Research Article

Iranian Journal of Forest and Poplar Research Vol. 32 No. 3, 2024
Vol. 32, No. 3, Page 214-231 (2023)
DOI: 10.22092/ijfpr.2024.364611.2144

Morphophysiological and biochemical responses of *Populus nigra* L. under salinity stress

A. Salehi [1*], M. Calagari [2] and H.R. Abbasi [3]

1*- Corresponding author, Assistant Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: az.salehi@rifr-ac.ir
2- Associate Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
3- Assistant Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 06.01.2024 Accepted: 08.04.2024

Abstract

Background and objectives: Salinity, caused by the accumulation of water-soluble salts in soil, is a major limiting factor for plant growth and development. A significant portion of Iran's soils are saline, which can severely restrict the cultivation of various poplar species. Therefore, determining the salinity tolerance of different poplar species can provide valuable guidance for poplar plantations in saline areas. This study investigates the morphological, physiological, and biochemical responses of *Populus nigra* L. clone "62/154" to varying levels of salinity stress. This high-yielding clone is widely used in poplar plantations across Iran.

Methodology: A pot study was conducted under controlled conditions using a completely randomized design to assess the morphological, physiological, and biochemical responses of this poplar clone to different salinity stress levels (0, 50, 100, 150, and 200 mM). Poplar cuttings were collected from the Alborz Research Center in Karaj, Iran, and planted in pots filled with clay-loam soil. The pots were placed outdoors during the experiment. The cuttings were initially irrigated with fresh water for three months before saline water (NaCl) was applied. After six weeks of salinity treatment, we measured survival rates, growth parameters, biomass production, relative water content (RWC) of leaves, macro- and micronutrient concentrations in plant tissues (leaf, stem, and root), and several physiological parameters (proline and sugar contents, malondialdehyde concentration, and enzyme activities). Data were analyzed using one-way analysis of variance to identify significant differences due to salinity treatment, with means separated by Tukey's HSD test.

Results: The results indicated that poplar plants subjected to low salt stress (50 mM NaCl) exhibited no significant differences compared to control plants regarding survival, growth, biomass production, or physiological and biochemical parameters. However, at higher NaCl levels (100, 150, and 200 mM), soil salinity significantly reduced survival rates, growth parameters, biomass production, leaf RWC, and concentrations of nitrogen (N) and potassium (K) in plant tissues. Additionally, calcium (Ca) concentrations in roots and leaves decreased alongside magnesium (Mg) levels in leaves. Conversely, higher salinity increased leaf physiological parameters (proline and soluble sugar content), activity of antioxidant enzymes (CAT and POD), malondialdehyde concentration, as well as sodium (Na) and chloride (Cl) concentrations in plant tissues. Notably, phosphorus (P), iron (Fe), zinc (Zn), manganese (Mn), and copper (Cu) concentrations in roots and leaves also increased compared to control and 50 mM NaCl treatments. The most pronounced changes occurred at 150 and 200 mM NaCl. Overall, high salt levels (150 and 200 mM) led to a marked decrease in survival rates, growth, and biomass

production along with significant morphophysiological and biochemical changes in the poplar plants. After six weeks of exposure to these salinity levels, survival rates dropped by nearly half. **Conclusion:** The observed decreases in survival rates, growth parameters, biomass production, changes in physiological parameters, nutrient absorption and accumulation in plant tissues—as well as higher accumulation of proline and sodium/chlorine elements—indicate that *P. nigra* clone 62/154 is salt-sensitive. Therefore, it is crucial to consider soil salinity levels and the sensitivity of this poplar clone when planning poplar plantation programs.

Keywords: Black poplar, growth parameter, nutrients, proline, soil salinity.

پاسخ‌های مورفوفیزیولوژیکی و زیست‌شیمیایی نهال‌های صنوبر تبریزی (*Populus nigra* L.) به تنش شوری

آزاده صالحی [۱*]، محسن کلاگری [۲] و حمیدرضا عباسی [۳]

۱*- نویسنده مسئول، استادیار، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

پست الکترونیک: az.salehi@rifr-ac.ir

۲- دانشیار، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۳- استادیار، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰

چکیده

سابقه و هدف: یکی از عوامل خاکیِ محدودکننده رشد و توسعه گیاهان، شوری است که با تجمع املاح در خاک تحت تأثیر عوامل مختلف به وجود می‌آید. سطح وسیعی از خاک‌های کشور، شور هستند. شوری خاک می‌تواند تاحد زیادی، کشت گونه‌های مختلف صنوبر را محدود کند، بنابراین تعیین دامنه تحمل به تنش شوری گونه‌ها و کلن‌های مختلف صنوبر می‌تواند راهنمای خوبی برای زراعت چوب در اراضی شور باشد. هدف از پژوهش پیش‌رو، بررسی پاسخ‌های ریخت‌شناختی، فیزیولوژیکی و زیست‌شیمیایی صنوبر تبریزی- سالاری (*Populus nigra* L. 62/154) به سطوح مختلف تنش شوری است. این کلن به‌عنوان یک کلن صنوبر پرمحصول، به‌طور وسیعی در نقاط مختلف کشور در زراعت چوب استفاده می‌شود.

مواد و روش‌ها: تحت شرایط کنترل‌شده طی یک مطالعه گلدانی در قالب طرح کامل تصادفی، برخی پاسخ‌های ریخت‌شناختی، فیزیولوژیکی و زیست‌شیمیایی رقم سالاری به سطوح مختلف تنش شوری (صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار) بررسی شد. بدین منظور، قلمه‌های صنوبر مورد مطالعه از خزانه تحقیقاتی بخش تحقیقات صنوبر در ایستگاه تحقیقاتی البرز تهیه و در گلدان‌های پرشده با خاکی با بافت لومی- رسی کاشته شدند. گلدان‌ها در طول انجام آزمایش در فضای بازِ مسقف نگهداری شدند. در ابتدا، قلمه‌های صنوبر به‌مدت سه ماه تحت شرایط آبیاری با آب معمولی رشد کردند. پس از طی این دوره، نهال‌های مورد مطالعه تحت تنش شوری با استفاده از آبیاری با آب شور (نمک NaCl) در پنج سطح شوری ذکرشده قرار گرفتند. پس از گذشت شش هفته، مؤلفه‌های زنده‌ماندنی، رشد و تولید زی‌توده، محتوای نسبی آب برگ، غلظت عناصر غذایی اصلی و کمیاب اندام‌های گیاهی (ریشه، ساقه و برگ) و برخی مؤلفه‌های فیزیولوژی برگ شامل مقدار پرولین و قندهای محلول، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (پراکسیداز و کاتالاز) و غلظت مالون‌دی‌آلدهید اندازه‌گیری شد. درنهایت، برای بررسی تأثیر سطوح مختلف تیمار شوری بر مؤلفه‌های مورد بررسی از آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون توکی استفاده گردید.

نتایج: نهال‌های صنوبر تبریزی تحت تنش شوری ۵۰ میلی‌مولار به‌خوبی نهال‌های شاهد رشد کردند. به‌طوری‌که در نهال‌های تحت این سطح شوری، کاهش زنده‌مانی، رشد و تولید زی‌توده و تغییرات فیزیولوژی و زیست‌شیمیایی معنی‌داری نسبت به نهال‌های شاهد مشاهده نشد. اما نهال‌های تحت تنش شوری ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار ازنظر کاهش در زنده‌مانی، رشد، تولید زی‌توده، محتوای نسبی آب برگ، غلظت نیتروژن و پتاسیم در ریشه، ساقه و برگ، کلسیم در ریشه و برگ و منیزیم برگ و افزایش در مؤلفه‌های فیزیولوژی برگ شامل مقدار پرولین و قندهای محلول، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (پراکسیداز و کاتالاز) و غلظت مالون‌دی‌آلدهید، غلظت سدیم و کلر در اندام‌های گیاهی، فسفر، آهن، روی، منگنز و مس در ریشه و برگ، تغییرات معنی‌داری را نسبت به نهال‌های شاهد و نهال‌های تحت تنش شوری ۵۰ میلی‌مولار نشان دادند و بیشترین تغییرات مربوط به نهال‌های تیمارشده با سطوح ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار شوری بود. به‌طورکلی، در سطوح شوری ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار، کاهش شدید زنده‌مانی، رشد و تولید زی‌توده به‌همراه تغییرات بیشتر

مورفوفیزیولوژیکی و زیست‌شیمیایی در نهال‌های صنوبر مشاهده شد. این دو سطح شوری برای نهال‌های صنوبر تبریزی، قابل‌تحمل نبود و پس از شش هفته از اعمال این سطوح شوری، زنده‌مانی نهال‌های صنوبر نزدیک‌به نصف کاهش یافت.
نتیجه‌گیری کلی: کاهش در زنده‌مانی، مؤلفه‌های رشد و تولید زی‌توده، تغییر در مؤلفه‌های فیزیولوژیکی و جذب و تجمع عناصر غذایی اصلی و کمیاب اندام‌های گیاهی ازیک‌سو و مقدار زیاد تجمع پرولین و عناصر سدیم و کلر در اندام برگ این رقم صنوبر نسبت به گونه‌های مقاوم صنوبر مانند پده ازسوی دیگر، حاکی از حساس بودن این کلن صنوبر تبریزی نسبت به تنش شوری است، بنابراین در برنامه‌های زراعت چوب با رقم سالاری لازم است که مقدار شوری خاک و دامنه تحمل این رقم نسبت به تنش شوری مورد توجه قرار گیرد.
واژه‌های کلیدی: پرولین، شوری خاک، عناصر غذایی، مؤلفه رشد.

