بررسی کارایی جذب بور در کاهو، اسفناج و چغندر برگی

فاطمه اکبرنژاد، رضا خراسانی[1] و امیر فتوت

دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ fatemeh.akbarnezhad@mail.um.ac.ir

دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ khorasani@um.ac.ir

استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ Afotovat@um.ac.ir

ص 275 - 288

دریافت: 1401/2/21 و پذیرش: 1401/6/6

چکیده

بور یکی از عناصر محدود کننده رشد در خاک‌های آهکی بوده و کمبود آن اثرات جبران‌ناپذیری را بر رشد و عملکرد گیاهان بر جای خواهد گذاشت. گیاهان مختلف کارایی‌های متفاوتی در جذب بور داشته و سازوکارهای متعددی را برای این منظور بکار می‌برند. به منظور بررسی راهکارهای مختلف گیاهان در افزایش کارایی جذب و استفاده از بور، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. آزمایش با سه سطح بور (صفر=B_0، 1/5 =$B_{1.5}$ و3=B_3 کیلوگرم در هکتار) از منبع اسید بوریک و سه گیاه (کاهو، اسفناج و چغندر برگی) اجرا شد. نتایج نشان داد که با افزایش سطوح بور نسبت به شاهد، وزن خشک اندام هوایی در گیاهان افزایش یافت. بیشترین زیست توده اندام هوایی برای کاهو در سطح (B_3)، و به میزان 32% بود که نشان می‌دهد کاهو نسبت به افزایش سطوح بور پاسخ بیشتری داشته است. تفاوت غلظت بور در اسفناج (61/8 میلی گرم بر کیلوگرم) و چغندر برگی (71/4 میلی گرم بر کیلوگرم)، نسبت به کاهو (31 میلی گرم بر کیلوگرم)، در شرایط کمبود بور (B_0)، بیانگر اهمیت خصوصیات ریشه و عوامل مؤثر در حلالیت و افزایش جذب بور از قبیل تراوشات ریشه بود. میزان غلظت و جذب بور در اندام هوایی و ریشه در اسفناج نسبت به کاهو و چغندر برگی، بیشتر تحت تأثیر سطوح بور قرار گرفت، بطوریکه در گیاه اسفناج در سطح 3 کیلوگرم در هکتار، غلظت بور در اندام هوایی و ریشه به ترتیب 44% و 30% و جذب در اندام هوایی و ریشه به ترتیب 53% و 37% نسبت به شاهد افزایش داشت. بطور کلی، ورودی (اینفلاکس) زیاد بور به اسفناج و چغندر برگی و ورودی (اینفلاکس) کمتر آن به کاهو دلیلی بر کارایی متفاوت این گیاهان در جذب بور بود.

واژه‌های کلیدی: اینفلاکس (جریان ورودی)، سبزیجات برگی، سطح ریشه، طول ریشه، کوددهی بور

[1]. نویسنده مسئول، آدرس: مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، گروه علوم خاک

مقدمه

بور یکی از عناصر غذایی ضروری برای رشد و توسعه گیاهان بوده و کمبود آن از محدودیت‌های مهم تغذیه‌ای برای گیاه محسوب می‌گردد (کاماکو-کریستوبال و همکاران، 2008؛ کوشیبا و همکاران، 2009). کمبود بور پس از عنصر غذایی روی، دومین محدودیت بین عناصر غذایی کم مصرف در سطح دنیا می‌باشد که منجر به کاهش شدید عملکرد رویشی و زایشی گیاه می‌شود (پاندی و همکاران، 2017). از نقش‌های مهم بور می‌توان به ساخت دیواره سلولی، لیگنینی شدن دیواره سلولی، انتقال قندها، سوخت و ساز کربوهیدرات‌ها، سوخت و ساز فنل‌ها و اکسین، تولید دانه و عملکرد غشا و طویل شدن ریشه اشاره کرد (مارشنر، 2012). فراهمی بور به عوامل متعددی مانند شرایط آب و هوایی، شرایط خاک و گونه‌های مختلف گیاهی بستگی دارد (ویل و همکاران، 2011). کمبود بور به عنوان یک عنصر پر اهمیت در گیاهان، بخصوص در خاک‌های قلیایی و آهکی، مشکل گسترده‌ای است که امروزه با آن مواجه هستیم (وانگ و همکاران، 2015). همچنین در ایران، در خاک‌های آهکی زیر کشت محصولات مختلف در بین عناصر کم مصرف، کمبود بور پس از روی می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری را به گیاه وارد کند (ملکوتی، 1393).

از سوی دیگر، تحمل گیاهان به کمبود بور در خاک بطور بارزی بستگی به گونه گیاهی دارد، بطوریکه در این شرایط رشد و توسعه گیاهان در بین گونه‌های مختلف گیاه و ژنوتیپهای مختلف، متفاوت بوده و کمبود بور اثرات مخرب کمتری را بر گونه‌های کارا خواهد داشت (پولین و المحمد، 1995). بنابراین یکی از رویکردهای ترجیحی در شرایط کمبود بور کاشت گیاهان کارا بوده که می‌توانند به خوبی در خاک‌های با مقادیر کم بور رشد کنند. تفاوت میان گونه‌های مختلف گیاه از لحاظ بهره‌وری و کارایی عنصر می‌تواند بر اساس تغییرات در کارایی جذب و نیاز متفاوت آنها باشد (هو و براون، 1997). کارایی جذب عناصر غذایی بستگی به سیستم ریشه و شدت جذب عنصر از بخش مشخص از ریشه (اینفلاکس یا جریان به داخل[1]) دارد (سادانا و همکاران، 2005؛ فرناندس و همکاران، 2014). خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی ریشه بر جذب عناصر غذایی مؤثر بوده و هنگامی که دسترسی ریشه به عناصر غذایی محدود باشد، می‌توان ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه را عامل مهمی در نظر گرفت، زیرا این ویژگی‌ها مستقیماً در پاسخ گیاه با تغییرات فراهمی عناصر غذایی ارتباط دارند (باتیستا و همکاران، 2016). می و همکاران (2011) نیز گزارش کردند که همبستگی مثبت معنی‌داری بین خصوصیات ریشه از قبیل طول تجمعی ریشه، سطح ریشه و تعداد ریشه‌های جانبی در جذب بور وجود دارد. از سوی دیگر علاوه بر خصوصیات ریشه، اینفلاکس یا شدت جذب عنصر از بخش مشخصی از ریشه در زمان، در بین گونه‌ها و ارقام گیاهی متفاوت است که بستگی به پارامترهای مختلف از جمله جذب و طول سیستم ریشه دارد. کارایی گیاهان مختلف نسبت به بور، با میزان جذب بور (کارایی جذب بور[2])، در ارتباط است و توانایی جذب بور، پایه و اساس کارایی و راندمان بور است (وانگ و همکاران، 2015؛ لی لی و همکاران، 2015).

با این حال، گونه‌ها و ارقام مختلف تحت شرایط محیطی یکسان بطور فاحشی در جذب بور با یکدیگر اختلاف دارند (بلالوئی و براون، 1998). گونه‌های زراعی ظرفیت‌های بسیار متفاوتی را برای رشد در خاک‌هایی که مقدار بور ناچیزی دارند نشان می‌دهند. حتی بین ارقام نزدیک از همان گونه‌ها تنوع قابل‌توجهی برای رشد وجود دارد. مکانیسم‌های زیربنایی این تفاوت‌ها ناشناخته است. استانگولیس و همکاران (2001) گزارش کردند که قابلیت بیشتر گیاه برای جذب بور از خاک، استفاده کارآمدتر از بور و توانایی بیشتر در انتقال بور از ریشه به اندام هوایی می‌توانند از مکانیسم‌های مهم در این

