

مقاله پژوهشی

تفاوت‌های ژنوتیپی در گیاه کلزا نسبت به تحمل کمبود بور و بررسی اثر متقابل بور با کمبود دیگر عناصر در محیط هیدروپونیک

زهرا بهمنی^{*}، رقیه حاجی بلند

گروه زیست شناسی گیاهی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

* نویسنده مسئول مکاتبات: Z.bahmani63@yahoo.com

تاریخ پذیرش: شهریور ۱۴۰۱

تاریخ دریافت: بهمن ۱۴۰۰

DOI:10.30495/JDB.2022.1952546.1292

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.2008692.1401.15.1.1.5>

چکیده

کلزا (*Brassica napus* L.) یکی از گیاهان اقتصادی مهم بوده که بصورت گسترده‌ای در ایران کشت می‌شود. بور (B) و آهن (Fe) دو عنصر کم مصرف و کلسیم (Ca) عنصر پر مصرف ضروری برای گیاهان عالی هستند و کمبود آنها از بیماری‌های تغذیه‌ای مهم در گیاهان زراعی است. مشکل کمبود بور دارای گستره جهانی می‌باشد و کلزا یک گیاه حساس به کمبود بور محسوب می‌گردد. در این پژوهش پاسخ‌های شش ژنوتیپ گیاه کلزا نسبت به کمبود بور (B-) در محیط هیدروپونیک مورد بررسی قرار گرفت و همچنین اثر متقابل کمبود بور با کمبود آهن و کلسیم در گیاه کلزا ژنوتیپ هایولا در شرایط کشت هیدروپونیک مطالعه شد. کمبود بور موجب کاهش قابل توجه رشد ریشه و اندام هوایی و طول ریشه گردید، بیشترین کاهش در ژنوتیپ اپرا و کمترین در ژنوتیپ اکاپی مشاهده شد. در هر شش ژنوتیپ، مقدار بور، شاخص‌های فلونورسانس کلروفیل و تبادل گاز به طور معنی داری با کمبود بور کاهش یافت. تیمار توام کمبود بور و آهن (Fe-B) و کمبود بور و کلسیم (B-Ca) موجب کاهش شدید رشد شاخساره و ریشه گیاهان شد. همچنین این تیمارها، موجب افزایش آزادسازی پروتون و اسیدی شدن ریزوسفر شده و نشأت پتانسیم از ریشه گیاهان افزایش و مقدار بور در ریشه و اندام هوایی کاهش یافت. نتایج این پژوهش نشان دهنده تفاوت‌های ژنوتیپی قابل توجه در پاسخ به کمبود بور و اثر تشدید کنندگی کمبود آهن و کلسیم بر روی کمبود بور در گیاه کلزا بود.

کلیدواژه‌ها: آهن، بور، تفاوت‌های ژنوتیپی، کلسیم، کلزا.

مقدمه

مطالعات کافی انجام بگیرد. در این راستا توجه محققان به افزایش میزان تولیدات گیاهی معطوف شده است. یکی از راه‌های رسیدن به این هدف، تغذیه کافی گیاه از عناصر ضروری است که رشد و تکثیر آن‌ها را ممکن می‌کند. تغذیه ناکافی گیاه، بروز علائم بیماری یا به عبارت دیگر کمبود عناصر غذایی را سبب می‌شود که بر شکل ظاهری و متابولیسم آنها تاثیر می‌گذارد [۱].

با توجه به نقشی که رژیم غذایی در سلامتی انسان‌ها دارد و مصرف میوه‌ها و سبزیجات باعث افزایش سلامتی و کاهش خطرات بیماری‌های مزمن می‌شود و باتوجه به رشد روزافزون جمعیت کره زمین و نیاز بشر به مواد غذایی و محدود بودن سطح زمین‌های کشت‌شدنی، باید در جهت شناخت نقش عناصر غذایی در بهبود کاشت و افزایش کیفیت محصولات کشاورزی

کمبود آهن موجب کلروز بین رگبرگی می‌شود که ابتدا در برگ‌های جوان ظاهر و سپس تمام سطح برگ زرد و یا سفید می‌شود [۳]. کاهش رشد ایجاد شده در اثر کمبود بور با اعمال کمبود آهن تشدید می‌شود که به دلیل نقش آهن در فتوسنتز می‌باشد [۳]. کلسیم نیز عنصر پرمصرف و ضروری مهمی است که در دیواره سلول حضور دارد و در تقسیم سلولی، جذب یون‌ها و نگهداری نفوذپذیری غشایی نقش دارد [۲۴]. نکروزه شدن نوک و حاشیه برگ‌های جوان، کاهش رشد و کلروز عمومی برگ‌ها، پیچ خوردگی برگ‌های جوان و کوتاه و قهوه‌ای شدن ریشه‌ها از علائم بارز کمبود کلسیم است [۲۵]. کمبود کلسیم نیز موجب تشدید اثرات کمبود بور می‌شود که به دلیل نقش مشترک هر دو عنصر در دیواره است [۳].

کلزا (*Brassica napus* L.)، متعلق به تیره *Brassicaceae*

و حاصل دورگه‌گیری بین *B. oleracea* و *B. rapa* می‌باشد (۱۲). گیاه کلزا یکی گیاهان اقتصادی مهم است و دارای دانه‌های روغنی بوده که به دلیل غلظت کم اورسیک اسید و گلوکوزینولات ارزش غذایی زیادی دارد [۲۶، ۲۷]. کلزا دومین گیاه زراعی غذایی و سومین منبع تولید روغن نباتی جهان است و تولید آن به شدت به بور وابسته است [۲۸]. کلزا به کمبود بور بسیار حساس می‌باشد و کاهش عملکرد این گیاه تحت تاثیر کمبود بور بسیار قابل توجه است [۲۹، ۱۲]. در واقع کلزا و چغندر قند بیشترین تقاضا را برای بور در بین گونه‌های زراعی دارند و کمبود بور در کلزا باعث ایجاد گل‌های بدون دانه می‌شود. کلزا نیاز به نیم الی یک میلی گرم بور در کیلوگرم خاک دارد که در بسیاری از خاک‌های کشاورزی کمتر از این مقدار وجود دارد [۱۲]. روغن کلزا دارای سطح بالایی از اسیدهای چرب غیر اشباع مخصوصاً اسیدلینولئیک که در بدن ساخته نمی‌شود است، لذا مقاومت بالایی در مقابل اکسیداسیون دارد و دارای شرایط لازم برای مصرف خوراکی است. دانه کلزا همچنین دارای ویتامین K و E می‌باشد [۳۰]. کلزا دارای ژنوتیپ‌های بهاره و پاییزه است و محصول خاص مناطق معتدل بوده و وسعت و پراکندگی کشت زیادی دارد. در اکثر خاک‌ها کشت این گیاه امکان پذیر است [۳۱، ۳۲].

غربالگری ژنوتیپ‌های گیاهی برای تعیین ژنوتیپ مقاوم و لذا کنترل و مدیریت و افزایش عملکرد و کیفیت محصولات

بور (B) یکی از عناصر کم مصرف ضروری برای رشد گیاهان عالی است که مشابه آهن، نیاز گیاه به آن بیش از سایر عناصر کم مصرف می‌باشد [۲، ۳]. بور در گیاهان موجب نقل و انتقال قندها، سنتز دیواره، نگهداری تمامیت و عملکرد غشا، متابولیسم اسیدهای نوکلئیک، اکسین و فنول‌ها می‌شود و بر فعالیت نیترات ردوکتاز اثر دارد [۴، ۵، ۶]. بور در تشکیل دیواره سلولی [۷]، تقسیم و رشد سلولی [۸، ۹]، عملکرد غشا و متابولیسم و انتقال کربوهیدرات‌ها [۱۰، ۱۱]، رشد ریشه و افزایش محتوای رنگدانه‌ای گیاه و کاهش دانه‌های خالی شرکت می‌کند و میوه دهی و تولید بذر را بهبود می‌بخشد [۵]. بور در جذب و جابجایی عناصر غذایی کم مصرف و پرمصرف مثل آهن، روی، پتاسیم، نیتروژن، فسفر و مس در گیاهان نقش بسیار مهمی دارد [۵].

کمبود بور یکی از کمبودهای رایج در تعداد زیادی از گونه‌ها بوده و نیز یکی از مهم ترین کمبودهای شناخته شده در ایران است. خاک‌های دارای کمبود بور در بیش از هشتاد کشور گزارش شده است [۱۲]. کمبود بور معمولاً در خاک‌های خشک و شور، اسیدی قرمز رنگ، فرسایش یافته، شنی، خاک‌هایی با ماده آلی زیاد و خاک‌های شکل گرفته از ته نشست رسوبات دریایی دیده می‌شود [۱۳]. کمبود بور مانع گسترش برگ، رشد ریشه، رشد گل، کاهش چیرگی انتهایی، اختلال در نمو گل، تشکیل میوه و دانه، نکروزه شدن برگ و کاهش کیفیت و عملکرد محصولات می‌شود [۵، ۱۴] و نیز مانع رشد طولی ریشه شده، بر توزیع اسیدهای پکتیک اثر دارد، منجر به کاهش کشسانی دیواره سلول شده و رشد طولی سلول را کم می‌کند [۱۵، ۱۶ و ۱۷]. کمبود بور بر ظرفیت فتوسنتزی و انتقال فرآورده‌های فتوسنتزی تاثیر می‌گذارد و موجب کاهش هدایت روزنه‌ای در برگ و کاهش فعالیت فتوسیستم II می‌شود [۱۶، ۱۸، ۱۹].

آهن (Fe) از عناصر ضروری کم مصرف برای رشد گیاهان است که در فتوسنتز، تنفس و تثبیت نیتروژن و در فرآیند ساخت کلروفیل نقش دارد و برای عملکرد برخی آنزیم‌ها مورد نیاز است [۲۰، ۲۱ و ۲۲]. علیرغم فراوانی زیاد آهن در پوسته زمین دسترسی گیاهان به آن در خاک‌های آهکی و قلیایی که حدود سی درصد زمین‌های زراعی جهان را شامل می‌شود، کم می‌باشد. کمبود آهن در خاک‌های آهکی ایران نیز رایج است [۲۲، ۲۳].