مقدمه

شوری خاک از مؤلفه‌های غیرزیستی مهمی است که می‌تواند رشدونمو گیاهان را محدود کند (Evelin *et al*., 2009). در خاک‌های شور، نمک‌های محلول متعددی شامل NaCl، Na_2SO_4، $MgSO_4$، $CaSO_4$، $MgCl_2$ و KCl وجود دارند، اما NaCl با ۵۰ تا ۸۰ درصد از کل نمک‌های محلول در خاک، رایج‌ترین نمکی است که در خاک‌ها تجمع می‌کند. در واقع، یکی از عوامل خاکیِ محدودکننده رشد و توسعه گیاهان، شوری است که با تجمع املاح در خاک تحت تأثیر عوامل مختلف به وجود می‌آید (Munns & Tester, 2008). شوری زیاد، فشار اسمزی را در محلول خاک افزایش می‌دهد. همین عامل بر فرایند آبی و روابط یونی گیاه تأثیرگذار خواهد بود. گیاهان با قرارگیری در معرض شوری، ابتدا تنش آبی را تجربه می‌کنند که به کاهش توسعه برگ‌ها منجر می‌شود. درصورتی‌که گیاه به‌مدت طولانی در معرض تنش شوری قرار گیرد، تنش یونی و درنهایت، کاهش فتوسنتز و رشدونمو گیاهی اتفاق می‌افتد. در واقع، پاسخ به تنش شوری شامل تغییرات ریخت‌شناختی، فیزیولوژیکی و زیست‌شیمیایی در گیاهان است که به‌صورت آسیب غشای سلولی، تحریک پاسخ‌های آنتی اکسیدانی و کاهش رشد در گیاه منعکس و آشکار می‌شود (Wu *et al*., 2016).

پاسخ‌های متعددی از گونه‌های گیاهی مختلف و حتی جنس‌های (نر و ماده) یک گونه گیاهی نسبت به تنش شوری گزارش شده است (Li *et al*., 2013). در اغلب گیاهانی که تحت شرایط تنش شوری رشد می‌کنند، غلظت‌های زیادی از یون‌های سدیم و کلر در اندام‌های گیاهی تجمع می‌کنند (Chen & Polle, 2010). تأثیر اولیه غلظت‌های یونی زیاد، اختلال هموستاز درون سلولی است که تضعیف فعالیت متابولیکی، اختلال در عملکرد غشا سلولی و برخی تأثیرات ثانویه را به‌دنبال دارد که حتی می‌تواند به مرگ سلول منجر شود (Kaya *et al*., 2007). چنانچه در پژوهش‌های پیشین گزارش شده است که تحت تنش شوری حفظ غلظت کم یون-های سمی در اندام برگ برای زنده‌مانی و رشد گیاه ضروری است (Wu *et al*., 2016). در واقع، نرخ کمتر انتقال سدیم و کلر از ریشه به اندام هوایی می‌تواند توانایی گیاه را برای مقابله با تنش شوری افزایش دهد. همچنین، گیاهان مختلف می‌توانند از طریق تغییر ساختار معماری ریشه، افزایش جذب آب، کاهش انتقال یونی و فتوسنتز با تنش شوری مقابله کنند (Grigulis *et al*., 2013).

صنوبرها (*Populus* spp.) با تنوع زیاد و گسترش بوم‌شناختی وسیع (Regier *et al*., 2009)، اهمیت اقتصادی و محیط‌زیستی (Ahmadloo *et al*., 2023) و باتوجه‌به تأمین مواد اولیه برخی صنایع چوبی، گونه‌های مهمی ازنظر تجاری هستند (Xiao *et al*., 2009; Jahanpour *et al*., 2022; Haidari *et al*., 2023). در جنس صنوبر، شکل‌های مختلفی از آسیب ناشی از تنش شوری شامل کاهش و بازدارندگی رشد، آسیب به اندام برگ، اختلالات فیزیولوژیکی مرتبط با عملکردهای متابولیکی گیاه و تغییر در جذب و تجمع عناصر غذایی در اندام‌هایی گیاهی مشاهده شده است (Chen & Polle, 2010; Bárzana *et al*., 2012). گونه‌های مختلف

صنوبر نسبت به تنش شوری، پاسخ‌های متفاوتی را نشان داده‌اند. به‌طوری‌که پده (*P. euphratica* Olivier) به‌عنوان صنوبر مقاوم به شوری خاک و اورامریکن (*P. euramericana* (Dode) Guinier)، *P. canescens* (Aiton) Sm. و *P. cathayana* Rehder به‌عنوان صنوبرهای حساس به شوری در اغلب پژوهش‌ها گزارش شده‌اند (Chen *et al*., 2002, 2003; Bolu & Polle, 2004; Yang *et al*., 2009). همچنین، در بررسی گلخانه‌ای تأثیر شوری خاک بر چهار گونه صنوبر، طبقه‌بندی خیلی حساس، حساس، نیمه‌حساس و نیمه‌متحمل به‌ترتیب برای صنوبرهای دلتوئیدس (*P. deltoides* W.Bartram ex MarshallBárzana)، اورامریکن، تبریزی (*P. nigra* L.) و کبوده (*P. alba* L.) گزارش شد (Daneshvar & Modirrahmati, 2009). Calagari و همکاران (۲۰۱۷) نیز نشان دادند که کلن‌ها و هیبریدهای مختلف صنوبر رشدیافته در عرصه‌های شور ازنظر ویژگی‌های رویشی با یکدیگر تفاوت‌های معنی‌داری داشتند. چنانچه مقدار تجمع یون‌های شوری مانند سدیم در اندام هوایی صنوبرهای حساس به شوری در مقایسه با گونه‌های مقاوم بیشتر بود. این موضوع نشان می‌دهد که گیاهان مقاوم به شوری نسبت به گونه‌های حساس به‌طور کارآمدتر از انتقال سدیم به اندام هوایی جلوگیری می‌کنند (Janz *et al*., 2012).

پژوهش‌های اندکی در مورد تأثیر تنش شوری بر صنوبر تبریزی انجام شده است. Lumis و همکاران (۱۹۷۳)، صنوبر تبریزی را به‌عنوان یک گونه مقاوم به شوری و Kogawara و همکاران (۲۰۱۴) آن را به‌عنوان گونه‌ای حساس به شوری گزارش کردند. Kulczyk-Skrzeszewska و Kieliszewska-Rokicka (۲۰۲۲) نیز نشان دادند که تحت تنش شوری زیاد، مقدار قابل‌توجهی از یون‌های شوری (سدیم و کلر) در برگ‌های تبریزی همانند گونه‌ها و هیبریدهای صنوبر حساس به تنش شوری تجمع پیدا می‌کند. باوجوداین، تبریزی توانست برخی سازوکارهای دفاعی را در پاسخ به تنش شوری مانند افزایش غلظت یون کلسیم و افزایش تولید پرولین در سطوحی مشابه با مقادیر ثبت‌شده برای صنوبرهای مقاوم به شوری فعال کند. نتایج Salehi و همکاران (۲۰۱۸) بر درختان صنوبر تبریزی سه‌ساله و Salehi و همکاران (۲۰۲۲) درمورد درختان صنوبر تبریزی پنج‌ساله نیز نشان داده است که خاک با هدایت الکتریکی کمتر (۱/۳۶ ds/m) شرایط رویشی مناسب‌تری را برای این گونه در مقایسه با خاک با هدایت الکتریکی بیشتر (۴/۴۳ ds/m) فراهم می‌کند. به‌طوری‌که همبستگی منفی بین ویژگی‌های رویشی درختان صنوبر تبریزی و هدایت الکتریکی خاک مشاهده شد.

سطح وسیعی از کشور را خاک‌های شور تشکیل می‌دهد. شور شدن فزاینده خاک‌ها می‌تواند تاحد زیادی کشت گونه‌های صنوبر را محدود کند، بنابراین تعیین دامنه تحمل به تنش شوری در گونه‌های مختلف صنوبر می‌تواند راهنمای خوبی برای زراعت آن‌ها در اراضی شور باشد. در پژوهش پیش‌رو، تحت شرایط کنترل‌شده در یک مطالعه گلدانی، پاسخ‌های مورفوفیزیولوژیکی و زیست‌شیمیایی نهال‌های صنوبر تبریزی- سالاری (*P. nigra* 62/154)، که به عنوان یک کلن پرمحصول برای صنوبرکاری در بسیاری از مناطق نیمه‌خشک کشور توصیه شده است (Salehi *et al*., 2021)، به سطوح مختلف تنش شوری بررسی شد.

مواد و روش‌ها

برای انجام پژوهش پیش‌رو، در اواسط اسفندماه، قلمه‌های صنوبر متعلق به کلن سالاری (قلمه‌های همگن به طول ۲۰ سانتی‌متر و قطر یک تا ۱/۵ سانتی‌متر و با حداقل سه تا چهار جوانه جانبی) از خزانه تحقیقاتی بخش تحقیقات صنوبر در ایستگاه تحقیقاتی البرز تهیه شد. سپس، این قلمه‌ها در گلدان‌های پلاستیکی (با ابعاد ۲۵×۲۰ سانتی‌متر و حجم تقریبی ۷/۵ لیتر یا کیلوگرم) پرشده با خاکی با بافت لومی- رسی کاشته شدند. ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک مورد استفاده در جدول ۱ آمده است. در این پژوهش، بافت خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، pH براساس روش گل اشباع (Mc Lean, 1982)، هدایت الکتریکی (EC) با روش عصاره گل اشباع (Rhoades, 1982)، ماده آلی به روش والکلی- بلاک (Nelson & Sommers, 1996)، نیتروژن کل با روش کجلدال (Bremner, 1996) و غلظت کل عناصر

غذایی دیگر شامل فسفر، پتاسیم، سدیم، کلر، کلسیم، منیزیم، سولفور، آهن، روی، منگنز و مس پس از هضم اسیدی نمونه‌ها (با استفاده از اسیدهای HCl و HNO_3 به نسبت چهار به یک) با استفاده از دستگاه ICP-MS (PerkinElmer ICP-MS: Elan 9000 DRC-E, USA) اندازه‌گیری شدند (McGrath & Cunliffe, 1985).

