Plant Prod., 2026, 49(1), 137-156
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.49459.2269
Received: 20 April 2025
Accepted: 3 October 2025

Plant Productions

Research Article

Evaluation of physiological and biochemical responses of apple (*Malus domestica* Borkh) rootstocks to different levels of boron

Ghasem Hasani[1*], Jamal Ahmadaali[2], Aziz Majidi [3], Mehdi Taheri[4], Ghader Ghasemi[1], Mashhid Henareh-Eshgehsou[1]

1. Horticulture Crops Research Department, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Centre, AREEO, Urmia, Iran
2. Agricultural Engineering Research Department, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Centre, AREEO, Urmia, Iran
3. Soil and Water Research Department, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Centre, AREEO, Urmia, Iran
4. Soil and Water Research Department, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Centre, AREEO, Zanjan, Iran

Citation: Hasani, G., Ahmadaali, J., Majidi, A., Taheri, M., Ghasemi, G., Henareh-Eshgehsou, M. (2026). Evaluation of physiological and biochemical responses of apple (*Malus domestica* Borkh) rootstocks to different levels of boron. *Plant Productions*, 49(1), 137-156.

Abstract

Introduction

Boron (B) is an essential micronutrient for growth and development, distributed unevenly across plant organs, particularly in reproductive tissues. The ongoing trend of rapid climate change, characterized by global warming and decreased rainfall, has increased the risk of boron accumulation and toxicity in soils. Boron toxicity is now recognized as a major abiotic stress that negatively affects the yield and quality of agricultural products in arid and semi-arid regions. Given the potentially irreversible damage associated with boron toxicity for crop production, it is crucial to develop strategies to mitigate its adverse effects. Among these strategies, the selection of tolerant cultivars and rootstocks offers a practical and cost-effective solution. Therefore, his study aims to evaluate the performance of various apple rootstocks and local cultivars under different boron concentrations.

Materials and Methods

In this experiment, different apple rootstocks including MM106, MM111, M26, M9, M7, P22, Ottawa3, Suporter4, and Gami-Almasi local rootstock were subjected to different levels of boron stress (0, 1, 1.5, 2, and 2.5 mg.l^{-1}) and three months after applying the treatments, different vegetative, physiological and biochemical characteristics of the bases were evaluated. In this study, boric acid was used as a source of boron stress. Vegetative characteristics including vegetative growth rate, fresh and dry weight of the aerial parts and roots were measured. Also,

* **Corresponding Author:** Ghasem Hasani
E-mail: gh.hasani91@gmail.com

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

physiological and biochemical characteristics including chlorophyll a, b and carotenoid levels, proline, soluble carbohydrate, glycine betaine content and protein content were measured.

Results and Discussion

The results of the analysis of variance showed that the rootstock treatment, boron level, and the interaction effects of rootstock and boron level had a significant effect on the fresh and dry weights of the aerial parts and roots. The results of the mean comparison of different boron levels on the rootstocks showed that the highest fresh and dry aerial parts weights in rootstock MM106 were obtained at the boron level of 1 $mg.l^{-1}$, with mean values of 611 g and 318 g, respectively. The results of the analysis of variance of chlorophyll data showed that the effects of rootstock treatment, boron, and the interaction of rootstock with boron levels on the amounts of chlorophyll a and b were significant, with this significance statistically at $P \leq 0.01$. Based on the mean comparison results, the highest amount of chlorophyll a was observed in the M9 rootstock in the control treatment, although it did not differ significantly from the M26 and P22 rootstocks at the boron level of 1 $mg.l^{-1}$. According to the analysis of variance results of soluble protein data, the main boron treatment had a significant effect on the amounts of soluble protein and soluble carbohydrate. In this study, with the increase in boron concentration, the soluble carbohydrate content initially increased up to a concentration of 1 $mg.l^{-1}$ and then decreased at higher concentrations, but this decrease was not significant among the concentrations of 1.5, 2, and 2.5 $mg.l^{-1}$ boron. According to the analysis of variance results, the interaction effect of rootstock and boron on glycine betaine content was significant. The results showed that glycine betaine content slightly increased up to the level of 1 $mg.l^{-1}$, but at higher levels, the increase in glycine betaine was more pronounced. The highest glycine betaine content was obtained in the MM106 rootstock at the boron level of 2.5 $mg.l^{-1}$. Based on the mean comparison chart, with the increase in boron concentration, the proline content in all rootstocks increased. However, the rate of increase in proline content was not the same across all apple rootstocks. The highest proline accumulation was observed in the Ottawa3 rootstock at the boron level of 2.5 $mg.l^{-1}$.

Conclusion

The results of this study showed that varying boron concentrations significantly influence the vegetative, physiological, and biochemical traits of different apple rootstocks, with responses differing according to both rootstock type and boron concentration. A comprehensive evaluation based on these traits showed that the M26 and P22 rootstocks exhibited higher tolerance to boron toxicity compared with the other rootstocks tested. Therefore, these rootstocks can be recommended for use in cultivation programs in regions where soil boron levels exceed 2 mg. l^{-1}.

Keywords: Abiotic stress, Boron toxicity, Glycine betaine, Proline.

تولیدات گیاهی، ۱٤۰۵، ٤۹(۱)، ۱۳۷-۱۵٦
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.49459.2269
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲

تولیدات گیاهی
مقاله پژوهشی

ارزیابی واکنش‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی پایه‌های رویشی سیب (*Malus domestica* Borkh) به سطوح مختلف بور

قاسم حسنی[1*]، جمال احمدآلی[2]، عزیز مجیدی[3]، مهدی طاهری[4]، قادر قاسمی[1]، مشهید هناره‌اشگه‌سو[1]

۱- بخش تحقیقات زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، ارومیه، ایران
۲- بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، ارومیه، ایران
۳- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، ارومیه، ایران
۴- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، زنجان، ایران

چکیده

سمیت بور از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی در کشاورزی است که سبب کاهش عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی می‌شود. انتخاب ارقام و ژنوتیپ‌های متحمل، رویکردی عملی و اقتصادی برای کاهش اثرهای آن به شمار می‌رود. بور در فرآیندهایی مانند انتقال قندها، متابولیسم کربوهیدرات‌ها و نیتروژن، ساخت دیوارۀ سلولی، پایداری غشا، تشکیل لوله گرده، فتوسنتز و فعالیت‌های آنزیمی نقش اساسی دارد. این پژوهش طی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱٤۰۰ در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان غربی انجام شد. در این آزمایش، پایه‌های رویشی تجاری سیب شامل MM106، M26، Ottawa3، Suporter4، M9، M7، P22، MM111 و پایۀ بومی Gami-Almasi (گمی‌آلماسی) تحت تنش بور در سطوح صفر، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر (به صورت اسید بوریک) قرار گرفتند. سه ماه پس از اعمال تیمار، شاخص‌های رشدی، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی شامل وزن تر و خشک اندام‌ها، رنگیزه‌های فتوسنتزی، غلظت بور برگ و محتوای پرولین، گلیسین بتائین، پروتئین و کربوهیدرات‌های محلول ارزیابی شد. نتایج نشان داد تیمار پایه، سطح بور و برهمکنش آن‌ها بر وزن تر و خشک اندام‌های هوایی و ریشه معنی‌دار بود. بیشترین وزن تر و خشک اندام هوایی در پایه MM106 در سطح ۱ میلی‌گرم در لیتر و کمترین در پایۀ Gami-Almasi و Ottawa3 در سطح ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد. همچنین با افزایش سطح بور، میزان محتوای پروتئین محلول برگ کاهش یافت، به‌طوری که کمترین مقدار در ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر و بیشترین در تیمار شاهد مشاهده شد. محتوای کربوهیدرات محلول ابتدا تا سطح ۱ میلی‌گرم در لیتر افزایش و سپس در غلظت‌های بالاتر کاهش یافت، اگرچه اختلاف بین غلظت‌های ۱/۵ تا ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر معنی‌دار نبود. بر اساس نتایج تجزیه واریانس، برهمکنش پایۀ و سطح بور بر محتوای گلیسین بتائین معنی‌دار

نویسنده مسئول: قاسم حسنی
رایانامه: gh.hasani91@gmail.com

بود. میزان این ترکیب تا سطح ۱ میلی‌گرم در لیتر افزایش اندکی نشان داد، اما در سطوح بالاتر افزایش آن محسوس‌تر بود؛ به‌طوری‌که بیشترین مقدار در پایهٔ MM106 در سطح ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد. همچنین با افزایش غلظت بور، محتوای پرولین در تمامی پایه‌ها افزایش یافت، هرچند شدت این افزایش در پایه‌ها متفاوت بود. بیشترین تجمع پرولین در پایهٔ Ottawa3 در سطح ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر ثبت گردید. به‌طور کلی، سمیت بور بسته به نوع پایه و سطح آن بر شاخص‌های رشدی و فیزیولوژیک سیب اثرگذار بود. ارزیابی نهایی بیانگر آن است که پایه‌های M26 و P22 نسبت به سایر پایه‌ها از تحمل بیشتری در برابر سمیت بور برخوردار هستند و می‌توان آن‌ها را برای کشت در مناطق با غلظت بالای بور (بیش از ۲ میلی‌گرم در لیتر آب آبیاری) توصیه کرد.

کلید واژه‌ها: پرولین، تنش غیرزیستی، سمیت بور، گلایسین بتائین

مقدمه

بور (B) یکی از عناصر ضروری برای تغذیه و رشد گیاهان به‌شمار می‌رود که به‌صورت غیریکنواخت در گیاه توزیع شده و بیشترین تجمع آن در اندام‌های زایشی مشاهده می‌شود (Saleem *et al.*, 2011). با توجه به روند کنونی تغییرات اقلیمی و گرم شدن زمین، همراه با کاهش میزان بارندگی در بسیاری از مناطق، احتمال تجمع بور در خاک و بروز سمیت ناشی از آن افزایش یافته است (Tariq and Mott, 2007). در مناطق کم‌باران، شستشوی طبیعی بور از خاک محدود شده و این عنصر در پروفایل خاک باقی می‌ماند که می‌تواند منجر به ایجاد شرایط سمی برای گیاه گردد. محدودهٔ مجاز غلظت بور در آب آبیاری بسته به شرایط فیزیکوشیمیایی خاک و برهمکنش آن‌ها، متفاوت است؛ به‌طوری‌که برای گیاهان حساس حدود ۰/۳ میلی‌گرم در لیتر و برای گیاهان مقاوم تا ۲ میلی‌گرم در لیتر گزارش شده است (Tanaka and Fujiwara, 2008). در خاک‌هایی که غلظت بور در محلول خاک بیش از ۵ تا ۸ میلی‌گرم در لیتر باشد، خطر بروز سمیت برای گیاهان افزایش می‌یابد.