گرفتند. دانه رست‌های ۷ روزه به تشک‌های ۵ لیتری، و در آزمایش‌های مربوط به تیمار آهن و کلسیم به گلدان‌های ۲/۵ لیتری حاوی محلول هوگلند. [۴] (با pH ۶) با دو سطح بور شامل کفایت (۲۵ میکرومولار مطابق ترکیب محیط هوگلند) و کمبود (محیط هوگلند ولی بدون بور) منتقل شدند. با توجه به اینکه در آزمایش‌های اولیه، علائم کمبود بور به سختی در گیاهان تغذیه شده با محلول فاقد بور مشاهده شده بود، ناخالصی بور با قرار دادن رزین مخصوص (IRA 743, Fluka) در محلول غذایی و آب آبیاری به مدت ۲۴ ساعت، تا حد ممکن کاهش داده شد [۴۰]. گیاهان در اتاق رشد با شرایط دمایی ۱۷-۲۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۸۰-۷۰ درصد و در دوره روشنایی/ تاریکی ۷/۱۷ ساعته نگهداری شدند.

– اندازه‌گیری شاخص‌های رشد

گیاهان سی روز پس از کشت برداشت شدند و طول اندام هوایی و عمق ریشه افکنی هر گیاه توسط خط کش مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. قبل از برداشت، شاخص‌های فلونورسانس کلروفیل و تبادل گاز اندازه‌گیری ای [۴۱] تعیین شدند. وزن تر ریشه و اندام هوایی و همچنین طول ریشه به روش شمارش شبکه گردید. سپس نمونه‌ها در درون پاکت‌های کاغذی قرار گرفته و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، در آن به مدت ۴۸ ساعت خشک شده و وزن خشک ریشه و اندام هوایی تعیین گردید. نمونه‌ها برای تعیین مقدار بور خاکستر شدند.

در آزمایش‌های مربوط به تیمار آهن و کلسیم، چهار هفته پس از اعمال کمبود بور، تیمار آهن و کلسیم (در دو سطح کمبود و کفایت) اعمال شد. در محیط کمبود کلسیم، نیترات آمونیوم به عنوان منبع ازت (در همان حد مقدار محیط هوگلند) جایگزین نیترات کلسیم گردید. پس از یک هفته گیاهان برداشت شدند و شاخص‌های مختلف در آن‌ها سنجش شد و وزن تر و خشک نمونه‌ها تعیین گردید.

– سنجش شاخص‌های فلونورسانس کلروفیل

جهت تعیین فلونورسانس کلروفیل، از دستگاه فلونورسانس سنج (OPTI-SCIENCES, ADC, UK) استفاده گردید. شاخص‌های فلونورسانس کلروفیل در برگ‌های سازش یافته با تاریکی شامل

کشاورزی مهم است. نیاز به بور در گیاهان متنوع است و بسته به گونه و یا ژنوتیپ متفاوت است [۵، ۳۳]. در بسیاری از گونه‌های گیاهی تفاوت زیادی بین حد بحرانی کمبود و سمیت بور وجود ندارد [۵] با اینحال در برخی موارد ژنوتیپ‌های درون یک گونه از نظر نیاز به بور بطور چشمگیری متفاوت هستند [۱۶]. بنابراین برای جلوگیری از پیامدهای زیانبار کمبود بور یا سمیت آن، شناسایی و استفاده از ژنوتیپ‌های مقاوم باعث افزایش بازده محصول می‌شود [۱۲].

تاکنون مطالعات غربالگری ژنوتیپ‌های گیاهی نسبت به عناصر دیگر انجام گرفته است [۳۴، ۳۵، ۳۶ و ۳۷] ولی مطالعات در مورد عوامل فیزیولوژیک، مولکولی و ژنتیکی موثر بر کارایی بور فقط برای تعداد بسیار محدودی از ژنوتیپ‌ها انجام شده است [۱۲]. با توجه به گستردگی کمبود بور در سطح وسیعی از خاک‌ها و حساسیت زیاد کلزا به کمبود بور، یافتن ژنوتیپ‌های مقاوم به کمبود بور بسیار موثر خواهد بود و برای کاهش افت عملکرد ناشی از کمبود بور، شناسایی ژنوتیپ‌هایی با کارایی بالای بور در کلزا ضروری است.

تنش‌های کمبود عناصر غذایی اغلب بطور همزمان در خاک رخ می‌دهد و بور بدلیل برهمکنش با سایر عناصر غذایی می‌تواند بر عملکرد عناصر دیگر در گیاه اثر بگذارد [۳۸]. کمبود توأم آهن و بور در خاک‌های آهنی و خشک رایج است [۳۹]. همچنین برهمکنش بور با کمبود کلسیم بدلیل کارکرد مشابه با بور در دیواره، می‌تواند دانش ما را در مورد کارکرد این دو عنصر ساختاری در گیاهان وسعت ببخشد. پژوهش حاضر با هدف بررسی پاسخ‌های شش ژنوتیپ گیاه کلزا نسبت به کمبود بور و نیز اثر متقابل آن با کمبود آهن و کلسیم در گیاه کلزا در شرایط کشت هیدروپونیک انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

– کشت گیاهان و اعمال تیمارها

بذر ژنوتیپ‌های مختلف گیاه کلزا (*Brassica napus* L.) از مرکز تحقیقات دانه‌های روغنی وزارت جهاد کشاورزی تهیه شد. دانه‌ها به مدت ۵ الی ۷ دقیقه، با استفاده از هیپوکلریت سدیم تجاری ۵ درصد ضدعفونی شده، سپس با آب مقطر شستشو داده شده و بر بستر پرلیت مرطوب و در تاریکی جهت جوانه زنی قرار

کلرید پتاسیم و ۰/۵ میلی مولار سولفات کلسیم به مدت ۳ ساعت بارگیری شدند. بعد از شستشو با آب مقطر، ریشه‌ها به مدت ۲ ساعت در ۶۰۰ میلی لیتر محلول سولفات کلسیم ۰/۵ میلی مولار قرار داده شدند. در ادامه و از ابتدای ۲ ساعت، هر ۲۰ دقیقه یک بار، ۱۰ میلی لیتر از محلول نشت با پیبت برداشته شد و مقدار پتاسیم آن‌ها توسط دستگاه فلم فتومتر تعیین گردید. مقدار پتاسیم نشت یافته از بافت‌های ریشه پس از تعیین وزن تر و خشک آنها بر حسب میکروگرم پتاسیم بر گرم وزن تر اندام مورد نظر محاسبه و گزارش گردید. جهت تهیه منحنی استاندارد از غلظت‌های مشخص کلرید پتاسیم (۰ تا ۵۰ میلی گرم در لیتر)، استفاده شد [۴۴].

- اندازه‌گیری pH ریزوسفر

محلول غذایی (۱۰۰٪) تازه همراه با بافر MES با غلظت ۲ میلی مولار (با pH ۵/۹) تهیه شد. pH محلول با استفاده از هیدروکسید پتاسیم ۰/۰۵ مولار تنظیم گردید و گیاهان به مدت ۲۴ ساعت در شرایط نور و هوادهی به داخل گلدان‌های حاوی این محلول‌ها منتقل شدند. یک گلدان دارای محلول بدون گیاه نیز بعنوان شاهد در نظر گرفته شد. بعد از برداشت گیاهان، محلول غذایی داخل گلدان‌ها فوراً به دمای ۴ درجه سانتی‌گراد (یخچال) منتقل شدند. سپس ریشه گیاهان جدا شده، توسط آب مقطر شسته شده و بعد از خشک شدن تعیین وزن شدند. محلول غذایی داخل گلدان‌ها توسط آب مقطر به حجم اولیه رسانده شد. در حدود ۱۰۰ میلی لیتر از محلول غذایی گلدان‌ها و نیز گلدان شاهد (بدون به حجم رساندن) برداشته شده و pH محلول توسط هیدروکسید پتاسیم ۰/۰۵ مولار بر روی ۸ تنظیم گردید و مقدار هیدروکسید پتاسیم مصرفی یادداشت گردید. اعداد بر حسب میکرومول یون پروتون یا هیدروکسید نشت یافته بر گرم وزن تر بر ساعت محاسبه شدند [۱۴].

- طرح آزمایشی و تجزیه داده‌ها

آزمایش در طرح بلوک‌های بطور کامل تصادفی با دو سطح از تیمار بور و چهار تکرار اجرا شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با کمک نرم افزار سیگما استات (نسخه ۳/۰۲) با استفاده از تست توکی در سطح پنج درصد انجام گردید. تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به تفاوت‌های ژنوتیپی به روش آزمون t (t -test)

F_0 (فلوئورسانس پایه) و F_m (فلوئورسانس بیشینه) و شاخص‌های فوق در برگ‌های سازش یافته با روشنائی شامل F_t (شدت فلوئورسانس پایه) و F_{ms} (شدت فلوئورسانس بیشینه) اندازه‌گیری شد. سپس محاسبات لازم برای بدست آوردن سایر شاخص‌ها از جمله کارآئی بیشینه فتوشیمیائی فتوسیستم II (F_v/F_m) ، نسبت فلوئورسانس متغیر به پایه (F_v/F_0) ، ظرفیت انگیختگی فتوسیستم II (F'_v/F'_m) ، خاموش شدگی فتوشیمیائی (q_p) و غیر فتوشیمیائی (q_{NP}) ، عملکرد کوآنتومی فتوسیستم II (Φ_{PSII}) و سرعت انتقال الکترون (ETR) انجام گردید [۴۲].

- سنجش شاخص‌های تبادل گاز

شاخص‌های مختلف تبادل گاز فتوسنتزی با استفاده از دستگاه (LCA4, ADC, UK) سنجش شد. این دستگاه دارای اتاقک شیشه‌ای حساسی است که برگ درون آن جای می‌گیرد و پس از تنظیم کامل دما، نور، مسیر تبادل هوا و انتخاب شاخص‌های مورد نظر جهت سنجش، ثبت مقادیر فوق آغاز شد. شاخص‌های اندازه‌گیری شده شامل شدت فتوسنتز (A) بر حسب میکرو مول دی اکسید کربن بر متر مربع بر ثانیه، تعرق (E) بر حسب میلی مول بخار آب بر متر مربع بر ثانیه و هدایت روزنه‌ای (g_s) بر حسب مول بخار آب بر متر مربع بر ثانیه بود. کارآئی بهره‌وری آب (WUE) به عنوان نسبت فتوسنتز به تعرق (A/E) محاسبه و گزارش شد.

