار داده شد و عدد فعالیت کمی آنزیم در ٦۰ و ۱۲۰ ثانیه قرائت شد (۳۳).

جهت تعیین پایداری غشا سلول‌های برگی از شاخص نشت الکترولیت به روش ژائو و همکاران (۱۹۹۲) استفاده گردید (۳٤). در این روش ابتدا قطعات برگی با اندازه ۲ سانتی‌متر تهیه گردید. این قطعات پس از شستشو همراه با ۵ سی‌سی آب مقطر در لوله‌های آزمایش قرار گرفتند سپس لوله‌های آزمایش به مدت ۲٤ ساعت در دمای محیط آزمایشگاه قرار گرفتند. در این مرحله مقدار هدایت الکتریکی نمونه‌های آزمایش (EC_1) توسط دستگاه EC متر مدل ۷۲۰۰ ساخت کشور تایوان اندازه‌گیری شد سپس لوله‌های آزمایش به مدت ۲٤ ساعت در فریزر قرار داده شدند و پس از ۲٤ ساعت قرار گرفتن در دمای محیط اندازه‌گیری هدایت الکتریکی در این مرحله (EC_2) انجام گرفت. در نهایت مقدار نشت الکترولیت از طریق معادله زیر محاسبه گردید.

$$EL = (E1 / E2) \times 100$$

محتوای نسبی آب برگ (*RWC*) به روش فرات و لوات (۱۹۹۹) از رابطه زیر محاسبه شد (۳۵):

$$RWC\ (\%) = (FW - DW) / (TW - DW)$$

که در آن، RWC محتوای آب نسبی برگ، FW وزن‌تر برگ، DW وزن خشک برگ، TW وزن آماس برگ.

به‌منظور اندازه‌گیری صفات ریز ریخت‌شناسی روزنه از روش لاک شفاف اسمیت و همکاران (۱۹۸۹) استفاده شد (۳٦). بدین‌صورت که لاک براق‌کننده ناخن (بی‌رنگ) به‌صورت یک‌لایه نازک بر روی سطح زیرین برگ قرار گرفت. پس از خشک شدن، لایه نازک لاک به کمک چسب نواری از سطح برگ برداشته شد و در زیر میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی ٤۰۰ برابر قرار داده شد و توسط دوربین دیجیتالی از نمونه‌ها عکس گرفته شد سپس برای اندازه‌گیری مشخصات فوق، از نرم‌افزار *Motic Images Ver 2000 1/2* استفاده گردید.

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها: نرمال بودن داده‌ها با آزمون کولموگرف- اسمیرنوف و همگنی واریانس داده‌ها با آزمون لون انجام شد. صفات مربوط به آنزیم‌ها (آنزیم پراکسیداز و آنزیم آسکوربات پراکسیداز)، رنگدانه‌ها (کلروفیل *a*، *b*، کل و کارتنوئید) و زنده‌مانی به کمک تجزیه واریانس دو عامله در قالب طرح کاملاً تصادفی شامل عامل ۱: تنش کم‌آبی در چهار سطح (۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی) و عامل ۲: کلن‌ها در چهار سطح و صفت نیاز آبی از طریق تجزیه واریانس دو عامله در قالب طرح کاملاً تصادفی شامل عامل

اول: تنش کم‌آبی در سه سطح (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) و عامل ۲: کلن‌ها در چهار سطح و سایر صفات به کمک تجزیه واریانس یک عامله (*ANOVA*) در قالب طرح کاملاً تصادفی مقایسه شدند. هم‌چنین جهت مقایسات چندگانه از آزمون دانکن در نرم‌افزار *SPSS 21* استفاده و نمودارها توسط نرم‌افزار *Excel* ترسیم شدند.

نتایج

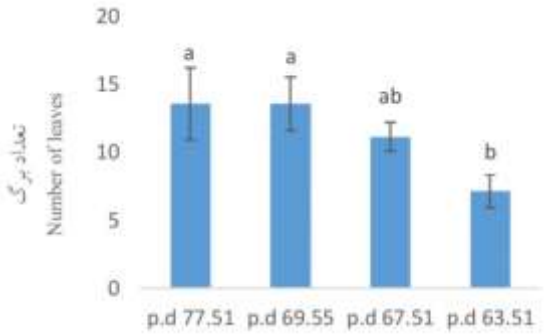
صفات ریز ریخت‌شناسی و رویشی: نتایج آنالیز واریانس در جدول ۱ بیانگر این مطلب است که تغییرات تعداد برگ در قبل و بعد از اعمال تنش کم‌آبی در کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس اختلاف معنی‌داری نداشت. میانگین تغییرات تعداد برگ در سطوح کلن‌های صنوبر دلتوئیدس در شکل ۱ مشاهده می‌شود. با توجه به جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تعداد برگ بعد از تیمار تنش کم‌آبی در سطح ۱ درصد خطا اختلاف معنی‌داری داشت. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود بیش‌ترین تعداد برگ بعد از تیمار تنش کم‌آبی در کلن *P.d* 77/51 بود.

جدول ۱- تجزیه واریانس تغییرات تعداد برگ در کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس قبل از تیمار و بعد از تنش کم‌آبی.

Table 1. Variance analysis of changes in the number of leaves in different clones of *Populus deltoides* before treatment and after dehydration stress.

مجموع مربعات Sum of Squares	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean square	F F-ratio	سطح معنی‌داری Pr>F
193.286	3	64.429	2.736	0.066^{ns}

^{ns} غیرمعنی‌دار



شکل ۱- مقایسه میانگین تغییرات تعداد برگ در کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس قبل از تیمار و بعد از تنش کم‌آبی.

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است.

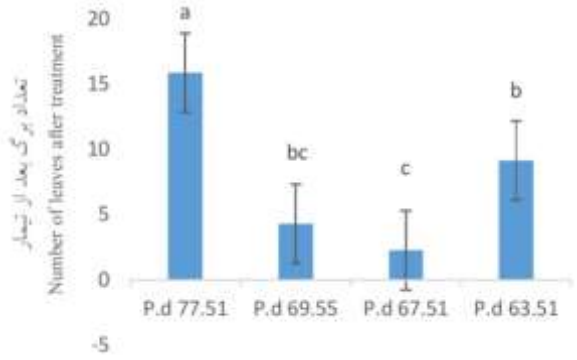
Figure 1. Comparison of average changes in the number of leaves in different clones of *Populus deltoides* before treatment and after dehydration stress. Similar letters indicate insignificant differences.

جدول ۲- تجزیه واریانس تعداد برگ کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس بعد از تیمار تنش کم‌آبی.

Table 2. Variance analysis of the number of leaves in different clones of *Populus deltoides* after dehydration stress treatment.

مجموع مربعات Sum of Squares	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean square	F F-ratio	سطح معنی‌داری Pr>F
766.107	3	255.369	16.020	0.000**

** معنی‌دار در سطح ۱ درصد



شکل ۲- مقایسه میانگین تعداد برگ در کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس بعد از تیمار تنش کم‌آبی.

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است.

Figure 2. Comparison of average the number of leaves in different clones of *Populus deltoides* after dehydration stress treatment. Similar letters indicate insignificant differences.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تغییرات ارتفاع ساقه (سطح احتمال ۱ درصد) در قبل و بعد از اعمال تنش کم‌آبی و عرض روزنه، وزن‌تر ریشه، (سطح احتمال پنج درصد) و شاخص سطح برگ، طول برگ، عرض برگ، نسبت طول به عرض برگ، محیط برگ، مساحت برگ، ضریب شکل برگ، وزن‌تر ساقه، وزن خشک ساقه، میزان آب ساقه، میزان آب ریشه و نسبت وزن خشک‌ریشه به ساقه تحت تنش کم‌آبی که در سطوح کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس ثابت بود در سطح یک درصد خطا اختلاف معنی‌داری داشت. آنالیز واریانس بررسی مساحت روزنه، طول روزنه، تراکم روزنه، وزن‌تر برگ، وزن خشک برگ، میزان آب برگ و وزن خشک ریشه تحت تنش کم‌آبی که در سطوح کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس ثابت بود اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۳).

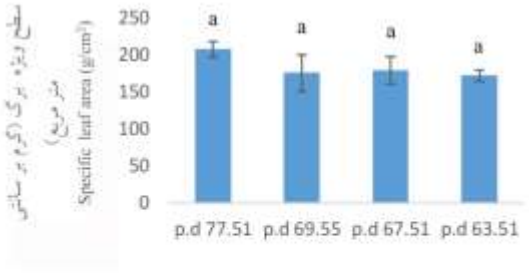
نتایج مقایسه میانگین‌ها برای کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس نشان داد که بیش‌ترین میانگین شاخص سطح برگ در کلن *P.d* 77/51 و کم‌ترین نیز در کلن *P.d* 69/55 بود ولی سطح ویژه برگ بعد از اعمال تنش کم‌آبی در سطوح کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس اختلاف معنی‌داری نداشت و بیش‌ترین میانگین پارامتر طول برگ در کلن *P.d* 67/51 بود. هم‌چنین بیش‌ترین عرض برگ، نسبت طول به عرض برگ و مساحت برگ، محیط برگ در کلن *P.d* 67/51 و نیز کم‌ترین مربوط به کلن *P.d* 69/55 بود و بیش‌ترین ضریب شکل برگ در کلن *P.d* 69/55 و نیز کم‌ترین مربوط به کلن *P.d* 77/51 بوده است. نتایج نشان می‌دهد تنش از بین پارامترهای روزنه بر عرض روزنه تأثیر معنی‌داری داشت بیش‌ترین میانگین عرض روزنه در کلن *P.d* 63/51 و کم‌ترین نیز در کلن *P.d* 77/51 بود. پارامترهای وزن‌تر برگ، وزن خشک برگ و میزان آب برگ بعد از اعمال تنش کم‌آبی در کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس اختلاف معنی‌داری نداشت. بیش‌ترین میانگین تغییرات ارتفاع ساقه، وزن‌تر ساقه، وزن خشک ساقه و میزان آب ساقه در کلن *P.d* 77/51 و کم‌ترین در کلن *P.d* 69/55 بود ولی تغییرات قطر ساقه در قبل و بعد از اعمال تنش کم‌آبی اختلاف معنی‌داری نداشت. نتایج نشان داد وزن‌تر ریشه، میزان آب ریشه و نسبت وزن خشک‌ریشه به ساقه بعد از اعمال تنش کم‌آبی اختلاف معنی‌داری دارد به‌طوری‌که بیش‌ترین میزان نسبت ریشه به ساقه در کلن *P.d* 69/55 و کم‌ترین نیز در کلن *P.d* 67/51 بود ولی وزن خشک‌ریشه بعد از اعمال تنش کم‌آبی اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۳).