سمیت بور در برخی مناطق کشور، به‌ویژه مناطق شور و کم‌آب که منابع آبی آن‌ها نیز شور هستند، گزارش شده است. از جمله این مناطق می‌توان به اردکان، جهرم و جیرفت در حاشیه کویر اشاره کرد. در باغ‌های مرکبات جیرفت، افزایش غلظت بور بیشتر به دلیل بالا بودن مقدار آن در منابع آبی، مانند آب چاه‌ها و رودخانه هلیل‌رود، رخ می‌دهد. همچنین در برخی مناطق استان آذربایجان غربی، سمیت بور مشاهده شده است که علت اصلی آن بالا بودن غلظت بور در آب آبیاری و در نتیجه افزایش غلظت آن در محلول خاک است. نبود زهکشی مناسب در این اراضی، به‌ویژه در مناطق اطراف دریاچه ارومیه، باعث تجمع مقادیر اضافی بور در خاک‌های زراعی و باغی شده و شرایط سمیت برای گیاهان را فراهم کرده است. علائم سمیت بور در باغ‌ها معمولاً به‌صورت سوختگی یا بافت‌مردگی در نوک ساقه‌های جوان، خشکیدگی سرشاخه‌ها، صمغی شدن محور برگ و بروز بافت‌های چوب‌پنبه‌ای قهوه‌ای در طول ساقه و دمبرگ‌ها مشاهده می‌شود. در درختان سیب، زردآلو و گلابی نیز ریزش و مرگ جوانه‌ها رخ می‌دهد که در نهایت با کاهش سطح برگ و فتوسنتز، عملکرد محصول کاهش می‌یابد (Majidi and Malakouti, 2008). بررسی‌های این پژوهشگران نشان داد آب آبیاری باغ‌های اطراف دریاچه ارومیه (منبع چاه‌های عمیق) از نظر بی‌کربنات و شوری محدودیت کمی دارد، اما از نظر غلظت بور دارای محدودیت شدید است، به‌طوری‌که میزان آن بین ۱/۳۵ تا ۹/۵ میلی‌گرم در لیتر متغیر بوده و به‌طور متوسط بسیار بالاتر از حد مطلوب (۰/۷ میلی‌گرم در لیتر) است.

آزمایش‌های مختلف نیز اثرهای منفی سمیت بور را بر رشد و فیزیولوژی گونه‌های مختلف گیاهی نشان داده‌اند. در انگور، افزایش غلظت بور باعث کاهش ارتفاع نهال، تعداد برگ، قطر ساقه، کلروفیل و وزن خشک برگ و در مقابل افزایش دمای برگ شد (Sarabandi *et al.*, 2019). در زیتون نیز افزایش بور سبب کاهش وزن تر و خشک برگ، ساقه و ریشه و کاهش کارایی فتوسیستم II شد (Rostami *et al.*, 2013). سمیت بور سبب کاهش پرولین برگ در پایهٔ سیب EM9 و کاهش کلروفیل ریزنمونه‌ها در پایهٔ MM111 شد (Sotiropoulos *et al.*, 2007). بررسی پایه‌های M9، MM106 و M26 به مقادیر مختلف بور (۰/۰۲۵، ۰/۲ و ۰/۴ میلی‌مول در لیتر) نشان داد که غلظت بور برگ در پایهٔ M26 کمتر بوده و این پایه در مقایسه با سایر پایه‌ها عملکرد بهتری تحت تنش بور داشت (Koutinase, 2013). نتایج سایر پژوهش‌ها نیز برتری پایه‌های M26 و P22 را در تحمل سمیت بور تأیید کرده‌اند (Hassani *et al.*, 2020; 2021).

با توجه به خطرات جبران‌ناپذیر سمیت بور برای محصولات کشاورزی، شناسایی و انتخاب پایه‌ها و ارقام متحمل، راهکاری عملی و اقتصادی برای مدیریت این تنش محسوب می‌شود (Yau and Ryan, 2008). بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر ارزیابی واکنش هشت پایهٔ رویشی سیب شامل MM106، M26، Ottawa3، Suporter4، M9، M7، P22 و MM111 به همراه پایهٔ بومی Gami-Almasi در برابر سطوح مختلف بور (صفر، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر آب آبیاری) است.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان غربی، واقع در شهر ارومیه، با مختصات طول جغرافیایی °۴۵′۰۴″۰۳، عرض جغرافیایی °۳۷′۳۲″۵۵ و ارتفاع ۱۳۳۲ متر از سطح دریا، در شرایط هوای آزاد طی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ اجرا گردید. در سال دوم، پایه‌های رویشی آماده و همگن‌سازی شدند (حذف پایه‌های غیر یکنواخت) و در سال سوم تیمارها اعمال گردید. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم نیمه‌خشک تا نیمه‌مرطوب با حداکثر دمای ۳۸/۴ و حداقل ۲۳- درجه سانتی‌گراد، میانگین بارندگی سالیانه بلندمدت ۳۵۰ میلی‌متر و میانگین تبخیر سالیانه حدود ۱۲۰۰ میلی‌متر است.

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. هر ترکیب تیماری شامل دو گلدان بود و در مجموع ۲۷۰ واحد آزمایشی مورد استفاده قرار گرفت. فاکتور اول شامل ۹ پایهٔ رویشی سیب (M9، M26، MM111، M7، Suporter4، Ottawa3، MM106، P22 و پایه بومی (Gami-Almasi) و فاکتور دوم شامل سطوح مختلف بور (۰، ۱، ۱/۵، ۲ و۲/۵ میلی‌گرم در لیتر آب از منبع اسید بوریک) بود.

در این پژوهش، از پایه‌های رویشی دوساله سیب به‌صورت غیرپیوندی استفاده شد. تیمارها در گلدان‌های پلاستیکی ۲۰ لیتری (ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر و قطر ۲۸ سانتی‌متر) اعمال گردید.

پس از جمع‌آوری نمونه‌های خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر خاک مزرعه، آزمون خاک شامل تعیین بافت خاک به روش هیدرومتری، اندازه‌گیری رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی با استفاده از دستگاه صفحات فشاری و تعیین جرم مخصوص ظاهری با استفاده از استوانه فلزی با حجم مشخص انجام شد. برای تعیین حجم آب آبیاری، عمق خالص آب مورد نیاز محاسبه و سپس با ضرب در مساحت سطح گلدان، میزان آب لازم برای تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه تعیین گردید.

با استفاده از رابطهٔ ۱ مقدار عمق خالص آب آبیاری تعیین شد:

$$d_n = \frac{(\theta_{FC} - \theta_{PWP})}{100} \times MAD \times D_r \quad (۱)$$

در رابطهٔ فوق:

d_n = عمق خالص آبیاری (بر حسب سانتی‌متر)

θ_{FC} و θ_{PWP} = به ترتیب درصد حجمی رطوبت خاک در نقطه ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی

MAD = حداکثر تخلیه مجاز رطوبت خاک، بستگی به مدیریت آبیاری و نوع زراعت دارد در این تحقیق مقدار آن ۰/۵ در نظرگرفته شد.

D_r = عمق توسعه ریشه گیاه (بر حسب سانتی‌متر) که به وسیله گلدان‌های تخریبی در طول دوره رشد اندازه‌گیری شد.

حجم آب آبیاری از رابطهٔ ۲ به دست می‌آید:

$$V = d_n \times A \quad (۲)$$

که در رابطهٔ فوق:

V = حجم آب مورد نیاز آبیاری (بر حسب سانتی‌متر مکعب یا سی سی یا میلی لیتر)

d_n = عمق خالص آبیاری (بر حسب سانتی‌متر)

A = مساحت گلدان (بر حسب سانتی‌متر مربع)

آبیاری به صورت دستی و با استفاده از پیمانه مدرج انجام شد. برای تعیین زمان و دفعات آبیاری از روش وزنی استفاده گردید؛ به این صورت که گلدان‌ها روزانه وزن‌کشی شده و با کسر وزن خشک خاک و وزن گیاه، مقدار آب موجود در گلدان محاسبه شد. سپس با تقسیم این مقدار بر وزن خشک خاک، رطوبت خاک و گلدان به دست آمد. هنگامی که رطوبت در دسترس گیاه کاهش می‌یافت، آبیاری انجام می‌شد و رطوبت خاک دوباره به سطح ظرفیت زراعی ارتقا داده می‌شد.

پایه‌های رویشی مورد مطالعه پس از کاشت در گلدان‌ها، تحت مراقبت‌های معمول باغی قرار گرفتند. در اوایل بهار، برای تحریک تولید شاخه‌های فرعی، عملیات سربرداری بر روی پایه‌ها انجام شد. سطوح تیمارهای بور بر اساس اندازه‌گیری حداکثر ظرفیت جذب بور در خاک و با استفاده از نموگرام هم‌دمایی جذب بور تعیین شد. نموگرام هم‌دمایی جذب، رابطهٔ بین یک یون در فاز جامد و غلظت آن در محلول تعادلی را در دمای ثابت نشان می‌دهد و به عنوان ابزاری برای توصیف و پیش‌بینی جذب و پویایی عناصر در خاک کاربرد دارد.

قبل از کاشت، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مطابق روش‌های استاندارد موسسه تحقیقات خاک و آب اندازه‌گیری شد (Ali-Ehyaee and Behbahani-Zadeh, 1997). ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری و خاک گلدان به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی‌ها و ترکیبات شیمیایی آب

Table 1. Chemical compositions and properties of water

Milliequivalents per liter										B (ppm)	pH	Ecx10^6
Sum Cation	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	K^+	Sum Anion	SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^-	CO_3^{2-}			
5.20	1.10	1.50	2.60	0.06	5.20	1.25	0.75	3.20	0.00	0.06	7.55	521

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 2. Physical and chemical properties of the soil

Soil texture	B	K	P	pH	Ec	T.N.V	O.C
-	(mg. kg^{-1})	(ava) (mg. kg^{-1})	(ava) (mg. kg^{-1})	-	(ds. m^{-1})	(%)	(%)
Silty loam	1.73	360	8.73	7.4	0.659	14.7	0.77

در پایان دوره آزمایش و سه ماه پس از اعمال تیمارها، شاخص‌های رویشی شامل رشد طولی شاخه‌ها و وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه اندازه‌گیری شد. برای این منظور، اندام هوایی و ریشه جدا و پس از شستشو، وزن تر با ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری گردید. سپس نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده و وزن خشک تعیین شد.