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک

Table 1. Physico-chemical properties of soil

Parameter	pH	EC	Organic matter	N	P	K	Na
Unit	-	(ds/m)	(%)	(%)	(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)
Quantity	7.6	1.6	0.97	0.08	1.08	20.14	14.45
Parameter	Ca	Mg	S	Fe	Zn	Cu	Mn
Unit	(g/kg)	(g/kg)	(mg/kg)	(g/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
Quantity	53.03	13.62	899.1	28.71	98.6	57.2	860.3

قلمه‌های صنوبر به‌مدت سه ماه تحت شرایط آبیاری با آب معمولی رشد کردند. پس از طی این دوره، تنش شوری با استفاده از آب شور با نمک NaCl در پنج سطح شوری (صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار) در قالب طرح کامل تصادفی به‌مدت شش هفته بر نهال‌های صنوبر تبریزی رشدیافته اعمال شد. هدایت الکتریکی خاک برای پنج سطح شوری فوق در انتهای آزمایش به‌ترتیب ۱/۶، ۳/۴، ۷/۱، ۱۰/۶ و ۱۳/۲ دسی‌زیمنس بر متر بود. برای هر سطح تیمار شوری، پنج نهال در سه تکرار در نظر گرفته شد. گلدان‌ها در طول انجام آزمایش در فضای باز مسقف (به‌منظور حذف تأثیر بارش‌های احتمالی بر نهال‌ها) نگهداری شدند. پس از گذشت شش هفته، زنده‌مانی نهال‌ها در هر تیمار ثبت و درصد زنده‌مانی محاسبه شد. ویژگی‌های رویشی (قطر و طول ساقه) و تولید زی‌توده (ریشه، ساقه و برگ) با انتخاب تصادفی شش نهال از هر تیمار (دو نهال از هر تکرار) اندازه‌گیری شدند. برای تعیین وزن خشک زی‌توده، پس از شستشوی نهال‌ها، اندام‌های مختلف (ریشه، ساقه و برگ) از هم جدا شدند. سپس وزن خشک اندام‌های گیاهی پس از خشک شدن آن‌ها در آون به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. درصد محتوای نسبی آب برگ (RWC) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد. در این فرمول از وزن تر (FW)، وزن در حالت تورژسانس (TW) و وزن خشک (DW) نمونه‌های برگ استفاده می‌شود (Sánchez *et al*., 1998).

$$RWC = [(FW-DW) / (TW-DW)] \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

نمونه‌های گیاهی (ریشه، ساقه و برگ) ازنظر عناصر غذایی با سه تکرار در هر سطح شوری بررسی شدند. در نمونه‌های گیاهی، نیتروژن و عناصر غذایی دیگر طبق روش‌های ذکرشده در مورد نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شدند. در پژوهش پیش‌رو، برای کنترل کیفیت آزمایش و ارزیابی صحت داده‌های عناصر غذایی اندازه‌گیری‌شده در نمونه‌های گیاهی از دو ماده مرجع استاندارد گیاهی با کدهای GSB-11 و ERM-CD281 استفاده شد.

در این پژوهش، غلظت مالون‌دی‌آلدئید برگ براساس روش Stewart و Bewley (۱۹۸۰) با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج‌های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر، قندهای محلول با استفاده از معرف آنترون با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۲۵ نانومتر (Irigoyen *et al*., 1992)، استخراج و سنجش محتوای پرولین براساس روش Bates و همکاران (۱۹۷۳)، سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز با روش Siminis و همکاران (۱۹۹۴) و آنزیم پراکسیداز براساس روش Chance و Maehly (۱۹۵۵) با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر با سه تکرار در هر سطح شوری برآورد شد.

تجزیه‌وتحلیل داده‌های پژوهش پیش‌رو با نرم‌افزار SPSS انجام شد. بدین ترتیب که در ابتدا توسط آزمون‌های Shapiro-Wilk و Levene نرمال بودن و همگنی واریانس

داده‌ها تأیید شد. بنابراین برای بررسی تأثیر سطوح مختلف تیمار شوری بر مؤلفه‌های مورد بررسی در نهال‌های صنوبر تبریزی از آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه (ANOVA) و برای گروه‌بندی و مقایسه میانگین‌ها از آزمون توکی استفاده گردید.

نتایج

تأثیر سطوح مختلف تیمار شوری بر مؤلفه‌های زنده‌مانی، رشد، تولید زی‌توده و محتوای نسبی آب برگ

اعمال تنش شوری بر نهال‌های صنوبر تبریزی سبب کاهش معنی‌دار درصد زنده‌مانی نهال‌ها شد ($P<۰/۰۱$). به‌طوری‌که پس از شش هفته، درصد زنده‌مانی نهال‌ها در سطوح شوری صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار به‌ترتیب ۱۰۰، ۱۰۰، ۸۰/۵۵، ۵۶/۳۶ و ۵۱/۵ درصد به‌دست آمد. نتایج تأثیر سطوح مختلف تیمار شوری بر مؤلفه‌های رشد (قطر و طول ساقه)، تولید زی‌توده (زی‌توده خشک ریشه، ساقه و برگ و کل گیاه) و محتوای نسبی آب برگ نهال‌های صنوبر نشان داد که اعمال تیمار شوری (به‌جز سطح شوری ۵۰ میلی‌مولار) با کاهش معنی‌دار مؤلفه‌های رشد، تولید زی‌توده و محتوای نسبی آب برگ نهال‌ها همراه بود ($P<۰/۰۱$). به‌طوری‌که بیشترین مقدار مؤلفه‌های ذکرشده در سطوح شوری صفر و ۵۰ میلی‌مولار و کمترین مقدار آن‌ها در سطح شوری ۲۰۰ میلی‌مولار مشاهده شد (جدول‌های ۲ و ۳).

جدول ۲- تجزیه واریانس مؤلفه‌های رشد، تولید زی‌توده و محتوای نسبی آب برگ تحت تأثیر تیمارهای شوری

Table 2. Variance analysis of growth parameters, biomass production and RWC under salinity treatment

Variation source	df	Mean Square						
		Diameter	Height	Root biomass	Stem biomass	Leaf biomass	Total biomass	RWC
Salinity treatment	4	6.68**	666.44**	27.18**	49.9**	28.77**	308.41**	917.86**
Error	25	0.122	13.3	0.102	0.23	0.081	0.527	12.04

**: Significant at P<0.01

جدول ۳- میانگین (± اشتباه معیار) مؤلفه‌های رشد، تولید زی‌توده و محتوای نسبی آب برگ در نهال‌های صنوبر تحت تأثیر سطوح مختلف تیمار شوری

Table 3. Growth parameters, biomass production and RWC of poplar plants affected by different salinity levels

Parameter	Salinity level				
	S_0: 0 mM	S_1: 50 mM	S_2: 100 mM	S_3: 150 mM	S_4: 200 mM
Diameter (mm)	10.14 ± 0.163^a	9.98 ± 0.115^a	8.87 ± 0.118^b	8.19 ± 0.086^b	7.64 ± 0.113^c
Height (cm)	95.27 ± 1.08^a	96.07 ± 1.66^a	80.9 ± 2.69^b	76.4 ± 2.11^c	73.77 ± 1.55^c
Root biomass (g)	5.89 ± 0.11^a	5.96 ± 0.229^a	3.32 ± 0.179^b	1.8 ± 0.135^c	1.23 ± 0.114^c
Stem biomass (g)	14.06 ± 0.377^a	13.77 ± 0.288^a	10.16 ± 0.336^b	8.38 ± 0.356^c	8.01 ± 0.272^c
Leaf biomass (g)	6.07 ± 0.141^a	5.93 ± 0.151^a	3.08 ± 0.108^b	2.13 ± 0.115^c	1.09 ± 0.098^d
Total biomass (g)	26.1 ± 0.399^a	25.86 ± 0.456^a	16.56 ± 0.238^b	12.31 ± 0.26^c	10.13 ± 0.141^d
RWC (%)	83.88 ± 1.02^a	82.18 ± 1.22^a	78.85 ± 1.31^b	71.54 ± 1.7^b	53.77 ± 1.69^c

Different letters in each row indicate a significant difference between means (P<0.01)

تأثیر سطوح مختلف شوری بر مؤلفه‌های فیزیولوژیکی

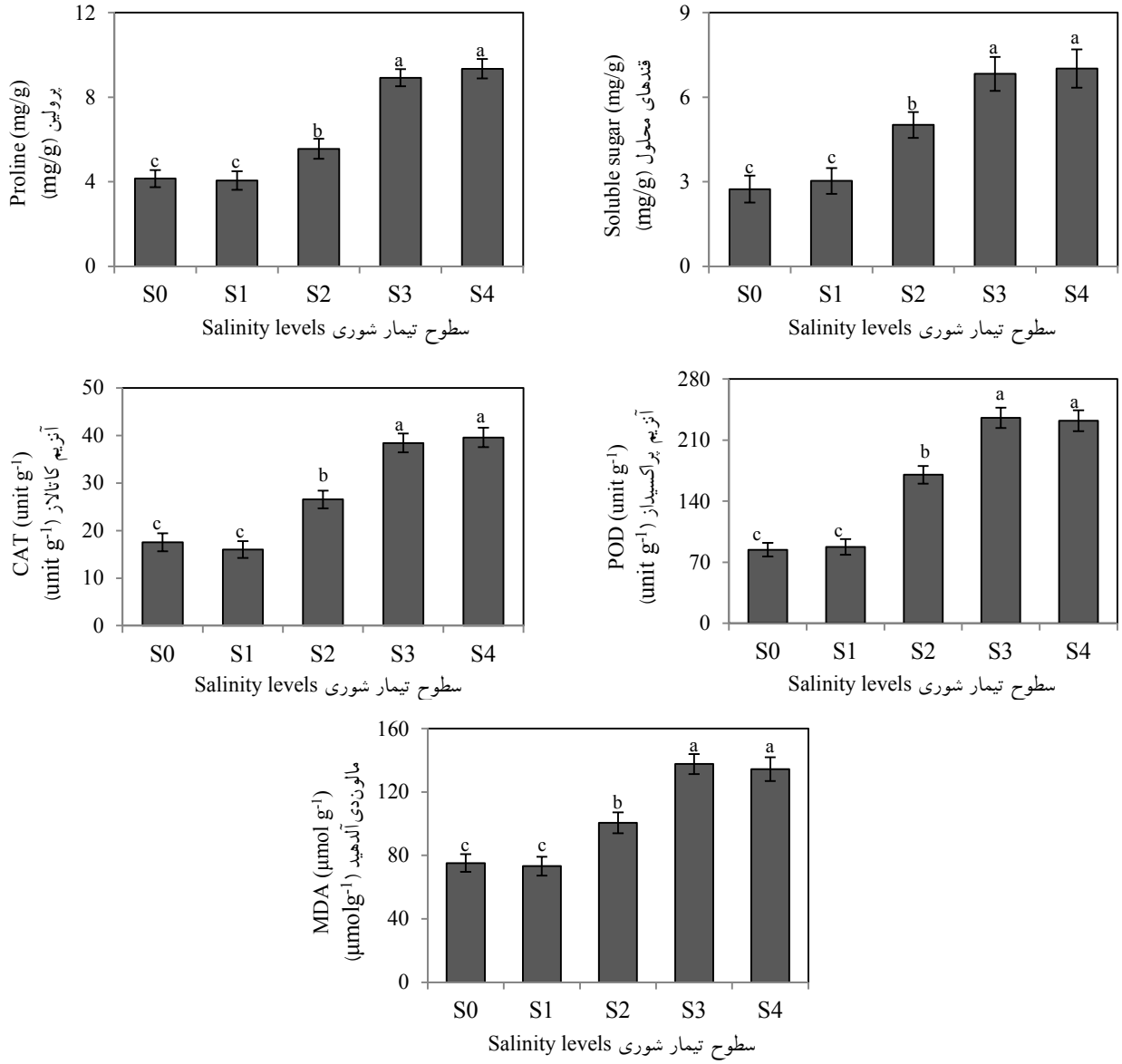
اندازه‌گیری برخی مؤلفه‌های فیزیولوژیکی برگ نشان داد که اعمال تنش شوری بر نهال‌های صنوبر تبریزی با افزایش معنی‌دار مقدار پرولین و قندهای محلول، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (پراکسیداز و کاتالاز) و غلظت مالون‌دی‌آلدهید برگ همراه بود. شایان‌ذکر است که ازنظر مؤلفه‌های فیزیولوژیکی ذکرشده بین سطوح شوری صفر و ۵۰ میلی‌مولار و نیز بین ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار، تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد (جدول ۴ و شکل ۱).