1. Influx
2. Uptake efficiency

امر باشند. از سوی دیگر توزیع بور در بسیاری از گونه‌های گیاهان به سختی انجام می‌شود و حتی یک وقفه کوچک در تأمین عنصر از خاک ممکن است سبب کاهش رشد و عملکرد گیاه شود که میزان کاهش عملکرد مستقیماً به مدت زمان کمبود و مرحله رشد گیاه بستگی دارد (علی و همکاران، 2015). در شرایط کمبود بور، کاربرد کودهای شیمیایی سبب برطرف شدن کمبود خواهد شد اما مشکلات احتمالی از قبیل ایجاد سمیت بور را نیز بایستی در نظر گرفت، زیرا محدوده کمبود و سمیت این عنصر بسیار نزدیک است. با توجه به مطالب گفته شده کشت گیاهان کارا در شرایط کمبود بور می‌تواند یکی از راهکارهای مهم در افزایش جذب و افزایش عملکرد باشد. بدین منظور این مطالعه با هدف بررسی تغییرات در زیست توده، غلظت و جذب بور، رابطه بین جذب و خصوصیات ریشه در گیاه و اینفلاکس و استراتژیهای مختلف اسفناج، کاهو و چغندر برگی در جذب و استفاده از بور انجام شد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه نوع گیاه از خانواده صیفی‌جات شامل کاهو (*Lactuca sativa L.*) ، اسفناج (*Spinacia oleracea L.*) و چغندربرگی(*Beta vulgaris subsp. Cicla L.*) با نیاز متوسط به بور و سه سطح غلظتی بور شامل سطح صفر (شاهد)، 1/5 کیلوگرم در هکتار و 3 کیلوگرم در هکتار (B_0, $B_{1.5}$, B_3)، از منبع اسید بوریک حاوی 17 درصد بور، در دو برداشت و سه تکرار در گلخانه‌ی تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد اجرا شد. نمونه خاک سطحی (30-0 سانتی متری) بر اساس حداقل میزان بور قابل استفاده از دانشگاه فردوسی مشهد واقع در عرض جغرافیایی 36 درجه و 18 دقیقه و 29 ثانیه شمالی و طول جغرافیایی 59 درجه و 31 دقیقه و 52 ثانیه شرقی، نمونه برداری گردید. توصیه کودی لازم برای عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم و بر اساس آنالیز خاک و نیاز گیاهان به تمام تیمارها اضافه شد. برای آماده سازی تیمارها جهت کشت گیاهان از گلدان‌های پلاستیکی با قطر 23 سانتی متر و ارتفاع 21 سانتی متر استفاده گردید. بر اساس وزن خاک درون هر گلدان (5 کیلوگرم) و بر اساس نیاز گیاهان به بور، مقادیر 11 و 22 میلی گرم به ترتیب برای تیمارهای 1/5 و 3 کیلوگرم در هکتار بور از منبع اسید بوریک قبل از کاشت به صورت خاکی استفاده گردید و سطح صفر (شاهد) فاقد افزودن کود بور بود (بارکر و پیلبیم، 2015). پس از آماده‌سازی تیمارها کشت گیاه صورت گرفت. آبیاری بر مبنای ظرفیت زراعی (17 درصد) وزنی در طول دوره رشد انجام شد. پس از طی 60 روز از کاشت، برداشت اول با تعداد 10 بوته در گلدان برای هر سه گیاه انجام شد. برداشت دوم با تعداد 4 بوته در گلدان برای گیاهان پس از 90 روز انجام شد. در هر برداشت اندام هوایی از ریشه‌ها جدا شد. پس از جداسازی تمامی ریشه‌ها از گلدانها و شست و شوی کامل آنها خصوصیات مورفولوژیکی ریشه از قبیل طول تجمعی ریشه، سطح ریشه و میانگین قطر ریشه با استفاده از دستگاه DELTA-T SCAN و نرم افزار پردازش تصویر DT-SCAN اندازه‌گیری شد. وزن خشک اندام هوایی و ریشه تعیین گردید.

برای اندازه‌گیری بور، نمونه‌های خشک گیاهی در کوره در دمای 550 درجه سانتی گراد به مدت 7 ساعت هضم شدند و سپس غلظت بور موجود در اندام هوایی و ریشه به روش رنگ‌سنجی با استفاده از آزومتین اچ و با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج 420 نانومتر اندازه‌گیری شد (ولف، 1974). نتایج به دست آمده به کمک نرم افزار آماری GUMP 8 تجزیهٔ واریانس شده و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح اطمینان 5 درصد بررسی شد. ترسیم نمودارها به کمک نرم افزار Excel انجام شد. مقدار اینفلاکس گیاهان با توجه به فرمول (ویلیامز، 1948) محاسبه شد.

$$In = \frac{U2-U1}{RL2-RL1} \times \frac{\ln(RL2/RL1)}{t2-t1}$$

در فرمول بالا، I_n اینفلاکس یا مقدار عنصری که از واحد طول ریشه در واحد زمان عبور می کند (میلی مول بر سانتی متر بر ثانیه)، U مقدار عنصر جذب شده توسط گیاه (میلی مول بر گیاه)، RL طول ریشه (سانتی متر)، t زمان (ثانیه) و اندیس 1و2 بیانگر دو برداشت متوالی در زمان 60 و 90 روز پس از کشت است.

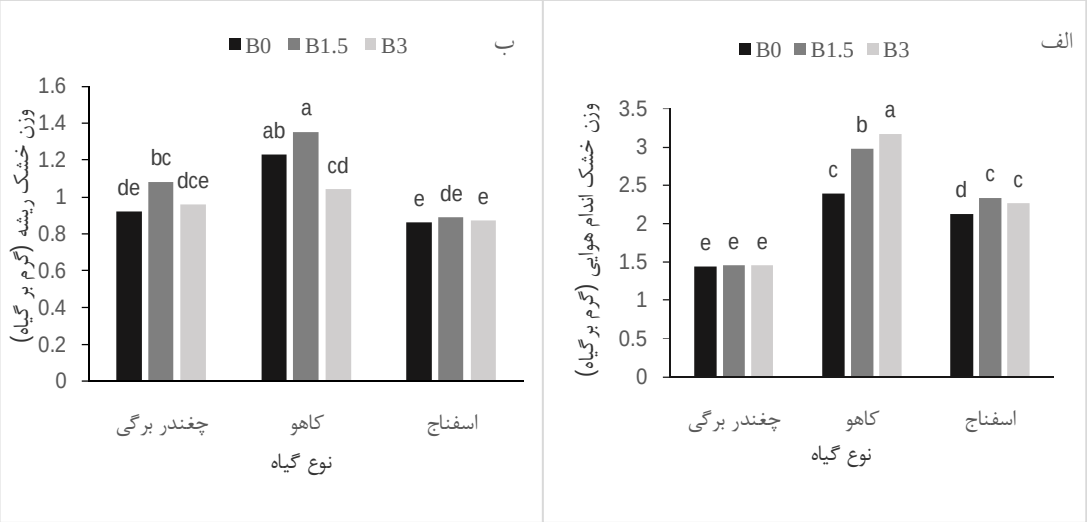
جدول 1- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

بافت	کربن آلی	کربنات کلسیم	هدایت الکتریکی	pH	نیتروژن کل	فسفر قابل استفاده	پتاسیم قابل استفاده	بور قابل استفاده
-	%	%	$dS\ m^{-1}$	-	%	$mg\ kg^{-1}$	$mg\ kg^{-1}$	$mg\ kg^{-1}$
لوم	0/48	15/25	1/42	7/72	0/03	10/6	160/8	0/42