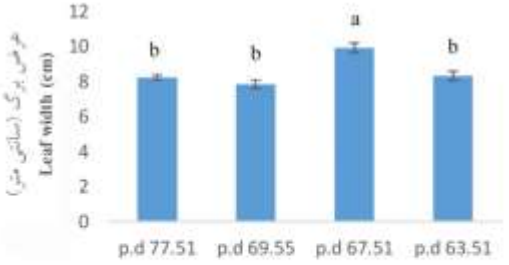
جدول ۳- تجزیه واریانس صفات ریز ریخت‌شناسی و رویشی در کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس.

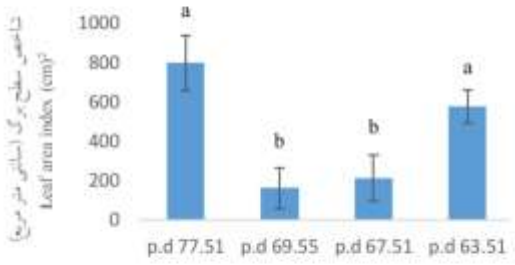
Table 3. Variance analysis of micromorphological and vegetative traits in different clones of *Populus deltoides*.

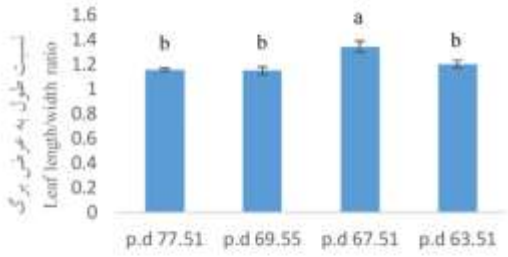
سطح معنی‌داری Pr>F	F F-ratio	میانگین مربعات Mean square	درجه آزادی Degree of freedom	مجموع مربعات Sum of Squares	صفات مورد مطالعه Investigated parameters
0.001**	7.158	642785.100	3	1928355.300	شاخص سطح برگ Leaf area index
0.127ns	2.202	1720.317	3	5160.952	سطح ویژه برگ Specific leaf area
0.000**	35.544	161.285	3	483.854	طول برگ Leaf length
0.000**	12.451	42.786	3	128.357	عرض برگ Leaf width
0.000**	9.658	0.441	3	1.323	نسبت طول به عرض برگ Leaf length-width ratio
0.000**	27.806	15497.097	3	46491.292	مساحت برگ Leaf area
0.000**	29.178	1559.109	3	4677.326	محیط برگ Leaf perimeter
0.000**	15.463	0.202	3	0.606	ضریب شکل برگ Leaf shape coefficient
0.017*	3.597	0.000	3	0.000	عرض روزنه Stomatal width
0.250ns	1.397	0.000	3	0.000	مساحت روزنه Stomatal area
0.549ns	0.710	0.001	3	0.002	طول روزنه Stomatal length
0.434ns	0.945	976.190	3	2928.571	تراکم روزنه Stomatal density
0.220ns	1.637	0.224	3	0.671	وزن تر برگ Leaf fresh weight
0.121ns	2.259	0.033	3	0.099	وزن خشک برگ Leaf dry weight
0.292ns	1.357	0.087	3	0.262	میزان آب برگ Leaf water content
0.008**	5.006	912.318	3	2736.955	ارتفاع ساقه Stem height
0.000**	15.750	310.112	3	930.336	وزن تر ساقه Stem fresh weight
0.000**	30.166	78.379	3	235.136	وزن خشک ساقه Stem dry weight
0.001**	8.182	83.842	3	251.526	میزان آب ساقه Stem water content
0.309ns	1.263	2.497	3	7.490	قطر ساقه Stem diameter
0.013*	4.445	398.767	3	1196.302	وزن تر ریشه Root fresh weight
0.081ns	2.532	33.198	3	99.594	وزن خشک ریشه Root dry weight
0.002**	6.399	246.194	3	738.581	میزان آب ریشه Root water content
0.001**	7.740	6.163	3	18.490	نسبت ریشه به ساقه Root-to-shoot ratio

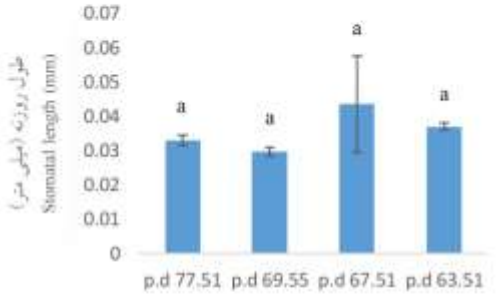
** معنی‌دار در سطح ۱ درصد، * معنی‌دار در سطح ۵ درصد، ns غیرمعنی‌دار

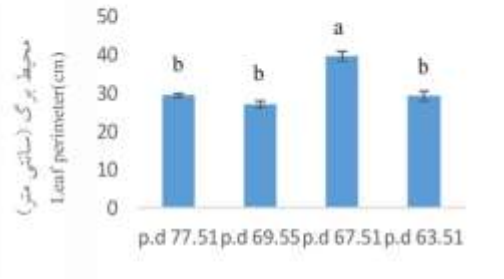

سطح ویژه برگ (گرم بر سانتی متر مربع)
Specific leaf area (g/cm²)
250
200
150
100
50
0
a a a a
p.d 77.51 p.d 69.55 p.d 67.51 p.d 63.51

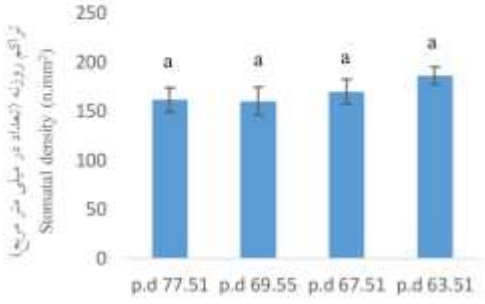

عرض برگ (سانتی متر)
Leaf width (cm)
12
10
8
6
4
2
0
b b a b
p.d 77.51 p.d 69.55 p.d 67.51 p.d 63.51

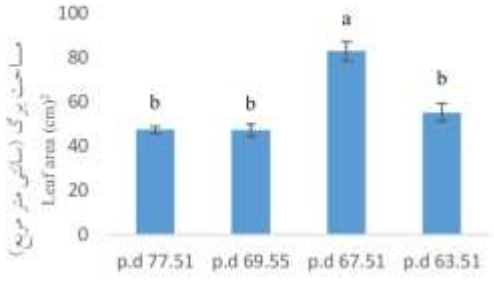

شاخص سطح برگ (سانتی متر مربع)
Leaf area index (cm)²
1000
800
600
400
200
0
a b b a
p.d 77.51 p.d 69.55 p.d 67.51 p.d 63.51

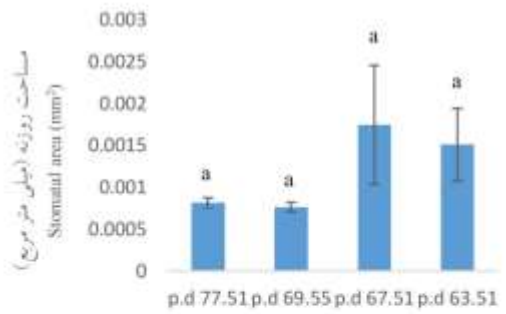

نسبت طول به عرض برگ
Leaf length/width ratio
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
b b a b
p.d 77.51 p.d 69.55 p.d 67.51 p.d 63.51

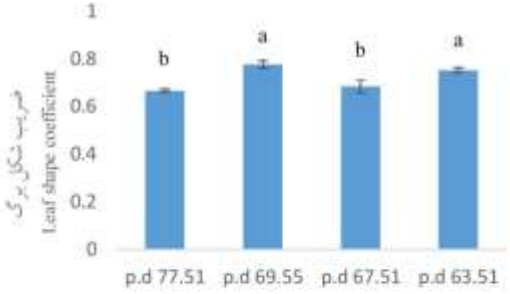

طول روزنه (میلی متر)
Stomatal length (mm)
0.07
0.06
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
a a a a
p.d 77.51 p.d 69.55 p.d 67.51 p.d 63.51

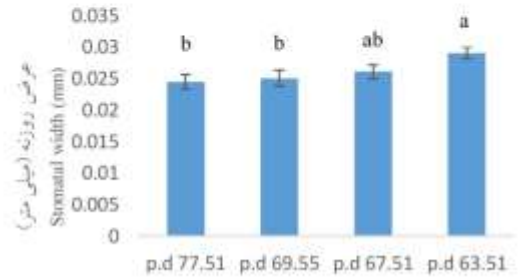

محیط برگ (سانتی متر)
Leaf perimeter(cm)
50
40
30
20
10
0
b b a b
p.d 77.51 p.d 69.55 p.d 67.51 p.d 63.51

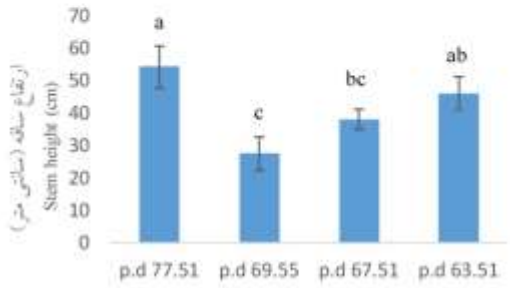

تراکم روزنه (تعداد در میلی متر مربع)
Stomatal density (n.mm²)
250
200
150
100
50
0
a a a a
p.d 77.51 p.d 69.55 p.d 67.51 p.d 63.51

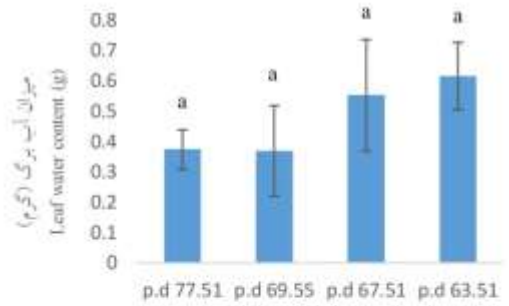

مساحت برگ (سانتی متر مربع)
Leaf area (cm)²
100
80
60
40
20
0
b b a b
p.d 77.51 p.d 69.55 p.d 67.51 p.d 63.51