برای اندازه‌گیری بور، ریشه‌های فرعی و موئین و انتهای شاخه‌ها جدا، شسته، خشک و آسیاب شدند. یک گرم نمونه خشک در بوته چینی قرار گرفته و پس از خاکستر شدن در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد، با اسیدکلریدریک عصاره‌گیری شد. غلظت بور با استفاده از روش آزومتین اچ تعیین گردید (Wolf, 1974).

برای تعیین محتوای کلروفیل a، b و کاروتنوئید کل، عصارهٔ برگ با متانول خالص (۹۹ درصد، شرکت پتروشیمی زاگرس) استخراج، سانتریفیوژ و فاز رویی جداسازی شد. جذب در طول موج‌های ۶۶۶، ۶۵۳ و ۴۷۰ نانومتر نسبت به شاهد اندازه‌گیری گردید و مقادیر رنگدانه‌ها با رابطه‌های زیر محاسبه شد (Lichtenthaler, 1987).

$$Chla = 15.65\ A_{666} - 7.340\ A_{653}$$
$$Chlb = 27.05\ A_{653} - 11.21\ A_{666}$$
$$Car = 1000\ A_{470} - 2.86\ Ca - 129.2\ Cb/245$$

محتوای پروتئین محلول کل با استخراج عصاره در بافر فسفات پتاسیم (۵۰ میلی‌مولار، pH=7) و سنجش محلول رویی به روش Bradford (۱۹۷۶) تعیین شد؛ جذب در ۵۹۵ نانومتر اندازه‌گیری و مقادیر پروتئین بر حسب میلی‌گرم بر گرم بافت تر گیاه محاسبه گردید.

میزان قندهای محلول با افزودن ۰/۱ میلی‌لیتر عصاره به سه میلی‌لیتر محلول آنترون (۱۵۰ میلی‌گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۷۲ درصد) و حرارت در حمام آب جوش به مدت ۱۰ دقیقه تعیین شد. پس از خنک شدن، جذب در طول موج ۶۲۵ نانومتر با اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری گردید (Irigoyen *et al.*, 1992).

محتوای گلایسین‌بتائین با استخراج ۰/۵ گرم برگ خشک در ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر به مدت ۴۸ ساعت و واکنش عصاره با اسیدسولفوریک دو نرمال و یدید پتاسیم و ید تعیین شد. نمونه‌ها پس از سانتریفیوژ ۱۵ دقیقه‌ای در دمای صفر درجه، جذب در ۳۶۵ نانومتر اندازه‌گیری شد و منحنی استاندارد با بتائین رسم گردید (Grieve and Grattan, 1983).

برای اندازه‌گیری محتوای پرولین، ۰/۵ گرم برگ با اتانول استخراج و پس از سانتریفیوژ، عصاره در ۴ درجه نگهداری شد. برای سنجش، عصاره با آب و نین‌هیدرین واکنش داده و جذب در ۵۱۵ نانومتر اندازه‌گیری شد (Paquin and Lechasseur, 1979).

تجزیه آماری داده‌ها با نرم‌افزار SAS 9.1 و رسم نمودارها با Excel انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح یک و پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

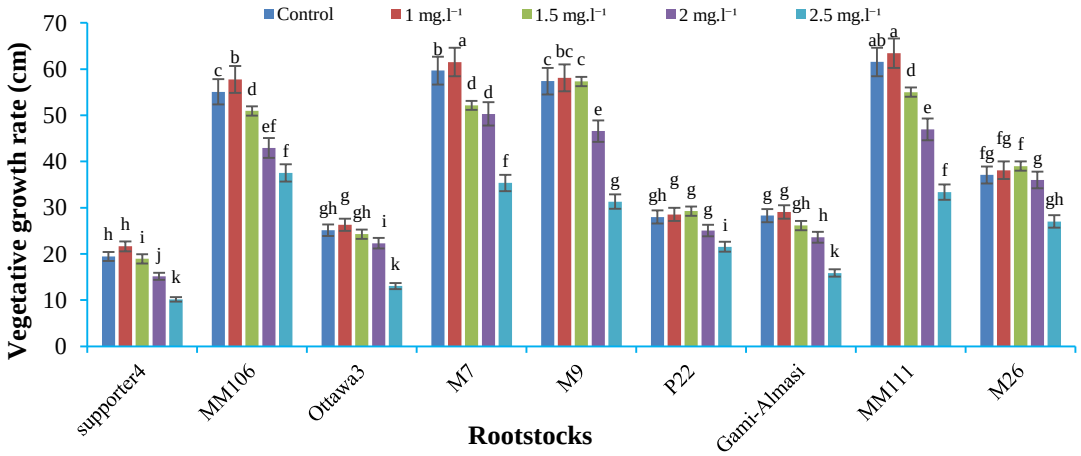
رشد رویشی شاخهٔ فصل جاری

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که رشد شاخه‌های فصل جاری در پایه‌های رویشی سیب به سطح بور و نوع پایه بستگی دارد (شکل ۱). بر اساس مقایسه میانگین‌ها، بیشترین رشد شاخه به پایهٔ رویشی M7 در سطح بور ۱ میلی‌گرم و مقدار ۶۹/۵ سانتی‌متر اختصاص داشت، و کمترین رشد به پایهٔ Suporter4 در سطح بور ۲/۵ میلی‌گرم با ۵۳/۱ سانتی‌متر تعلق داشت. همچنین، رشد رویشی شاخه در پایهٔ بومی Gami-Almasi در سطح بور ۲/۵ میلی‌گرم با ۱۵/۱۵ سانتی‌متر بیشتر از پایه‌های Ottawa3، Suporter4 و MM106 بود. بر اساس مقایسه میانگین ها با افزایش سطوح بور میزان رشد رویشی شاخهٔ فصل جاری در مقایسه با شاهد در همه پایه‌های رویشی سیب در ابتدا افزایش و سپس در غلظت‌های بیشتر بور در خاک کاهش یافت (شکل ۱). براساس مقایسه میانگین‌ها بیشترین رشد شاخه به پایهٔ رویشی M7 در سطح بور یک میلی‌گرم به میزان ۶۹/۵ سانتی‌متر و کمترین میزان رشد رویشی به پایهٔ Suporter4 در سطح بور ۲/۵ میلی‌گرم به میزان

۱۰/۵۳ سانتی‌متر اختصاص داشت. رشد رویشی شاخه در پایهٔ محلی Gami-Almasi به میزان ۱۵/۱۵ سانتی‌متر در سطح بور ۲/۵ میلی‌گرم نسبت به پایه‌های Ottawa3، Suporter4 و MM106 بیشتر بود. رشد شاخه نشان‌دهندهٔ فعالیت متابولیکی گیاه است و تغییرات کمی و کیفی آن از نخستین نشانه‌های تنش به شمار می‌رود. بر اساس نتایج (نمودار ۱)، رشد رویشی شاخه‌ها تا غلظت ۱ میلی‌گرم بور در لیتر آب افزایش یافت، اما با افزایش غلظت بور روند رشد کاهش یافت که با نتایج سایر محققان همخوانی داشت (Wang *et al.*, 2011). نهال‌های دورهٔ نونهالی به دلیل نیاز زیاد به بور برای تقسیم سلولی و تشکیل دیوارهٔ سلولی، به مقادیر کم بور واکنش مثبت نشان دادند. واکنش پایه‌ها به بور متفاوت بود؛ پایه‌های M26 و P22 نسبت به دیگر پایه‌ها کاهش رشد کمتری داشتند. درصد کاهش رشد رویشی در غلظت ۲/۵ میلی‌گرم بور نسبت به شاهد در پایه‌های M26 و P22 به ترتیب ۲۸ و ۲۵ درصد بود، در حالی که پایه‌های دیگر بیش از ۴۰ درصد کاهش رشد را تجربه کردند.

وزن تر و خشک اندام هوایی

مقایسه میانگین تیمار سطوح مختلف بور روی پایه‌ها نشان داد، بیشترین وزن تر اندام هوایی در پایهٔ رویشی MM106 در سطح بور ۱ میلی‌گرم در لیتر با میانگین ۶۱۱ گرم و کمترین میزان وزن تر اندام هوایی هم در پایهٔ رویشی Gami-Almasi در سطح بور ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد (شکل ۲). وزن تر اندام‌های هوایی تابع وزن تر شاخه، وزن و سطح برگ است. روند تغییرات صفت وزن تر اندام هوایی در ابتدا با افزایش میزان بور تا سطح ۱ میلی‌گرم در لیتر به‌صورت افزایشی بود و سپس در سطوح بالاتر بور با کاهش وزن تر اندام هوایی مواجه شد. کاهش وزن تر اندام‌های هوایی می‌تواند به دلیل کاهش سطح برگ و آنهم در نتیجه کاهش تولید برگ‌های جدید، ریزش برگ‌ها و کاهش اندازه تک‌تک برگ‌ها باشد. اولین اثر سمیت بور کاهش غلظت محتوای کلروفیل است که به دنبال آن رشد کاهش یافته و کاهش سطح برگ و کاهش تثبیت دی‌اکسیدکربن اتفاق می‌افتد که همه این اثرهای قبل از مشاهده علائم سمیت بور رخ می‌دهد. این کاهش رشد از لحاظ وزن تر و خشک اندام هوایی با یافته‌های دیگر پژوهشگران مطابقت داشت (Wang *et al.*, 2011; Rostami *et al.*, 2013). در آزمایشی واکنش نهال‌های دوساله سیب رقم ردچیف دلیشز نسبت به مقادیر مختلف بور در یک خاک نشان داد که وزن تر با افزایش مقدار بور در خاک همبستگی مثبت دارد (Paparankis *et al.*, 2013).