جدول ۴- تجزیه واریانس مؤلفه‌های فیزیولوژیکی برگ تحت تأثیر تیمار شوری

Table 4. Variance analysis of physiological parameters in poplar leaves under salinity treatment

Variation Source	Mean Square					
	df	Proline	Soluble sugar	CAT	POD	MDA
Salinity treatment	4	19.26**	11.38**	372.67**	16412.02**	2862.36**
Error	10	0.227	0.298	2.49	80.46	38.61

**: Significant at P<0.01



شکل ۱- میانگین (± اشتباه معیار) پرولین، قندهای محلول، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و مالون‌دی‌آلدهید در برگ نهال‌های صنوبر تحت سطوح مختلف شوری

S_0، S_1، S_2، S_3، S_4 به‌ترتیب نشان‌دهنده سطح شوری صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار هستند. حرف‌های لاتین متفاوت در هر نمودار نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۹ درصد هستند.

Figure 1. The means (± SE) of proline, soluble sugar, CAT, POD and MDA of poplar leaves affected by different salinity levels

S_0: 0 mM, S_1: 50 mM, S_2: 100 mM, S_3: 150 mM, and S_4: 200 mM. Different letters in each figure indicate a significant difference between means (P<0.01).

تأثیر سطوح مختلف شوری بر غلظت عناصر سدیم (Na) و کلر (Cl) در اندام‌های گیاهی

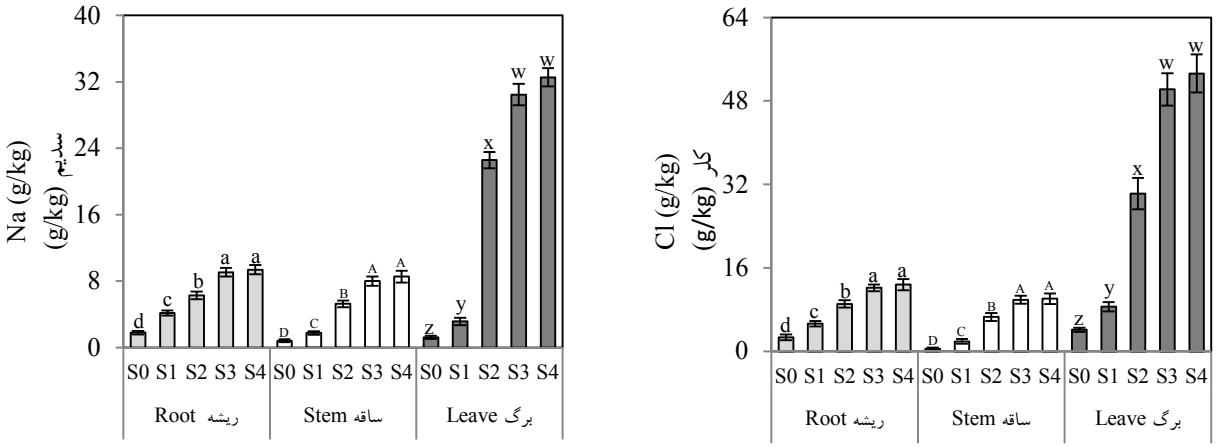
اعمال تنش شوری بر نهال‌های صنوبر تبریزی سبب افزایش معنی‌دار سدیم و کلر در اندام‌های گیاهی (ریشه، ساقه و برگ) شد ($P<۰/۰۱$)، اما از این نظر بین سطوح شوری ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار، تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. بیشترین غلظت عناصر مذکور به‌ترتیب در اندام‌های برگ، ریشه و ساقه مشاهده شد (جدول ۵ و شکل ۲).

جدول ۵- تجزیه واریانس غلظت عناصر سدیم و کلر در اندام‌های گیاهی تحت تأثیر تیمار شوری

Table 5. Variance analysis Na and Cl concentrations of plant tissues under different salinity treatment

Source of variation		Mean Square					
		Na			Cl		
	df	Root	Stem	Leaf	Root	Stem	Leaf
Salinity treatment	4	32.17**	36.61**	649.17**	56.68**	59.82**	1528.37**
Error	10	0.178	0.185	0.65	0.521	0.342	2.4

**: Significant at P<0.01



شکل ۲- میانگین (± اشتباه معیار) غلظت عناصر سدیم و کلر در اندام‌های گیاهی نهال‌های صنوبر تحت سطوح مختلف تیمار شوری

S_0، S_1، S_2، S_3، S_4 به‌ترتیب نشان‌دهنده سطح شوری صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار هستند. حرف‌های لاتین متفاوت در هر اندام نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۹ درصد هستند.

Figure 2. The means (± SE) of Na and Cl concentrations in the tissues of poplar plants affected by different salinity levels

S_0: 0 mM, S_1: 50 mM, S_2: 100 mM, S_3: 150 mM, and S_4: 200 mM. Different letters in each tissue indicate a significant difference between means (P<0.01).

تأثیر سطوح مختلف شوری بر غلظت عناصر نیتروژن (N)، فسفر (P) و پتاسیم (K) در اندام‌های گیاهی

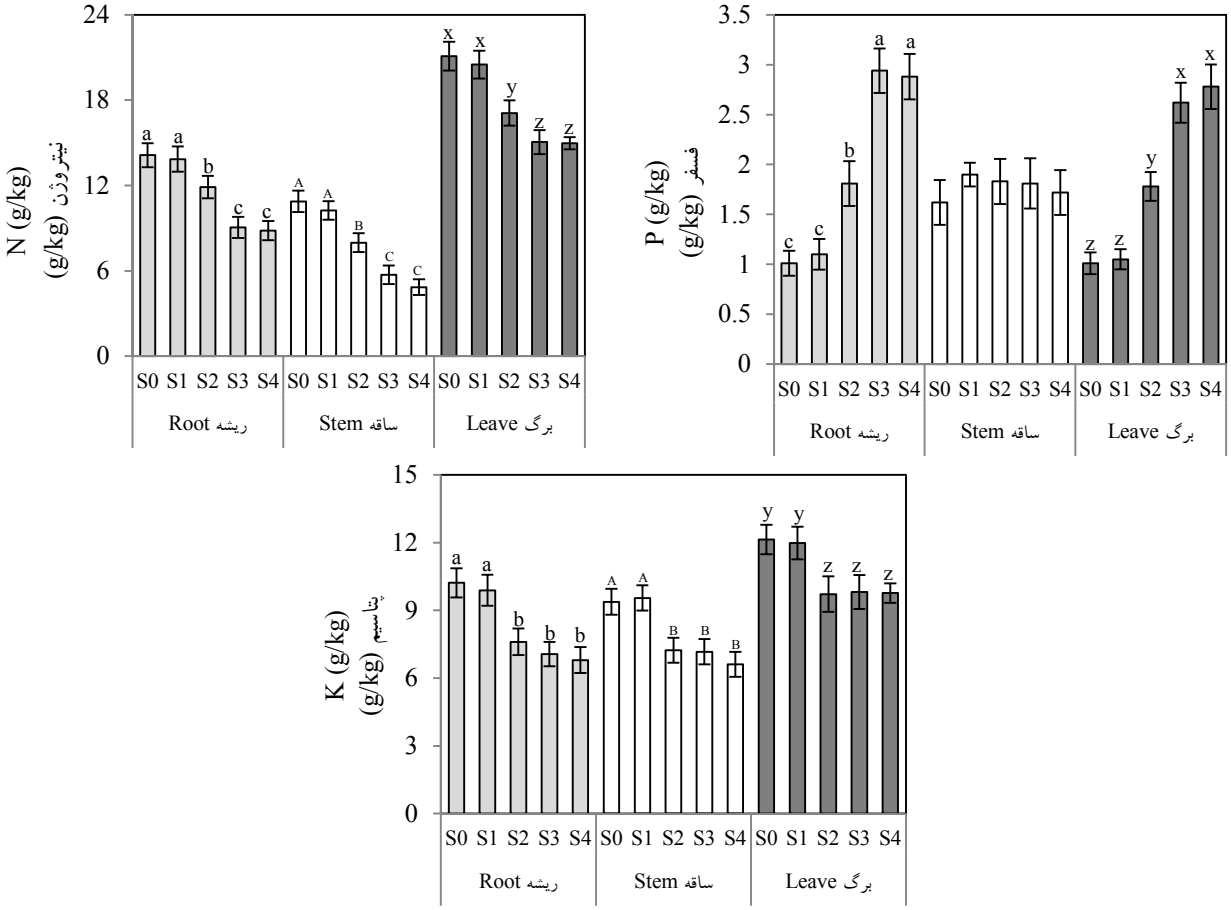
تأثیر سطوح مختلف تیمار شوری بر غلظت عناصر غذایی NPK در اندام‌های گیاهی (به‌جز غلظت فسفر در اندام ساقه) معنی‌دار بود. تیمارهای شوری، کاهش معنی‌دار عناصر نیتروژن و پتاسیم در ریشه، ساقه و برگ را به‌همراه داشتند ($P<۰/۰۱$)، به‌طوری‌که کمترین غلظت نیتروژن و پتاسیمِ هر سه اندام گیاهی در سطوح ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار شوری مشاهده شد. در مقابل، اعمال تیمار شوری بر نهال‌های صنوبر به افزایش معنی‌دار غلظت فسفر ریشه و برگ منجر شد ($P<۰/۰۱$). بیشترین غلظت فسفر ریشه و برگ در سطوح ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار شوری مشاهده گردید (جدول ۶ و شکل ۳).