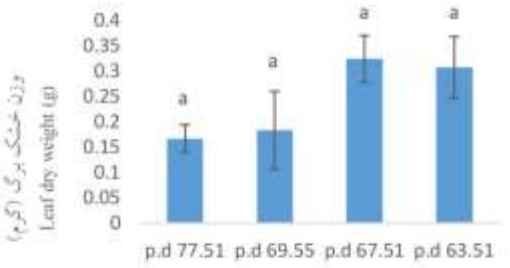

مساحت روزنه (میلی متر مربع)
Stomatal area (mm²)
0.003
0.0025
0.002
0.0015
0.001
0.0005
0
a a a a
p.d 77.51 p.d 69.55 p.d 67.51 p.d 63.51

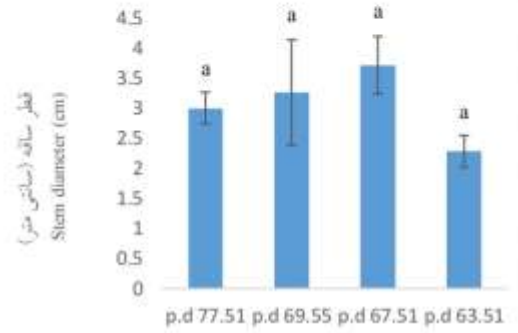

ضریب شکل برگ
Leaf shape coefficient
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
b a b a
p.d 77.51 p.d 69.55 p.d 67.51 p.d 63.51

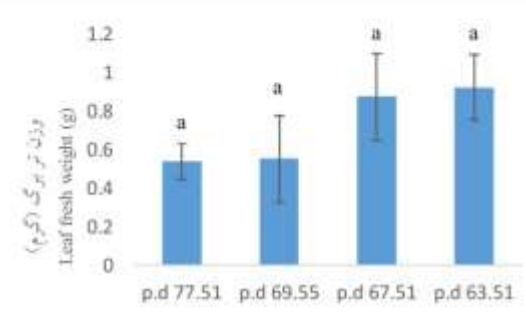

عرض روزنه (میلی متر)
Stomatal width (mm)
0.035
0.03
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005
0
b b ab a
p.d 77.51 p.d 69.55 p.d 67.51 p.d 63.51

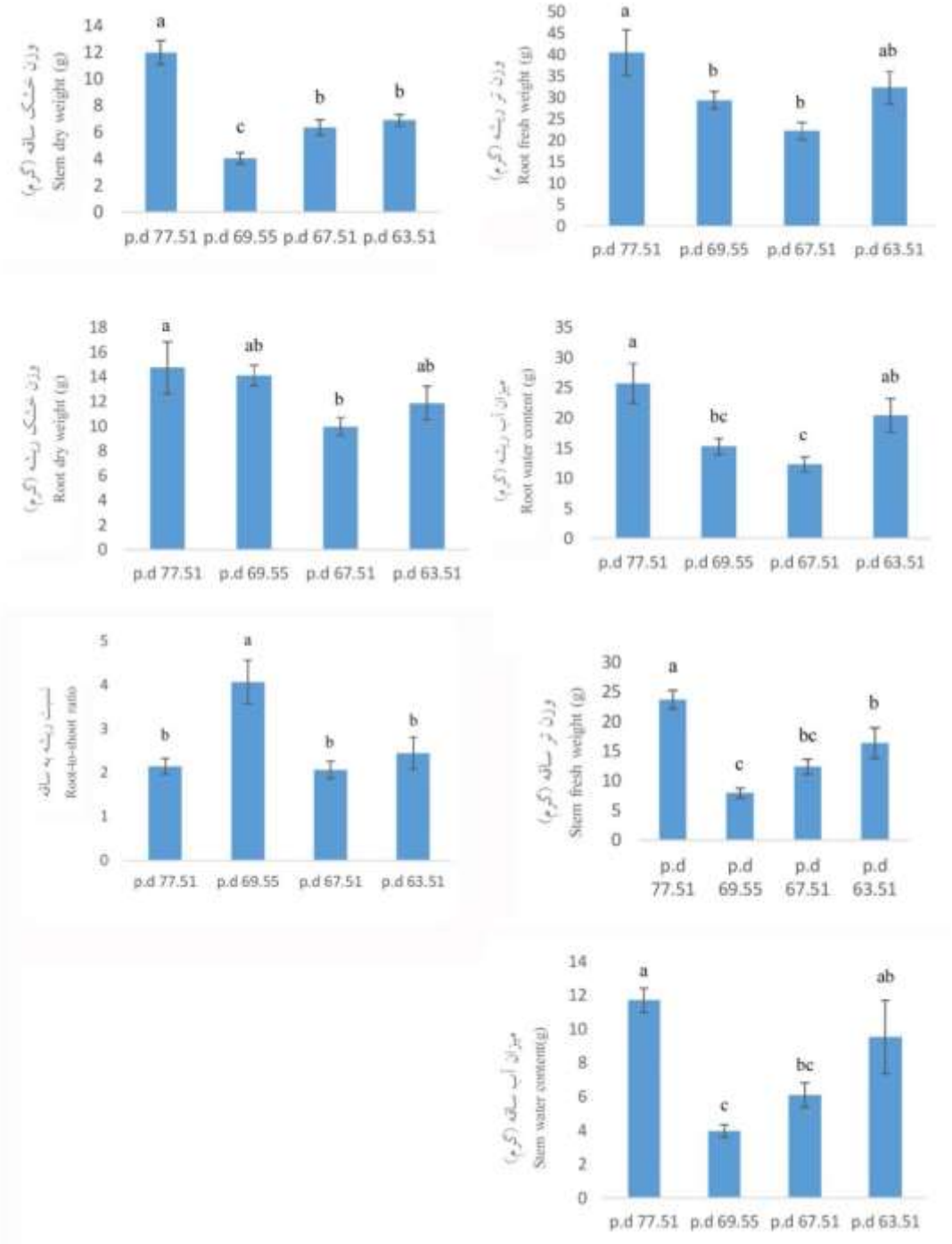

ارتفاع ساقه (سانتی متر)
Stem height (cm)
70
60
50
40
30
20
10
0
a c bc ab
p.d 77.51 p.d 69.55 p.d 67.51 p.d 63.51


میزان آب برگ (گرم)
Leaf water content (g)
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
a a a a
p.d 77.51 p.d 69.55 p.d 67.51 p.d 63.51


وزن خشک برگ (گرم)
Leaf dry weight (g)
0.4
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
a a a a
p.d 77.51 p.d 69.55 p.d 67.51 p.d 63.51


قطر ساقه (سانتی متر)
Stem diameter (cm)
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
a a a a
p.d 77.51 p.d 69.55 p.d 67.51 p.d 63.51


وزن تر برگ (گرم)
Leaf fresh weight (g)
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
a a a a
p.d 77.51 p.d 69.55 p.d 67.51 p.d 63.51



شکل ۳- مقایسه میانگین صفات ریز ریخت‌شناسی و رویشی در کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس.

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است.

Figure 3. Comparison of average micromorphological and vegetative traits in different clones of *Populus deltoides*. Similar letters indicate insignificant differences.

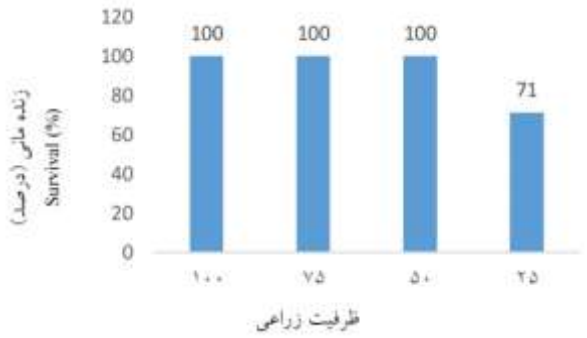
زنده‌مانی: در این پژوهش مشخص شد که تمامی نهال‌های کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس در تیمارهای ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی در طی تنش کم‌آبی دوام آوردند و زنده‌مانی ۱۰۰ درصد داشتند. در ظرفیت زراعی ۲۵ درصد کلن‌ها زنده‌مانی ۷۱ درصد داشتند (شکل ٤). در این سطح تنش کلن‌های *P.d* 77/51 و *P.d* 63/51 دارای بیش‌ترین درصد زنده‌مانی (۱۰۰ درصد) بودند و کلن‌های *P.d* 69/55 و *P.d* 67/51 زنده‌مانی ٤۳ درصد داشتند (شکل ۵). با توجه به نتایج مقاوم‌ترین کلن‌ها *P.d* 77/51 و *P.d* 63/51 می‌باشند.

جدول ٤- تجزیه واریانس زنده‌مانی در کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس تحت تیمارهای مختلف ظرفیت زراعی.

Table 4. Variance analysis of changes in survival in different colonies of *Populus deltoides* under different treatments of crop capacity.

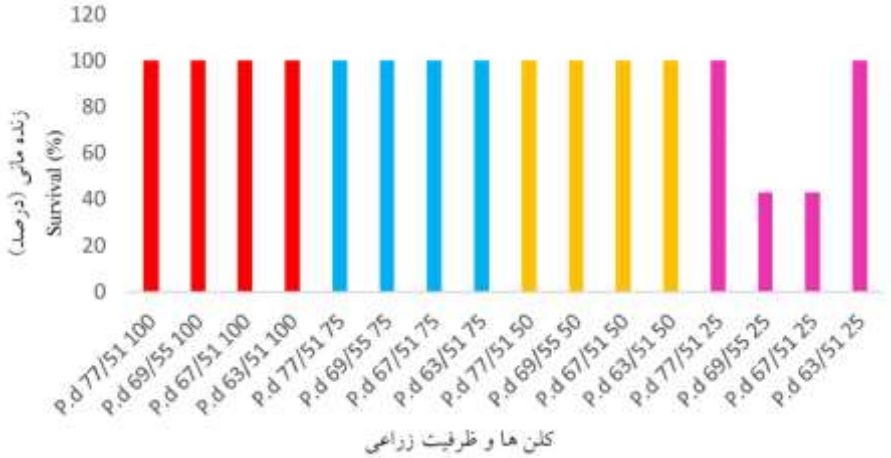
سطح معنی‌داری Pr>F	F F-ratio	میانگین مربعات Mean square	درجه آزادی Degree of freedom	مجموع مربعات Sum of Squares	منبع تغییرات Source of variation
0.002**	5.533	2470.238	3	7410.714	کلن Clone
0.000**	11.933	5327.381	3	15982.143	تیمار آبیاری Irrigation treatment
0.000**	4.111	1835.317	9	16517.857	کلن و تیمار Clone & Treatment
		446.429	96	42857.143	خطا Error
			112	1030000.000	کل Total

** معنی‌دار در سطح ۱ درصد



شکل ٤- مقایسه میانگین زنده‌مانی در تیمارهای متفاوت ظرفیت زراعی.