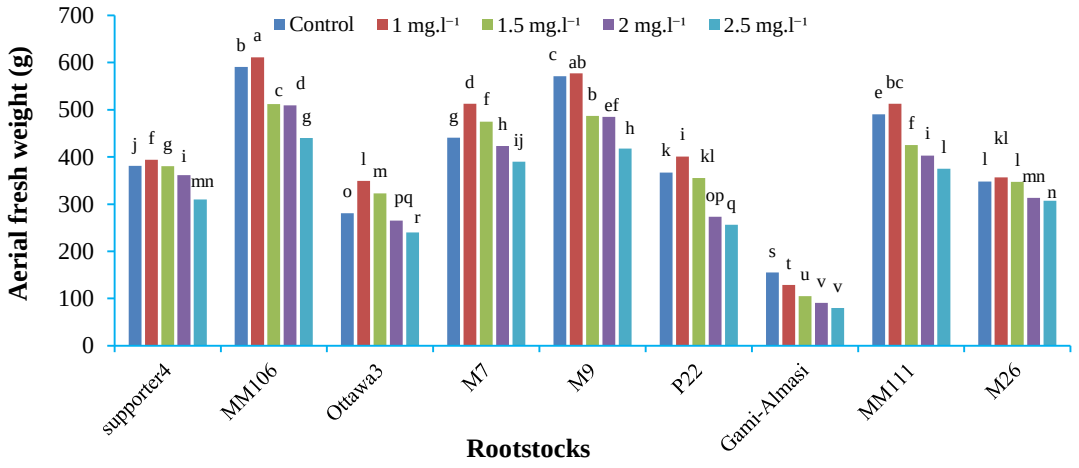


شکل ۱- مقایسه میانگین اثر بور و پایه بر نرخ رشد رویشی سیب. حروف متفاوت نشان‌دهندهٔ معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن می‌باشد ($P < 0.01$).

Figure 1. Mean comparison for boron and rootstock on vegetative growth rate of apple. Different letters indicate statistical significance based on Duncan's multiple range test ($p < 0.01$).

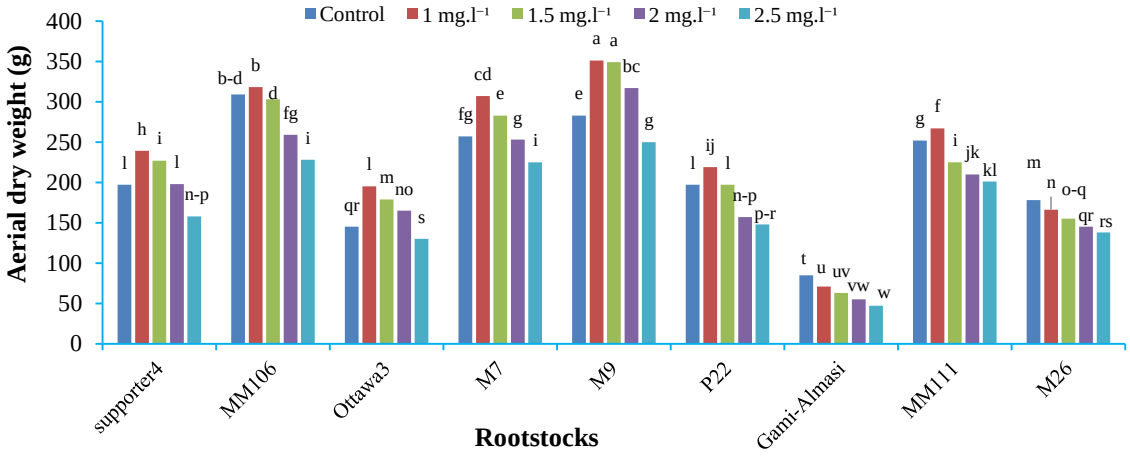
اثر برهمکنش پایه و سطوح مختلف بور نشان داد که پایه‌های Gami-Almasi و Ottawa3 در تیمار ۲/۵ میلی‌گرم بور در لیتر دارای کمترین وزن خشک بودند. بیشترین وزن خشک اندام هوایی مربوط به پایهٔ

MM106 به میزان ۳۱۸ گرم در سطح بور ۱ میلی‌گرم در لیتر به دست آمد. با افزایش سطوح بور، وزن خشک اندام هوایی، در مقایسه با شاهد در همه پایه‌های رویشی سیب در ابتدا افزایشی و سپس در غلظت‌های بالاتر روند کاهشی داشت (شکل ۳). نتایج مطالعه حاضر، با نتایج آزمایش‌های قبلی روی نهال‌های گلابی مطابقت داشت (Wang *et al.*, 2011). بر این اساس نهال‌هایی که در دوره نونهالی و رشد سریع هستند، به علت تقسیمات شدید سلولی و نیاز به عنصر بور برای تشکیل دیواره سلولی در سلول‌های تازه تشکیل یافته، به‌ویژه در نقاط مریستمی گیاه، به مقادیر اضافی بور در غلظت‌های کم، واکنش مثبت نشان دادند. در آزمایشی، در مورد اثرهای زیادی بور بر پایه‌های گلابی BA29 و EMA، نشان دادند که غلظت‌های بالای بور باعث کاهش وزن تر و خشک اندام هوایی در این پایه‌ها شده است ولی در غلظت‌های بور کمتر از ۰/۲ میلی‌مولار بیشترین وزن تر و خشک اندام هوایی به دست آمد (Sotiropoulos *et al.*, 2006). در اثر سمیت بور حجم سلول، تقسیم سلولی، دیواره‌سازی سلول و در نتیجه سطح برگ کاهش می‌یابد. به‌طورکلی سمیت بور از طریق صدمات تیلاکوئید و در واکنش به قرار گرفتن الکترون‌های انتقالی فتوسنتزی و تخریب کلروفیل سبب تقلیل فرآیند فتوسنتز می‌گردد و باعث کاهش سطح برگ و رشد رویشی و نهایتاً منجر به کاهش وزن‌تر و وزن خشک می‌شود (Rostami *et al.*, 2013).



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر بور و پایه بر وزن تر اندام هوایی سیب. حروف متفاوت نشان‌دهندهٔ معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن می‌باشد ($P< 0.01$).

Figure 2. Mean comparison for boron and rootstock on fresh weight of aerial parts. Different letters indicate statistical significance based on Duncan's multiple range test ($P < 0.01$).

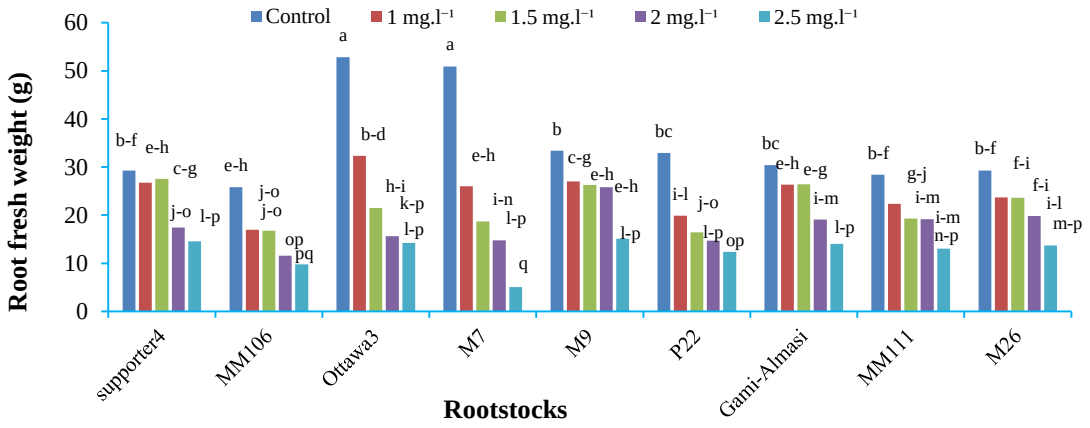


شکل ۳- مقایسه میانگین اثر بور و پایه بر وزن خشک اندام هوایی سیب. حروف متفاوت نشان‌دهندهٔ معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن می‌باشد ($P < 0.01$).

Figure 3. Mean comparison for boron and rootstock on dry weight of aerial parts. Different letters indicate statistical significance based on Duncan's multiple range test ($P < 0.01$).