نتایج و بحث

وزن خشک اندام هوایی و ریشه

با توجه به شکل 1- الف، با افزایش سطوح بور، وزن خشک اندام هوایی در کاهو و اسفناج افزایش یافت اما تفاوت معنی‌داری بین سطوح مختلف بور بر وزن خشک اندام هوایی چغندر برگی مشاهده نشد. بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی با اضافه شدن سطوح بور نسبت به شاهد (B_0) در کاهو در سطح ($B_{1.5}$) به مقدار 24 درصد و در سطح (B_3) به میزان 32 درصد مشاهده شد. در حالیکه این افزایش در اسفناج در سطح ($B_{1.5}$) و (B_3) به ترتیب 10 درصد و 6 درصد بود. به عبارتی می‌توان بیان کرد کاهو در مقایسه با دو گیاه دیگر، نسبت به افزایش سطوح بور پاسخ بیشتری از خود نشان داده است. سرکار و همکاران (2007) بیان کردند در مقایسه چند گیاه، زمانی که افزایش عملکرد گیاهی حتی با مقادیر ناچیز بور بیشتر باشد می‌توان آن را به عنوان کاراترین گیاه در نظر گرفت. ژنوتیپ‌هایی از پنبه که تحت شرایط کمبود بور قرار گرفتند با اینکه غلظت بور کمتری را در بافتهای خود دارا بودند اما زیست توده بیشتری تولید کردند که نشان دهنده کارایی استفاده بیشتر این ژنوتیپ‌ها از بور است، درحالیکه ژنوتیپ‌هایی که زیست توده کمتری تولید کردند کارایی استفاده کمتری از بور داشتند (شاه و همکاران، 2014). با توجه به غلظت کم بور در اندام هوایی کاهو (شکل3- الف) و زیست توده بیشتر (شکل 1- الف) در مقایسه با اسفناج و چغندر برگی، می‌توان نتیجه گرفت که کاهو کارایی استفاده بیشتری از بور داشته است. با توجه به شکل 1- ب، وزن خشک ریشه همانند وزن خشک اندام هوایی در کاهو بیشتر از دو گیاه دیگر بود. وزن خشک ریشه نسبت به سطح صفر (B_0) در هر سه گیاه در سطح 1/5کیلوگرم در هکتار ($B_{1.5}$) افزایش داشت اما در سطح 3 کیلوگرم در هکتار (B_3) وزن خشک ریشه نسبت به شاهد کاهش یافت. با افزودن بور، عملکرد بخش‌های مختلف (ریشه، ساقه و برگ) گیاهان خردل، گندم و سیب زمینی نسبت به شاهد افزایش یافت اما میزان این افزایش برای گیاهان متفاوت بود (سرکار و همکاران، 2007). از سوی دیگر ممکن است سطوح بالای بور سبب کاهش زیست توده اندامهای مختلف گیاه از جمله ریشه گردد. در تحقیقی نشان داده شد که وزن خشک ریشه در دو رقم ریحان شیرین در سطوح بالای بور (20 میلی گرم بر لیتر) نسبت به شاهد (0/25 میلی گرم بر لیتر) به مقدار 53 و 39 درصد کاهش یافت (پاردوسی و همکاران، 2015).



شکل 1- برهمکنش اثرات گیاه و سطوح بور بر وزن خشک اندام هوایی (الف) و ریشه (ب)

حروف مشترک در ستون‌ها، طبق آزمون دانکن نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح 5 درصد است.

تخصیص زیست توده بیشتر به ریشه‌ها که از نظر متابولیکی در به دست آوردن بور مؤثر هستند، مکانیسمی برای سازگاری با محدودیت بور می‌باشد. در شرایط کمبود بور گیاهان نسبت کربن بیشتری را به ریشه‌ها اختصاص داده و زیست توده ریشه کمتر کاهش یافته است. اصولا برگهای گیاه غلظت بیشتری از بور را در خود جذب می‌کنند، در نتیجه در گیاهانی که نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی بیشتر است مصرف بور برای ساخت برگها کمتر شده و فراهمی بور برای گیاه بیشتر می‌شود (می و همکاران، 2011). با توجه به شکل 1، در شرایط کمبود بور (B_0)، وزن خشک ریشه و اندام هوایی به ترتیب در چغندر برگی 0/92 و 1/42، در کاهو 1/23 و 2/39 و در اسفناج 0/86 و 2/13 گرم بر گیاه می‌باشد و نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی در چغندربرگی (0/64) در مقایسه با کاهو (0/51) و اسفناج (0/40) بیشتر بوده که می‌توان نتیجه گرفت چغندر برگی می‌تواند با این مکانیسم شرایط کمبود بور را بهتر تحمل کند. فرناندس و همکاران (2014) بیان کردند با کاهش فراهمی فسفر نسبت زیست توده ریشه به اندام هوایی در برخی رقم‌های سیب‌زمینی افزایش یافت که یکی از راههای سازگاری برای جبران کمبود فسفر است.

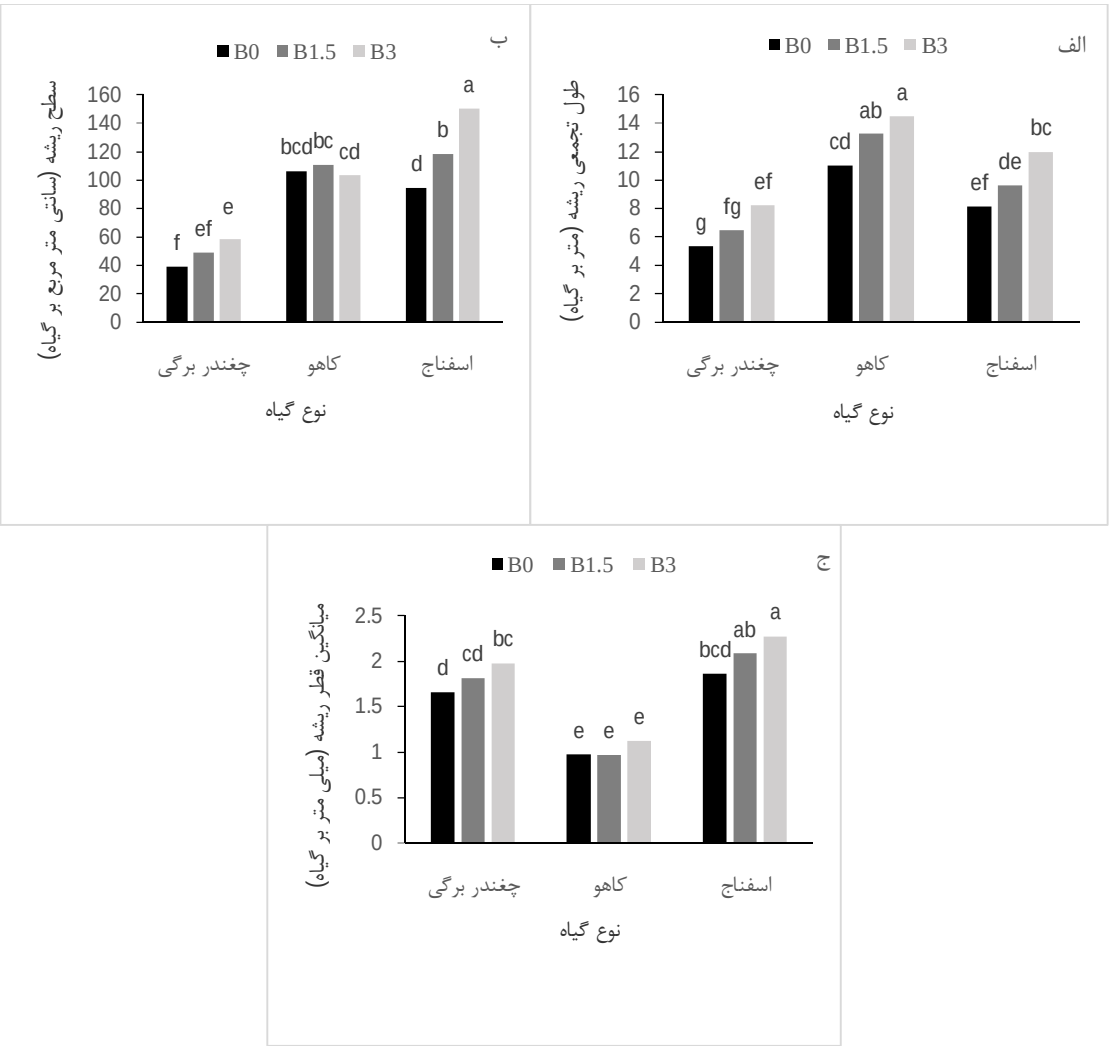
خصوصیات مورفولوژیکی ریشه

با توجه به شکل 2- الف، با افزایش سطوح بور، طول تجمعی ریشه افزایش یافت، بطوریکه کمترین طول تجمعی ریشه برای هر سه گیاه در سطح صفر (B_0) مشاهده شد. طول تجمعی ریشه چغندربرگی و اسفناج تنها در سطح 3 کیلوگرم در هکتار از بور افزایش معنی‌داری را نسبت به شاهد نشان داد. اما در کاهو، طول ریشه در سطح 1/5 و 3 کیلوگرم بور در هکتار، افزایش معنی‌داری نسبت به سطح صفر داشت. افزایش طول تجمعی ریشه در سطح (B_3) نسبت به شاهد (B_0) به ترتیب در چغندر برگی (54 درصد)، اسفناج (47 درصد) و کاهو (31 درصد) مشاهده گردید. تحقیقات نشان داده است که به دلیل نقش مهم و اساسی بور در انسجام دیواره سلولی و طویل شدن ریشه، در شرایط کمبود بور طول تجمعی ریشه کاهش یافت (اونیل و همکاران، 2004). بطور کلی، در شرایط کمبود بور (B_0)، طول تجمعی ریشه در کاهو نسبت به اسفناج (1/3) و نسبت به چغندر برگی (2 برابر) بیشتر بود که با افزایش سطوح بور نیز این روند