Figure 4. Comparison of average survival in different treatments of crop capacity.



شکل ۵- مقایسه میانگین زنده‌مانی در کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس تحت تیمارهای مختلف ظرفیت زراعی.

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است.

Figure 5. Comparison of average survival in different colonies of *Populus deltoides* under different treatments of crop capacity. Similar letters indicate insignificant differences.

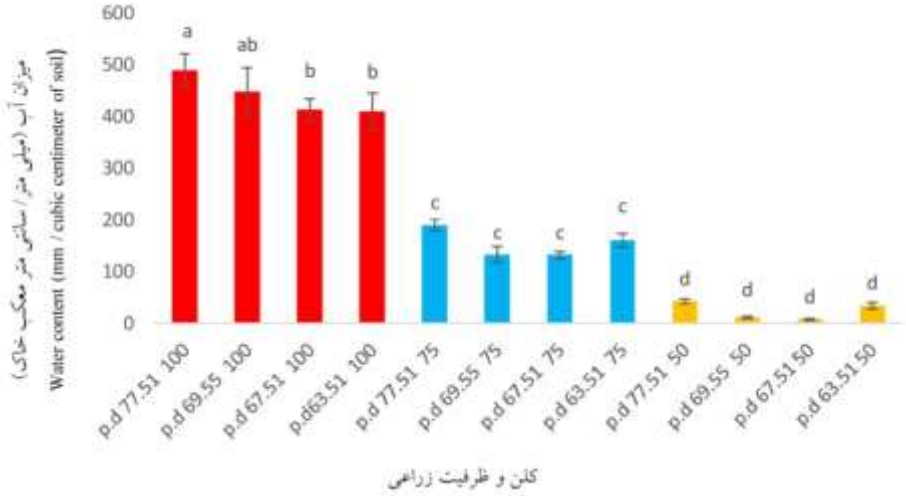
نیاز آبی کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس: نتایج آنالیز واریانس بیانگر این مطلب است که نیاز آبی در کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس (*P.d* 63/51، *P.d* 67/51، *P.d* 69/55 و *P.d* 77/51) در سطح ۱ درصد خطا اختلاف معنی‌داری را نشان می‌دهد که بیش‌ترین نیاز آبی مربوط به کلن *P.d* 77/51 و کم‌ترین مربوط *P.d* 67/51 می‌باشد هم‌چنین نیاز آبی در سطوح مختلف تیمارهای تنش کم‌آبی (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) در سطح ۱ درصد خطا اختلاف معنی‌داری داشت. بیش‌ترین میزان نیاز آبی مربوط به تیمار شاهد و کم‌ترین میزان نیاز آبی مربوط به تیمار ۵۰ درصد می‌باشد اما اثر متقابل تنش کم‌آبی و کلن‌ها بر نیاز آبی معنی‌دار نشد (شکل ٦).

جدول ۵- تجزیه واریانس تغییرات نیاز آبی در کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس تحت تیمارهای مختلف ظرفیت زراعی.

Table 5. Variance analysis of Changes in water requirements in different colonies of *Populus deltoides* under different treatments of crop capacity

سطح معنی‌داری Pr>F	F F-ratio	میانگین مربعات Mean square	درجه آزادی Degree of freedom	مجموع مربعات Sum of Squares	منبع تغییرات Source of variation
0.008**	3.976	112858.202	3	338574.607	کلن Clone
0.000**	401.727	11402397.55	2	22804795.10	تیمار آبیاری Irrigation treatment
0.622ns	0.735	28383.480	6	125115.310	کلن و تیمار Clone & Treatment
		28383.480	744	21117309.01	خطا Error
			756	76426635.00	کل Total

** معنی‌دار در سطح ۱ درصد، ns غیرمعنی‌دار



شکل ٦- مقایسه میانگین نیاز آبی در کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس تحت تیمارهای مختلف ظرفیت زراعی.

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است.

Figure 6. Comparison of average water requirement in different colonies of *Populus deltoides* under different treatments of crop capacity. Similar letters indicate insignificant differences.

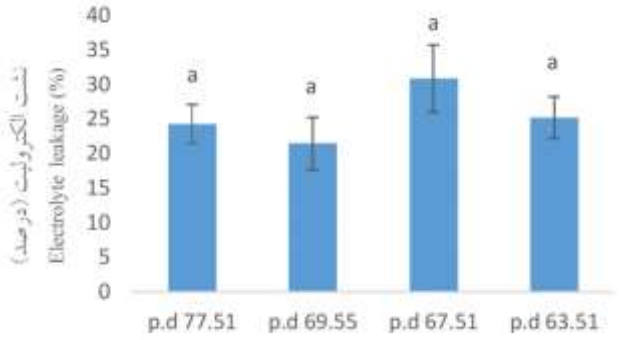
صفات فیزیولوژیکی: نشت الکترولیت: نتایج بررسی آنالیز واریانس نشان داد که میزان نشت الکترولیت در سطوح کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ٦ و شکل ٧).

جدول ٦- تجزیه واریانس نشت الکترولیت در کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس.

Table 6. Variance analysis of Electrolyte leakage in different colonies of *Populus deltoides*.

صفات مورد مطالعه Investigated parameters	مجموع مربعات Sum of Squares	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean square	F *F*-ratio	سطح معنی‌داری Pr>F
نشت الکترولیت Electrolyte leakage	144.973	3	48.324	0.837	0.493[ns]

[ns] غیرمعنی‌دار



شکل ٧- مقایسه میانگین نشت الکترولیت در کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس.

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است.

Figure 7. Comparison of average electrolyte leakage in different clones of *Populus deltoides*. Similar letters indicate insignificant differences.

رنگ‌دانه‌ها و آنزیم‌ها: نتایج آنالیز واریانس نشان داد که اثر سطوح کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس بر میزان کلروفیل *a* در سطح یک درصد خطا معنی‌دار ولی بر میزان کلروفیل *b* و کل اختلاف معنی‌داری نداشت. بیش‌ترین میزان کلروفیل *a* در کلن *P.d* 77/51 و کم‌ترین نیز در کلن *P.d* 69/55 بود. تنش کم‌آبی اثر معنی‌داری بر میزان کلروفیل *a*، *b* و کل (سطح احتمال یک درصد) داشت. بیش‌ترین میزان میانگین کلروفیل *b* و کل در تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و کم‌ترین میزان کلروفیل *b* و کل در تیمار ۲۵ درصد ظرفیت زراعی بود. هم‌چنین اثرات متقابل کلن‌ها و تنش کم‌آبی بر میزان کلروفیل *b* و کل اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد خطا داشت ولی بر میزان کلروفیل *a* معنی‌دار نبود. تفاوت معنی‌داری بر میزان کارتنوئید در بین کلن‌ها، سطوح تنش و هم‌چنین اثرات متقابل تنش کم‌آبی و کلن‌ها در سطح یک درصد خطا مشاهده شد. بیش‌ترین میزان کارتنوئید در کلن *P.d* 77/51 و کم‌ترین در کلن *P.d* 69/55 و بیش‌ترین میزان میانگین کارتنوئید در تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و کم‌ترین میزان در تیمار ۲۵ درصد ظرفیت زراعی بوده است. نتایج بیانگر این مطلب است که سطوح کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس بر میزان آنزیم پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز اثر معنی‌داری نداشت ولی سطوح تنش کم‌آبی بر میزان آنزیم پراکسیداز (سطح احتمال پنج درصد) و آسکوربات پراکسیداز (سطح احتمال یک درصد) تأثیر معنی‌داری داشت. به‌ترتیب بیش‌ترین میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز و کم‌ترین میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و کم‌ترین میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز و بیش‌ترین میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در تیمار ۲۵ درصد ظرفیت زراعی بود (جدول ۷ و شکل ۸).

جدول ۷- تجزیه واریانس رنگ‌دانه‌ها و آنزیم‌ها در کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس تحت تیمارهای مختلف ظرفیت زراعی.

Table 7. Variance analysis of pigments and enzymes in different colonies of *Populus deltoides* under different treatments of crop capacity.

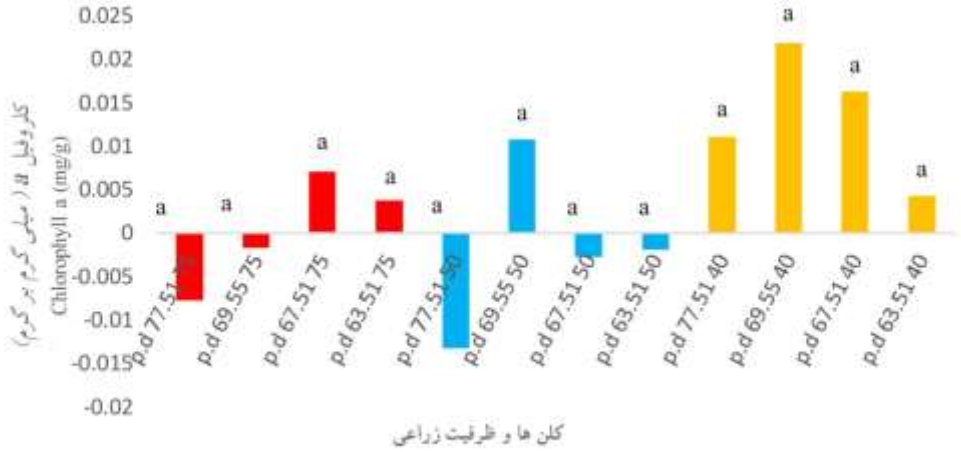
صفات مورد مطالعه Investigated parameters	منبع تغییرات Source of variation	مجموع مربعات Sum of Squares	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean square	F F-ratio	سطح معنی‌داری Pr>F
کلروفیل a Chlorophyll a	کلن Clone	0.002	3	0.001	4.321	0.007**
	تیمار آبیاری Irrigation treatment	0.004	2	0.002	11.074	0.000**
	کلن و تیمار Clone & Treatment	0.002	6	0.000	1.849	0.102ns
	خطا Error	0.012	72	0.000		
	کل Total	0.021	84			
کلروفیل b Chlorophyll b	کلن Clone	0.006	3	0.002	0.714	0.547ns
	تیمار آبیاری Irrigation treatment	0.092	2	0.046	17.253	0.000**
	کلن و تیمار Clone & Treatment	0.036	6	0.006	2.286	0.045*
	خطا Error	0.191	72	0.003		
	کل Total	0.336	84			