جدول ۶- تجزیه واریانس غلظت عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم در اندام‌های گیاهی تحت تأثیر تیمار شوری

Table 6. Variance analysis N, P and K concentrations of plant tissues under different salinity treatment

Source of variation		Mean Square								
		N			P			K		
	df	Root	Stem	Leaf	Root	Stem	Leaf	Root	Stem	Leaf
Salinity treatment	4	20.86**	24.01**	26.68**	2.39**	0.041^{ns}	1.74**	7.8**	5.69**	5.1**
Error	10	0.517	0.366	0.55	0.039	0.061	0.35	0.334	0.263	0.423

**: Significant at P<0.01; ns: non-significant



شکل ۳- میانگین (± اشتباه معیار) غلظت عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم در اندام‌های نهال‌های صنوبر تحت سطوح مختلف تیمار شوری

S_0، S_1، S_2، S_3، S_4 به‌ترتیب نشان‌دهنده سطح شوری صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار هستند. حرف‌های لاتین متفاوت در هر اندام نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۹ درصد هستند.

Figure 3. The means (± SE) of N, P and K concentrations in the tissues of poplar plants affected by different salinity levels

S_0: 0 mM, S_1: 50 mM, S_2: 100 mM, S_3: 150 mM, and S_4: 200 mM. Different letters in each tissue indicate a significant difference between means (P<0.01).

تأثیر سطوح مختلف شوری بر غلظت عناصر کلسیم (**Ca**)، منیزیم (**Mg**) و سولفور (**S**) در اندام‌های گیاهی

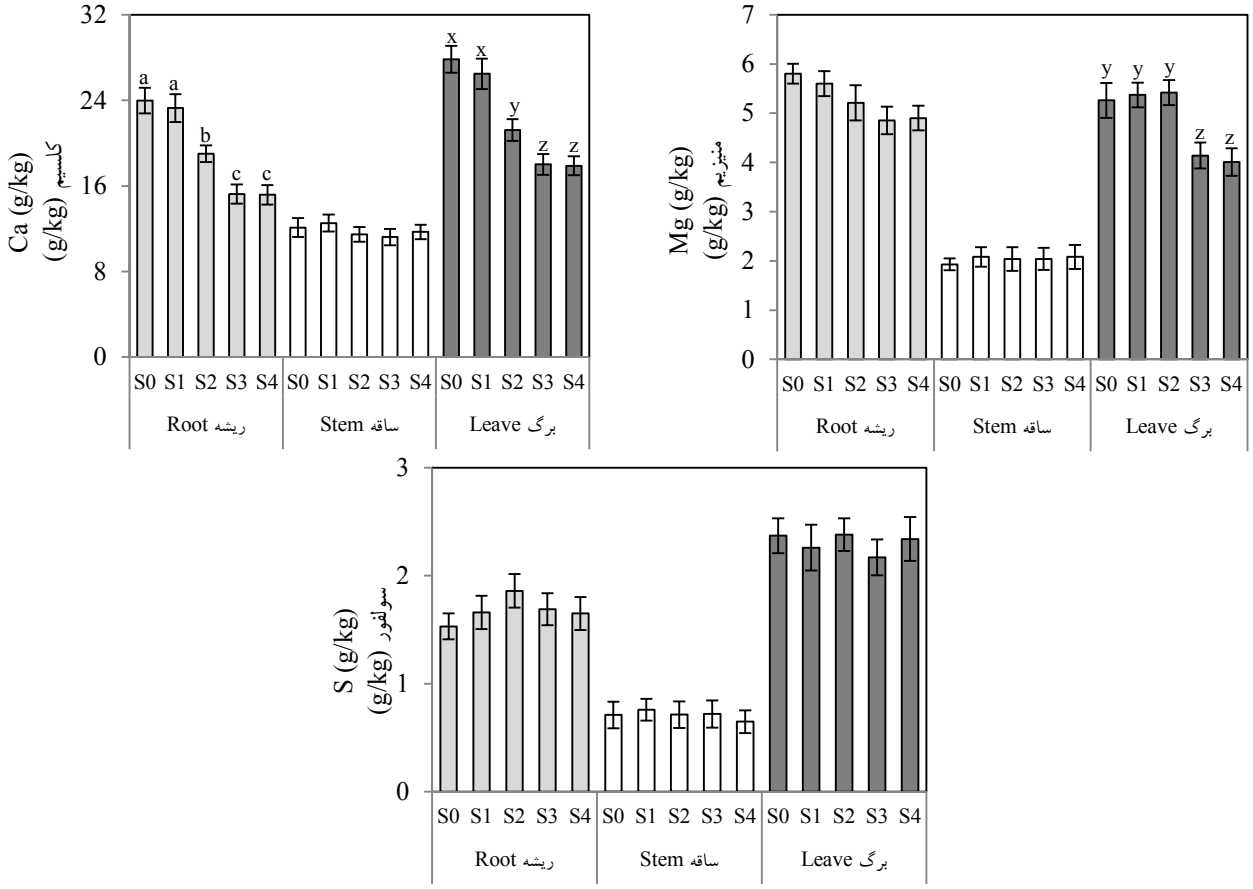
نتایج نشان داد که تیمار شوری، کاهش معنی‌دار غلظت کلسیم ریشه و برگ ($P <$ ۰/۰۱) و منیزیم برگ ($P <$ ۰/۰۵) را به‌همراه داشت، اما تأثیر سطوح مختلف تیمار شوری بر غلظت عناصر کلسیم و منیزیم در اندام‌های دیگر معنی‌دار نبود. غلظت سولفور اندام‌های گیاهی نیز تحت تأثیر سطوح مختلف تیمار شوری قرار نگرفت (جدول ۷ و شکل ۴).

جدول ۷- تجزیه واریانس غلظت عناصر کلسیم، منیزیم و سولفور در اندام‌های گیاهی تحت تأثیر تیمار شوری

Table 7. Variance analysis Ca, Mg and S concentrations of plant tissues under different salinity treatment

Source of variation		Mean Square								
		Ca			Mg			S		
	df	Root	Stem	Leaf	Root	Stem	Leaf	Root	Stem	Leaf
Salinity treatment	4	50.2**	0.719^{ns}	68.11**	0.391^{ns}	0.03^{ns}	1.46**	0.015^{ns}	0.007^{ns}	0.023^{ns}
Error	10	0.665	0.553	1.04	0.136	0.042	0.119	0.042	0.009	0.043

**: Significant at P<0.01; ns: non-significant



شکل ۴- میانگین (± اشتباه معیار) غلظت عناصر کلسیم، منیزیم و سولفور در اندام‌های نهال‌های صنوبر تحت سطوح مختلف تیمار شوری

S_0، S_1، S_2، S_3، S_4 به‌ترتیب نشان‌دهنده سطح شوری صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار هستند. حرف‌های لاتین متفاوت در هر اندام نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۹ درصد هستند.

Figure 4. The means (± SE) of Ca, Mg and S concentrations in the tissues of poplar plants affected by different salinity levels

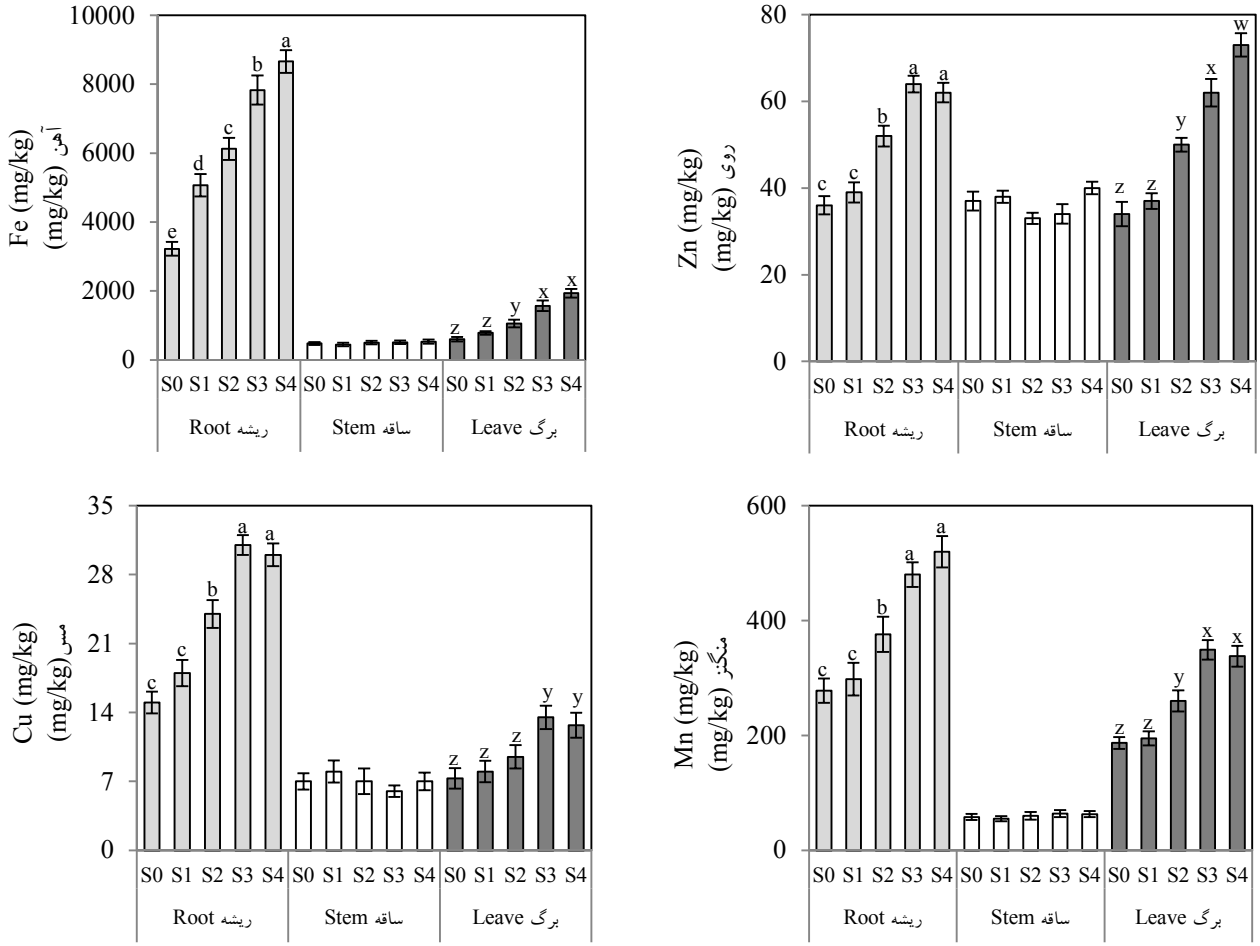
S_0: 0 mM, S_1: 50 mM, S_2: 100 mM, S_3: 150 mM, and S_4: 200 mM. Different letters in each tissue indicate a significant difference between means (P<0.01).