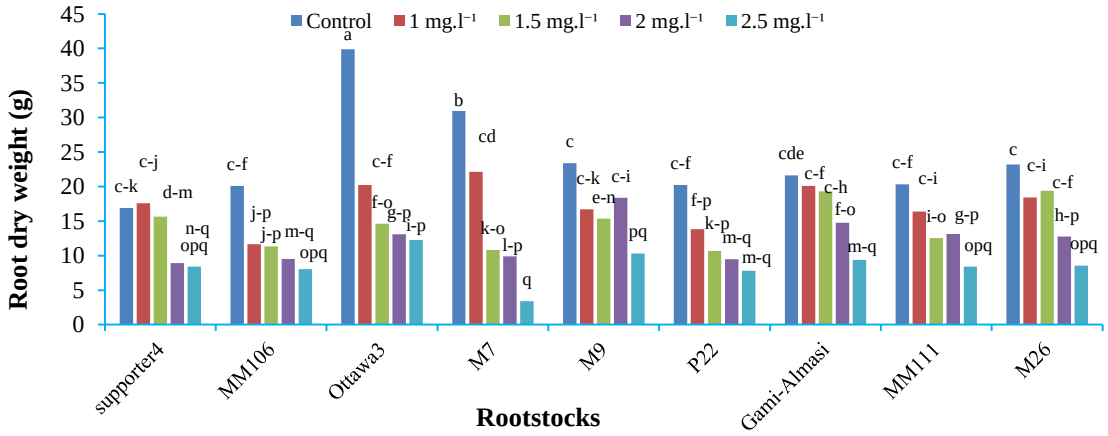
وزن تر و خشک ریشه

در مقایسه میانگین اثرهای برهمکنش پایه در تیمار بور بر وزن تر ریشه، بیشترین وزن تر ریشه در پایهٔ رویشی Ottawa3 درتیمار بور شاهد و کمترین وزن تر ریشه به پایهٔ رویشی M7 در تیمار سطح بور ۲/۵ میلی‌گرم تعلق داشت (شکل ۴). به همین ترتیب، در مورد وزن خشک ریشه هم بیشترین وزن خشک ریشه در پایهٔ Ottawa3 و کمترین آن به پایهٔ رویشی M7 اختصاص یافت (شکل ۵). به عبارت دیگر، بیشترین کاهش در میزان وزن تر و خشک ریشه در سطح ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر در پایه‌های رویشی Ottawa3 و M7 مشاهده شد. در شرایط تنش، بین بخش‌های هوایی و ریشه برای جذب مواد فتوسنتزی رقابت وجود دارد و این مسئله روی رشد این اندام‌ها اثر می‌گذارد و معمولاً رشد برگ‌ها از حساسیت بیشتری نسبت به رشد ریشه برخوردار است. تولید هورمون اسیدآبسیزیک (ABA) در شرایط تنش توسط ریشه‌ها خاصیت بازدارندگی برای اندام‌های هوایی دارد درحالی‌که در ریشه‌ها باعث تداوم رشد می‌گردد (Hsiao and Xu, 2000). همچنین در شرایط تنش، مواد هیدروکربنی بیشتری از برگ‌ها به‌طرف ریشه‌ها حرکت می‌کند (Lambers *et al.*, 1998). با این وجود، در پژوهش حاضر با افزایش سطح بور ، وزن خشک ریشه با کاهشی معنی‌دار مواجه شد. در آزمایشی اثرهای مقادیر مختلف بور را روی بادام رقم فراگنس پیوند شده روی دو پایهٔ GF677 و Tuvano بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که سمیت بور اثرهای کاهشی معنی‌داری بر ویژگی‌های رویشی، فیزیولوژیکی و غلظت عناصر غذائی بادام داشت. شدت این اثرها برحسب نوع پایه‌ها متفاوت بود. با افزایش سطوح بور، وزن تر و خشک برگ و ریشه، تعداد برگ، سطح برگ، شدت فتوسنتز و شاخص کلروفیل کاهش یافت (Oraei *et al*, 2012). کاهش رشد ریشه در اثر سمیت بور موافق با نتایج مطالعه حاضر در گوجه‌فرنگی (Kaya *et al.*, 2009)، گندم (Gunes *et al.*, 2007) و انگور (Gunes *et al.*, 2006) گزارش شده است.



شکل ٤- مقایسه میانگین اثر بور و پایه بر وزن تر ریشه سیب. حروف متفاوت نشان‌دهندهٔ معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن می‌باشد ($P < 0.01$).

Figure 4. Mean comparison for boron and rootstock on root fresh weight. Different letters indicate statistical significance based on Duncan's multiple range test ($P < 0.01$).



شکل ٥- مقایسه میانگین اثر بور و پایه بر وزن خشک ریشه سیب. حروف متفاوت نشان‌دهندهٔ معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن می‌باشد ($P < 0.01$).

Figure 5. Mean comparison for boron and rootstock on root dry weight. Different letters indicate statistical significance based on Duncan's multiple range test ($P < 0.01$).

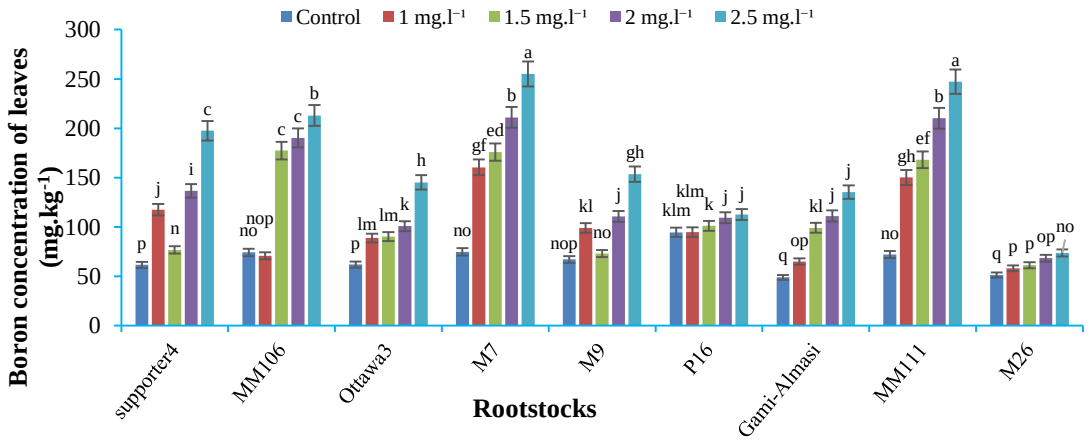
غلظت بور در برگ

بر اساس مقایسه میانگین‌ها کمترین و بیشترین مقدار بور در تیمار ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب در برگ پایهٔ رویشی M26 و M7 به دست آمد (شکل ۶). نتایج تجزیه برگ نشان داد که با افزایش مقدار بور در خاک، میزان بور اندازه‌گیری شده در برگ همه پایه‌های رویشی سیب نسبت به شاهد افزایش یافت (نمودار ۵). میزان تجمع بور در سطح ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر در برگ پایه‌های رویشی M26 و P22 نسبت به شاهد در مقایسه با پایه‌های رویشی دیگر، نزدیک به ۵۰ درصد کمتر بود به‌طوری‌که در سطح بور ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر، مقدار بور در برگ پایه‌های M26 و P22 به ترتیب معادل ۹۱ و ۱۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک برگ بود که با نتایج گزارش‌های قبلی مطابقت داشت (Nable *et al.*, 1997). بر اساس یافته اخیر، ژنوتیپ‌های حساس به سمیت بور دارای مقدار بور بیشتری در برگ‌هایشان نسبت به ژنوتیپ‌های متحمل هستند و این احتمالاً به دلیل جذب کمتر بور در ریشه آن‌ها است. یک ارتباط مستقیم بین مقدار بور در برگ‌ها و شدت سمیت بور وجود دارد. غلظت بور برگ در گونه‌های حساس و متحمل

خیلی متفاوت است (Furlani *et al.*, 2003) به این دلیل تشخیص سمیت بور به‌وسیله تجزیه‌های برگی ارجح‌تر از تجزیه شاخه‌ها است (Reid, 2014). در پایه بادام Tuvano به‌وسیلهٔ سازوکار تدافعی از طریق ایجاد محدودیت در انتقال بور از سیستم ریشه به قسمت‌های هوائی تحمل بالاتری نسبت به پایهٔ رویشی GF677 داشته و تحت شرایط مقادیر بیش‌ازحد بور می‌توان از آن به‌عنوان یک‌پایه متحمل برای ارقام مختلف بادام استفاده کرد (Oraei *et al*, 2012). به نظر می‌رسد که پایه‌های رویشی M26 و P22 نیز از طریق سازوکار تدافعی توانسته‌اند که بور کمتری جذب نموده و از انتقال آن به برگ جلوگیری نمایند.

محتوای کلروفیل a، b و کاروتنوئید کل

بر اساس جدول مقایسه میانگین، بیشترین مقدار محتوای کلروفیل a، b و کاروتنوئید در پایهٔ رویشی M9 به ترتیب با میانگین ۰/۷۸۷، ۱/۴۱ و ۰/۷۹ میکروگرم بر گرم وزن خشک در تیمار شاهد مشاهده شد در حالیکه، کمترین مقدار محتوای کلروفیل a در پایهٔ رویشی P22 با میانگین ۰/۲۱۴ میکروگرم بر گرم وزن خشک و در بالاترین سطح تیمار بور یعنی ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد با افزایش سطح بور میزان محتوای کلروفیل در همه پایه‌ها روند کاهشی داشت (جدول ۳). کمترین میزان محتوای کلروفیل b در بالاترین سطح بور (۲/۵ میلی‌گرم بر لیتر) در پایه‌های MM111، P22 و Gami-Almasi با میانگین ۰/۰۸ میکروگرم بر گرم وزن خشک مشاهده شد. همچنین، کمترین میزان کاروتنوئید کل هم در باالاترین سطح تیمار بور (۲/۵ میلی‌گرم در لیتر) با میانگین ۰/۱۴ میکروگرم بر گرم وزن خشک در پایهٔ Ottawa3 مشاهده شد. بیش‌بود بور باعث کاهش مقدار محتوای کلروفیل در برگ‌های گیاه آرابیدوپسیس شده است (Chen *et al.*, 2014). در آزمایشی روی گلابی آسیائی رقم Cuiguan، تیمار با غلظت بالای بور باعث افزایش مقدار محتوای کلروفیل و کاهش کاروتینوئید برگ شد (Wang *et al.*, 2011). از اثرهای بارز تنش اکسیداتیو فعال کردن آنزیم‌های تخریب‌کننده نظیر آنزیم‌های هضم‌کننده دیواره سلولی و غشاء سلول‌ها نظیر لیپوکسیژنازها، پروتئازها، کلروفیلازها و غیره باعث تخریب بافت‌ها می‌گردد (Asghari *et al.*, 2015). گیاهانی که در شرایط تنش میزان محتوای کلروفیل بیشتری را حفظ نمایند، کارایی فتوسنتز بالاتری دارند و در برابر تنش مقاوم‌تر هستند (Dubey, 2020). محققان تأیید کردند سمیت بور روی تبخیر و تعرق اثر می‌گذارد و با افزایش میزان اسیدآبسزیک باعث بسته شدن روزنه‌ها می‌شود (Macho-Rivero *et al.*, 2018).



شکل ٦- مقایسه میانگین اثر بور و پایه بر غلظت بور برگ سیب. حروف متفاوت نشان‌دهندهٔ معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن می‌باشد ($P < 0.01$).

Figure 6. Mean comparison for boron and rootstock on the boron c of leaves. Different letters indicate statistical significance based on Duncan's multiple range test ($P < 0.01$).