افزایشی در طول تجمعی ریشه در کاهو نسبت به اسفناج و چغندر برگی مشاهده شد. شاید زیست توده بیشتر اندام هوایی کاهو نیز در این شرایط با گستردگی سیستم ریشه در ارتباط باشد. ویشارت و همکاران (2014) بیان کردند هر چه سیستم ریشه گستردگی بیشتری داشته باشد کاهش عملکرد اندام هوایی گیاه کمتر خواهد شد. با توجه به شکل 2- ب، افزایش سطوح بور، سبب افزایش سطح ریشه در هر سه گیاه گردید، اما این افزایش در اسفناج و چغندر برگی معنی‌دار بود و در کاهو ارتباط معنی‌داری بین سطوح بور بر سطح ریشه مشاهده نشد.

در شرایط کمبود بور (B_0) کمترین سطح ریشه متعلق به چغندر برگی بود و اسفناج و کاهو سطح ریشه بیشتری نسبت به چغندر برگی داشتند (حدود 3 برابر). در شرایط کمبود بور، رشد و توسعه ریشه کاهش یافته و در نتیجه در راستای کاهش طول ریشه، سطح ریشه نیز کاهش پیدا می‌کند. در بالاترین سطح بور (B_3)، سطح ریشه در چغندر برگی و اسفناج به ترتیب 48 و 58 درصد نسبت به شاهد (B_0) افزایش یافت. بطور کلی می‌توان با توجه به افزایش طول و سطح ریشه با افزایش سطوح بور، به اهمیت بور در افزایش خصوصیت مورفولوژیکی ریشه در گیاهان پی برد. با توجه به شکل 2- ج، با افزودن سطوح بور اختلاف معنی‌داری در قطر ریشه در کاهو مشاهده نگردید، اما قطر ریشه چغندر برگی و اسفناج افزایش یافت. باتیستا و همکاران (2016) گزارش کردند 99 درصد جذب عناصر غذایی اغلب در ریشه هایی با قطر کمتر از 3 میلی متر صورت گرفته که بیشترین جذب مربوط به ریشه‌هایی با قطر کمتر از یک میلی متر است. کاهو کمترین میانگین قطر ریشه (0/98 میلی متر) را نسبت به اسفناج و چغندر برگی داشت. بطور کلی تأثیر طول و سطح ریشه در جذب عناصر غذایی بیشتر از قطر ریشه می‌باشد. استنگروب و شنک (1991) نشان دادند که میانگین قطر ریشه (0/12 میلی متر) خصوصیت مؤثری در افزایش کارایی جذب نیترات در اسفناج و کلم قمری نبوده، بلکه افزایش ریشه‌های موئینه و بالتبع افزایش سطح ریشه عوامل مهم در افزایش کارایی جذب نیترات بودند. در مطالعه‌ای نشان داده شد که ژنوتیپ‌های مرکبات پاسخ-های متفاوتی را در ارتباط با خصوصیات مورفولوژیکی ریشه نسبت به بور داشتند. بطوریکه در برخی از ژنوتیپ-ها حضور و یا عدم حضور بور تأثیر معنی‌داری بر طول و سطح ریشه نداشت اما در برخی دیگر تأثیر بور بر این ویژگی‌ها بسیار مشهود بود. اما بطور کلی کمبود بور سبب کاهش طول تجمعی ریشه و سطح ریشه در اکثر ژنوتیپ-های مرکبات شد.

می‌توان نتیجه گرفت تفاوت در مورفولوژی ریشه‌های مرکبات تعیین کننده توانایی آنها برای جذب بور از محلول غذایی بود و همبستگی معنی‌داری بین خصوصیات ریشه و جذب خالص بور وجود داشت. بطوریکه در شرایط کمبود بور طول و سطح ریشه در برخی از گونه‌های مرکبات کاهش یافت در حالیکه در برخی دیگر از این گونه‌ها حتی در شرایط کمبود بور تغییری در خصوصیات ریشه ایجاد نگردید (می و همکاران، 2011). سورگانا و همکاران (2005) بیان کردند که خصوصیات متفاوت ریشه سبب توانایی متفاوت گیاهان برای جذب بور می‌شود و همبستگی مثبت معنی‌داری بین سطح ریشه، طول ریشه و جذب بور وجود دارد. همچنین خصوصیات مورفولوژیکی ریشه می‌تواند بر کارایی جذب بور و تحمل گیاه در شرایط کمبود بور اثرگذار باشد.



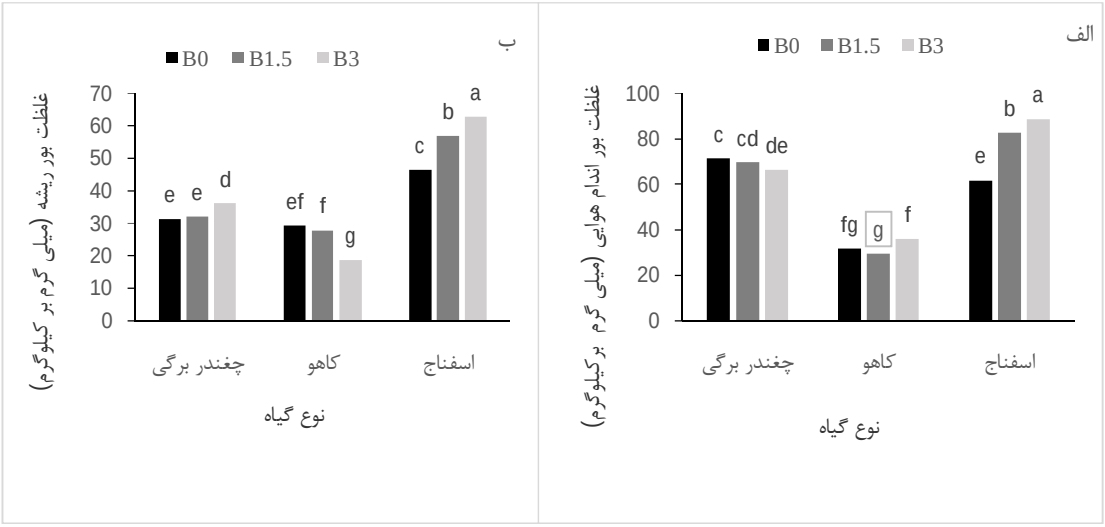
شکل 2- برهمکنش اثرات گیاه و سطوح بور بر طول تجمعی ریشه (الف)، سطح ریشه (ب) و میانگین قطر ریشه(ج)

حروف مشترک در ستون‌ها، طبق آزمون دانکن نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح 5 درصد است.