- اندازه‌گیری عنصر بور

جهت اندازه‌گیری عنصر بور، ابتدا بر روی نمونه‌ها هیدروکسید کلسیم اشباع اضافه شده و در زیر هود در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت تا خشک شدن حرارت داده شدند. سپس نمونه‌ها در کوره الکتریکی در دمای پانصد درجه سانتی‌گراد به مدت ۸ ساعت خاکستر شدند. پس از انحلال در هیدروکلریک اسید و رساندن نمونه‌ها به حجم با استفاده از آب مقطر، مقدار بور در نمونه‌ها به روش آزومتین H و با استفاده از اسپکتروفتومتر سنجش گردید [۴۳].

- اندازه‌گیری نشت پتاسیم از ریشه

گیاهان از ناحیه ریشه در محلول حاوی ۱/۵ میلی مولار بافر MES (۲- مورفولینو اتان سولفونیک اسید)، ۱ میلی مولار

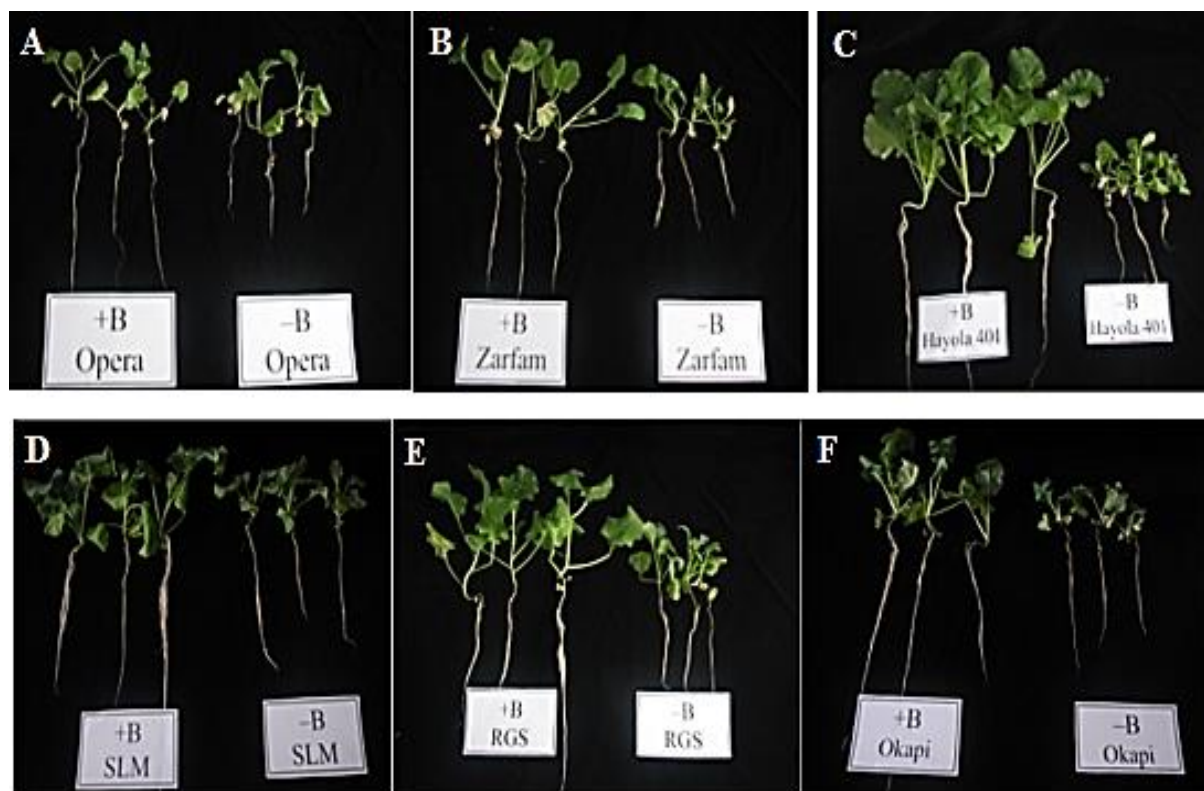
شدن برگ‌های پیر نیز مشاهده شد. در مجموع رشد گیاه بسیار کاهش یافته و ارتفاع گیاه بسیار کم شد. دمبرگ‌ها نیز ضخیم تر و کوتاه تر شده و حالت شکنندگی پیدا کردند. کمبود بور باعث از بین رفتن تسلط انتهایی شده و حالت طوقه‌ای (روزت) ایجاد شد. ساقه نیز ضخیم و حالت شکننده پیدا کرده و میانگره‌ها کوتاه تر شده و قد کوتاهی گیاه نمایان بود. اثرات کمبود بور در اواخر هفته سوم ظاهر شدند و علائم کمبود تقریباً در تمام شش ژنوتیپ مشابه بود (شکل ۱).

تمام شش ژنوتیپ بررسی شده پاسخ‌های مشهودی به کمبود بور نشان دادند و کمبود بور موجب کاهش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی و ریشه و طول ریشه، در ژنوتیپ زرفام، هایولا، اس ال ام، آر جی اس و اکاپی شد. در ژنوتیپ اپرا این کاهش معنی‌دار نبود و وزن خشک ریشه و اندام هوایی به ترتیب به میزان ۵ و ۳۳ درصد کاهش یافت. طول ریشه در ژنوتیپ اپرا به میزان ۵ درصد کاهش پیدا کرد (جدول ۱).

($P < 0.05$) و داده‌های مربوط به اثر متقابل عناصر به روش تجزیه پراش یک عاملی (One way ANOVA, $P < 0.05$) انجام گرفت.

نتایج

در گیاهان رشد یافته در کمبود بور کاهش طول ریشه قابل توجه بود. بعد از مدتی رنگ ریشه‌ها تغییر کرده و به رنگ قهوه‌ای روشن دیده شدند. در اندام هوایی، آثار کمبود بور ابتدا در برگ‌های جوان مشاهده شد به این صورت که همراه با کاهش طول ریشه، کوچک تر و تیره تر شدن رنگ پهنک برگ‌ها مشاهده گردید. بعد از مدتی حاشیه برگ‌های جوان تر حالت غیرعادی پیدا کرده و به طرف پشت برگ پیچ خوردند که باعث شد برگ‌ها حالت فنجان‌مانند شکل به خود بگیرند. با ادامه کمبود بور برگ‌های جدید ناقص و بد شکل و پهنک برگ ضخیم تر شد و کاهش رشد قابل توجهی نشان داد و این باریک‌شدگی در برگ‌های جوان کاملاً مشهود بود. آوندها به صورت برجسته دیده شدند. کلروزه



شکل ۱: اثر کمبود بور بر رشد ژنوتیپ‌های مختلف گیاه کلزا در طی دوره تیمار ۳۰ روزه و رشد یافته در محیط هیدروپونیک: A: اپرا، B: زرفام، C:

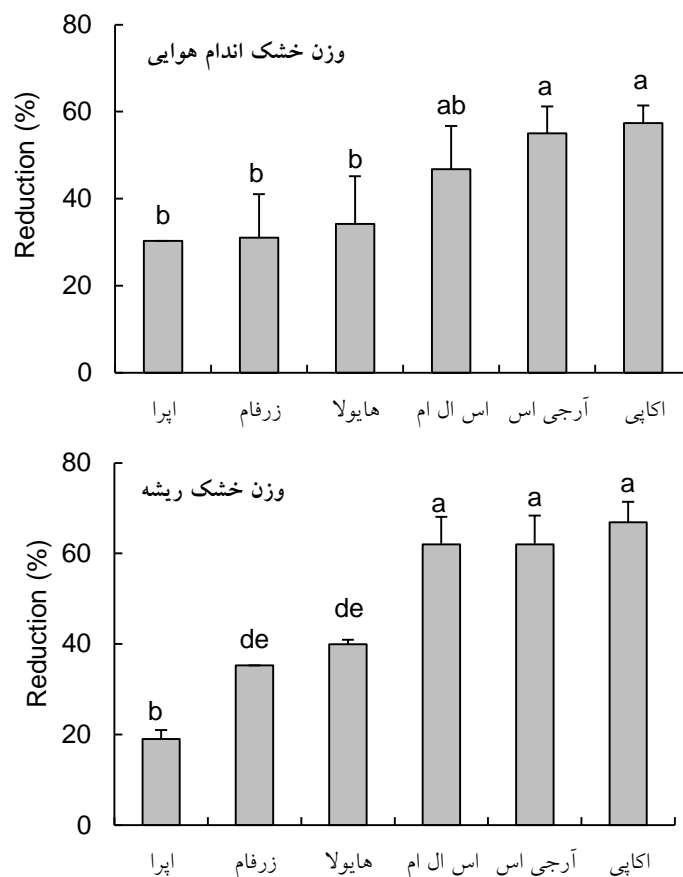
هایولا، D: اس ال ام، E: آر جی اس، F: اکاپی.

محاسبه درصد کاهش رشد اندام هوایی و ریشه نشان داد که ژنوتیپ اپرا کمترین و اکاپی بیشترین حساسیت به کمبود بور دارند (شکل ۲). کمبود بور موجب کاهش معنی‌دار مقدار بور اندام هوایی و ریشه در ژنوتیپ هایولا، اس ال ام، آر جی اس و اکاپی شد. کاهش مقدار بور در اندام هوایی ژنوتیپ اپرا و زرفام به ترتیب ۲۴ و ۴۶ درصد بود. مقدار بور ریشه در هر دو ژنوتیپ به میزان ۲۰ درصد کاهش یافت (شکل ۳).