جدول ۸- تجزیه واریانس غلظت عناصر آهن، روی، منگنز و مس در اندام‌های گیاهی تحت تأثیر تیمار شوری

Table 8. Variance analysis Fe, Zn, Cu and Mn concentrations of plant tissues under different salinity treatment

Source of Variation		Mean Square					
		Fe			Zn		
	df	Root	Stem	Leaf	Root	Stem	Leaf
Salinity treatment	4	14100288.67**	3830.233^{ns}	908738.9**	505.21**	24.24^{ns}	808.54**
Error	10	70742.267	1685.86	10080.2	3.52	3.88	3.87
Source of Variation		Cu			Mn		
	df	Root	Stem	Leaf	Root	Stem	Leaf
Salinity treatment	4	144.85**	1.58^{ns}	22.3**	40743.4**	41.05^{ns}	18671.73**
Error	10	1.79	0.676	0.834	649.2	14.69	366.01

**: Significant at P<0.01; ns: non-significant



شکل ۵- میانگین (± اشتباه معیار) غلظت عناصر آهن، روی، مس و منگنز در اندام‌های نهال‌های صنوبر تحت سطوح مختلف تیمار شوری

S_0، S_1، S_2، S_3، S_4 به‌ترتیب نشان‌دهنده سطح شوری صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار هستند. حرف‌های لاتین متفاوت در هر اندام نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۹ درصد هستند.

Figure 5. The means (± SE) of Fe, Zn, Cu and Mn concentrations in the tissues of poplar plants affected by different salinity levels

S_0: 0 mM, S_1: 50 mM, S_2: 100 mM, S_3: 150 mM, and S_4: 200 mM. Different letters in each tissue indicate a significant difference between means (P<0.01).

تأثیر سطوح مختلف شوری بر غلظت عناصر آهن (Fe)، روی (Zn)، مس (Cu) و منگنز (Mn) در اندام‌های گیاهی

براساس نتایج به‌دست‌آمده، اعمال تیمار شوری بر نهال‌های صنوبر به افزایش معنی‌دار غلظت عناصر کمیاب آهن، روی، منگنز و مس در اندام‌های ریشه و برگ منجر شد ($P <$۰/۰۱)، اما این تأثیر بر ساقه معنی‌دار نبود (جدول ۸ و شکل ۵).

بحث

نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داد که اعمال تنش شوری (به‌جز سطح شوری ۵۰ میلی‌مولار) با کاهش معنی‌دار مؤلفه‌های رشد، تولید زی‌توده و محتوای نسبی آب برگ در نهال‌های صنوبر همراه بود ($P <$۰/۰۱). به‌طوری‌که بیشترین مقادیر مؤلفه‌های فوق در سطوح شوری صفر و ۵۰ میلی‌مولار و کمترین آن‌ها در سطح شوری ۲۰۰ میلی‌مولار مشاهده شد. در پژوهش‌های زیادی، نقش بازدارنده تنش شوری بر رشد صنوبرها گزارش شده است (Wang *et al*., 2008; Kulczyk-Skrzeszewska & Kieliszewska-Rokicka, 2022; Salehi *et al*., 2022). هم‌راستا با نتایج پژوهش پیش‌رو، کاهش رشد نهال‌های متعلق به گونه‌های صنوبر حساس به شوری تحت سطوح کم شوری در پژوهش‌های Kulczyk-Skrzeszewska و Kieliszewska-Rokicka (۲۰۲۲) (*P. nigra* در شوری با غلظت ۵۰ میلی‌مولار) و Bolu و Polle (۲۰۰۴) (*P. canescens* (Aiton) Sm.) تحت شوری ۲۵ میلی‌مولار) نیز مشاهده نشد.

پاسخ اولیه گیاهان به تنش شوری، یک سازوکار اجتنابی است که در تنظیم نرخ رشد گیاه به‌صورت کاهش قطر، ارتفاع و سطح برگ نمایان می‌شود (Wu *et al*., 2016). تنش اسمزی ناشی از تنش شوری به‌عنوان یکی از دلایل اصلی کاهش رشدونمو رویشی گیاه عنوان شده است (Kulczyk-Skrzeszewska & Kieliszewska-Rokicka, 2022). در واقع، تنش شوری و وضعیت آبی گیاه، ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند. درنتیجه تنش شوری، مقدار یون‌ها افزایش و توانایی گیاه برای جذب آب کاهش می‌یابد. این امر به‌سرعت سبب کاهش زی‌توده گیاهی به‌همراه مجموعه‌ای از تغییرات می‌شود که مشابه با تغییرات ایجادشده ناشی از تنش خشکی است (Bárzana *et al*., 2012). باتوجه‌به کاهش زی‌توده ریشه نهال‌های صنوبر تبریزی در سطوح بالای تنش شوری، می‌توان گفت که سیستم ریشه در تعامل با تنش شوری دچار آسیب شده است. سیستم ریشه در گیاهان مقاوم به تنش شوری، ریخت‌شناسی خود را برای افزایش توانایی جذب و زنده‌مانی گیاه از طریق افزایش طول و سطح ریشه تنظیم می‌کند. ریخت‌شناختی بهتر ریشه به مقاومت بهتر گیاه نسبت به تنش شوری منجر می‌شود (Ashraf *et al*., 2005). یکی دیگر از بارزترین پاسخ‌های گیاهان نسبت به تنش شوری، کاهش محتوای نسبی آب برگ است. نتایج پژوهش‌های بسیاری نیز تأیید کرده‌اند که رابطه معکوسی بین تنش شوری و محتوای نسبی آب برگ وجود دارد (Parida & Das, 2005). بنابر عقیده بسیاری از پژوهشگران، محتوای نسبی آب برگ، مناسب‌ترین شاخص برای اندازه‌گیری وضعیت آبی گیاه است. چون این مؤلفه، نتیجه فیزیولوژیکی کمبود آب سلولی است (Ghoulam *et al*., 2002). نتایج پژوهش پیش‌رو نیز کاهش محتوای نسبی آب برگ در نهال‌های صنوبر را همراه با تنش شوری نشان داد. در واقع، توانایی نهال‌های صنوبر تبریزی برای حفظ وضعیت آبی با افزایش سطح شوری در خاک، کاهش پیدا کرد.

اعمال تنش شوری بر نهال‌های صنوبر تبریزی با افزایش معنی‌دار مقدار پرولین و قندهای محلول، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (پراکسیداز و کاتالاز) و غلظت مالون‌دی‌آلدهید برگ همراه بود. افزایش مؤلفه‌های فیزیولوژیکی در اندام برگ، نشان‌دهنده پاسخ دفاعی گیاه نسبت به تنش شوری است (Kulczyk-Skrzeszewska & Kieliszewska-Rokicka, 2022). مقدار پرولین اندام گیاهی می‌تواند به‌عنوان شاخص آسیب ناشی از تنش شوری استفاده شود و تجمع آن در بسیاری از گیاهان تحت تنش شوری مشاهده شده است (Kishor & Sreenivasulu, 2014). البته شایان ذکر است که تحت شرایط شوری، گیاهان مقاوم به شوری نسبت به گیاهان

و رقم‌های حساس، مقدار بیشتری از پرولین را در اندام برگ تجمع می‌کنند (Yang *et al*., 2009). در پژوهش پیش‌رو، مقدار افزایش مؤلفه‌های فیزیولوژیکی اندازه‌گیری‌شده در برگ در سطوح ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار شوری، دو تا سه برابر آن‌ها نسبت به گیاهان شاهد بود، درحالی‌که مقدار پرولین در پده به‌عنوان یک صنوبر مقاوم به تنش شوری در سطح ۲۵۰ میلی‌مولار شوری، هشت برابر مقدار آن نسبت به گیاهان شاهد گزارش شد (Watanabe *et al*., 2000). افزایش مقدار پرولین، مالون‌دی‌آلدهید و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گونه‌های مختلف صنوبر تحت تأثیر تنش شوری در پژوهش‌های Lu و همکاران (۲۰۱۴) و Wu و همکاران (۲۰۱۶) نیز گزارش شده است. در واقع، مقاومت گیاه به تنش شوری با تحریک آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش آسیب و خسارت اکسیداتیو مرتبط و همراه است (Wu *et al*., 2016).