غلظت بور اندام هوایی و ریشه

شکل3- الف، نشان می‌دهد که با افزایش سطوح بور اختلاف معنی‌داری بین غلظت بور در اندام هوایی کاهو نسبت به شاهد مشاهده نشد. چغندربرگی در سطح 3 کیلوگرم در هکتار (B_3) کاهش معنی‌داری نسبت به شاهد (B_0) داشت (7درصد). یکی از دلایل کاهش غلظت بور در اندام هوایی گیاه، افزایش زیست توده گیاه است. اما با توجه به اینکه با افزایش سطوح بور اختلاف معنی‌داری در وزن خشک اندام هوایی گیاه مشاهده نشد (شکل1)، احتمالاً تخصیص بیشتر زیست توده گیاه به ریشه‌ها در سطوح بالای بور و افزایش فراهمی بور برای ریشه سبب کاهش غلظت بور اندام هوایی در سطوح بالای بور در چغندر برگی شده است. غلظت بور در اندام هوایی اسفناج در سطح 1/5 ($B_{1.5}$) و 3 کیلوگرم در هکتار (B_3) به ترتیب 34 و 44 درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. بطور کلی، اسفناج و چغندر برگی بیشترین غلظت بور اندام هوایی را دارا بودند و کاهو کمترین غلظت بور را در اندام هوایی خود داشت. در شرایط کمبود بور (B_0)، اسفناج با غلظت (61/8 میلی گرم بر کیلوگرم) و چغندر برگی (71/4 میلی گرم بر کیلوگرم) توانستند از مقدار کم بور موجود در خاک، نیاز خود را تأمین کنند اما غلظت بور در اندام هوایی کاهو (31 میلی گرم بر کیلوگرم) در

محدوده بحرانی قرار گرفت (خوشگفتارمنش، 1386). اگر فراهمی عناصر غذایی برای گیاه کم باشد، گیاهان با افزایش کارایی فیزیولوژیکی جذب و یا سازگاری خصوصیات ریشه، می‌توانند این کمبود را جبران کنند (استنگروب و شنک، 1991). با توجه به شکل 2، خصوصیات مورفولوژیکی ریشه از جمله طول و سطح بیشتر ریشه در اسفناج می‌تواند عامل مهمی در افزایش غلظت بور در شرایط کمبود بور باشد. اما در چغندر برگی طول و سطح کم ریشه در افزایش غلظت بور در شرایط کمبود بور نقشی نداشته و احتمالاً عوامل مهم دیگری دخیل هستند. مطالعات نشان دادند که تحت تأثیر کمبود عناصر غذایی در خاک تراوشات ریشه از قبیل قندها، اسیدهای آلی و اسیدهای آمینه می‌توانند در حلالیت عناصر غذایی تأثیرگذار باشند (کاروالیس و همکاران، 2011؛ ورانوا و همکاران، 2013). همچنین در مطالعه‌ای نشان داده شد که کمبود بور بر تراوشات ریشه از قبیل قندهای محلول و آمینو اسیدها در رقم‌های کلزا تأثیر داشت (کائو و همکاران، 1997). از سوی دیگر توانایی تشکیل کمپلکس اسید بوریک (H_3BO_3) و بورات $B(OH)_4^-$ که دو فرم قابل جذب بور در خاک هستند با کربوهیدراتها، آمینو اسیدها، اسیدهای آلی و برخی ترکیبات دیگر گزارش شده است (کوزه و زومری اوغلو-کارن، 2012). با توجه به مطالب بیان شده، احتمالاً تراوشات ریشه در شرایط کمبود بور توانسته است سبب افزایش غلظت بور در چغندر برگی شود. با توجه به شکل 3- ب، غلظت بور ریشه چغندربرگی و کاهو در سطح 3 کیلوگرم در هکتار به ترتیب افزایش (16 درصدی) و کاهش (25 درصدی) نسبت به شرایط کمبود بور (B_0) داشت. اما با افزایش سطوح بور، غلظت بور ریشه اسفناج (16 تا 30 درصد) نسبت به شاهد (B_0) افزایش داشت. بطور کلی کاهو نسبت به چغندربرگی و اسفناج کمترین غلظت بور را در اندام هوایی و ریشه دارا بود.



شکل 3- برهمکنش اثرات گیاه و سطوح بور بر غلظت بور اندام هوایی (الف) و ریشه (ب)
حروف مشترک در ستون‌ها، طبق آزمون دانکن نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح 5 درصد است.

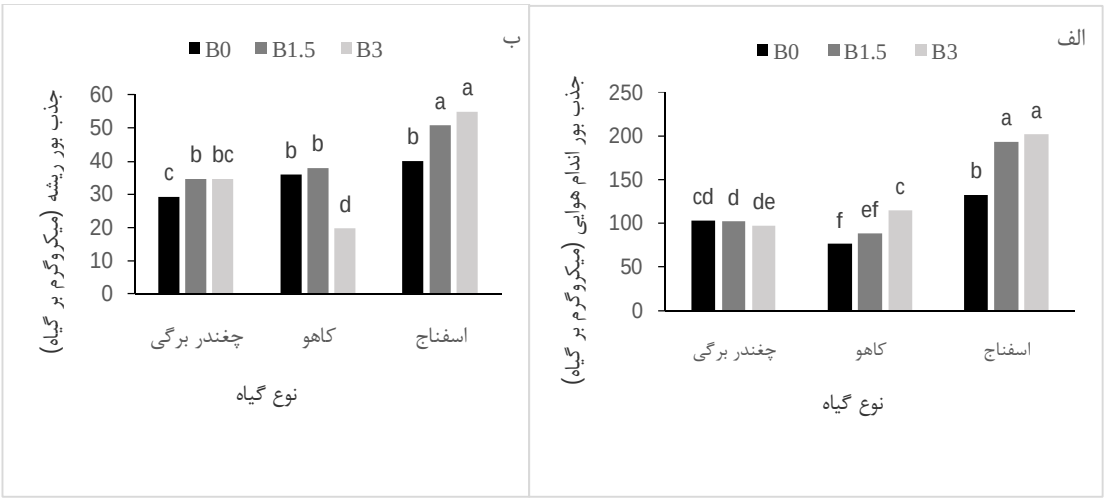
در پژوهشی بیان شد، تفاوت در افزایش چشمگیر غلظت بور در گیاهان خردل (34 درصد)، گندم (71 درصد) و سیب زمینی (80 درصد) نسبت به شاهد، با افزودن بور از طریق روش‌های مختلف کوددهی، نشان دهنده توانایی متفاوت آنها در جذب بور می‌باشد (سرکار و همکاران، 2007). همچنین در مطالعه‌ای دیگر بیان شد، تفاوتهای مشاهده شده در غلظت بور در گیاهان جو، گندم و کلزا احتمالاً نشانگر مکانیسم‌های مختلف برای جذب

بور است (مولباچووا، 2018). از سوی دیگر، بلالوئی و براون (1998) بیان کردند که غلظت کم و یا زیاد بور در گیاهان مختلف به تفاوت در نفوذپذیری غشا که در ارتباط با ترکیبات غشا و دیواره سلولی است، مربوط می‌شود. ترکیبات مختلف در دیواره سلولی گیاهان و توانایی مختلف آنها برای کمپلکس کردن بور می‌تواند بر غلظت بور تأثیرگذار باشد بطوریکه گونه‌های گیاهی با مقادیر بالای این ترکیبات نیاز بیشتری به بور دارند.