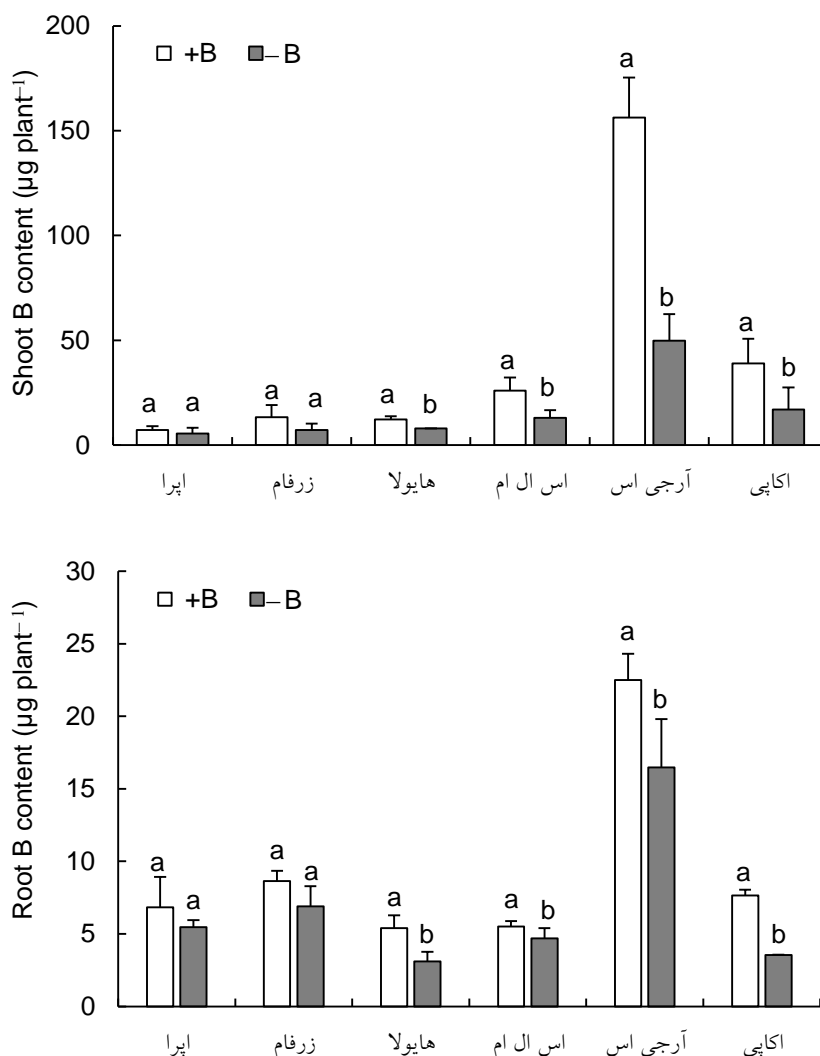
جدول ۱: اثر کمبود بور بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه ($mg\ plant^{-1}$) و طول ریشه ($m\ plant^{-1}$) در شش ژنوتیپ گیاه کلزا با دوره تیمار ۳۰ روزه و رشد یافته در محیط هیدروپونیک. داده‌ها شامل میانگین چهار تکرار و انحراف استاندارد می‌باشد.

ژنوتیپ	وزن خشک اندام هوایی		وزن خشک ریشه		طول ریشه	
	-B	+B	-B	+B	-B	+B
اپرا	36 ± 4^a	38 ± 9^a	2 ± 1^a	3 ± 1^a	0.86 ± 0.02^a	0.91 ± 0.04^a
زرفام	83 ± 6^b	110 ± 8^a	6 ± 1^b	7 ± 1^a	2 ± 0.1^b	3 ± 0.4^a
هایولا	520 ± 13^b	720 ± 190^a	28 ± 11^a	39 ± 11^a	6 ± 0.1^b	24 ± 7^a
اس ال ام	163 ± 26^b	291 ± 58^a	13 ± 2^b	29 ± 7^a	4 ± 1^b	14 ± 4^a
آر جی اس	186 ± 54^b	420 ± 57^a	32 ± 47^b	210 ± 14^a	6 ± 2^b	12 ± 4^a
اکاپی	152 ± 6^b	354 ± 32^a	10 ± 2^b	28 ± 6^a	3 ± 0.1^b	7 ± 1^a

حروف متفاوت بین دو تیمار در هر ژنوتیپ، نشان دهنده تفاوت آماری معنی‌دار می‌باشد (t -test, $p < 0.05$).



شکل ۲: اثر کمبود بور بر کاهش وزن خشک اندام هوایی و ریشه (درصد نسبت به شاهد) در شش ژنوتیپ گیاه کلزا در طی دوره تیمار ۳۰ روزه و رشد یافته در محیط هیدروپونیک. داده‌ها شامل میانگین چهار تکرار و انحراف استاندارد می‌باشد. حروف متفاوت نشان دهنده تفاوت آماری معنی‌دار میان ژنوتیپ‌ها می‌باشد ($p < 0.05$).



شکل ۳: اثر کمبود بور بر مقدار بور اندام هوایی و ریشه در شش ژنوتیپ گیاه کلزا در طی دوره تیمار ۳۰ روزه و رشد یافته در محیط هیدروپونیک. داده‌ها شامل میانگین چهار تکرار و انحراف استاندارد می‌باشد. حروف متفاوت بین دو تیمار در هر ژنوتیپ، نشان دهنده تفاوت آماری معنی‌دار می‌باشد (t-test, $p < 0.05$).

بور، qP (خاموش شدگی فتوشیمیایی)، در ژنوتیپ اس ال ام به صورت معنی‌داری افزایش یافت و در ژنوتیپ زرغام، آرجی اس و اکاپی به صورت غیر معنی‌داری کاهش نشان داد و در ژنوتیپ اپرا و هایولا تغییری نشان نداد. qN (خاموش شدگی غیر فتوشیمیایی) در ژنوتیپ زرغام، هایولا و اکاپی به طور معنی‌داری کاهش یافت و در ژنوتیپ آرجی اس این کاهش بی‌معنی بود و در ژنوتیپ اپرا و اس ال ام افزایش معنی‌داری پیدا کرد. ETR (سرعت انتقال الکترون) در همه ژنوتیپ‌ها کاهش غیر معنی‌داری یافت به جز اکاپی که این کاهش معنی‌دار بود (جدول ۲ و ۳).

تحت تاثیر کمبود بور F_0 (فلوئورسانس پایه) و F_m (فلوئورسانس بیشینه) در همه شش ژنوتیپ به طور معنی‌داری کاهش یافت. F_v/F_m (بیشینه عملکرد کوانتومی فتوسیستم II) و F_v/F_0 (نسبت فلوئورسانس متغیر به فلوئورسانس پایه) در هیچکدام از ژنوتیپ‌ها تحت تاثیر کمبود بور قرار نگرفت. F_m (فلوئورسانس بیشینه روشنایی) در همه ژنوتیپ‌ها به صورت معنی‌داری کاهش پیدا کرد. F'_v/F'_m (کارایی کمپلکس جمع کننده نور فتوسیستم II) و Φ_{PSII} (عملکرد کوانتومی PSII) در هیچکدام از ژنوتیپ‌ها تغییر معنی‌داری نیافت. تحت تاثیر کمبود

جدول ۲: اثر کمبود بور بر شاخص‌های مختلف فلونورسانس کلروفیل در برگ‌های سازش یافته به تاریکی شامل F_0 (فلونورسانس پایه)، F_m (فلونورسانس بیشینه)، F_v/F_m (بیشینه عملکرد کوانتومی فتوسنتز II)، F_v/F_0 (نسبت فلونورسانس متغیر به فلونورسانس پایه)، در شش ژنوتیپ گیاه کلزا با دوره تیمار ۳۰ روزه و رشد یافته در محیط هیدروپونیک. داده‌ها شامل میانگین چهار تکرار و انحراف استاندارد می‌باشد.

F_v/F_0	F_v/F_m	F_m	F_0	تیمار	ژنوتیپ
۴/۶±۰/۰۸ ^a	۰/۸۲±۰/۰۱ ^a	۷۵۸±۵۴ ^a	۱۳۹±۶ ^a	+B	اپرا
۴/۵±۰/۱۴ ^a	۰/۸۲±۰/۰۱ ^a	۶۵۱±۲۶ ^b	۱۱۶±۴ ^b	-B	
۴/۷±۰/۲۵ ^a	۰/۸۲±۰/۰۱ ^a	۷۷۱±۵۳ ^a	۱۳۹±۹ ^a	+B	زرغام
۴/۵±۰/۲ ^a	۰/۸۲±۰/۰۱ ^a	۶۸۹±۲۷ ^b	۱۲۳±۶ ^b	-B	
۵/۸±۲/۵ ^a	۰/۸۴±۰/۰۴ ^a	۷۴۸±۳۲ ^a	۱۴۰±۶ ^a	+B	هایولا
۳/۷±۱/۶ ^a	۰/۸۲±۰/۰۱ ^a	۶۶۱±۲۹ ^b	۱۲۰±۱ ^b	-B	
۴/۵±۰/۵۵ ^a	۰/۸۲±۰/۰۲ ^a	۷۵۰±۱۰ ^a	۱۳۲±۷ ^a	+B	اس ال ام
۴/۹±۰/۷۲ ^a	۰/۸۱±۰/۰۲ ^a	۶۶۵±۲۱ ^b	۱۱۰±۱۸ ^b	-B	
۴/۴±۰/۸۱ ^a	۰/۸۱±۰/۰۳ ^a	۷۰۳±۳۶ ^a	۱۲۷±۳ ^a	+B	آرجی اس
۴/۴±۰/۵۹ ^a	۰/۸۱±۰/۰۲ ^a	۶۴۳±۱۰ ^b	۱۲۳±۴ ^a	-B	
۴/۳±۰/۵۶ ^a	۰/۸۱±۰/۰۲ ^a	۷۸۸±۱۰ ^a	۱۶۳±۳ ^a	+B	اکاپی
۴/۲±۰/۳۲ ^a	۰/۸۱±۰/۰۱ ^a	۷۵۶±۳۴ ^b	۱۲۹±۱۴ ^b	-B	

حروف متفاوت بین دو تیمار در هر ژنوتیپ، نشان دهنده تفاوت آماری معنی‌دار می‌باشد (t-test, $p < 0.05$)

جدول ۳: اثر کمبود بور بر پارامترهای مختلف فلونورسانس کلروفیل در برگ‌های سازش یافته به روشنایی شامل F_{ms} (بیشینه فلونورسانس روشنایی)، F'_v/F'_m (کارایی کمپلکس جمع‌کننده نور فتوسنتز II)، Φ_{PSII} (عملکرد مؤثر کوانتومی PSII)، q_p (خاموش شدگی فتوشیمیایی)، q_N (خاموش شدگی غیر فتوشیمیایی) و ETR (سرعت انتقال خطی الکترون) در شش ژنوتیپ گیاه کلزا با دوره تیمار ۳۰ روزه و رشد یافته در محیط هیدروپونیک.