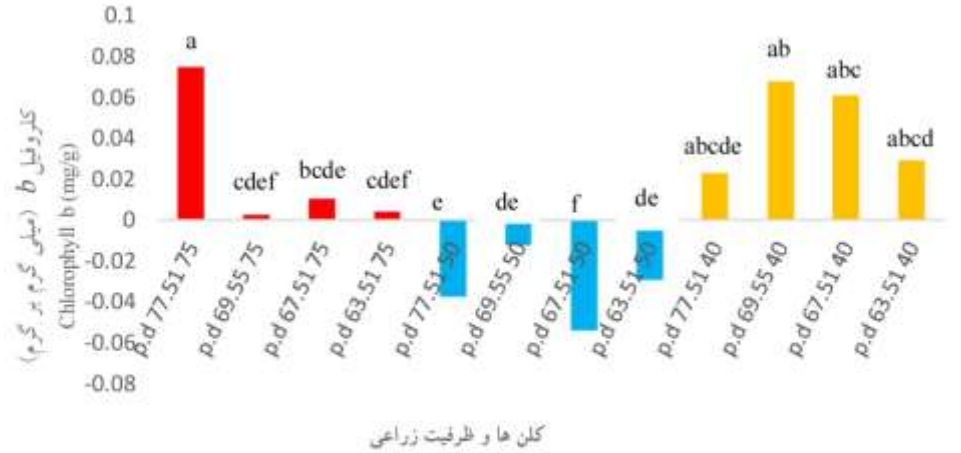
ادامه جدول ۷-

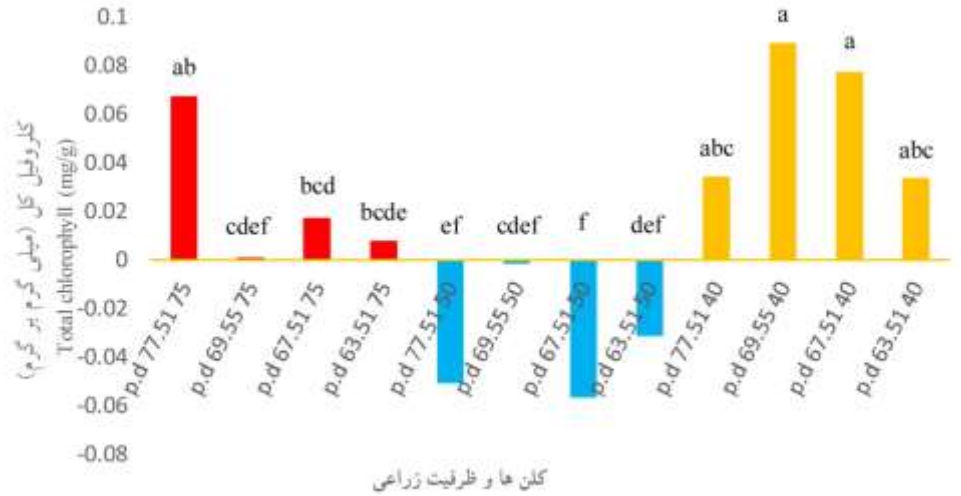
Continue Table 7.

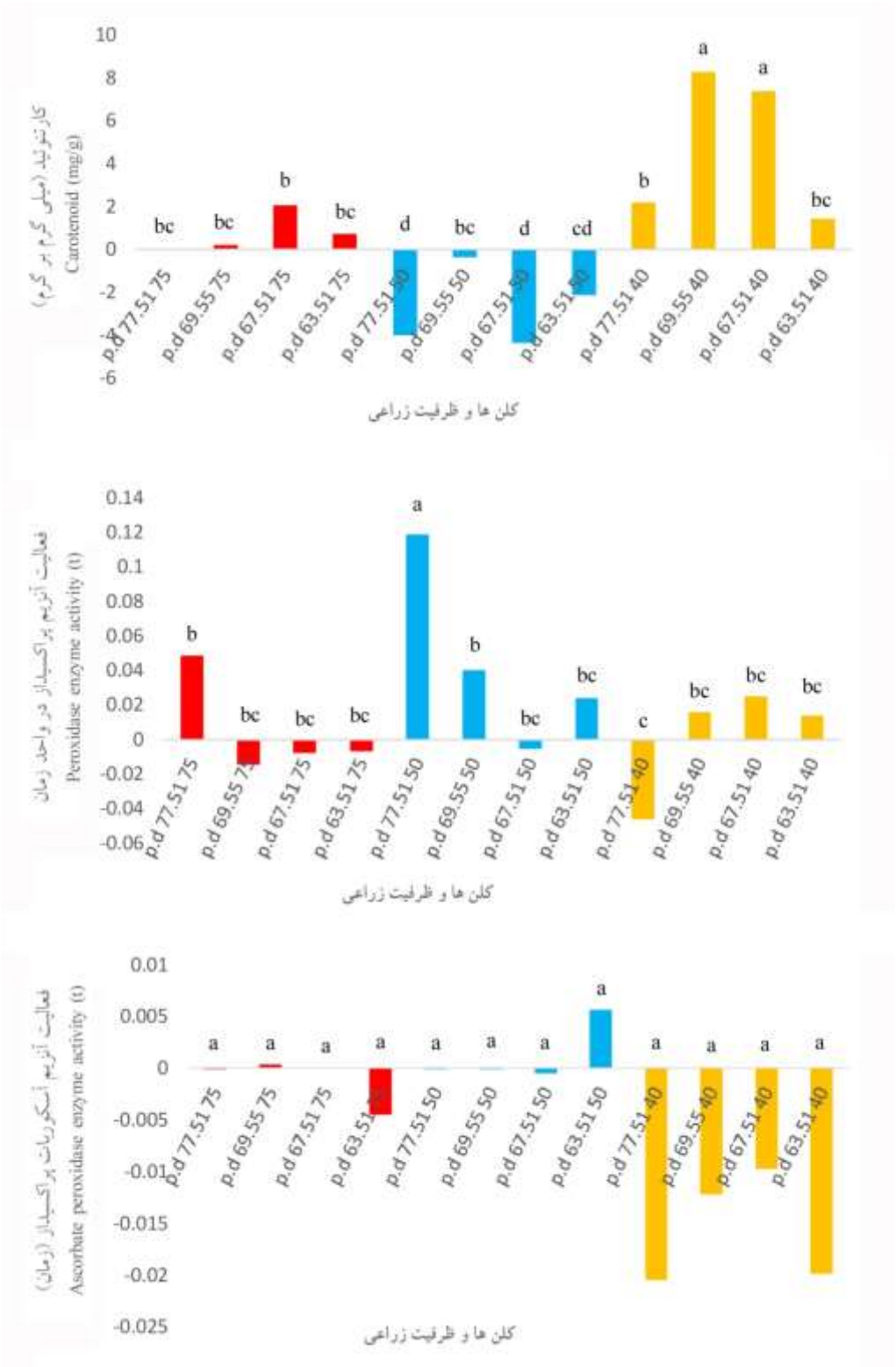
صفات مورد مطالعه Investigated parameters	منبع تغییرات Source of variation	مجموع مربعات Sum of Squares	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean square	F F-ratio	سطح معنی‌داری Pr>F
کلروفیل کل Total chlorophyll	کلن Clone	0.007	3	0.002	0.977	0.408^{ns}
	تیمار آبیاری Irrigation treatment	0.125	2	0.063	24.613	0.000**
	کلن و تیمار Clone & Treatment	0.042	6	0.007	2.757	0.018*
	خطا Error	0.183	72	0.003		
	کل Total	0.378	84			
کارتنوئید Carotenoid	کلن Clone	146.648	3	48.883	4.913	0.004**
	تیمار آبیاری Irrigation treatment	791.103	2	395.551	39.759	0.000**
	کلن و تیمار Clone & Treatment	201.595	6	33.599	3.377	0.005**
	خطا Error	716.311	72	9.949		
	کل Total	1929.934	84			
آنزیم پراکسیداز Peroxidase enzyme	کلن Clone	0.016	3	0.005	1.359	0.262^{ns}
	تیمار آبیاری Irrigation treatment	0.031	2	0.016	3.923	0.024*
	کلن و تیمار Clone & Treatment	0.083	6	0.014	3.472	0.005**
	خطا Error	0.288	72	0.004		
	کل Total	0.444	84			
آنزیم آسکوربات پراکسیداز Ascorbate peroxidase enzyme	کلن Clone	0.000	3	6.197E-5	0.388	0.762^{ns}
	تیمار آبیاری Irrigation treatment	0.005	2	0.002	14.512	0.000**
	کلن و تیمار Clone & Treatment	0.001	6	0.000	0.762	0.602^{ns}
	خطا Error	0.011	72	0.000		
	کل Total	0.019	84			

** معنی‌دار در سطح ۱ درصد، * معنی‌دار در سطح ۵ درصد، ^{ns} غیرمعنی‌دار


کلروفیل a (میلی گرم بر گرم)
Chlorophyll a (mg/g)
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005
0
-0.005
-0.01
-0.015
-0.02
a a a a a a a a a a a a
p.d 77.51 75
p.d 69.55 75
p.d 67.51 75
p.d 63.51 75
p.d 77.51 50
p.d 69.55 50
p.d 67.51 50
p.d 63.51 50
p.d 77.51 40
p.d 69.55 40
p.d 67.51 40
p.d 63.51 40
کلن ها و ظرفیت زراعی


کلروفیل b (میلی گرم بر گرم)
Chlorophyll b (mg/g)
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
-0.02
-0.04
-0.06
-0.08
a cdef bcde cdef e de f de abcde ab abc abcd
p.d 77.51 75
p.d 69.55 75
p.d 67.51 75
p.d 63.51 75
p.d 77.51 50
p.d 69.55 50
p.d 67.51 50
p.d 63.51 50
p.d 77.51 40
p.d 69.55 40
p.d 67.51 40
p.d 63.51 40
کلن ها و ظرفیت زراعی


کلروفیل کل (میلی گرم بر گرم)
Total chlorophyll (mg/g)
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
-0.02
-0.04
-0.06
-0.08
ab cdef bcd bcde ef cdef f def abc a a abc
p.d 77.51 75
p.d 69.55 75
p.d 67.51 75
p.d 63.51 75
p.d 77.51 50
p.d 69.55 50
p.d 67.51 50
p.d 63.51 50
p.d 77.51 40
p.d 69.55 40
p.d 67.51 40
p.d 63.51 40
کلن ها و ظرفیت زراعی



شکل ۸- مقایسه میانگین رنگ‌دانه‌ها و آنزیم‌ها در کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس تحت تیمارهای مختلف ظرفیت زراعی.