جدول ۳- مقایسه میانگین برهم‌کنش نوع پایه و سطوح بور بر مقادیر محتوای کلروفیل a و b و محتوای کاروتنوئید کل

Table 3. Comparison of the average interaction effect of base type and boron levels on chlorophyll a and b and total carotenoid content

B(mg.l^{-1})	Rootstock	chlorophyll a content	chlorophyll b content	carotenoid content
B1 (control)	supporter4	0.457d-l	0.9e	0.503d-f
	MM106	0.459d-k	0.86e	0.79a
	Ottawa3	0.298j-n	0.14j-o	0.35f-j
	M7	0.631a-f	1.19c	0.77a
	M9	0.787a	1.14a	0.79a
	P22	0.731ab	0.15j-o	0.16k-m
	Gami-Almasi	0.356i-n	0.26hi	0.40e-h
	MM111	0.728ab	0.85e	0.16k-m
	M26	0.370i-n	0.26hi	0.32g-k
B2 (1 mg.l^{-1})	supporter4	0.186n	0.102m-o	0.22i-m
	MM106	0.276i-n	0.21i-o	0.31g-l
	Ottawa3	0.241k-n	0.21h-m	0.22i-m
	M7	0.697a-c	1.17c	0.72ab
	M9	0.447d-l	0.64f	0.38e-i
	P22	0.671a-d	0.14j-o	0.706ab
	Gami-Almasi	0.281i-n	0.21h-l	0.309g-m
	MM111	0.682a-d	0.19i-n	0.606b-d
	M26 × B2	0.488c-j	0.21h-l	0.309g-m
B3 (1.5 mg.l^{-1})	supporter4	0.729ab	0.36g	0.31g-m
	MM106	0.567a-h	0.917e	0.52c-e
	Ottawa3	0.277i-n	0.14j-o	0.303g-m
	M7	0.314i-n	0.14j-o	0.20j-m
	M9	0.636a-f	1.04d	0.57b-d
	P22	0.626a-f	0.09no	0.37e-i
	Gami-Almasi	0.613a-g	0.11l-o	0.59b-d
	MM111	0.639a-f	0.69f	0.38e-i
	M26 × B3	0.453d-l	0.11l-o	0.29g-m
B4 (2 mg.l^{-1})	supporter4	0.246k-n	0.09no	0.24h-m
	MM106	0.288i-n	0.23h-j	0.41e-g
	Ottawa3	0.298i-n	0.30gh	0.37e-i
	M7	0.507b-h	1.16c	0.65a-c
	M9	0.428e-l	0.65f	0.39e-h
	P22	0.695a-c	1.29b	0.706ab
	Gami-Almasi	0.217l-n	0.08no	0.22i-m
	MM111	0.645a-e	0.09no	0.506d-f
	M26	0.387h-n	0.08no	0.22i-m
B5 (2.5 mg.l^{-1})	supporter4	0.244k-n	0.27g-i	0.21i-m
	MM106	0.267k-n	0.22h-k	0.31g-m
	Ottawa3	0.234k-n	0.14j-o	0.14m
	M7	0.292i-n	0.12j-o	0.71ab
	M9	0.408f-n	0.63f	0.26g-m
	P22	0.214mn	1.2c	0.15m
	Gami-Almasi	0.217mn	0.08no	0.22i-m
	MM111	0.554a-h	0.08no	0.25g-m
	M26	0.384g-n	0.08no	0.22i-m

حروف یکسان میانگین‌ها نشان دهندهٔ عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد بر اساس آزمون دانکن می‌باشد.

The same letters in front of the averages indicate the absence of a significant difference at the one percent level between them based on Duncan's test.

محتوای پروتئین محلول

بر اساس نتایج مقایسه میانگین با افزایش سطح بور، میزان محتوای پروتئین محلول برگ کاهش یافت (شکل ۷). بر این اساس، کمترین میزان محتوای پروتئین محلول برگ در سطح بور ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر و بیشترین میزان در تیمار شاهد مشاهده گردید (نمودار ۶). سنتز پروتئین‌ها یکی از مهم ترین

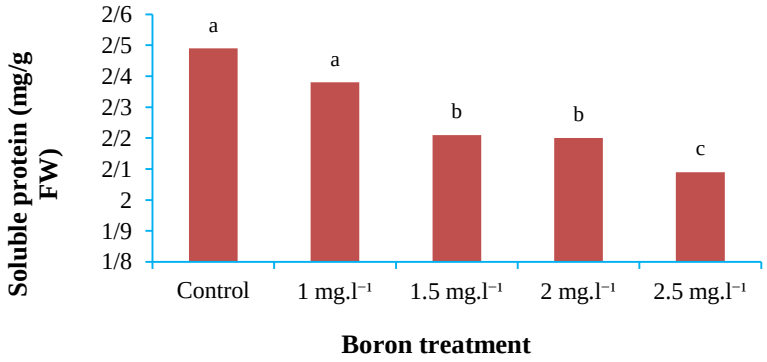
فرآیندهای گیاهی است که در شرایط تنش در واکنش به آن قرار می‌گیرد. مقدار محتوای پروتئین محلول علامت مهمی از وضعیت بیوشیمیایی گیاهان است (Doganlar *et al.*, 2010). بسیاری از پروتئین‌ها طی تنش هیدرولیز می‌شوند و بر این اساس، کاهش در غلظت پروتئین کل، می‌تواند یکی از آثار و نتایج تنش باشد. زمانی که میان تولید انواع اکسیژن واکنش‌گر و سیستم آنتی‌اکسیدانی برای دفع این مولکول‌ها تعادل برقرار نباشد، مقدار زیاد این ترکیبات، متابولیسم طبیعی و تعادل سلولی را برهم می‌زنند و سبب آسیب‌های اُکسایشی به لیپیدها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک می‌شوند. اثر اکسیژن‌های واکنش‌گر بر DNA و RNA می‌تواند از دلایل کاهش سنتز پروتئین‌ها در شرایط تنش باشد (Lee, 2001). بیش‌بود بور باعث کاهش مقدار پروتئین قبل از ظهور علائم برگی در گیاه آرابیدوپسیس می‌شود (Chen *et al.*, 2014).

محتوای کربوهیدرات محلول

با افزایش غلظت بور ابتدا میزان کربوهیدارت‌های محلول تا غلظت یک میلی‌گرم در لیتر افزایش و در غلظت‌های بیشتر کاهش یافت ولی این کاهش در بین غلظت‌های ۱/۵، ۲ و ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر، اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۸). قندهای محلول به‌عنوان عامل اسمزی برای حفظ تورژسانس و تورم سلول‌ها و به‌عنوان محافظ اسمزی، برای پایدار نمودن پروتئین‌های غشاها عمل می‌کنند (Molassiotis *et al.*, 2006; Jalili-Marandi, 2011). بسیاری از تنش‌های محیطی بر متابولیسم قندها و پخش مواد فتوسنتزی در گیاهان در حال رشد اثر می‌گذارند. در غلظت‌های بیشتر بور احتمالاً به دلیل کاهش فتوسنتز یا تحریک سرعت تنفس، قندهای محلول کاهش می‌یابد. محتوای کربوهیدرات در ساقه‌های گیاهان تحت تنش بور شدید کاهش می‌یابد (EI-Fekey *et al.*, 2014). افزایش کربوهیدرات‌های محلول در زمان تنش را می‌توان به علت توقف سنتز این ترکیبات و هم‌چنین تخریب قندهای نامحلول که باعث افزایش قندهای محلول می‌شود نسبت داد (Hajebi and Heidari, 2005). زیادی بور در پرتقال باعث بالا رفتن غلظت گلوکز و فروکتوز می‌شود(Keles and Öncel, 2004). افزایش قند اینورتاز در نوک ریشه‌های جو متحمل به بور همراه با افزایش قندهای احیا شونده، گلوکز و فروکتوز در شرایط سمیت بور مشاهده شده است. یک ارتباط نزدیک‌بین تحمل به سمیت بور و بالا بودن سطح قندهای احیاشونده در نوک ریشه وجود دارد و این نشان می‌دهد که قندهای احیا شونده در تحمل گیاه به سمیت بور نقش دارد (Huynh *et al.*, 2009).

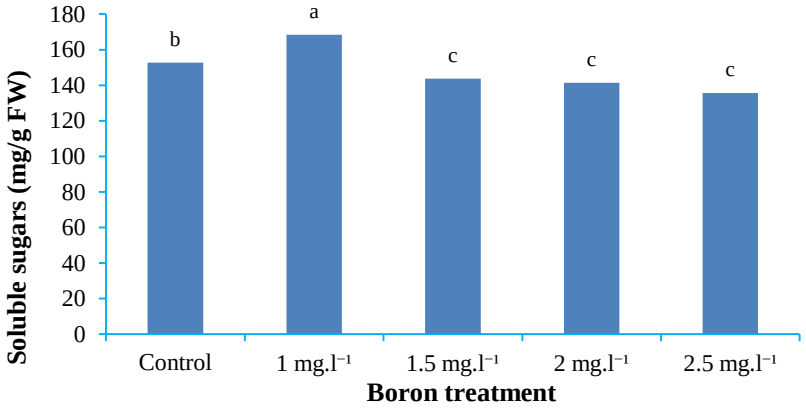
محتوای گلایسین بتائین

مطابق نتایج مقایسه میانگین با افزایش سطوح بور در خاک میزان گلایسن بتائین تا سطح یک میلی‌گرم افزایش جزئی داشت ولی از سطح یک میلی‌گرم در لیتر به بالا روند افزایش گلایسین بتائین تشدید شد (شکل ۹). به‌طوری‌که بیشترین میزان گلایسین بتائین در پایهٔ رویشی MM106 در سطح بور ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر به دست آمد. افزایش گلایسین بتائین در هنگام مواجه با تنش‌های غیرزیستی نظیر تنش بور در انگور (Haddad and Kamangar, 2015) گزارش شده است. میزان گلایسن بتائین در گیاهان تحت تنش برای افزایش مقاومت گیاه در برابر شرایط تنش‌زا افزایش می‌یابد. گلایسین بتائین با فرمول شیمیایی $C_5H_{11}NO_2$ یک اسیدآمینه اصلاح شده با سه گروه متیلی که از گلایسین مشتق شده است. ساختار مولکولی گلایسین بتائین این امکان را می‌دهد که با بخش‌های آب گریز و آب‌دوست مولکول‌های پروتئین و آنزیم‌ها برهم‌کنش داشته باشد (Sakamoto and Murata, 2002). فعالیت هیدراسیونی ویژه گلایسین بتائین، در زمان وقوع تنش مانع از صدمات اکسیدکننده به پروتئین‌ها می‌شود. گلایسین‌بتائین با این عمل بخش‌های آب‌گریز پروتئین را در برابر مولکول‌های آب قابل‌دسترس کرده و باعث افزایش سطح تماس مولکول‌های آب با پروتئین می‌گردد، درنتیجه از واسرشتگی پروتئین ممانعت می‌کند (Schobert, 1977).