ETR	q_N	q_p	Φ_{PSII}	F'_v/F'_m	F_{ms}	تیمار	ژنوتیپ
۱۱۳±۶ ^a	۰/۱±۰/۰۱ ^b	۰/۸۵±۰/۰۲ ^a	۰/۶۷±۰/۰۴ ^a	۰/۸۱±۰/۰۱ ^a	۷۷۰±۴ ^a	+B	اپرا
۱۱۹±۷ ^a	۰/۱۴±۰/۰۱ ^a	۰/۸۵±۰/۰۵ ^a	۰/۷۱±۰/۰۴ ^a	۰/۸۲±۰ ^a	۶۵۲±۴۲ ^b	-B	
۱۲۲±۳ ^a	۰/۱۴±۰/۰۷ ^a	۰/۹±۰/۰۲ ^a	۰/۷۲±۰/۰۲ ^a	۰/۸۲±۰/۰۱ ^a	۶۷۷±۶ ^a	+B	زرغام
۱۲۰±۳ ^a	۰/۰۱±۰/۰۶ ^b	۰/۸۶±۰/۰۵ ^a	۰/۷۱±۰/۰۲ ^a	۰/۸۲±۰/۰۱ ^a	۶۵۸±۱۱ ^b	-B	
۱۲۵±۱ ^a	۰/۰۹±۰/۰۴ ^a	۰/۹±۰/۰۱ ^a	۰/۷۳±۰/۰۲ ^a	۰/۸۴±۰/۰۴ ^a	۷۷۷±۱ ^a	+B	هایولا
۱۲۳±۳ ^a	۰/۰۱±۰/۰۱ ^b	۰/۹±۰/۰۲ ^a	۰/۷۳±۰/۰۲ ^a	۰/۷۸±۰/۰۸ ^a	۶۵۴±۲۱ ^b	-B	
۱۱۶±۸ ^a	۰/۰۱±۰/۰۱ ^b	۰/۶۹±۰/۰۵ ^b	۰/۸۶±۰/۰۳ ^a	۱±۰ ^a	۶۵۵±۴۷ ^a	+B	اس ال ام
۱۱۲±۴ ^a	۰/۲۱±۰/۱ ^a	۰/۸۶±۰/۰۳ ^a	۰/۸۶±۰/۰۳ ^a	۰/۷۸±۰/۱۴ ^b	۵۸۱±۳۶ ^b	-B	
۱۲۵±۴ ^a	۰/۰۸±۰/۰۴ ^a	۰/۹۳±۰/۰۵ ^a	۰/۷۴±۰/۰۳ ^a	۰/۸±۰/۰۴ ^a	۶۶۷±۵ ^a	+B	آرجی اس
۱۱۸±۱۰ ^a	۰/۰۴±۰/۰۴ ^a	۰/۸۶±۰/۰۸ ^a	۰/۷±۰/۰۶ ^a	۰/۸۱±۰/۰۲ ^a	۶۵۸±۲ ^b	-B	
۱۲۱±۳ ^a	۰/۰۳±۰/۰۱ ^a	۰/۷±۰/۰۴ ^a	۰/۷±۰/۰۴ ^a	۱±۰ ^a	۶۷۳±۲ ^a	+B	اکاپی
۱۱۴±۴ ^b	۰/۰۱±۰ ^b	۰/۶۸±۰/۰۳ ^a	۰/۶۸±۰/۰۳ ^a	۱±۰ ^a	۶۰۱±۴۸ ^b	-B	

حروف متفاوت بین دو تیمار در هر ژنوتیپ، نشان دهنده تفاوت آماری معنی‌دار می‌باشد (t-test, $p < 0.05$)

معنی‌دار بود. شدت تعرق در گیاهان تحت کمبود بور در همه ژنوتیپ‌ها اندکی کاهش یافت. این کاهش در ژنوتیپ اپرا، زرغام،

همه شاخص‌های تبادل گاز برگ‌ها تحت اثر کمبود بور کاهش یافت. کاهش شدت تثبیت خالص دی‌اکسید کربن

پیچ خوردگی برگ‌های جوان و کوتاه و قهوه‌ای شدن ریشه‌ها دیده شد. در شرایط کمبود توام بور و کلسیم (-B-Ca)، چهار روز پس از اعمال تیمار، برگ‌ها پیچ خوردگی شدیدی نشان دادند و ارتفاع گیاه در مقایسه با شاهد کاهش یافت. یازده روز پس از تیمار، برگ‌های تازه نمو یافته در مقایسه با شاهد کوچک‌تر بودند اما برگ‌های پایینی بدون کاهش اندازه، نکروزه و خشک شدند و پوسیدگی و قهوه‌ای شدن ریشه نیز مشاهده شد. دوازده روز پس از تیمار، گیاهان مردند (شکل ۵).

در تیمار کمبود توام بور و آهن (-B-Fe) وزن خشک اندام هوایی و ریشه بطور معنی‌داری کاهش یافت. به این صورت که وزن تر و خشک اندام هوایی در تیمار کمبود بور (-B+Fe) نسبت به کفایت هر دو عنصر (+B+Fe) ۵۴ درصد کاهش یافت و در تیمار کمبود توام بور و آهن (-B-Fe) نسبت به کفایت هر دو عنصر (+B+Fe) به ترتیب ۷۸ و ۶۲ درصد کاهش یافت که نشان دهنده تشدید اثرات کمبود بور توسط کمبود آهن می‌باشد. وزن تر و خشک ریشه در تیمار توام کمبود بور و آهن (-B+Fe) نسبت به کفایت هر دو عنصر به ترتیب ۶۸ و ۷۰ درصد کاهش یافت. در تیمار توام کمبود بور و کلسیم (-B-Ca) نیز وزن خشک اندام هوایی و ریشه بطور معنی‌داری کاهش یافت اما وزن خشک اندام هوایی اندکی افزایش پیدا کرد که معنی‌دار نبود (شکل ۶).

هایولا، اس ال ام، آر جی اس و اپرا به ترتیب ۱/۸، ۳۴، ۶، ۳، ۱/۶ و ۶ درصد بود. هدایت روزنه‌ای در همه ژنوتیپ‌ها اندکی کاهش یافت. این کاهش در ژنوتیپ اپرا ۲۰، زرفام ۴۸، هایولا ۶۵، اس ال ام ۳۹، آر جی اس ۲۱ و اکاپی ۴۰ درصد بود. کارایی بهره‌وری آب (WUE) در همه ژنوتیپ‌ها به صورت غیر معنی‌داری کاهش یافت (جدول ۴).

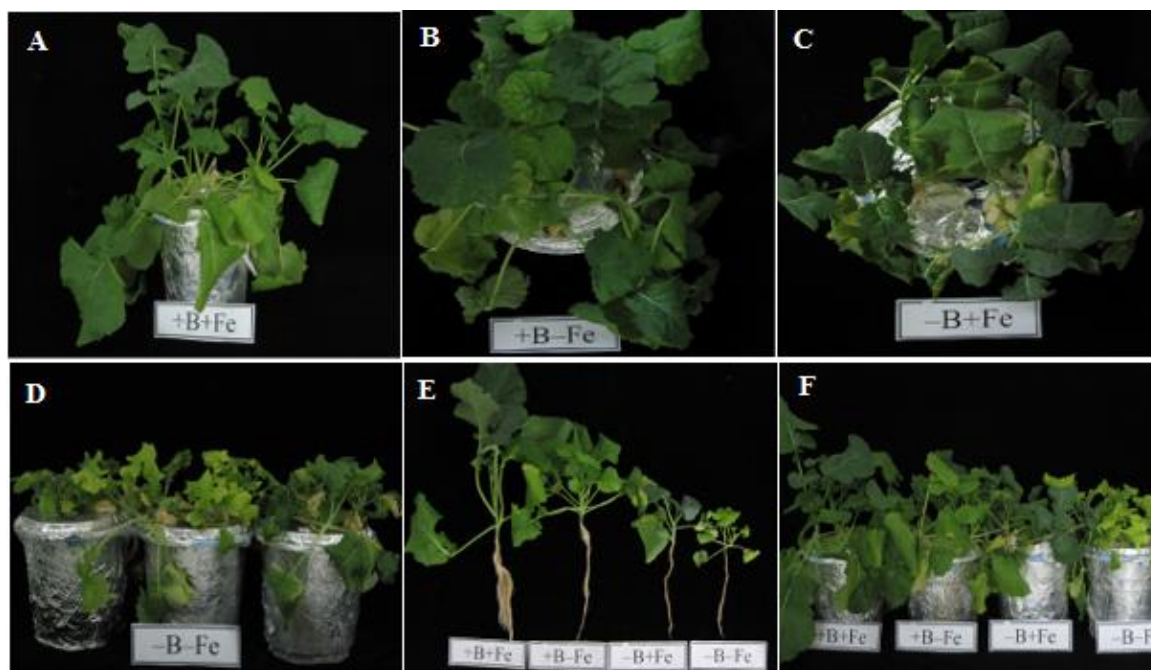
در آزمایش اثر متقابل کمبود بور با کمبود آهن، گیاهان رشد یافته تحت کمبود بور (-B+Fe) مشابه آزمایش اصلی، پیچ خوردگی و کاهش سطح پهنک برگ نشان داده و ارتفاع آن‌ها کاهش و حالت طوقه‌ای پیدا کردند. یک هفته پس از تیمار کمبود آهن (-B+Fe) کلروز بین رگ‌رگی در گیاهان ظاهر شد اما تغییری در ارتفاع گیاه، اندازه برگ و طول ریشه ثبت نشد. بیشترین کاهش رشد در شرایط تیمار توام کمبود بور و آهن (-B-Fe) دیده شد به این صورت که سه روز پس از اعمال تیمار، برگ گیاهان زرد شده و بتدریج ارتفاع اندام هوایی کاهش یافته و برگ‌ها علایم مرگ نشان دادند. یک هفته پس از اعمال تیمار، برگ‌ها کاملاً کوچک شده و به شکل فنجان‌ی پیچ خوردگی شدید درآمدند. حالت طوقه‌ای که در کمبود بور ایجاد شده بود شدیدتر شده و ارتفاع گیاهان کوتاه‌تر و برگ‌ها زرد شدند (شکل ۴).