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است.

Figure 8. Comparison of average pigments and enzymes in different colonies of *Populus deltoides* under different treatments of crop capacity. Similar letters indicate insignificant differences.

بحث

ویژگی‌های ریخت‌شناسی: کاهش میزان زنده‌مانی نهال‌ها با افزایش تنش کم‌آبی ناشی از کمبود آب از مقدار حد بهینه در جهت جذب آب و عناصر غذایی نهال‌ها است که در نتیجه سبب کاهش رشد و تغییرات مورفولوژیکی و سپس مرگ‌ومیر نهال‌ها می‌شود (۳۷). اعمال تیمار تنش کم‌آبی بر روی کلن‌های صنوبر دلتوئیدس بیانگر این مطلب بود که تمامی نهال‌های کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس در تیمارهای ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی در طی تنش کم‌آبی دوام آوردند و زنده‌مانی ۱۰۰ درصد داشتند. درحالی‌که نهال‌ها در تیمار ۲۵ درصد در کلن‌های *P.d* 77/51 و *P.d* 63/51 زنده‌مانی ۱۰۰ درصد و در کلن‌های *P.d* 69/55 و *P.d* 67/51 زنده‌مانی ٤۳ درصد داشتند. کلن‌های صنوبر دلتوئیدس *P.d* 77/51 و *P.d* 63/51 بیش‌ترین میزان زنده‌مانی را نشان دادند که نشان‌دهنده تحمل بالای این کلن‌ها به تنش کم‌آبی است. تنش کم‌آبی باعث تغییرات رشد ارتفاع ساقه متفاوتی بین کلن‌های موردمطالعه شد. بهترین کلن از این نظر *P.d* 77/51 بود. تنش کم‌آبی بر فتوسنتز، تعرق و تنظیم رشد از طریق تنظیم عرض روزنه‌ها در کلن‌های صنوبر دلتوئیدس تأثیر می‌گذارد و در نهایت منجر به کاهش طول سلولی و کاهش رشد ارتفاعی می‌شود. رشد گیاه حاصل فعالیت حیاتی در شرایطی است که آب کافی در اختیار گیاه باشد در صورت عدم تأمین آب مورد نیاز، به‌دلیل کاهش فشار تورژسانس سلول‌های در حال رشد و اثر بر طول سلول‌ها، رشد ارتفاعی کم می‌شود (۳۸). نتایج این پژوهش با نتایج مطالعه یین و همکاران (۲۰۰۵) بر روی *Populus kangdingensis*، لی و همکاران (۲۰۰٦) و گوا و همکاران (۲۰۱۰) هم‌راستا می‌باشد (۱۸، ۲۰، ۲۳) و تأثیری بر تغییرات قطر یقه در کلن‌های مورد مطالعه نداشت که به‌نظر می‌رسد علت این امر شباهت سرشتی نزدیک کلن‌ها از این نظر باشد. با توجه به نتایج پژوهش تنش کم‌آبی تأثیری بر تغییرات تعداد برگ قبل و بعد از تیمار تنش کم‌آبی در کلن‌های موردمطالعه نداشت اما نتایج نشان داد که تنش کم‌آبی باعث تغییر میانگین تعداد برگ بعد از تیمار بین کلن‌های مورد مطالعه شد. کلن‌های *P.d* 77/51 و *P.d* 63/51 دارای بیش‌ترین درصد زنده‌مانی با بیش‌ترین تعداد برگ در بین کلن‌ها بعد از تنش کم‌آبی بودند. نهال‌های صنوبر دلتوئیدس با کاستن از تعداد برگ و جلوگیری از رشد آن، از هدر رفت آب جلوگیری کرده و به‌نوعی سبب افزایش کارایی مصرف آب و حفظ نهال تحت شرایط کم‌آبی خاک شده است. نتایج پژوهش‌ها بر روی کلن‌های (*Luisa Avanzo* و *Dorskamp*) مارون و همکاران (۲۰۰۰)، (*Populus kangdingensis*) یین و همکاران (۲۰۰۵)، (*Populus cathayana Rehd*) خو و همکاران (۲۰۰۸) تأثیر معنی‌داری تنش کم‌آبی را بر تعداد برگ نشان داده است (۱۳، ۱۸، ۲۱). تنش کم‌آبی باعث تغییرات سطح برگ متفاوتی بین کلن‌های موردمطالعه شد. کاهش سطح برگ یک سازگاری مهم به شمار می‌رود، زیرا کاهش سطح برگ اولین راهبردی است که گیاه در مواجه با محدودیت آب انتخاب می‌کند (۳۹). هم‌زمان با کاهش سطح برگ گیاه در اثر تنش کم‌آبی، تعرق گیاه هم کم می‌شود و هدررفت آب از طریق روزنه، به‌میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد (٤۰)؛ که با نتایج یین و همکاران (۲۰۰۵)، ژانگ و همکاران (۲۰۰٤) و خو و همکاران (۲۰۰۸) مطابقت دارد (۱۸، ۱۷، ۲۱) و تأثیری بر سطح ویژه برگ در کلن‌های موردمطالعه نداشت که به‌نظر می‌رسد علت این امر شباهت سرشتی نزدیک کلن‌ها از این نظر باشد. در این مطالعه بعد از تنش کم‌آبی در بین کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس از لحاظ شاخص سطح برگ اختلاف

معنی‌داری وجود داشت. کلن‌های *P.d* 77/51 و *P.d* 63/51 با بیش‌ترین درصد زنده‌مانی دارای بیش‌ترین مقدار شاخص سطح برگ و کلن‌های *P.d* 69/55 و *P.d* 67/51 با کم‌ترین درصد زنده‌مانی، کم‌ترین مقدار شاخص سطح برگ را به خود اختصاص دادند. تنش کم‌آبی معمولاً با کاهش سطح برگ همراه بوده و شروع تشکیل برگ در مریستم‌ها و توسعه بعدی سطح برگ در پتانسیل پایین آب برگ کاهش یافته و حتی ممکن است متوقف شود که ناشی از کاهش تقسیم سلولی نیز می‌باشد هم‌چنین کمبود آب علاوه بر تأثیر بر توسعه برگ، می‌تواند از طریق ریزش برگ‌ها در طول مراحل رشدی بر شاخص سطح برگ مؤثر باشد. نتایج بررسی نشان داد که تنش کم‌آبی باعث تغییرات طول برگ، عرض برگ و نسبت طول به عرض برگ متفاوتی بین کلن‌های مورد مطالعه شد و بهترین کلن در هر سه پارامتر *P.d* 67/51 بود. کاهش طول، عرض و محیط برگ می‌تواند به این خاطر باشد که با کمبود آب درون‌سلولی کشیدگی و جمع شدگی در برگ‌ها ایجادشده است که در راستای کاهش میزان تعرق و مقاومت به خشکی آن می‌باشد (۳۵). هم‌چنین در ضریب شکل برگ اختلاف معنی‌داری مشاهده شد که نسبت طول به عرض برگ در مقایسه با ضریب شکل برگ بیش‌تر بود یعنی حالت کشیدگی برگ بیش‌تر از حالت دایره‌ای برگ می‌باشد که این یکی از سازگاری‌های مورفولوژیکی کلن‌های موردمطالعه صنوبر دلتوئیدس نسبت به تنش کم‌آبی می‌باشد. تنش کم‌آبی باعث تغییرات وزن‌تر ساقه، ریشه و وزن خشک ساقه بین کلن‌های موردمطالعه شد. محدود شدن رشد اندام‌های هوایی گیاه از آثار مهم تنش کم‌آبی می‌باشد که سبب کاهش تولید ماده خشک کل گیاه می‌شود. در این پژوهش افزایش تنش کم‌آبی سبب کاهش معنادار وزن خشک ساقه و به‌طورکلی وزن نهال شد که دلیل آن می‌تواند ارتباط بیوماس خشک ساقه و کل نهال با فتوسنتز خالص و پتانسیل آبی باشد که با نتایج سعیدی و آزادفر (۲۰۰۹) هم‌خوانی دارد (۲۲). درحالی‌که ازنظر وزن‌تر برگ تغییر معنی‌داری مشاهده نشد که به‌نظر می‌رسد علت این امر شباهت سرشتی نزدیک کلنی در پژوهش حاضر باشد. نتایج نشان می‌دهد که تنش کم‌آبی تأثیری بر تغییرات میزان آب برگ در کلن‌های مورد مطالعه ندارد. کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس مکانیسم‌های متفاوتی برای حفظ آب درون برگ‌های خود تحت تنش کم‌آبی دارند. یکی از این مکانیسم‌ها، بسته شدن روزنه‌ها برای کاهش سرعت تعرق می‌باشد که به حفظ محتوای آب برگ با وجود تنش کم‌آبی کمک می‌کند. با توجه به نتایج تنش کم‌آبی تأثیری بر وزن خشک ریشه در کلن‌های موردمطالعه ندارد. کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس تخصیص منابع را بر اساس نیازهای آنی و چالش‌هایی که در محیط خود با آن مواجه می‌شوند اولویت می‌دهند. گیاهان تحت تنش کم‌آبی، منابع را برای حفظ عملکردهای ضروری مانند جذب آب، جذب مواد مغذی و فرایندهای فیزیولوژیکی که برای بقا حیاتی هستند توزیع می‌کنند؛ بنابراین کلن‌های صنوبر دلتوئیدس تحت تنش کم‌آبی منابعی را به رشد و نگهداری ریشه اختصاص می‌دهند تا از دسترسی مداوم به آب و مواد مغذی از خاک اطمینان حاصل کنند در نتیجه وزن خشک ریشه را حفظ می‌کنند. درحالی‌که تنش کم‌آبی باعث تغییرات میزان آب ساقه و ریشه متفاوتی بین کلن‌های موردمطالعه شد به‌طوری‌که بهترین کلن از این نظر در دو پارامتر *P.d* 77/51 می‌باشد. میزان آب ساقه ابزاری به‌منظور نمایش عملکرد گونه‌های مختلف در مواجه با تنش خشکی است. بسیاری از گونه‌های گیاهی به‌وسیله افزایش سهم مواد تولیدشده به سمت ریشه موجب افزایش نسبت ریشه به اندام‌های هوایی