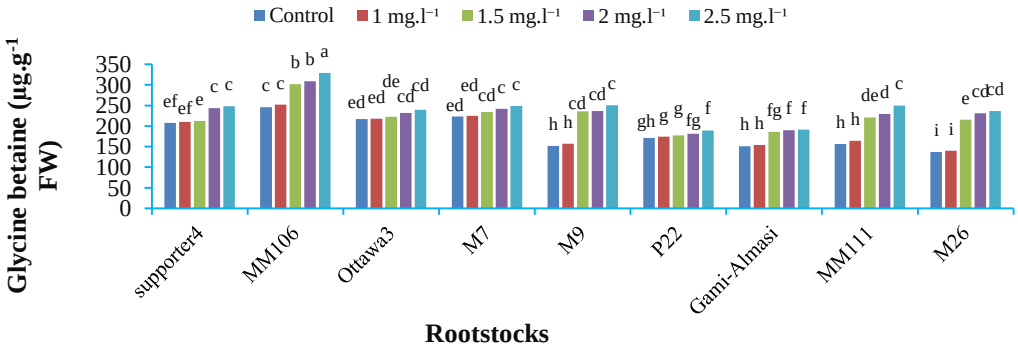
شکل ۷- مقایسه میانگین اثر بور و پایه بر محتوای پروتئین محلول سیب. حروف متفاوت نشان‌دهندهٔ معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن می‌باشد ($P < 0.01$).

Figure 7. Mean comparison for boron and rootstock on soluble protein of leaves. Different letters indicate statistical significance based on Duncan's multiple range test ($P < 0.01$).



شکل ۸- مقایسه میانگین اثر بور و پایه بر محتوای کربوهیدرات محلول سیب. حروف متفاوت نشان‌دهندهٔ معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن می‌باشد ($P < 0.01$).

Figure 8. Mean comparison for boron and rootstock on soluble sugars of leaves. Different letters indicate statistical significance based on Duncan's multiple range test ($P < 0.01$).

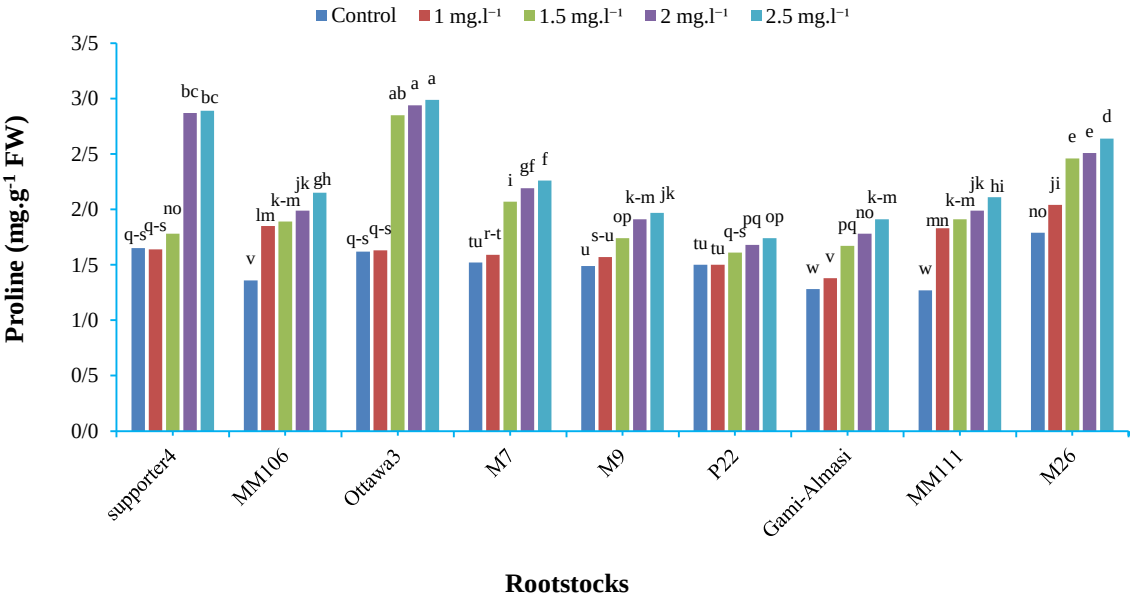


شکل ۹- مقایسه میانگین اثر بور و پایه بر محتوای گلایسین‌بتائین سیب. حروف متفاوت نشان‌دهندهٔ معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن می‌باشد ($P < 0.01$).

Figure 9. Mean comparison for boron and rootstock on glycine betaine. Different letters indicate statistical significance based on Duncan's multiple range test ($P < 0.01$).

محتوای پرولین

بر اساس نتایج مقایسه میانگین با افزایش غلظت بور، میزان پرولین اندازه‌گیری شده در برگ همه پایه‌های رویشی افزایش یافت (شکل ۱۰). هرچند روند افزایش میزان پرولین در همه پایه‌های رویشی سیب یکسان نبود. به‌طوری‌که بیشترین میزان تجمع پرولین در پایهٔ رویشی Ottawa3 و سطح بور ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد. افزایش پرولین در هنگام مواجه با تنش بور در برگ گلابی (Wang *et al.*, 2011)، پایه‌های رویشی سیب (Molassiotis *et al.*, 2006) و برگ‌های انگور سفید بیدانه (Nezamdoost *et al.*, 2017) گزارش شده است. تجمع پرولین در گیاهان تحت شرایط سمیت بور یک استراتژی برای تحمل است (Karabal *et al.*, 2003; Gunes *et al.*, 2007) و این با سیستم جاروب کننده گونه‌های واکنش‌گر اکسیژن مرتبط است (Xiong and Zhu, 2002). زمانی که گیاه تحت تنش قرار می‌گیرد، مقدار پرولین که یکی از اسمولیت‌های سازگاری در گیاهان تحت تنش است، افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد در گیاهانی که تحت تنش هستند، افزایش اسیدآمینه پرولین باعث حفظ فشار آماس و ادامه رشد سلول می‌گردد و یک نقش آنتی‌اکسیدانی در حفاظت از غشاهای بیولوژیک را دارد (Patakas *et al.*, 2002). محققان گزارش کردند سمیت بور باعث افزایش میزان پرولین در برگ پایه‌های رویشی کوئینس A و C گلابی شده ولی میزان پرولین در پایهٔ کوئینس A بیشتر از کوئینس C بود (Eraslan *et al.*, 2016). همچنین مطالعه‌های قبلی تأیید کردند در پایه‌های سیب با افزایش بور در محیط کشت مقدار پرولین برگ افزایش می‌یابد که این امر برای رفع سمیت ناشی از گونه‌های واکنش‌گر اکسیژن اهمیت دارد و این می‌تواند به پراکسیداسیون کمتر لیپید منجر شود (Molassiotis *et al.*, 2006).



شکل ۱۰- مقایسه میانگین اثر بور و پایه بر محتوای پرولین سیب. حروف متفاوت نشان‌دهندهٔ معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن می‌باشد ($P < 0.01$).

Figure 10. Mean comparison for boron and rootstock on proline. Different letters indicate statistical significance based on Duncan's multiple range test ($P < 0.01$).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که سطوح مختلف بور برخی از شاخص‌های رویشی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی را در پایه‌های مختلف رویشی و بومی سیب در واکنش به آن قرار می‌دهد. شاخص‌های رویشی بسته به نوع پایه و سطح بور عکس‌العمل متفاوتی نشان دادند، ولی اغلب شاخص‌های رویشی در سطوح بالاتر بور با کاهش مواجه شدند. با افزایش غلظت بور میزان تجمع بور، وزن تر و خشک اندام‌های هوایی و ریشه، میزان محتوای پروتئین محلول و محتوای کلروفیل a، b و کل کاهش یافت. اما سطوح محتلف تیمار بور محتوای گلایسین بتائین و پرولین را در پایه‌های مختلف افزایش داد. ارزیابی کلی پایه‌های رویشی در پاسخ به سطوح مختلف بور نشان داد که پایه‌های M26 و P22 نسبت به پایه‌های دیگر از لحاظ تحمل به سمیت بور برتر بودند و می‌توان از آنها در برنامه توسعه کشت در مناطقی با میزان بور بیش از ۲ میلی‌گرم در لیتر استفاده نمود.

سپاس‌گزاری

از آقایان کوروش طهماسبی و علیرضا نوروزی آذر به جهت همکاری در تجزیه‌های آزمایشگاهی، تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

Ali-Ehyaee, M., & Behbahani-Zadeh, A.A. (1997). Description of soil chemical analysis methods. Soil and Water Research Institute Technical publication. 1024 (2). [In Persian].

Asghari, M.R., Ghaffari Bagtash, H., Rasmiy, Y., & Farokhzad, A.R. (2015). The interaction of post-harvest salicylic acid and nitric oxide treatments on quality retention and marketability enhancement in red delicious apples. *Journal of Crop Production and Processing*, 4 (13), 51-62 [in Persian].

Bradford, M.M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1-2), 248-254. https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3

Chen, M., Mishra, S., Heckathorn, S.A., Frantz, J.M., & Krause, C. (2014). Proteomic analysis of Arabidopsis thaliana leaves in response to acute boron deficiency and toxicity reveals effects on photosynthesis, carbohydrate metabolism, and protein synthesis. *Journal of Plant Physiology*, 171(3-4), 235-242. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.07.008

Doganlar, Z.B., Demir, K., Basak, H., & Gul, I. (2010). Effects of salt stress on pigment and total soluble protein contents of three different tomato cultivars. *African Journal of Agriculture Research*, 5(15), 2056-2065.

Dubey, R., Gupta, D.K., & Sharma, G.K., (2020). Chemical Stress on Plants. New Frontiers in Stress Management for Durable Agriculture. Publisher Springer, PP. 101-128. https://doi.org/10.5897/AJAR10.258

El-Fekey, S.S., El-Shintinawy, F.A., & Shaker, E.M. (2014). Role of $CaCl_2$ and salicylic acid on metabolic activities and productivity of boron stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3 (2): 368-380.

Eraslan, F., Polat, M., Yildirim, A., & Kucukyumuk, Z. (2016). Physiological and nutritional responses of two distinctive Quince (*Cydonia oblonga* Mill) rootstocks to Boron toxicity. *Pakistan Journal of Botany*, 48(1), 75-80.