در تیمار کمبود کلسیم (+B-Ca) نکروزه شدن نوک و حاشیه برگ‌های جوان، کاهش رشد و کلروز عمومی برگ‌ها،

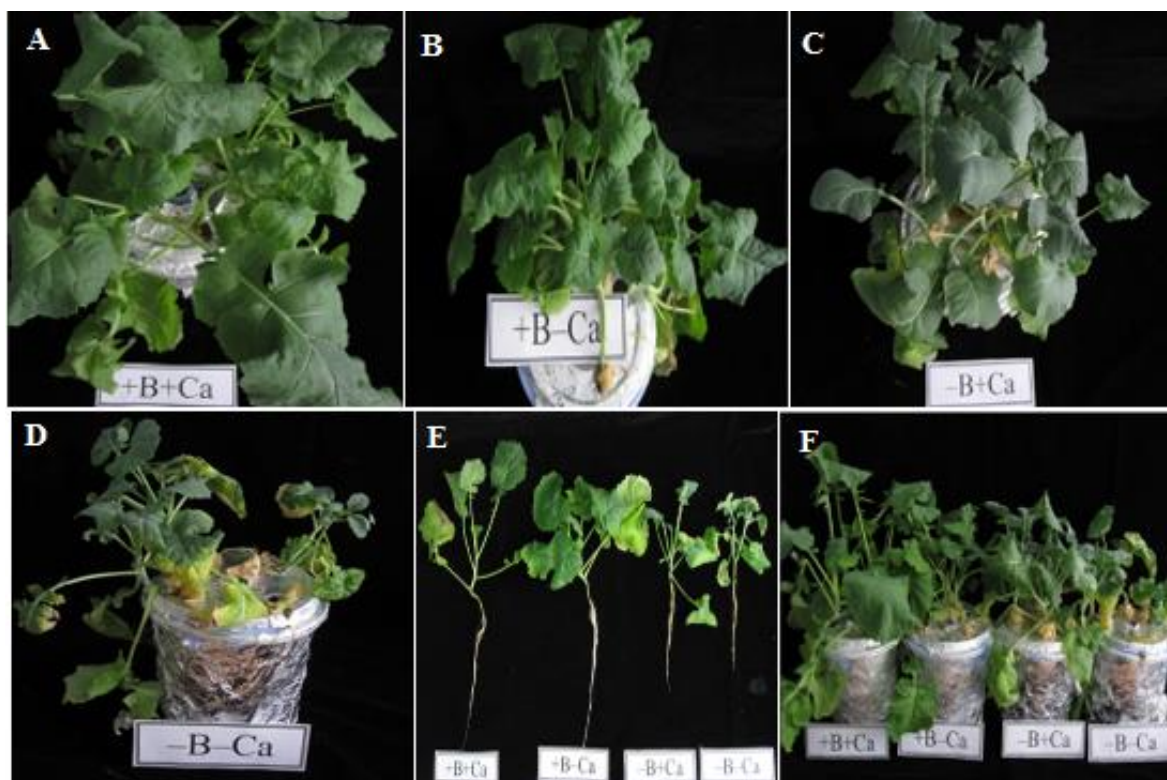
جدول ۴: اثر کمبود بور بر پارامترهای مختلف تبادل گاز شامل ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) A (شدت تثبیت خالص CO_2)، ($\text{m mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) E (شدت تعرق)، ($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) g_s (هدایت روزنه‌ای) و WUE (A/E) (کارایی مصرف آب) در شش ژنوتیپ گیاه کلزا با دوره تیمار ۳۰ روزه و رشد یافته در محیط هیدروپونیک.

ژنوتیپ	تیمار	A	E	g_s	WUE
اپرا	+B	۳/۱۶±۰/۱ ^a	۱/۶۱±۰/۱ ^a	۰/۳۶±۰/۲ ^a	۲/۶۳±۰/۸ ^a
	-B	۲/۷۲±۰/۳ ^b	۱/۵۸±۰/۵ ^a	۰/۲±۰/۱ ^a	۱/۷۴±۰/۵ ^a
زرفام	+B	۴/۱۷±۱/۵ ^a	۱/۸۷±۰/۴ ^a	۰/۵۸±۰/۱ ^a	۳/۸۴±۲/۷ ^a
	-B	۲/۴۴±۱/۵ ^b	۱/۲۳±۰/۴ ^a	۰/۳±۰/۱ ^b	۱/۶۷±۰/۶ ^a
هایولا	+B	۴/۱۲±۰/۵ ^a	۱/۵۴±۰/۳ ^a	۰/۹۶±۰/۱ ^a	۲/۷۳±۰/۵ ^a
	-B	۳/۱۴±۰/۵ ^b	۱/۴۵±۰/۳ ^a	۰/۳۳±۰/۱ ^b	۲/۲۲±۰/۴ ^a
اس ال ام	+B	۳/۱۲±۰/۱ ^a	۲/۵۱±۰/۱ ^a	۲/۵۱±۰/۵ ^a	۱/۴۳±۰/۰۳ ^a
	-B	۲/۴۸±۰/۴ ^b	۲/۴۴±۰/۱ ^a	۲/۵۰±۰/۵ ^a	۱/۰۲±۰/۲ ^a
آر جی اس	+B	۳/۶۷±۰/۸ ^a	۱/۱۹±۰/۰۳ ^a	۰/۴۵±۰/۲ ^a	۳/۲۷±۱/۱ ^a
	-B	۲/۶۵±۰/۱ ^b	۱/۵۶±۰/۵ ^a	۰/۳۶±۰/۱ ^a	۱/۷۲±۰/۳ ^b
اکاپی	+B	۳/۳۵±۰/۳ ^a	۱/۸۹±۰/۶ ^a	۱/۴۱±۱/۳ ^a	۱/۶۲±۰/۶ ^a
	-B	۲/۳۴±۰/۲ ^b	۱/۷۷±۰/۴ ^a	۰/۸۳±۰/۸ ^a	۱/۵۵±۰/۶ ^a

حروف متفاوت بین دو تیمار در هر ژنوتیپ، نشان دهنده تفاوت آماری معنی‌دار می‌باشد ($p < 0.05$, t-test).



شکل ۴: اثر متقابل بین کمبود بور و آهن بر رشد گیاه کلزا ژنوتیپ هایولا با دوره تیمار ۳۰ روزه و رشد یافته در محیط هیدروپونیک A: کفایت بور و آهن (+B +Fe)، B: کفایت بور و کمبود آهن (+B -Fe)، C: کمبود بور و کفایت آهن (-B +Fe)، D: کمبود بور و کمبود آهن (-B -Fe)، E و F: رشد گیاهان در همه چهار ترکیب تیماری.



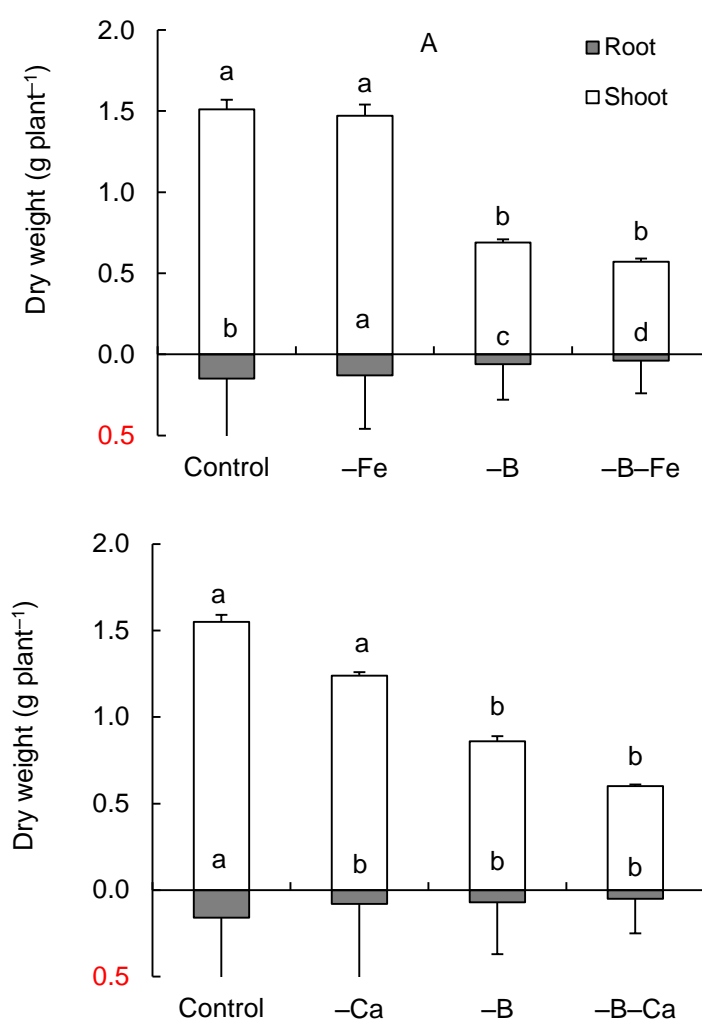
شکل ۵: اثر متقابل بین کمبود بور و کلسیم بر رشد گیاه کلزا ژنوتیپ هایولا با دوره تیمار ۳۰ روزه و رشد یافته در محیط هیدروپونیک A: کفایت بور و کلسیم (+B +Ca)، B: کفایت بور و کمبود کلسیم (+B -Ca)، C: کمبود بور و کفایت کلسیم (-B +Ca)، D: کمبود بور و کمبود کلسیم (-B -Ca)، E و F: رشد گیاهان در همه چهار ترکیب تیماری.

هوایی و ریشه در تیمار توام کمبود بور و کلسیم (-B-Ca) مشاهده شد که مقدار بور در مقایسه با کفایت هر دو عنصر کاهش معنی داری یافت (شکل ۸).