جذب بور اندام هوایی و ریشه

با توجه به شکل4- الف، با افزایش سطوح بور، اختلاف معنی‌داری در جذب بور در اندام هوایی چغندربرگی مشاهده نشد. جذب بور توسط کاهو در سطح 1/5 و 3 کیلوگرم در هکتار، به ترتیب 15 و 50 درصد افزایش داشت که در سطح (B_3) افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد (B_0) داشت و اسفناج نیز با افزایش سطوح بور افزایش معنی‌داری در جذب بور نسبت به شاهد نشان داد (46 و 53 درصد). بطور کلی بیشترین جذب اندام هوایی توسط اسفناج صورت گرفت (202 میکروگرم بر گیاه). در شرایط کمبود بور (B_0) نیز جذب اسفناج نسبت به چغندر برگی و کاهو افزایش معنی‌داری داشت که می‌توان نتیجه گرفت اسفناج کارایی جذب بیشتری نسبت به چغندر برگی و کاهو داشته است. در روش‌های متعدد کوددهی بور، درصد افزایش جذب بور نسبت به شاهد در خردل (128 درصد)، گندم (100 درصد) و سیب زمینی (35 درصد) بود. ولی بیشترین مقدار جذب در سیب زمینی (525 گرم در هکتار) مشاهده گردید. سرکار و همکاران (2007)، جذب بسیار زیاد بور توسط سیب زمینی (10 برابر) نسبت به خردل و گندم را به عملکرد زیاد سیب زمینی نسبت داد. خصوصیات مورفولوژیکی ریشه از قبیل، طول ریشه، سطح ریشه، میانگین قطر ریشه و ریشه‌های جانبی و خصوصیات فیزیولوژیکی از قبیل پارامترهای مانند یا ماکزیمم اینفلاکس گیاه (I_{max}) در بین گونه‌ها، رقم‌ها و ژنوتیپ‌های مختلف گیاهان متفاوت بوده و از عوامل مؤثر در جذب عناصر در گیاهان هستند (می و همکاران، 2011؛ فرناندس و همکاران، 2014). با توجه به شکل 2، خصوصیات ریشه از قبیل طول و سطح زیاد ریشه از عوامل اصلی در جذب بالای بور توسط اسفناج می‌باشند. با این وجود کاهو با دارا بودن طول و سطح زیاد ریشه توانایی جذب کمتری داشت. می‌توان بیان کرد، کاهو اگر چه طول ریشه زیادی دارد ولی زیست توده اندام هوایی این گیاه نیز زیاد بوده و اندازه سیستم ریشه که تأمین کننده بور برای اندام هوایی گیاه است کافی نمی‌باشد.

بطور کلی این نتایج نشان می‌دهد علاوه بر اهمیت ریشه در جذب، عوامل دیگری از قبیل حضور یون در سطح ریشه و اینفلاکس نیز در افزایش جذب عنصر در گیاه دخیل هستند و صرفا طول تجمعی و سطح بیشتر ریشه نمی‌تواند سبب افزایش جذب گردد. بیشترین جذب بور ریشه نیز همانند اندام هوایی در گیاه اسفناج مشاهده شد که با افزایش سطوح بور به ترتیب 26 و 37 درصد افزایش داشت. افزایش جذب بور توسط ریشه نسبت به جذب بور توسط اندام هوایی در گیاه چغندربرگی بیشتر تحت تأثیر بور بود و با افزایش سطوح بور جذب بور ریشه افزایش یافت (شکل 4- ب). جذب بور ریشه کاهو نیز در سطح 3 کیلوگرم در هکتار کاهش معنی‌داری نسبت به شاهد داشت که غلظت و زیست توده کم ریشه کاهو در این سطح می‌تواند دلیلی بر این موضوع باشد. در مطالعه‌ای که بر روی کارایی جذب متفاوت سه گیاه گندم، کرفس و گوجه فرنگی نسبت به مقادیر بور انجام گرفت، الگوی توزیع بور در بین گیاهان متفاوت بود و تفاوت در حساسیت به کمبود و زیادبود بور در گیاهان دلایل متعددی داشت. کاهش جذب در گندم ، محدودیت در انتقال بور از ریشه به اندام هوایی در کرفس و ترکیبی از هر دو عامل در گوجه فرنگی علت اصلی کارایی متفاوت این گیاهان و رقم‌های آنها در جذب بود. (بلالوئی و براون، 1998).



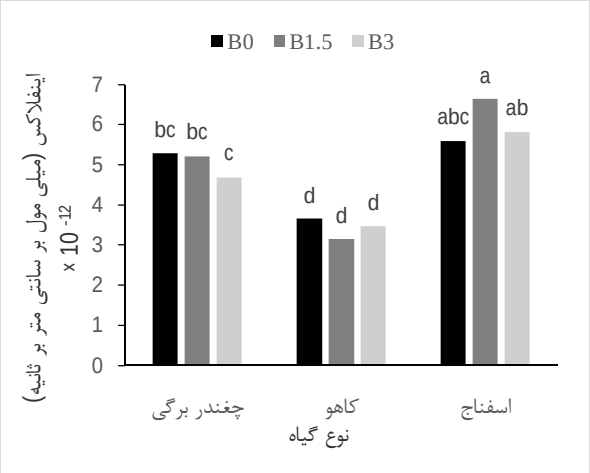
شکل 4- برهمکنش اثرات گیاه و سطوح بور بر جذب بور اندام هوایی (الف) و ریشه (ب)

حروف مشترک در ستون‌ها، طبق آزمون دانکن نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح 5 درصد است.

گالیندو و همکاران (2018) خاطر نشان کردند با افزایش مقادیر بور در خاک در 4 سطح (صفر، 1، 2 و 4 کیلوگرم در هکتار) از منبع اسید بوریک، کارایی جذب بور در گیاه گندم کاهش یافت. مقادیر بالای بور احتمالاً توسط گیاه جذب نشده و از دست رفته که باعث کاهش کارایی جذب گیاه شده و به قانون بازگشت کاهشی معروف است. بطور کلی هنوز مکانیسم‌های اساسی و دقیقی که تفاوتهای جذب و توزیع بور توسط گونه‌های مختلف گیاهان را بررسی کند مشخص نشده است. مکانیسم‌های احتمالی از جمله نفوذپذیری غشا که به ترکیبات موجود در دیواره سلولی مربوط می‌شود، توانایی ترکیبات کلیت کننده از جمله آمینو اسیدها، اسیدهای آلی و پلی ساکاریدها در ریزوسفر که سبب کاهش بور آزاد در اطراف ریشه می‌شود و انتقال بور در آوند چوبی و شدت تنفس ممکن است در این امر دخیل باشند (نابل و پائول، 1991؛ نابل و همکاران، 1997؛ هو و براون، 1997).

اینفلاکس (جریان به داخل)

با توجه به شکل5، با افزودن سطوح بور اختلاف معنی‌داری در اینفلاکس گیاهان نسبت به شاهد (B_0) مشاهده نشد. افزایش سطوح کوددهی لزوما منجر به افزایش اینفلاکس در گیاهان نخواهد شد، زیرا علاوه بر عوامل گیاهی، عوامل خاکی نیز بر اینفلاکس تأثیر داشته و برهمکنش عناصر مختلف با خاک و تحرک و انتقال آنها به سمت ریشه می‌تواند اینفلاکس گیاهان را تحت تأثیر قرار دهد (سیفرت و همکاران، 1995؛ شریفی و زیبارت، 2006). سامال و همکاران (2003) بیان کردند که شیب غلظتی عناصر در محلول خاک و سطح ریشه از عوامل مهم در اینفلاکس گیاهان است. هر چه شیب غلظتی بیشتر باشد و غلظت عنصر در محلول خاک نسبت به سطح ریشه بیشتر باشد اینفلاکس بیشتر است زیرا انتقال به سطح ریشه بیشتر صورت می‌گیرد. احتمالاً، با افزایش سطوح بور، مقداری از بور به دلیل برهمکنش آن با اجزای خاک در دسترس نبوده و شیب غلظتی لازم برای رسیدن عنصر به سطح ریشه و ورود آن به داخل ریشه کافی نیست.



شکل 5- برهمکنش اثرات گیاه و سطوح بور بر اینفلاکس گیاه

حروف مشترک در ستون‌ها، طبق آزمون دانکن نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح 5 درصد است.