شده و حجم آب قابل‌دسترس برای گیاهان تحت تنش را افزایش می‌دهند تا جایی که افزایش وزن خشک ریشه یا کاهش کم‌تر آن تحت تنش خشکی به‌عنوان یک مکانیسم تحمل به خشکی فرض می‌شود در این پژوهش تنش کم‌آبی باعث تغییرات نسبت وزن خشک ریشه به ساقه متفاوتی بین کلن‌های مورد مطالعه شد. به‌طوری‌که بهترین کلن از این نظر *P.d* 69/55 می‌باشد. نتایج این پژوهش با نتایج ژانگ و همکاران (۲۰۰٤) هم‌خوانی دارد (۱۷). براساس نتایج پژوهش حاضر تنش کم‌آبی تأثیری بر تغییرات مساحت و طول و تراکم روزنه نداشت. میانگین تراکم روزنه برای کلن‌های *P.d* 77/51، *P.d* 69/55، *P.d* 67/51 و *P.d* 63/51 به‌ترتیب ۱٦۱/٤۲۸۵۷۱، ۱٦۰/۰۰۰۰۰۰، ۱۷۰/۰۰۰۰۰۰ و ۱۸۵/۷۱٤۲۸٦ می‌باشد. به‌نظر می‌رسد علت این امر شباهت سرشتی نزدیک کلنی از این نظر باشد اما باعث تغییرات عرض روزنه بین کلن‌های موردمطالعه شد تنظیم عرض روزنه یک سازگاری برای مقابله با تنش کم‌آبی می‌باشد. کلن‌های صنوبر دلتوئیدس برای کاهش اتلاف آب از طریق تعرق، روزنه‌های با عرض کم‌تر را در اولویت قرار دادند. با توجه به نتایج کلن‌های مختلف در سطوح متفاوت تنش کم‌آبی واکنش‌های متفاوتی از نظر نیاز آبی دارند. به‌طوری‌که بیش‌ترین نیاز آبی مربوط به کلن *P.d* 77/51 و کم‌ترین مربوط *P.d* 67/51 می‌باشد و بیش‌ترین میزان نیاز آبی مربوط به تیمار شاهد، و کم‌ترین میزان مربوط به تیمار ۵۰ درصد می‌باشد که در تنش شاهد بالاترین نیاز آبی را دارند و تا تنش کم‌آبی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی نسبت به خشکی مقاومت و در تنش کم‌تر از ۵۰ درصد ظرفیت زراعی از بین می‌روند. تنش کم‌آبی باعث بسته شدن روزنه‌ها که سبب کاهش میزان تعرق، تغییرات در مورفولوژی ریشه، تنظیم در جذب، انتقال و استفاده آب در کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس می‌شود که این واکنش‌ها در حفظ آب به کلن‌ها کمک می‌کنند.

در این پژوهش تنش کم‌آبی باعث تغییرات صفات ارتفاع ساقه، تعداد برگ، وزن تر ساقه، وزن خشک ساقه، میزان آب ساقه، وزن تر ریشه، میزان آب ریشه، نسبت وزن ریشه به ساقه، طول برگ، عرض برگ، نسبت طول به عرض برگ، ضریب شکل برگ، مساحت برگ و شاخص سطح برگ بین کلن‌های مورد مطالعه شد درحالی‌که از پارامترهای ریز ریخت‌شناسی، تنش کم‌آبی فقط باعث تغییرات عرض روزنه بین کلن‌های مورد مطالعه شد. نتایج این بخش از مطالعات کلن‌های *P.d* 77/51 و *P.d* 63/51 را به‌عنوان کلن‌های موفق‌تر نسبت به تنش کم‌آبی با میانگین تراکم روزنه به‌ترتیب ۱٦۱/٤۲۸۵۷۱ و ۱۸۵/۷۱٤۲۸٦ نشان داد که با نتایج ساداتی و همکاران (۲۰۱۹) در تعیین کلن *P.d* 63/51 به‌عنوان کلن مقاوم به تنش کم‌آبی همسو و کلن‌های *P.d* 77/51 و *P.d* 69/55 به ترتیب به‌عنوان کلن حساس و مقاوم به تنش کم‌آبی مطابقت ندارد که می‌تواند به دلیل تفاوت در منشأ کلن‌ها باشد (۱۹).

ویژگی‌های فیزیولوژیکی: بر طبق نتایج حاصل از آزمایش‌های فیزیولوژیکی، تنش کم‌آبی باعث تغییرات فعالیت آنزیم پراکسیداز در تیمارهای مختلف تنش کم‌آبی شد. فعالیت آنزیم پراکسیداز در طی مراحل اولیه تنش کم‌آبی افزایش ولی وقتی تنش طولانی شد، فعالیت این آنزیم کاهش یافت که معلوم شد در ارقام مقاوم به خشکی کاهش خسارت اکسیداتیوی به افزایش بیان سیستم‌های آنتی‌اکسیدان مرتبط است و سلول‌های گیاهی که دارای مکانیسم‌های آنتی‌اکسیدان هستند می‌تواند در مقابل خسارت‌های اکسیداتیو محافظت شوند که با نتایج لی و همکاران (۲۰۰٦)، خو و همکاران (۲۰۰۸)، گوا و همکاران (۲۰۱۰) و لیائو و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد (۲۰، ۲۱، ۲۳، ۲٤).

تنش کم‌آبی تأثیری بر تغییرات میزان آنزیم آسکوربات پراکسیداز در کلن‌های موردمطالعه نداشت که می‌تواند به‌دلیل پایین بودن پایداری مولکولی پروتئین این آنزیم در شرایط اکسیداتیو باشد. تنش کم‌آبی باعث تغییرات میزان آنزیم آسکوربات پراکسیداز بین تیمارهای مختلف تنش کم‌آبی شد و میزان این آنزیم با افزایش تنش کم‌آبی افزایش یافت. حفظ میزان کلروفیل در زمان خشکی نماد مقاومت فیزیولوژیک گیاه به تنش می‌باشد چرا که تولید اکسیژن‌های آزاد در طی تنش خشکی مسبب اصلی تخریب کلروفیل می‌باشد (٦). نتایج نشان داد که تنش کم‌آبی باعث تغییرات میزان کلروفیل a متفاوتی بین کلن‌های موردمطالعه شد ولی تأثیری بر تغییرات میزان کلروفیل b و کل نداشت و باعث تغییرات میزان کلروفیل a، b و کل در تیمارهای مختلف تنش کم‌آبی شد. میزان کلروفیل a، b و کل با افزایش دوره تنش کم‌آبی کاهش یافت و بیش‌ترین میزان کلروفیل a، b و کل در تنش متوسط و کم‌ترین در تنش شدید بود که با نتایج لی و همکاران (۲۰۰٦) و گوا و همکاران (۲۰۱۰) هم‌خوانی دارد (۲۰، ۲۳). به نظر می‌رسد افزایش مقدار کلروفیل در تنش متوسط در اثر افزایش وزن مخصوص برگ می‌باشد. وقوع تنش میزان سطح برگ را کاهش می‌دهد که ناشی از کاهش اندازه سلول است؛ بنابراین در طی بروز تنش متوسط به‌دلیل وجود سلول‌های بزرگ‌تر در واحد وزن برگ، میزان کلروفیل آن نیز افزایش می‌یابد. نتایج این پژوهش نشان داد اثرات متقابل تیمارهای مختلف تنش کم‌آبی و کلن‌های موردمطالعه بر میزان کلروفیل b و کل تغییر معنی‌داری دارد. بررسی‌ها نشان داد که در این پژوهش تنش کم‌آبی باعث تغییرات میزان کارتنوئید بین کلن‌ها، تیمارهای مختلف تنش کم‌آبی و اثرات متقابل تیمارهای مختلف تنش کم‌آبی و کلن‌های موردمطالعه شد. میزان کارتنوئید با افزایش دوره تنش کم‌آبی کاهش یافت. پژوهش‌های لی و همکاران (۲۰۰٦) بر روی *Populus przewalskii* نیز کاهش میزان کارتنوئید را نشان داده است (۲۰). براساس نتایج آزمایش‌ها با افزایش تنش خشکی تغییری در میزان نشت الکترولیت مشاهده نشد. الکترولیت‌ها یون‌هایی هستند که برای عملکردهای مختلف سلولی ضروری هستند. در طول تنش کم‌آبی غشاهای سلولی می‌توانند آسیب ببینند و منجر به نشت الکترولیت از سلول‌ها شوند. نتایج نشان می‌دهد که کلن‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس مکانیسم‌های مؤثری برای حفظ یکپارچگی غشاء و جلوگیری از نشت الکترولیت تحت تنش کم‌آبی دارند که این مکانیسم‌ها می‌تواند شامل پروتئین‌های محافظ، اسمولیت‌ها یا آنتی‌اکسیدان‌هایی باشد که به حفظ یکپارچگی و عملکرد سلولی در شرایط تنش کم‌آبی کمک می‌کند. تنش کم‌آبی تأثیری بر محتوای نسبی آب برگ نداشت که نشان می‌دهد کلن‌های صنوبر دلتوئیدس استراتژی‌های مؤثری با تغییر مکانیسم‌های جذب و از دست دادن آب، تنظیم عرض روزنه‌ها جهت بهینه‌سازی اتلاف آب برای تنظیم تعادل آب ایجاد کرده‌اند. براساس نتایج این بخش از مطالعات مشخص گردید که نهال‌ها از ۷۵ درصد ظرفیت زراعی به پایین تحت‌تأثیر تنش کم‌آبی قرار گرفتند و از طریق افزایش عکس‌العمل‌های فیزیولوژیکی مانند افزایش میزان آنزیم پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز تنش را تعدیل نموده و گیاه به‌خوبی با تنش‌های سطح ۷۵٪ و ۵۰٪ مقابله کرده است و کلن‌های *P.d* 77/51 و *P.d* 63/51 موفق‌تر از بقیه عمل نمودند.