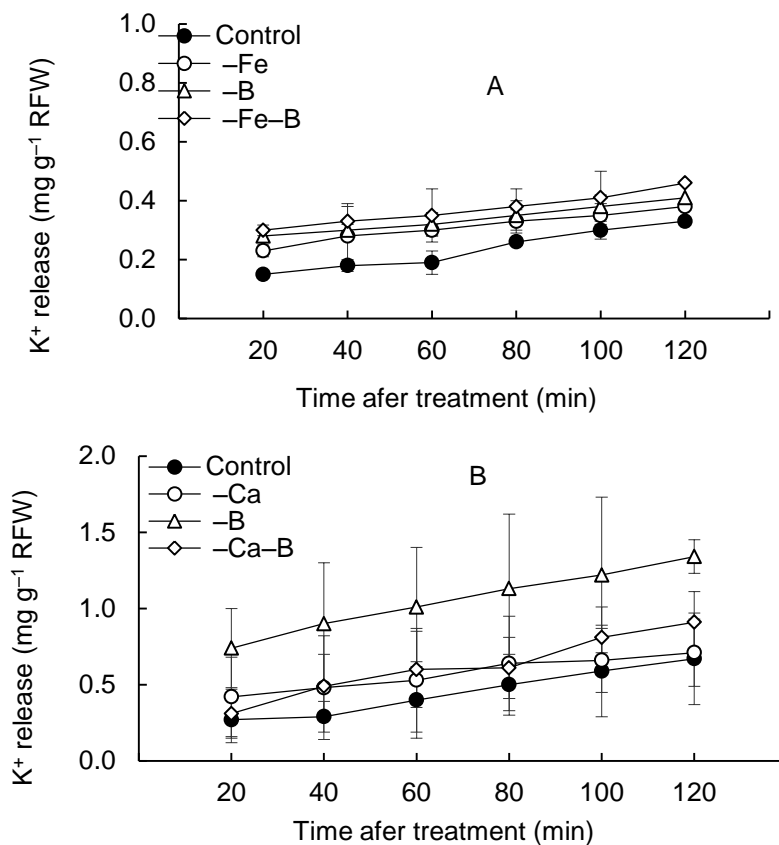
در شرایط رشد شاهد (+B+Fe) ریشه گیاهان با آزادسازی یون هیدروکسیل موجب قلیایی شدن محیط شدند. تیمار کمبود بور (-B+Fe) برعکس، موجب آزادسازی پروتون و اسیدی شدن pH ریزوسفر شد. اسیدی شدگی محیط در تیمار توام کمبود بور و آهن (-B-Fe) شدت بیشتری در مقایسه با کمبود هر دو عنصر به تنهایی داشت (جدول ۵).

بیشترین افزایش نشت پتاسیم در مقایسه با شاهد در تیمار توام کمبود بور و آهن (-B-Fe) مشاهده شد. در تیمار کمبود بور (-B+Ca) و در تیمار توام کمبود بور و کلسیم (-B-Ca) نشت پتاسیم افزایش یافت (شکل ۷).

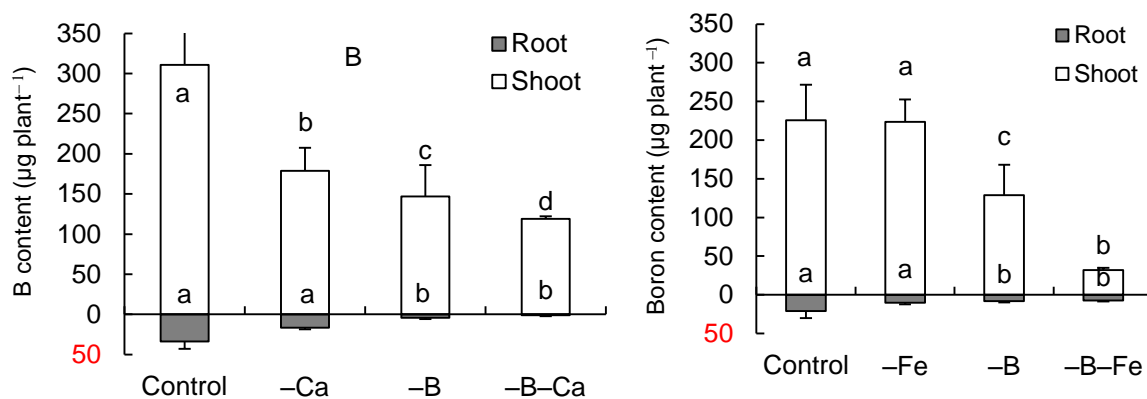
تیمار کمبود بور (-B+Fe) موجب کاهش مقدار بور اندام هوایی و ریشه شد و بیشترین میزان کاهش بور در تیمار توام کمبود بور و آهن (-B-Fe) مشاهده گردید که مقدار بور در آن به طور معنی داری کاهش یافت. در تیمار کمبود کلسیم (+B-Ca) مقدار بور باقی کاهش بیشتری یافت. بیشترین کاهش مقدار بور در اندام



شکل ۶: وزن خشک (g plant⁻¹) اندام هوایی و ریشه در گیاه کلزا ژنوتیپ هایولا با دوره تیمار ۳۰ روزه و رشد یافته در محیط هیدروپونیک. A: تیمار اثر متقابل بین کمبود بور و آهن B: تیمار اثر متقابل بین کمبود بور و کلسیم. حروف متفاوت نشان دهنده تفاوت آماری معنی دار می باشد (p < ۰/۰۵).



شکل ۷: نشت پتاسیم (K^+ release g^{-1} RFW) از ریشه‌های گیاه کلزا ژنوتیپ هایولا رشد یافته در محیط هیدروپونیک. A: تیمار اثر متقابل بین کمبود بور و آهن. B: تیمار اثر متقابل بین کمبود بور و کلسیم.



شکل ۸: مقدار بور ($\mu g \text{ plant}^{-1}$) در اندام هوایی و ریشه گیاه کلزا ژنوتیپ هایولا رشد یافته در محیط هیدروپونیک. A: تیمار اثر متقابل بین کمبود بور و آهن. B: تیمار اثر متقابل بین کمبود بور و کلسیم.

جدول ۵: آزاد سازی پروتون از ریشه‌های گیاه کلزا ژنوتیپ هایولا تحت تاثیر متقابل بین کمبود بور و آهن و بین کمبود بور و کلسیم. اعداد منفی نشان‌دهنده آزاد سازی OH^- و اعداد مثبت نشان دهنده آزاد سازی H^+ به محیط است. داده‌ها شامل میانگین چهار تکرار و انحراف استاندارد می‌باشد. حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت آماری معنی دار است ($p < 0.05$).

تیمار	H^+ یا OH^- رها شده	تیمار	H^+ یا OH^- رها شده
شاهد	$3/9 \pm 0/9^b$	شاهد	$-1/9 \pm 0/57^b$
-Ca	$3/4 \pm 0/07^b$	-Fe	$1/9 \pm 3/7^{ce}$
-B	$14/7 \pm 2/4^a$	-B	$9/8 \pm 0/68^{de}$
-Ca-B	$6/98 \pm 1/5^c$	-Fe-B	$14/3 \pm 0/31^a$

بحث

در این پژوهش کمبود بور تاثیر عمده‌ای بر رشد و نمو و مورفولوژی ریشه و اندام هوایی در شش ژنوتیپ کلزا داشت. کمبود بور مانع گسترش برگ، رشد ریشه و کاهش چیرگی انتهایی در گیاهان می‌شود [۵، ۱۴]. در کمبود شدید و طولانی مدت بور، میانگرها کوتاه می‌شود و لکه‌های نکروزه بر روی برگ ظاهر می‌گردد [۱۶]. کمبود بور فعالیت مریستم ریشه و ساقه و رشد گل را مهار می‌کند و منجر به نارسایی زادآوری و در نهایت کاهش عملکرد شده و باعث پوسیدگی قلب در ریشه‌ها و شاخساره‌ها در کلزا می‌شود [۱۲]. کمبود بور موجب اختلال در تقسیمات سلولی در مریستم‌ها می‌شود و برگ‌های تشکیل یافته گسترش کافی نمی‌یابند [۴۵]. در بررسی حاضر نیز گیاهان دچار کمبود بور دارای برگ‌های کوچکتر و پیچ خورده بودند که نشان دهنده اختلال در هردو تقسیم و گسترش سلولی است که مطابق با یافته‌های قبلی ما نیز می‌باشد [۴۵]. ایجاد حالت طوقه‌ای در گیاهان به دلیل کاهش چیرگی راسی است که از علائم کمبود بور می‌باشد [۴].

وزن خشک اندام هوایی و ریشه هر دو به شدت تحت تاثیر کمبود بور کاهش یافت. بیشترین میزان کاهش رشد در ژنوتیپ اکاپی دیده شد و بنابراین حساس ترین ژنوتیپ به کمبود بور می‌باشد در حالی که کمترین حساسیت به کمبود بور در ژنوتیپ اپرا به عنوان مقاوم ترین ژنوتیپ به کمبود بور مشاهده گردید. کاهش وزن خشک ریشه و اندام هوایی تحت تاثیر کمبود بور در تعداد زیادی از گونه‌های گیاهی گزارش شده است [۴۶]. کاهش فتوسنتز می‌تواند یکی از دلایل مهم کاهش تولید ماده خشک در گیاهان دچار کمبود بور باشد [۴۵]. اختلال در رشد گیاهان در شرایط کمبود بور نتیجه کاهش گسترش سلول‌های گیاهان و نیز کاهش تقسیم سلولی است [۷، ۹ و ۴۷]. نقش بور در گسترش سلولی می‌تواند به نقش ساختمانی این عنصر در دیواره سلولی مربوط باشد. بور یکی از اجزای ساختاری ماده زمینه‌ای دیواره از گروه رامنوگالاکتورونان هاست و در دایمری کردن رشته‌های فوق عمل می‌کند. کمبود بور موجب اختلال در تشکیل دایمرهای رامنوگالاکتورونان و بنابراین جلوگیری از تشکیل ساختار مناسب دیواره می‌شود [۴۸]. دیواره در سلول‌های گیاهی نقشی فراتر از حفاظت فیزیکی سلول‌ها داشته و هر نوع تغییر در بیوسنتز آن

موجب اختلال در تقسیم، گسترش و متابولیسم عادی سلول می‌شود [۴۹] مقدار بور در ریشه و اندام هوایی در کمبود بور در هر شش ژنوتیپ کاهش یافت که مطابق انتظار بود. کمترین میزان کاهش مقدار بور در ژنوتیپ اپرا و بیشترین مقدار در ژنوتیپ آرجی اس و اکاپی مشاهده شد که مطابق با تفاوت در پاسخ رشدی این ژنوتیپ‌ها به کمبود بور بود.

کمبود بور موجب کاهش رشد طولی ریشه در هر شش ژنوتیپ کلزا گردید. کمترین کاهش رشد طولی ریشه در ژنوتیپ اپرا دیده شد که نشان دهنده حساسیت کمتر این ژنوتیپ به کمبود بور می‌باشد. بیشترین میزان کاهش رشد طولی ریشه در ژنوتیپ هایولا و اس ال ام دیده شد. کمبود بور مانع رشد طولی ریشه شده، بر توزیع اسیدهای پکتیک اثر دارد، منجر به کاهش کثافت دیواره سلول شده و رشد طولی سلول را کم می‌کند [۴]. توقف رشد ریشه در شرایط کمبود بور ناشی از مهار سنتز DNA و قطع تقسیم سلولی در مریستم راسی می‌باشد [۱۶].