علاوه بر این، در تیمار شاهد (B_0) کاهو و چغندربرگی اینفلاکس بیشتری نسبت به تیمارهای ($B_{1.5}$) و (B_3) داشتند. احتمالاً، در شرایط کمبود بور در گیاهان اینفلاکس نسبتاً زیاد بوده که نشان دهنده این است که گیاهان اینفلاکس خود را افزایش می‌دهند تا غلظت بور داخلی را حفظ کنند. از سوی دیگر با افزایش سطوح بور اینفلاکس در هر سه گیاه تغییر چندانی نکرد. مارشنر (2012) بیان کرد، ریشه گیاهانی که در معرض کمبود عنصر غذایی قرار گرفتند اینفلاکسی بیشتری را نسبت به شرایطی که فراهمی عنصر کافی است، نشان دادند. در تحقیقات دیگر نیز نشان داده شد که در شرایط کمبود فسفر، حداکثر اینفلاکس گیاهان افزایش یافت. افزایش اینفلاکس گیاهان به این دلیل بود که غلظت فسفر داخلی را از طریق افزایش سنتز و یا میل ترکیبی ناقلین فسفر در غشای پلاسمایی سلول های ریشه حفظ کنند (جونگک و همکاران، 1990؛ بهادریا و همکاران، 2004). اما عکس این نتایج در مطالعه فرناندس و همکاران (2014) مشاهده شد که بیشترین اینفلاکس در برخی از رقم‌های سیب زمینی، در شرایط فراهمی عنصر غذایی وجود داشت و جذب فسفر توسط گیاه در شرایط کمبود فسفر بیشتر تحت تأثیر طول و سطح ریشه بود تا اینفلاکس. از طرف دیگر با توجه به شکل 5، بین اینفلاکس گیاهان با یکدیگر اختلاف معنی‌داری وجود داشت. کمترین اینفلاکس متعلق به کاهو بود و اسفناج و چغندر برگی به ترتیب اینفلاکس بیشتری داشتند. کاهو سیستم ریشه گسترده‌ای داشت (طول تجمعی ریشه در کاهو بیشتر بود) اما جذب بور کمتری نسبت به اسفناج دارد که دلیل این موضوع را می‌توان به اینفلاکس کمتر کاهو نسبت داد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که سیستم گسترده ریشه نمی‌تواند لزوما منجر به جذب بیشتر بور شود بخصوص اگر اینفلاکس بور در گیاه کم باشد. با توجه به شکل 2، خصوصیات مورفولوژیکی ریشه از قبیل طول و سطح بالای ریشه، در اسفناج تأثیر بیشتری در جذب داشته و در نتیجه مقدار بور بیشتری از واحد سطح ریشه وارد گیاه شده است. یعنی عامل اصلی افزایش اینفلاکس اسفناج، جذب بیشتر بور توسط اسفناج است که خصوصیات ریشه در این امر از اهمیت بیشتری برخوردارند. با توجه به شکل 2، طول تجمعی و سطح ریشه در چغندربرگی نسبت به اسفناج و کاهو بسیار کمتر بود. در حالیکه اینفلاکس بالایی را به خود اختصاص داد. برخی از گیاهان برای جبران سیستم ریشه ناکارامد خود (طول و سطح کمتر)، اینفلاکس خود را افزایش می‌دهند. با توجه به جذب کمتر بور توسط چغندر برگی (شکل 4)، می‌توان نتیجه گرفت که حداکثر اینفلاکس لزوما منجر به کارایی

جذب بیشتر عنصر نخواهد شد چون ممکن است سیستم ریشه گستردگی چندانی نداشته باشد (شریفی و زیبارت، 2006). با توجه به اینکه خصوصیات موفولوژیکی ریشه نقش چندانی در افزایش اینفلاکس و جذب بور توسط چغندر برگی ندارد، شاید دلیل اینفلاکس زیاد آن را بتوان به عوامل دیگری که سبب افزایش غلظت بور در محلول خاک و جذب بور شده اند، نسبت داد.

نتیجه‌گیری

خصوصیات مورفولوژیکی ریشه و اینفلاکس از عوامل مهم در جذب بور توسط گیاهان می‌باشند. تفاوت در کارایی جذب مختلف گیاهان منعکس کننده مورفولوژی ریشه و اینفلاکس متفاوت آنهاست. در شرایط کمبود بور، طول و سطح ریشه در اسفناج نسبت به دو گیاه دیگر بیشتر بود که زیست توده بیشتر، غلظت زیاد بور و جذب بیشتر در این شرایط را می‌توان به گستردگی ریشه اسفناج در شرایط کمبود بور نسبت داد. از سوی دیگر، چغندر برگی با کمترین گستردگی ریشه، توانست، غلظت و جذب بالایی از بور را داشته باشد. اینفلاکس بالای این گیاه در شرایط کمبود بور به دلیل افزایش حلالیت بور در اطراف ریشه می‌تواند از عوامل مهم در افزایش کارایی جذب بور در چغندر برگی باشد. همچنین، کمترین غلظت و جذب بور در شرایط کمبود بور، مربوط به کاهو بود. کاهو با دارا بودن بیشترین طول و سطح ریشه و زیست توده بیشتر اندام هوایی و ریشه، نتوانست غلظت و جذب کافی از بور را داشته باشد. لزوما، سیستم گسترده ریشه نمی‌تواند منجر به جذب بیشتر بور شود بخصوص اگر اینفلاکس بور در گیاه کم باشد. بطور کلی می‌توان نتیجه گرفت اسفناج با توجه به غلظت و جذب بالای بور، بیشترین کارایی جذب را داشته که طول و سطح زیاد ریشه و اینفلاکس بالای آن از مهمترین عوامل در این موضوع می‌باشند.

فهرست منابع:

1. خوشگفتارمنش، ا. ح. 1386. ارزیابی وضعیت تغذیه ای گیاه و مدیریت بهینه کودی. مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان.
2. ملکوتی، م. ج. 1393. توصیه بهینه مصرف کود برای محصولات کشاورزی در ایران. نشر تهران مبلغان.
3. Ali, F., Ali, A., Gul, H., Sharif, M., Sadiq, A., Ahmed, A., Ullah, A., Mahar, A. and Kalhoro, S.A. 2015. Effect of Boron Soil Application on Nutrients Efficiency in Tobacco Leaf. American Journal of Plant Sciences. 6: 1391-1400.
4. Batista, R.O., Furtini neto, A.E., Deccetti, S.F.C., and Viana, C.S. 2016. Root morphology and nutrient uptake kinetics by Australian cedar clones. Journal of Revista Caatinga. 29(1): 153 – 162.
5. Barker, A.V., Pilbeam, D.J. 2015. Hand book of plant nutrition. CRC press.
6. Bellaloui, N., Brown, P.H. 1998. Cultivar differences in boron uptake and distribution in celery (Apium graveolens), tomato (Lycopersicon esculentum) and wheat (Triticum aestivum). Journal of Plant and Soil .198: 153-158.
7. Bhadoria, P.S., Dessougi, H., El. Liebersbach, H., and Claassen, N. 2004. Phosphorus uptake kinetics, size of root system and growth of maize and groundnut in solution culture. Journal of Plant and Soil .262: 327–336.
8. Camacho-Cristobal, J.J., Rexach, J., and Gonzalez-Fontes, A. 2008. Boron in plants: deficiency and toxicity. Journal of Integrative Plant Biology. 50: 1247–1255.
9. Cao, X.Y., Liu, W.D., and Pi, M.M.1997. Composition of root exudates and root bleeding sap of a boron-efficient and inefficient oilseed rape genotype. p. 171–174. Proceedings of the International Symposium on Boron in Soils and Plants. Chiang Mai, Thailand, 7–11 September.