نتیجه‌گیری کلی

به‌طورکلی نتایج این پژوهش نشان داد که شروع فرایندهای پاسخ به تنش کم‌آبی از سطح ۷۵٪ ظرفیت زراعی بوده به‌طوری‌که اگر به زیر ۵۰ درصد ظرفیت زراعی برسد مرگ‌آور می‌باشد بنابراین آبیاری نهال‌ها

برای زراعت چوب یا تولید نهال در نهالستان با کلن‌های موردمطالعه صنوبر دلتوئیدس باید به‌گونه‌ای باشد که ظرفیت زراعی خاک از ۵۰ درصد، کاهش نیابد و در مقایسه بین کلن‌های مختلف صنوبر، کلن 77/51 *P.d* و 63/51 *P.d* به‌عنوان کلن‌های مقاوم‌تر به تنش کم‌آبی معرفی شدند.

سپاسگزاری

از همکاری‌های صمیمانه آقای دکتر ملکشاه و عوامل اجرایی جنگل شصت‌کلاته و سایر دوستان طی مراحل انجام پژوهش بسیار سپاسگزارم.

منابع

1.Jajarmi, V. (2015). Effect of water stress on germination indices in seven wheat cultivar. World Academy of Science, *Engineering and Technology*. 49, 105-106.

2.Mirzaei, D. J., Tabari, M., & Daroodi, H. (2007). Early growth of Quercus castaneifolia seedlings as affected by weeding, shading, and irrigation. Pakistan. *J. of Biological Sciences*. 10 (15), 2430-2435.

3.Babaee, K., Amini Dehaghi, M., Modares Sanavi, S. A. M., & Jabbari, R. (2010). Water deficit effect on morphology, proline content, and thymol percentage of Thyme (*Thymus vulgaris* L.). *Iranian J. of Medicinal and Aromatic Plants*. 26 (2), 239-251. [In Persian with English summary]

4.Jangpromma, N., Kitthaisong, S., Lomthaisong, K., Daduang, S., Jaisil, P., & Thammasirirak, S. (2010). A proteomics analysis of drought stress-responsive proteins as a biomarker for drought-tolerant sugarcane cultivars. *American J. of Biochemistry and Biotechnology*. 6 (2), 89-102.

5.Lawlor, D. W., & Cornic, G. (2002). Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. Plant, Cell, and Environment. 25, 275-294.

6.Sairam, P. K., Deshmukh, P. S., & Shukla, D. S. (1997). Tolerance of drought and temperature stress in relation to increased antioxidant enzyme activity in wheat. *J. of Agronomy and Crop Science*. 178, 171-178.

7.Heidari Sharif Abad, H. (2000). Plants, aridity and drought (translation). Research Institute of Forests and Rangelands. Tehran. 207p. [In Persian]

8.Egert, M., & Tevini, M. (2002). Influence of drought on some physiological parameters symptomatic for oxidative stress in leaves of chives (*Allium schoenoprasum*). *J. of Environmental and Experimental Botany*. 48, 43-49.

9.Noctor, G., & Foyer, C. H. (1998). Ascorbate and glutathione: keeping active oxygen under control. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 49, 249-279.

10.Liu, C., Liu, Y., Guo, K., Fan, D., Li, G., Zheng, Y., Yu, L., & Yang, R. (2011). Effect of drought on pigments, osmotic adjustment, and antioxidant enzymes in six woody plant species in karst habitats of southwestern China. *Environmental and Experimental Botany*. 71 (2), 174-183.

11.Pan, Y., Wu, L., & Yu, Z. (2006). Effect of salt and drought stress on antioxidant enzymes activities and SOD isoenzymes of licorice. (*Glycyrrhiza uralensis* Fisch). *J. of Plant Growth Regulation*. 301, 564-571.

12.Marron, N., Gielen, B., Brignolas, F., Gao, J., Johnson, J. D., Karnosky, D. F., Polle, A., Scarascia- Mugnozza, G., Schroeder, W. R., & Ceulemans, R. (2014). Poplars and Willows: Trees for Society and the Environment. Food and Agriculture Organization (FAO) United Nations Roma, Italy. Pp: 337-442.

13.Marron, N., Delay, D., Petit, J. M., Dryer, E., Kahlem, G., Delmotte, F. M., & Brignolas, F. (2002). Physiological traits of two *Populus* × *euramericana* clones, Luisa Avanzo, and Dorskamp, during a water stress and re-watering cycle. *Tree Physiology*. 22, 849-858.

14. Sadati, S. E. (2011). Propagation approaches of *Populus caspica Bornm* and study of morphological and physiological responses of its seedling under drought stress and flooding. Ph.D. Thesis, Tarbiat Modares University, 131p. [In Persian]
15. Moeinifar, S., Salehi, A., Ghodskhah Daryaei, M., & Heidari Safari Kouchi, A. (2020). Respond of *Populus deltoides* Bartr. Ex Marsh Seedlings to Various Soil Moisture Regimes in Guilan Province. *Water Management in Agriculture*. 7 (1), 23-32. [In Persian with English summary]
16. Sadati, S. E., & Tabari, M. (2013). Growth and water relation in afforested *Populus caspica* seedling after one-year drought stress. The First National Conference on Plant Stress. Isfahan, Pp: 1-10. [In Persian]
17. Zhang, X., Zang, R., & Li, C. (2004). Population differences in physiological and morphological adaptations of *Populus davidiana* seedlings in response to progressive drought stress. *Plant Science*. 166 (3), 791-797.
18. Yin, C., Peng, Y., Zang, R., Zhu, Y., & Li, C. (2005). Adaptive responses of *Populus kangdingensis* to drought stress. *Physiologia Plantarum*. 123 (4), 445-451.
19. Sadati, S. E., Mokhtari, J., & Asadi, F. (2019). Drought tolerant of seedlings of five clones of *Populus* Forest and Poplar Research. 27 (4), 377-388. [In Persian with English summary]
20. Lei, Y., Yin, C., & Li, C. (2006). Differences in some morphological, physiological, and biochemical responses to drought stress in two contrasting populations of *Populus przewalskii*. *Physiologia Plantarum*. 127 (2), 182-191.
21. Xu, X., Peng, G., Wu, Ch., Korpelainen, H., & Li, Ch. (2008). Drought inhibits photosynthetic capacity more in females than in males of *Populus cathayana*. *Tree Physiology*. 28 (11), 1751-1759.
22. Saeidi, Z., & Azadfar, D. (2009). Effect of Hydromorphy and Drought Stresses on Net Photosynthesis Rate and Viability for Three Poplar Species. *J. of Wood and Forest Science and Technology*. 16 (3), 93-106. [In Persian with English summary]
23. Guo, X. Y., Zhang, X. S., & Huang, Z. Y. (2010). Drought tolerance in three hybrid poplar clones submitted to different watering regimes. *J. of Plant Ecology*. 3 (2), 79-87.
24. Liao, T., Wang, Y., Xu, C.P., Li, Y., & K, X. Y. (2018). Adaptive photosynthetic and physiological responses to drought and rewatering in triploid *Populus* populations. *Photosynthetic*. 56, 578-590.
25. Kumari, A., Singh, S. K., Singh, A. K., & Khan, I. (2017). Physiological evaluation of drought tolerance in *Poplar* (*Populus deltoids* L.) for different drought levels. *J. of AgriSearch*. 4 (2), 128-132.
26. Alizadeh, A. (2004). Soil - Water - Plant Relation Ship. Ferdowsi University of Mashhad. Mashhad. 470 p.
27. Mirzaei, J. (2011). Identification of arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Pistacia atlantica* and *P. khinjuk* in Ilam province and their effects on seedlings growth under drought stress. Ph.D. thesis, Faculty of Natural Resources. Tarbiat Modarres University. 176p. [In Persian]
28. Yin, C., Pang, X., & Lei, Y. (2009). *Populus* from high altitude has more efficient protective mechanisms under water stress than from low-altitude habitats: a study in the greenhouse for cuttings. *Physiologia Plantarum*. 137, 22-35.
29. Cutini, A., Matteucci, G., & Mugnozza, G. S. (1998). Estimation of leaf area index with the Li-cor LAI 2000 in deciduous forests. *Forest Ecology and Management*. 105, 55-65.
30. Cobb, W. R., Will, R. E., Daniels, R. F., & Jacobson, M. A. (2008). Aboveground biomass and nitrogen in four short-rotation woody crop species growing with different water and nutrient availabilities. *Forest Ecology and Management*. 255 (12), 4032-4039.

31. Arnon, A. N. (1967). Method of chlorophyll measurements in plants. *J. of Agronomy*. 23, 112-121.
32. Freehold, N. J. (1972). Manual of Clinical Enzyme Measurements. Freehold. N.J: Worthington Biomedical Corporation.
33. Ranieri, A., Castagna, A., Pacini, J., Baldan, B., Mensuali Sodi, A., & Soldatini, G. F. (2003). Early production and scavenging of hydrogen peroxide in the apoplast of sunflower plants exposed to ozone. *J. of Experimental Botany*. 54 (392), 2529-2540.
34. Zhao, Y., Aspinall, D., & Paleg, L. G. (1992). Protection of membrane integrity in *Medicago sativa* L. by Glycine betaine against the Effects of Freezing. *J. of Plant Physiology*. 140 (5), 541-543.
35. Lazcano-Ferrat, I., & Lovatt, C. J. (1999). Relationship between relative water content, nitrogen pools, and growth of *phaseolus vulgaris* L. and *P. acutifolius*, A. Gray during water Deficit. *Crop Science*. 39 (2), 467-475.
36. Smith, S., Weyers, J. D. B., & Berry, W. G. (1989). Variation in stomatal characteristics over the lower surface of Commelina communis leaves. *Plant, Cell & Environment*. 12 (6), 653-659.
37. Kridman, P. E. (1986). Photosynthesis in vine leaves as a function of light intensity, temperature, and leaf age. *J. of Grapevine Research - VITIS*. 7, 213-220.
38. Seeley, S. (1990). Hormonal transduction of environmental stresses. *HortScience*. 25 (11), 1369-1376.
39. Bacelar, E. A., Santos, D. L., Moutinho-Pereira, J. M., Goncalves, B. C., Ferreira, H. F., & Correia, C. M. (2006). Immediate responses and adaptative strategies of three olive cultivars under contrasting water availability regimes: changes in structure and chemical composition of foliage and oxidative damage. *Plant Science*. 170 (3), 596-605.
40. Close, D. C., Beadle, C. L., & Brown, P. H. (2005). The physiological basis of containerized tree seedling 'transplant shock': a review. *Australian Forestry*. 68 (2), 112-120.