براساس نتایج دیگر پژوهش پیش‌رو، اعمال تنش شوری بر نهال‌های صنوبر تبریزی به افزایش معنی‌دار عناصر سدیم و کلر در اندام‌های گیاهی (ریشه، ساقه و برگ) منجر شد. بیشترین غلظت عناصر سدیم و کلر به‌ترتیب در اندام‌های برگ، ریشه و ساقه مشاهده شد. در صنوبرهای حساس به تنش شوری، جذب بیشتر سدیم و کلر و انتقال این عناصر به اندام هوایی در مقایسه با صنوبرهای مقاوم به شوری رخ می‌دهد. در پژوهش پیش‌رو، غلظت سدیم برگ در سطوح ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار شوری حدود ۲۵ برابر گیاهان شاهد (صفر میلی‌مولار) بود، درحالی‌که در صنوبر پده (گونه مقاوم به شوری) تحت تیمار ۲۰۰ میلی‌مولار شوری، غلظت سدیم برگ حدود هفت برابر برگ‌های گیاهان شاهد گزارش شد (Chen *et al*., 2003). در پژوهش Kulczyk-Skrzeszewska و Kieliszewska-Rokicka (۲۰۲۲) نیز غلظت سدیم برگ در *P. nigra* "Italica" در تیمار ۲۵۰ میلی‌مولار، ۱۳ برابر مقدار آن نسبت به تیمار شاهد گزارش شده است. در واقع، سازوکار مقاومت به تنش شوری در گیاهان شامل محدودیت انتقال سدیم و کلر از ریشه به اندام‌های هوایی است که می‌تواند تعادل اسمزی و یونی را در گیاه تنظیم کند (Evelin *et al*., 2009). تأثیر منفی ناشی از تجمع سدیم در برگ با آسیب زدن به این اندام و کاهش مؤلفه‌های رشد در گونه‌های مختلف صنوبر گزارش شده است (Chen *et al*., 2001, 2002, 2003). ازسوی دیگر، سمیت کلر برای گیاهان چوبی نسبت به سمیت سدیم بیشتر است (Munns & Tester, 2008). در گونه‌های حساس صنوبر، تجمع کلر می‌تواند سبب آسیب به برگ‌ها شود و درنتیجه، رشد گیاه را محدود کند (Chen *et al*., 2001). در پژوهش پیش‌رو، تجمع یون‌های کلر در برگ تحت شوری ۲۰۰ میلی‌مولار حدود ۱۲ برابر مقدار آن نسبت به گیاهان شاهد بود. هم‌راستا با این یافته‌ها، Chen و همکاران (۲۰۰۲) مقدار تجمع کلر در برگ پده (به‌عنوان یک صنوبر مقاوم به شوری) و *P. tomentosa* Carrière (به‌عنوان یک صنوبر حساس به شوری) تحت تنش شوری ۲۰۰ میلی‌مولار را به‌ترتیب سه و ۲۷ برابر مقدار آن نسبت به گیاهان شاهد گزارش کردند. همچنین، Kulczyk-Skrzeszewska و Kieliszewska-Rokicka (۲۰۲۲) تجمع این یون در برگ‌های *P. nigra* "Italica" در تیمارهای ۱۵۰ و ۲۵۰ میلی‌مولار شوری را هشت برابر مقدار آن نسبت به گیاهان شاهد به‌دست آوردند. تحت تنش شوری، عناصر سدیم و کلر توسط ریشه‌ها جذب می‌شوند و با انتقال از طریق شیره گیاهی، سطوح زیاد محتوای یونی را در اندام هوایی گیاه ایجاد می‌کنند (Chen *et al*., 2014)، بنابراین پتانسیل و توانایی صنوبرها برای دفع سدیم و کلر، سازوکار مهمی برای مقاومت به تنش شوری به‌شمار می‌آید (Chen *et al*., 2001). به‌طوری‌که پژوهشگران پیشین نیز نشان داده‌اند که بسیاری از گیاهان مقاوم به شوری مانند پده (Janz *et al*., 2012)، گیاهان هالوفیتی (*Eutrema salsugineum* (Pall.) Al-Shehbaz & Warwick با نام مترادف *Thellungiella salsuginea* O.E.Schulz و (*Cakile maritima* Scop.) (Ellouzi *et al*., 2014) و یونجه (*Medicago sativa* L.) (Bertrand *et al*., 2015) به‌طور مؤثری از جذب سدیم و کلر تحت تنش شوری جلوگیری می‌کنند.

تیمارهای شوری در پژوهش پیش‌رو، کاهش معنی‌دار عناصر نیتروژن و پتاسیم در ریشه، ساقه و برگ نهال‌های

صنوبر تبریزی را به‌همراه داشتند. به‌طوری‌که کمترین غلظت نیتروژن و پتاسیم در هر سه اندام گیاهی در سطوح ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار شوری مشاهده شد. در مقابل، اعمال تیمار شوری بر نهال‌ها به افزایش معنی‌دار غلظت فسفر ریشه و برگ منجر شد. بیشترین غلظت فسفر ریشه و برگ در سطوح ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار شوری مشاهده شد. همچنین، نتایج دیگر نشان داد که تیمار شوری سبب کاهش معنی‌دار غلظت کلسیم ریشه و برگ و منیزیم برگ شد، اما تأثیر سطوح مختلف تیمار شوری بر غلظت کلسیم و منیزیم اندام‌های دیگر گیاه معنی‌دار نبود. غلظت سولفور در هیچ‌کدام از اندام‌های گیاهی نیز تحت تأثیر سطوح مختلف تیمار شوری قرار نگرفت. در پژوهش Kulczyk-Skrzeszewska و Kieliszewska-Rokicka (۲۰۲۲)، تنش شوری، تأثیر معنی‌داری بر غلظت عناصر غذایی برگ شامل نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم و کلسیم در *P. nigra* "Italica" نداشت، اما افزایش جزئی غلظت کلسیم و کاهش جزئی غلظت پتاسیم برگ گزارش شد. از طرف دیگر، کاهش برخی عناصر غذایی مانند کلسیم تحت سطوح زیاد و طولانی‌مدت تنش شوری در صنوبرهای حساس به شوری گزارش شده است (Ottow *et al*., 2005). هم‌راستا با نتایج پیش‌رو، برخی پژوهش‌ها نیز نشان داده‌اند که تنش شوری با کاهش در متابولیسم و جذب عناصر غذایی گیاه می‌تواند سبب عدم تعادل و توازن یونی در گیاه شود (Wu *et al*., 2016). برخلاف نتایج پژوهش پیش‌رو، اغلب پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تنش شوری، غلظت فسفر را در اندام‌های گیاهی کاهش می‌دهد و یا تأثیر معنی‌داری بر آن نداشته است، اما واقعیت این است که تعامل و اثرات متقابل شوری و غلظت فسفر در اندام‌های گیاهی تاحد زیادی به گونه گیاهی، سن رشدونمو، ترکیب و سطح شوری و غلظت عنصر فسفر در بستر رشد بستگی دارد، بنابراین بسته به گیاه انتخاب‌شده و شرایط آزمایش، نتایج متفاوتی نیز می‌تواند به‌دست آید (Grattan & Grieve, 1998).

در پژوهش پیش‌رو، اعمال تیمار شوری سبب افزایش معنی‌دار غلظت عناصر کمیاب گیاهی شامل آهن، روی، منگنز و مس در ریشه و برگ نهال‌های صنوبر تبریزی شد، اما تأثیر معنی‌داری بر غلظت عناصر غذایی کمیاب ساقه مشاهده نشد. ارتباط بین تنش شوری و جذب عناصر غذایی کمیاب در پژوهش‌های متعددی بررسی شده است (Villora *et al*., 2000; Lao *et al*., 2013)، اما این ارتباط، پیچیده عنوان شده است. به‌طوری‌که پژوهشگران مختلف، نتایج متفاوتی در زمینه جذب و تجمع عناصر غذایی کمیاب تحت شرایط تنش شوری منتشر کرده‌اند. در واقع، غلظت عناصر کمیاب در گیاهان تحت شرایط تنش شوری بسته به نوع گیاه، مقاومت گیاه نسبت به شوری، سطح و ترکیب تنش شوری، غلظت عناصر غذایی اصلی و کمیاب در خاک، pH خاک، دوره تنش شوری و شرایط محیطی مختلف ممکن است افزایش یا کاهش یابد و یا حتی بدون تغییر باقی بماند (Grattan & Grieve, 1998).

کاهش زنده‌مانی، مؤلفه‌های رشد و تولید زی‌توده، تغییرات در مؤلفه‌های فیزیولوژیکی و جذب و تجمع عناصر غذایی اصلی و کمیاب اندام‌های گیاهی ازیک‌سو و تجمع زیاد پرولین، سدیم و کلر در برگ کلن سالاری نسبت به گونه‌های مقاوم صنوبر مانند پده ازسوی دیگر، حاکی از حساس بودن این کلن صنوبر تبریزی نسبت به تنش شوری است. نهال‌های صنوبر تبریزی در سطح شوری ۵۰ میلی‌مولار به‌خوبیِ نهال‌های شاهد توانستند رشد کنند، اما تحت سطوح شوری ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار شوری، تغییرات معنی‌داری در اغلب مؤلفه‌های مورد بررسی نسبت به گیاهان شاهد مشاهده شد. این تغییرات در شوری ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار شدیدتر بود. به‌طوری‌که این سطوح شوری برای نهال‌های صنوبر تبریزی قابل‌تحمل نبود و پس از شش هفته از اعمال تنش شوری، زنده‌مانی نهال‌های صنوبر در این سطوح شوری تقریباً به نصف کاهش پیدا کرد، بنابراین در برنامه‌های زراعت چوب لازم است که مقدار شوری خاک و آستانه تحمل کلن سالاری نسبت به شوری مورد توجه قرار گیرد.

References

- Ahmadloo, F., Dehghan, R., Salehi, A. and Eskandari, S., 2023. Surveying and study on the biometric