10. Carvalhais, L.C., Dennis, P.G., Fedoseyenko, D., Hajirezaei, M.R., Borriss, R. and Wirén, N.V. 2011. Root exudation of sugars, amino acids, and organic acids by maize as affected by nitrogen, phosphorus, potassium, and iron deficiency. Journal of Plant Nutrition and Soil Science.174: 3–11.
11. Fernandes, A.M., Soratto, R.P., and Gonsales, J.R. 2014. Root morphology and phosphorus uptake by potato cultivars grownunder deficient and sufficient phosphorus supply. Journal of Scientia Horticulture.180:190-198.
12. Galindo, F.S., Teixeira Filho, M.C.M., Buzetti, S., Rodrigues, W.L., Boleta, E.H.M., Santini, J.M.K., and Pereira, M.R.A. 2018. Effects of Boron (B) doses and forms on boron use efficiency of wheat. Australian Journal of crop science. 12(09):1536-1542.
13. Hu, H., and Brown, P.H. 1997. Absorption of boron by plant roots. Journal of Plant and Soil. 193: 49–58.
14. Jungk, A., Asher, C.J., Edwards, D.G., and Meyer, D. 1990. Influence of phosphate status on phosphate uptake kinetics of maize (Zea mays L) and soybean (Glycine maxL). Journal of Plant and Soil .124: 175–182.
15. Kose, A.K., and Zumreoglu-Karan, B. 2012. Mixed-ligand complexes of boric acid with organic biomolecules. Chemical Papers 66 (1): 54–60.
16. Koshiba, T., Kobayashi, M., and Matoh, T. 2009. Boron Nutrition of Tobacco BY-2 Cells. V. Oxidative Damage is the Major Cause of Cell Death Induced by Boron Deprivation. Journal of Plant Cell Physiology. 50(1): 26–36.
17. Lili, G., Mingjian, G., Lei, S., Zhuqing, Z., and Duanwei, Z. 2015. Boron uptake and distribution in two oilseed rape (Brassica napus L.) cultivars with different boron efficiency and their plants grafted each other. Journal of Agronomy: Soil Nutrition. 223-227.
18. Marschner, P. 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. London: Academic Press.
19. Mei, L., Sheng, O., Peng, S.A., Zhou, G.F., Wei, Q.J., and Li, Q.H. 2011. Growth, root morphology and boron uptake by citrus rootstock seedlings differing in boron-deficiency responses. Journal of Scientia Horticulture. 129: 426–432.
20. Muhlbachova, G., Cermak, P., Vavera, R., Kas, M., Pechova, M., Markova, K., Kusa, H., Ruzek, P., Hlusek, J., and Losak, T. 2018. Crop yields, boron availability and uptake in relation to phosphorus supply in a field experiment. Journal of Plant, Soil and Environment. 64(12): 619–625.
21. Nable, R.O., Banuelos, G.S., and Paull, J.G. 1997. Boron toxicity. Journal of Plant and Soil. 193: 181–198.
22. Nable, R.O., and Paul, G. 1991. Mechanism and genetics of tolerance to boron toxicity in plants. Current Topics. Journal of Plant Biochemistry and Physiology. 10: 257–273.
23. O'Neill, M.A., Ishii, T., Albersheim, P., and Darvil, A.G. 2004. Rhamnogalacturonan II: structure and function of a borate cross-linked cell wall pectic polysaccharide. Journal of Annual Review of Plant Biology. 55:109–139.
24. Pandey, A., Mohd, k,Kh., Hamurcu, M., Gezgin, S., and Esref Hakki, E. 2017. Boron deficiency responses on nutrients composition in brachypodium distachyon, a model for wheat. Journal of biochemistry. 256:39.
25. Pardossi, A., Romani, M., Carmassi, G., Guidi, L., Landi, M., Incrocci, L., Maggini, L., Puccinelli, M., Vacca, W., and Ziliani, M. 2015. Boron accumulation and tolerance in sweet basil (*Ocimum basilicum L.*) with green or purple leaves. Journal of plant and soil. https://www.researchgate.net/publication/279420035
26. Poulain, D., and Al Mohammad, H. 1995. Effects of boron deficiency and toxicity on faba bean (Vicia faba L.). European Journal of Agronomy. 4(1): 127-134.

27. Sadana, U.S., Sharma, P., Castaneda Ortiz, N., Samal, D., and Claassen, N. 2005. Manganese uptake and Mn efficiency of wheat cultivars are related to Mn-uptake kinetics and root growth. Journal of Plant Nutrition Soil Science. 168: 581–589.
28. Samal, D., Sadana, U.S., and Gill, A.A.S. 2003. Mechanistic approach to study manganese influx and its depletion in the rhizosphere of wheat and raya. Journal of communications in soil science and plant analysis. 34(19): 3033–3044.
29. Sarkar, D., Mandal, B., and Kundu, M.C. 2007. Increasing use efficiency of boron fertilizers by rescheduling the time and methods of application for crops in India. Journal of Plant and Soil. 301:77-85.
30. Seiffert, S., Kaselowsky, J., Jungk, A., and Claassen, N. 1995. Observed and calculated potassium uptake by maize as affected by soil Water content and bulk Density. Agronomy Journal. 87:1070-1077.
31. Shah, J.A., hassan, Z.U., Rajpar, I., and Sial, M.A. 2014. Evaluating boron use efficiency of twenty cotton genotypes of Pakistan. Journal of Agriculture, Agricultural Engineering and Veterinary. 30 (2): 147-158.
32. Sharifi. M., and Zebarth, B.J. 2006. Nitrate influx kinetic parameters of five potato cultivars during vegetative growth. Journal of plant soil. 288:91–99.
33. Sorgonà, A., Abenavoli, M.R., and Cacco, G., 2005. A comparative study between two citrus rootstocks: effect of nitrate on the root morpho-topology and net nitrate uptake. Journal of plant and soil. 270: 257–267.
34. Stangoulis, J.C.R., Brown, P.H., Bellaloui, N., Reid, R.J., and Graham, R.D. 2001. The efficiency of boron utilization in canola. Australian Journal of Plant Physiology. 28: 1109–1114.
35. Steingrobe, B., and Schenk, M.K. 1991. Influence of nitrate concentration at the root surface on yield and nitrate uptake of kohlrabi and spinach. Journal of plant and soil. 135:205–211.
36. Vranova, V., Rejsek, K., Skene, K.R., Janous, D., and Formanek, P. 2013. Methods of collection of plant root exudates in relation to plant metabolism and purpose: A review. Journal of Plant Nutrition and Soil Sci.176: 175–199.
37. Wang, N., Yang, C., Pan, Z., Liu, Y., and Peng, S. 2015. Boron deficiency in woody plants. Various responses and tolerance mechanism. Journal of Frontier in Plant Science. 6: 916.
38. Will, S., Eichert, T., Fernandez, V., Mohring, J., Muller, T., and Romheld, V. 2011. Absorption and mobility of foliar-applied boron in soybean as affected by plant boron status and application as a polyol complex. Journal of Plant Soil. 344: 283–293.
39. Williams R.F., 1948. The effect of phosphorus supply on the rates of intake of phosphorus and nitrogen upon certain aspects of phosphorus metabolism in gramineous plants. Australian Journal of Scientific Research1. 333-361.
40. Wishart, J., George, T.S., Brown, L.K., White, P.J., Ramsay, G., Jones, H., and Gregory, P.J. 2014. Field phenotyping of potato to assess root and shoot characteristics associated with drought tolerance. Journal of Plant Soil .378: 351–363.
41. Wolf, B. 1974. Improvement in the azomethine-H method for the determination of boron. Communication in Soil Science and Plant Analysis. 5: 39-44.

Evaluation of Boron Uptake Efficiency in Lettuce, Spinach and Leaf Beet

F. Akbarnezhad, R. Khorassani[1] and A. Fotovat

PhD student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad; E-mail: fatemeh.akbarnezhad@mail.um.ac.ir

Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad; E-mail: khorasani@um.ac.ir

Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad E-mail: Afotovat@um.ac.ir

Received: May, 2022, and Accepted: August, 2022

Abstract

Boron deficiency is an important disorder that can affect plant growth in calcareous soils. Various plants have different mechanisms of uptake. To investigate the different strategies of plants in increasing the efficiency of boron uptake, a factorial experiment was conducted in a completely randomized design with three replications in the greenhouse of the Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. The experiment was conducted with three levels of boron (B_0, $B_{1.5}$, and B_3 kg/ha) in the form of boric acid and three plant species (spinach, lettuce, and leaf beet). The results revealed that addition of boron enhanced shoot dry matter content in all plants. Lettuce shoot biomass was increased by 32% at B_3, indicating that lettuce had a greater growth response to boron levels. Differences in boron concentrations in spinach (61.8 mg kg^{-1}) and leaf beets (71.4 mg kg^{-1}) compared to lettuce (31 mg kg^{-1}) at the B_0 level showed the importance of root characteristics and other factors affecting boron solubility and uptake efficiency such as root exudates. The concentration and uptake of boron in spinach were more affected by boron levels compared to lettuce and leaf beet. In spinach, the shoot and root boron concentration increased by 44% and 30%, respectively, and uptake in shoot and root also increased by 53% and 37%, respectively, at B_3, compared to the control. Generally, different efficiencies of these plants in boron uptake were due to the high boron influx into spinach and leaf beet and low influx into lettuce.

Keywords: Boron fertilization, Influx, Leafy vegetables, Root length, Root surface area

[1] Corresponding author: Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad; Iran