Furlani, Â.M.C., Carvalho, C.P., Freitas, J.G.D., & Verdial, M.F. (2003). Wheat cultivar tolerance to boron deficiency and toxicity in nutrient solution. Scientia Agricola, 60, 359-370. https://doi.org/10.1590/s0103-90162003000200022

Grieve, C. M., & Grattan, S. R. (1983). Rapid assay for determination of water-soluble quaternary ammonium compounds. *Plant and Soil*, 70, 303-307. https://doi.org/10.1007/BF02374789

Gunes, A., Inal, A., Bagci, E.G., Coban, S., & Sahin, O. (2007). Silicon increases boron tolerance and reduces oxidative damage of wheat grown in soil with excess boron. *Biologia Plantarum*, 51, 571-574. https://doi.org/10.1007/s10535-007-0125-6

Gunes, A., Soylemezoglu, G., Inal, A., Bagci, E.G., Coban, S., & Sahin, O. (2006). Antioxidant and stomatal responses of grapevine (*Vitis vinifera* L) to boron toxicity. *Science Horticulture*, 110, 279–284. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.07.014

Haddad, R., & Kamangar, A. (2015). The ameliorative effect of silicon and potassium on drought stressed grape (*Vitis vinifera* L.) leaves. *Iranian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 4(2), 48-58.

Hajebi, A.H., & Heidari-Sharifabad, H. (2005). Investigation of effect of drought on growth and nodulation of three species of clover. *Pajouhesh-va-sazandegi*, 13-22. Sid. https://sid.ir/paper/19927/en. [In Persian].

Hassani, G., Farrokhzad, A., Majidi, A., & Sepehr, E. (2020a). Evaluating some apple rootstocks in Boron toxicity condition using Morpho-physiological and biochemical indexes in soil. *Iranian Journal of Horticultural Science*. 52(1), 861-875. https://doi.org/10.22059/ijhs.2020.296200.1760 [In Persian].

Hassani, G., Majidi, A., Farrokhzad, A., & Sepehr, E. (2021b). Interactive Effect of Boron and Rootstock on the Growth, Physiological and Biochemical Characteristics Apple c.v. Golden Delicious. *Seed and Plant Production Journal.* 31(1).

Hsiao, T.C., & Xu, L.K. (2000). Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport. *Journal of Experimental Botany*, 51, 1595-1616. https://doi.org/10.1093/jexbot/51.350.1595

Huynh, B.L., Pallotta, M., Choi, E.Y., Garnett, T., Graham, R., & Stangoulis, J. (2009). Quantitative trait loci for reducing sugar concentration in the barley root tip under boron toxicity. *Bioresource Technology*, 101(22), 8891-8896.

Irigoyen, J.J., Einerich, D.W., & Sánchez-Díaz, M. (1992). Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in modulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Physiologia Plantarum*, 84(1), 55-60. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb08764.x

Jalili-Marandi, R., (2011). Physiology Of Environmental Stresses and Resistance Mechanisms in Garden Plants (Fruit Trees, Vegetables, Ornamental Plants and Medicinal Plants). Urmia University Academic Jihad Publications. 636. [In Persian].

Karabal, E., Yücel, M., & Öktem, H.A. (2003). Antioxidant responses of tolerant and sensitive barley cultivars to boron toxicity. *Plant Science*, 164(6), 925-933. https://doi.org/10.1016/s0168-9452(03)00067-0

Kaya, C., Tuna, A.L., Dikilitas, M., Ashraf, M., Koskeroglu, S., & Guneri, M. (2009). Supplementary phosphorus can alleviate boron toxicity in tomato. *Scientia Horticulturae*, 121(3), 284-288. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.02.011

Keles, Y., & Öncel, I. (2004). Growth and solute composition in two wheat species experiencing combined influence of stress conditions. *Russian Journal of Plant Physiology*, 51, 203-209. https://doi.org/10.1023/b:rupp.0000019215.20500.6e

Koutinase, N. (2013). Respone of the apple rootstocks M9, M26 and MM106 to Boron toxicity. *Acta Horticulturae*, 981, 471-474.

Lambers, H., Chapin, F.S., & Pons, T.L. (1998). Role in Ecosystem and Global Processes. In: Plant Physiological Ecology. Springer, New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2855-2_10

Lee, D.H., Kim, Y.S., & Lee, C.B. (2001). The inductive responses of the antioxidant enzymes by salt stress in the rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Plant Physiology*, 158, 737-745. https://doi.org/10.1078/0176-1617-00174

Lichtenthaler, H. K, (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic membranes. *Methods Enzymology*, 148, 350-383.

Macho-Rivero, M.A., Herrera-Rodríguez, M.B., Brejcha, R., Schäffner, A.R., Tanaka, N., Fujiwara, T., González-Fontes, A., & Camacho-Cristóbal, J.J. (2018). Boron toxicity reduces water transport from root to shoot in Arabidopsis plants. Evidence for a reduced transpiration rate and expression of major PIP aquaporin genes. *Plant and Cell Physiology*, 59(4), 841-849. https://doi.org/10.1093/pcp/pcy026

Majidi, A., & Malakouti, M.J., (2008). Boron toxicity in Urmia Lake around Orchards. Sana Publication. [In Persian].

Molassiotis, A., Sotiropolos, T., Tanou, G., Diamanitidis, G., &Therios, I. (2006). Boron-induced oxidative damage and antioxidant and nucleolytic responses in shoot tips culture of the apple rootstock EM 9 (*Malus domestica* Borkh). *Environmental and Experimental Botany*, 56, 54-62. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.01.002

Nable, R.O., Banuelos, G.S., & Paull, G. (1997). Boron toxicity. *Plant and soil*, 193, 181- 198.

Nezamdoost, S., Farrokhzad, A. & Rasouli-Sadaghiani, M.H. (2017). Effect of potasium silicate on reduction of boron accumulation and oxidative damages in grape (*Vitis vinifera* cv. Bidaneh Sefid) under boron toxicity stress. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 48(2), 391-401. https://doi.org/10.22059/ijhs.2017.140928.922 [In Persian].

Oraei, M., Tabatabaei, S.J., Fallahi, E., & Imani, A. (2012). The effects of boron stress on growth, physiological characteristics and the distribution of boron in scion-rootstock combination of almond (*Prunus dulcis* Mill). *Journal of Horticultural Sciences*, 26, 440-447. https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.18259 [In Persian].

Paparankis, A., Chatzissavvidis, C., & Antoniadis, V. (2013). How apple responds to boron excess in acidic and limed soil. *Journal of Soil Sscience and Plant Nutrition,* (4), 787- 796.

Paquin, R., & Lechasseur, P. (1979). Observations on a method of dosing free proline in plant extracts. *Canadian Journal of Botany*, 57(18), 1851-1854.

Patakas, A., Nikolaou, N., Zioziou, E., Radoglou, K., & Noitsakis, B. (2002). The role of organic solute and ion accumulation in osmotic adjustment in drought-stressed grapevines. *Plant Science*, 163(2), 361-367. https://doi.org/10.1016/s0168-9452(02)00140-1

Reid, R. (2014). Understanding the boron transport network in plants. *Plant and Soil*, 385, 1-13. https://doi.org/10.1007/s11104-014-2149-y

Rostami, H., Tabatabai, S.J., Zare Nahandi, F., & Hajiloo, J, (2013). Concentrations of boron (B) on the growth and phisiological characteristics of olives. *Journal of Horticultural Science*, 27, 26-18. https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.20781 [In Persian].

Sakamoto, A., & Murata, N. (2002). The role of glycine betaine in the protection of plants from stress: clues from transgenic. *Plant Cell and Environment*, 25 (2), 163-171. https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00790.x

Saleem, M., Yusop, M.K., Ishak, F., Samsuri, A.W., & Hafeez, B. (2011). Boron fertilizers borax and colemanite application on rice and their residual effect on the following crop cycle. *Soil Science and Plant Nutrition*, 57(3), 403-410. https://doi.org/10.1080/00380768.2011.582589

Sarabandi, M., Farrokhzad, A., Abdulahi, B. & Ghasim-zadeh, R. (2019). The effect of methyl jasmonate foliar application on some vegetative indicators of two grape varieties under boron toxicity conditions. P. 1-9. Second International Conference on Medicinal Plants, Organic Agriculture. 13 March 2019, Mashhad, Iran. [In Persian].

Schobert, B. (1977). Is there an osmotic regulatory mechanism in algae and higher plants? *Journal of Theoretical Biology*, 68(1), 17-26. https://doi.org/10.1016/0022-5193(77)90224-7

Sotiropoulos, T.E., Fotopoulos, S., Dimassi, K.N., Tsirakoglou, V., & Therios, I.N. (2006). Response of the pear rootstock to boron and salinity *in vitro*. *Biologia Plantarum*, 50, 779-781. https://doi.org/10.1007/s10535-006-0130-1

Tanaka, M., & Fujiwara, T. (2008). Physiological roles and transport mechanisms of boron: perspectives from plants. *Pflügers Archiv-European Journal of Physiology*, 456(4), 671-677. https://doi.org/10.1007/s00424-007-0370-8

Tariq, M., & Mott, C.J.B. (2007). The Significance of Boron in Plant Nutrition and Environment-*A Review*. *Journal of Agronomy*, 6(1), 1–10. https://doi.org/10.3923/ja.2007.1.10.

Wang, J.Z., Tao, S.T., Qi, K.J., Wu, J., Wu, H.Q., & Zhang, S.L. (2011). Changes in photosynthetic properties and antioxidative system of pear leaves to boron toxicity. *African Journal of Biotechnology*. 10(85), 19693- 19700. https://doi.org/10.5897/AJB11.2608

Wolf, B. (1974). Improvement in the azomethine-H method for the determination of boron. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 5: 39-44. https://doi.org/10.1080/00103627409366478

Xiong, L., & Zhu, J.K. (2002). Molecular and genetic aspects of plant responses to osmotic stress. *Plant, Cell and Environment*, 25(2), 131-139. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00782.x

Yau, S.K., & Ryan, J. (2008). Boron toxicity tolerance in crops: a viable alternative to soil Amelioration. *Crop Sciences.* 48(3), 854- 865. https://doi.org/10.2135/cropsci2007.10.0539