variables of poplar plantations in Guilan province. Iranian Journal of Forest, 15(2): 195-210 (In Persian with English summary).
- Ashraf, M.Y., Akhtar, K., Satwar, G. and Ashraf, M., 2005. Role of the rooting system in salt tolerance potential of different guar accessions. Agronomy for Sustainable Development, 25: 243-249.
- Bárzana, G., Aroca, R., Paz, J.A., Chaumont, F., Martinez-Ballesta, M.C., Carvajal, M. and Ruiz-Lozano, J.M., 2012. Arbuscular mycorrhizal symbiosis increases relative apoplastic water flow in roots of the host plant under both well-watered and drought stress conditions. Annals of Botany, 109: 1009-1017.
- Bates, I.S., Waldern, R.P. and Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant and Soil, 39: 205-207.
- Bertrand, A., Dhont, C., Bipfubusa, M., Chalifour, F.P., Drouin, P. and Beauchamp, C.J., 2015. Improving salt stress responses of the symbiosis in alfalfa using salt-tolerant cultivar and rhizobial strain. Applied Soil Ecology, 87: 108-117.
- Bolu, W.H. and Polle, A., 2004. Growth and stress reactions in roots and shoots of a salt-sensitive poplar species (*Populus x canescens*). Tropical Ecology, 45(1): 161-171.
- Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. Agronomy Journal, 54(5): 464-465.
- Bremner, J.M., 1996. Nitrogen-total: 1085-1121. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., … and Sumner, M.E. (Eds.). Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, 1390p.
- Calagari, M., Salehi Shanjani, P. and Banj Shafiei, Sh., 2017. Growth comparison of two poplar species (*Populus alba* and *Populus euphratica*) and their hybrid in the saline and non-saline soils. Journal of Plant Researches, 30(1): 143-154 (In Persian with English summary).
- Chance, B. and Maehly, A.C., 1955. Assay of catalases and peroxidases: 764-765. In: Colowick, S.P. and Kaplan, N.O. (Eds.). Methods in Enzymology, Vol. II. Academic Press, New York, 987p.
- Chen, S. and Polle, A., 2010. Salinity tolerance of *Populus*. Plant Biology, 12: 317-333.
- Chen, S., Hawighorst, P., Sun, J. and Polle, A., 2014. Salt tolerance in *Populus*: significance of stress signaling networks, mycorrhization, and soil amendments for cellular and whole-plant nutrition. Environmental and Experimental Botany, 107: 113-124.
- Chen, S., Li, J., Fritz, E., Wang S. and Huttermann, A., 2002. Sodium and chloride distribution in roots and transport in three poplar genotypes under increasing NaCl stress. Forest Ecology and Management, 168: 217-230.
- Chen, S., Li, J., Wang, S., Fritz, E., Huttermann, A. and Altman, A., 2003. Effects of NaCl on shoot growth, transpiration, ion compartmentation, and transport in regenerated plants of *Populus euphratica* and *Populus tomentosa*. Canadian Journal of Forest Research, 33: 967-975.
- Chen, S., Li, J., Wang, S., Huttermann, A. and Altman, A., 2001. Salt, nutrient uptake and transport, and ABA of *Populus euphratica*; a hybrid in response to increasing soil NaCl. Trees: Structure and Function, 15: 186-194.
- Daneshvar, H.A. and Modirrahmati, A.R., 2009. Effects of NaCl and CaCl2 on growth characteristics and ions accumulation in the leaves of four poplar genotypes. Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 17(2): 200-209 (In Persian with English summary).
- Ellouzi, H., Ben Hamed, K., Hernandez, I., Cela, J., Muller, M., Magne, C., ... and Munne-Bosch, S., 2014. A comparative study of the early osmotic, ionic, redox and hormonal signaling response in leaves and roots of two halophytes and a glycophyte to salinity. Planta, 240: 1299-1317.
- Evelin, H., Kapoor, R. and Giri, B., 2009. Arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress: a review. Annals of Botany, 104: 1263-1280.
- Ghoulam, C., Foursy, A. and Fares, K., 2002. Effects of salt stress on growth, inorganic ions and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in five sugar beet cultivars. Environmental and Experimental Botany, 47: 39-50.
- Grattan, S.R. and Grieve, C.M., 1998. Salinity–mineral nutrient relations in horticultural crops. Scientia Horticulturae, 78: 127-157.
- Grigulis, K., Lavorel, S., Krainer, U., Legay, N., Baxendale, C., Dumont, M., ... and Clement, J.C., 2013. Relative contributions of plant traits and soil microbial properties to mountain grassland ecosystem services. Journal of Ecology, 101: 47-57.
- Haidari, M., Jaafari, A., Calagari, M., Pourhashemi, M. and Yousefi, B., 2023. Overcoming challenges and formulating management strategies for wood farming development in Kurdistan Province, Iran. Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 31(3): 169-185 (In Persian with English summary).
- Irigoyen, J.J., Einerich, D.W. and Sanchez-Diaz, M., 1992. Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa

(*Medicago sativa*) plants. Physiologia Plantarum, 84: 55-60.
- Jahanpour, F., Mansouri, M., Ramak, P. and Badehian, Z., 2022. Investigation of wood production of different cultivars of open-crown poplar in the comparative population of Khorramabad station. Iranian Journal of Forest, 14(3): 245-255 (In Persian with English summary).
- Janz, D., Lautner, S., Wildhagen, H., Behnke, K., Schnitzler, J.P., Rennenberg, H., ... and Polle, A., 2012. Salt stress induces the formation of a novel type of 'pressure wood' in two *Populus* species. New Phytologist 194: 129-141.
- Kaya, C., Tuna, A.L., Ashraf, M. and Altunlu, H., 2007. Improved salt tolerance of melon (*Cucumis melo* L.) by the addition of proline and potassium nitrate. Environmental and Experimental Botany, 60: 397-403.
- Kishor, P.B.K. and Sreenivasulu, N., 2014. Is proline accumulation per se correlated with stress tolerance or is proline homeostasis a more critical issue? Plant, Cell & Environment, 37: 300-311.
- Kogawara, S., Mohri, T., Igasak, T., Nakajima, N. and Shinohara, K., 2014. Drought and salt stress tolerance of ozone-tolerant transgenic poplar with an antisense DNA for 1-aminocyclopropane-1-carboxylate synthase. Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute, 13: 89-98.
- Kulczyk-Skrzeszewska, M. and Kieliszewska-Rokicka, B., 2022. Influence of drought and salt stress on the growth of young *Populus nigra* 'Italica' plants and associated mycorrhizal fungi and non-mycorrhizal fungal endophytes. New Forests, 53: 679-694.
- Lao, M.T., Plaza, B.M. and Jiménez, S., 2013. Impact of salt stress on micronutrients in *Cordyline fruticosa* var. 'Red Edge'. Journal of Plant Nutrition, 36: 990-1000.
- Li, L., Zhang, Y., Luo, J., Korpelainen, H. and Li, C., 2013. Sex-specific responses of *Populus yunnanensis* exposed to elevated CO_2 and salinity. Physiologia Plantarum, 147: 477-488.
- Lu, Y., Wang, G., Meng, Q., Zhang, W. and Duan, B., 2014. Growth and physiological responses to arbuscular mycorrhizal fungi and salt stress in dioecious plant *Populus tomentosa*. Canadian Journal of Forest Research, 44: 1020-1031.
- Lumis, G.P., Hofstra, G. and Hall, R., 1973. Sensitivity of roadside trees and shrubs to aerial drift of deicing salt. HortScience, 8: 475-477.
- Mc Lean, E.O., 1982. Soil pH and lime requirement: 199-224. In: Page, A.L. (Ed.). Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties, Second Edition. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, 1159p.
- McGrath, S.P. and Cunliffe, C.H., 1985. A simplified method for the extraction of the metals Fe, Zn, Cu, Ni, Cd, Pb, Cr, Co and Mn from soils and sewage sludges. Journal ofthe Science of Food and Agricult ure, 36: 794-798.
- Munns, R. and Tester, M., 2008. Mechanisms of salinity tolerance. Annual Review of Plant Biology, 59: 651-681.
- Nelson, D.W. and Sommers, L.E., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter: 961-1010. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., … and Sumner, M.E. (Eds.). Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, 1390p.
- Ottow, E.A., Brinker, M., Teichmann, T., Fritz, E., Kaiser, W., Brosche, M., ... and Polle, A., 2005. *Populus euphratica* displays apoplastic sodium accumulation, osmotic adjustment by decreases in calcium and soluble carbohydrates, and develops leaf succulence under salt stress. Plant Physiology, 139: 1762-1772.
- Parida, A.K. and Das, A.B., 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. Ecotoxicology and Environmental Safety, 60: 324-349.
- Regier, N., Streb, S., Cocozza, C., Schaub, M., Cherubini, P., Zeeman, S.C. and Frey, B., 2009. Drought tolerance of two black poplar (*Populus nigra* L.) clones: contribution of carbohydrates and oxidative stress defence. Plant, Cell & Environment, 32: 1724-1736.
- Rhoades, J.D., 1982. Soluble salts: 167-180. In: Page, A.L. (Ed.). Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties, Second Edition. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, 1159p.
- Salehi, A., Calagari, M. and Ahmadloo, F., 2018. Effect of some soil properties on growth of three-year black poplar (*Populus nigra* L.) trees in poplar plantations in south of Tehran, Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 26(3): 344-354 (In Persian with English summary).
- Salehi, A., Calagari, M. and Ahmadloo, F., 2021. Effect of soil and water affected by municipal effluent on performance one-year-old plants of three black poplar (*Populus nigra* L.) clones. Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 29(2): 127-114 (In Persian with English summary).
- Salehi, A., Calagari, M., Ahmadloo, F., Jafari Sayadi,

M.H. and Tafazoli, M., 2022. Productivity of *Populus nigra* L. in two different soils over five rotations. Acta Ecologica Sinica, 42(4): 332-337.
- Sánchez, F.J., Manzanares, M., De Andres, E.F., Tenorio, J.L. and Ayerbe, L., 1998. Turgor maintenance, osmotic adjustment and soluble sugar and proline accumulation in 49 pea cultivars in response to water stress. Field Crops Research, 59: 225-235.
- Siminis, C.I., Kanellis, A.K. and Roubelakis-Angelakis, K.A., 1994. Catalase is differentially expressed in dividing and nondividing protoplasts. Plant Physiology, 105(4): 1375-1383.
- Stewart, R.R.C. and Bewley, J.D., 1980. Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. Plant Physiology, 65: 245-248.
- Villora, G., Moreno, D.A., Pulgar, G. and Romero, L., 2000. Yield improvement in zucchini under salt stress: Determining micronutrient balance. Scientia Horticulturae, 86: 175-183.
- Wang, R., Chen, S., Zhou, X., Shen, X., Deng, L., Zhu, H., ... and Polle, A., 2008. Ionic homeostasis and reactive oxygen species control in leaves and xylem sap of two poplars subjected to NaCl stress. Tree Physiology, 28: 947-957.
- Watanabe, S., Kojima, K., Ide, Y. and Sasaki, S., 2000. Effects of saline and osmotic stress on proline and sugar accumulation in *Populus euphratica* in vitro. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 63: 199-206.
- Wu, N., Li, Z., Wu, F. and Tang, M., 2016. Comparative photochemistry activity and antioxidant responses in male and female *Populus cathayana* cuttings inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi under salt. Scientific Reports, 6: 37663.
- Xiao, X.W., Yang, F., Zhang, S., Korpelainen, H. and Li, C., 2009. Physiological and proteomic responses of two contrasting *Populus cathayana* populations to drought stress. Physiologia Plantarum, 136: 150-168.
- Yang, F., Xiao, X., Zhang, S., Korpelainen, H. and Li, C., 2009. Salt stress responses in *Populus cathayana* Rehder. Plant Science, 176: 669-677.