فلوئورسانس پایه و فلوئورسانس بیشینه در شرایط کمبود بور کاهش یافت که ممکن است به دلیل کاهش محتوای کلروفیل باشد و کاهش در فلوئورسانس بیشینه می‌تواند نشان دهنده غیر فعال شدن مراکز واکنشی فتوسیستم II یا کاهش در اندازه آنتن‌ها باشد [۵۰]. با این حال، شاخص‌های دیگر شامل F_v/F_m (بیشینه عملکرد کوانتومی فتوسیستم II)، F_v/F_0 (نسبت فلوئورسانس متغیر به فلوئورسانس پایه)، F'_v/F'_m (کارایی کمپلکس جمع کننده نور فتوسیستم II)، Φ_{PSII} (عملکرد مؤثر کوانتومی PSII)، ETR (سرعت انتقال خطی الکترون) کاهش معنی‌داری در شرایط کمبود بور نشان ندادند که احتمالاً به دلیل حفظ ساختمان تیلاکوئیدها و آسیب ندیدن آن‌ها در این شرایط بوده است [۵۰]. در این بررسی شدت تاثیر کمبود بور بر فلوئورسانس پایه و بیشینه در ژنوتیپ‌های مختلف متفاوت بود، بطوری که فلوئورسانس پایه در ژنوتیپ اکاپی، بیشترین و در آرجی اس کمترین تاثیر را از کمبود بور پذیرفت. برعکس، فلوئورسانس بیشینه کمترین کاهش را در ژنوتیپ اکاپی نشان داد و بیشترین کاهش در هایولا و اپرا مشاهده گردید. در مورد سایر شاخص‌های فلوئورسانس کلروفیل نیز چنین تفاوت‌های ژنوتیپی مشاهده شد که می‌تواند به دلیل تفاوت در ساختار و حساسیت عملکرد کلروپلاست‌ها و یا تولید متفاوت ترکیبات فنلی و گونه‌های فعال اکسیژن در شرایط

کلروفیل برگ و ایندول استیک اسید افزایش و منجر به افزایش ارتفاع گیاه می‌شود [۵۴].

در تیمار کمبود کلسیم (+B-Ca) نکروزه شدن نوک و حاشیه برگ‌های جوان، کاهش رشد و کلروز عمومی برگ‌ها، پیچ‌خوردگی برگ‌های جوان و کوتاه و قهوه‌ای شدن ریشه‌ها دیده شد که از علائم بارز کمبود کلسیم می‌باشند [۲۴، ۳] و مطابق با یافته‌های قبلی می‌باشد [۲۵]. به دلیل حضور کلسیم در دیواره سلول و نقش آن در رشد سلولی، کمبود کلسیم موجب رشد نابرابر حاشیه برگ و پیچ‌خوردگی آن می‌شود. کاهش شدید رشد به دلیل نکروزه شدن جوانه انتهایی و توقف تقسیم مریستم و مرگ مریستم در کمبود کلسیم می‌باشد [۵۵]. در این پژوهش بیشترین کاهش رشد در تیمار توام کمبود بور و کلسیم (-B-Ca) دیده شد که مطابق با یافته‌های قبلی است و در واقع تشدید کمبود بور با کمبود کلسیم به دلیل نقش مشترک هر دو عنصر در دیواره است [۵۶]. هر دو عنصر در ساختمان دیواره شرکت می‌کنند هر چند محل اتصال متفاوتی دارند. کلسیم با گروه‌های کربوکسیلی موجود در دیواره پیوند برقرار کرده و موجب استحکام دیواره می‌شود. این پیوندها به هنگام رشد سلول سست شده و بعد از گسترش دیواره دوباره تشکیل می‌شوند [۳، ۱۳].

کاهش شدید وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه که در تیمار کمبود توام بور و آهن (-B-Fe) مشاهده گردید نشان دهنده تشدید اثرات کمبود بور توسط کمبود آهن می‌باشد. آهن جزء ساختاری آنزیم‌ها و پروتئین‌های خاص در سلول، از جمله سیتوکروم‌ها می‌باشد و نقش اساسی در سنتز کلروفیل و رشد کلروپلاست و انتقال انرژی در داخل گیاه دارد بنابراین دارای نقش اساسی در رشد گیاه است [۵۴]. و کمبود آهن بیشترین اثر را روی کلروپلاست و فتوسنتز دارد و در نتیجه موجب کاهش تثبیت دی اکسید کربن و کاهش رشد گیاه می‌شود [۳].

در تیمار توام کمبود بور و کلسیم (-B-Ca) وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه کاهش شدیدی نشان داد که مطابق با مطالعات قبلی می‌باشد [۵۶]. کمبود بور و کلسیم باعث کاهش توده زنده و رشد گیاه می‌شود و کمبود کلسیم باعث تجزیه دیواره سلول شده و مانع از رشد گیاه می‌گردد [۳۹]. بیشترین عملکرد و وزن خشک اندام هوایی و ریشه در کفایت هر دو عنصر بود که مطابق با مطالعات قبلی می‌باشد که گزارش کردند کاربرد

کمبود بور در این ژنوتیپ‌ها باشد [۵۰]. اصلاح کنندگان گیاهان از شاخص‌های فلئورسانس کلروفیل برای تشخیص سریع پاسخ ارقام یا لاین‌های مختلف نسبت به تنش‌های محیطی استفاده می‌کنند [۵۱].

تحت کمبود بور، کمترین میزان کاهش تثبیت دی اکسید کربن در ژنوتیپ اپرا مشاهده شد. کاهش شدت فتوسنتز در کمبود بور، عمدتاً بدلیل بستن روزنه‌ها بود و به دلیل مهار گشودگی روزنه‌ها، تثبیت دی اکسید کربن نیز افت کرد. بور در فتوسنتز و بعضی از آنزیم‌ها و غشاهای فتوسنتزی و مراحل اولیه متابولیسم و نقل و انتقال قند نقش دارد [۱۸] و کمبود بور بر ظرفیت فتوسنتزی و انتقال فرآورده‌های فتوسنتزی تأثیر می‌گذارد و موجب کاهش هدایت روزنه‌ای و جذب دی اکسید کربن و افزایش دی اکسید کربن بین سلولی در برگ می‌شود [۱۶]. کمبود بور منجر به افزایش فعالیت لیپواکسیژناز و مقدار مالون‌دی‌آلدئید غشاهای تیلاکوئیدی و کاهش محتوای لینولنیک اسید و لینولنیک اسیدها و کاهش واکنش‌های Hill و انتقال الکترون در زنجیره انتقال الکترون می‌شود که همراه با کاهش فعالیت فتوسیستم II می‌باشد [۱۹]. با این حال، کمبود بور هیچ تأثیر منفی روی شاخص‌های دیگر مربوط به فتوسنتز مانند چگالی روزنه‌ها، غلظت کلروفیل، ظرفیت فتوسنتزی و کارایی فتوسیستم II ندارد [۵۲]. هیچ مدرکی برای اثبات اثر مستقیم بور در فتوسنتز گزارش نشده است [۵۳].

در این پژوهش تیمار کمبود آهن (+B-Fe) موجب ایجاد لکه‌های زرد بین رگبرگی در گیاهان شد که بدلیل کاهش یا توقف سنتز کلروفیل می‌باشد، زیرا آهن در سه مرحله از مسیر بیوسنتزی کلروفیل دخالت می‌کند و از مهم‌ترین نشانه‌های کمبود آهن کلروز بین رگبرگی است [۲۱، ۳]. حالت پیچ‌خوردگی و کاهش سطح پهنک برگ در کمبود بور، با اعمال کمبود آهن بیشتر شد که نشان دهنده تشدید اثرات کمبود بور بود. در کمبود آهن تقسیم سلولی کاهش و بنابراین گسترش برگ گیاهان کاهش می‌یابد [۳]. کاهش رشد و ارتفاع گیاه نیز بدلیل نقش آهن در فتوسنتز است که در شرایط کمبود سبب کاهش فرآورده‌های فتوسنتزی و سرانجام کاهش رشد می‌شود [۳]. مطالعات قبلی نشان داده است که در کمبود بور و آهن، ارتفاع گیاه کاهش می‌یابد و با کاربرد آهن و بور تشکیل دیواره سلولی، غلظت

عنصر مقدار بور در بیشترین مقدار خود بود. مطالعات نشان داده است که یک اثر هم افزایی بین بور و آهن وجود دارد و کاربرد آهن باعث افزایش مقدار بور در گیاه می‌شود [۲۳]. در تیمار کمبود بور و کلسیم (B-Ca-) مقدار بور اندم هوایی و ریشه در مقایسه با کفایت هر دو عنصر کاهش معنی‌داری یافت که مطابق با یافته‌های قبلی در این زمینه می‌باشد [۶۳، ۵۶]. تقابل بین عناصر زمانی رخ می‌دهد که عرضه یک عنصر بر جذب، توزیع یا عملکرد یک عنصر دیگر تاثیر بگذارد و بور و کلسیم دارای میانگین با همدیگر می‌باشد [۵۶]. کمبود بور موجب کاهش مقدار بور بافتی می‌شود [۶۳، ۵۰] و در کمبود بور و کلسیم نیز مقدار بور بافت کاهش یافته و کاربرد کلسیم اضافی باعث افزایش مقدار بور بافتی می‌شود [۵۶].

نتیجه‌گیری نهایی

داده‌های بررسی حاضر نشان می‌دهد که از مهم‌ترین تاثیرات کمبود بور در دوره رشد رویشی اختلال در نمو برگ و نیز کاهش فتوسنتز و فرآورده‌های فتوسنتزی است. از بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه، اپرا کمترین و اکاپی بیشترین حساسیت به کمبود بور را از خود نشان دادند. کمبود کلسیم و آهن موجب تشدید علائم کمبود بور شد و کمبود توام بور و آهن (B-Fe-) و بور و کلسیم (B-Ca-) موجب آسیب به ساختار غشا شده و بنابراین موجب افزایش نشت پتاسیم و نیز آزاد سازی پروتون به محیط گردید و موجب کاهش قابل توجه رشد رویشی و کاهش کیفیت و عملکرد گیاه کلزا شد.

منابع

- [1] Taiz L, Zeiger E. Plant physiology. 5th edition, Sinauer Associates, Inc., Sunderland. 2010.
- [2] Gowhar A. D. Impact of Boron Nutrition in Fruit Crops. ICMAS. 2017; 6(12): 4145-4155.
- [3] Marschner, P. Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd Ed, Academic Press, London. 2011.
- [4] Johnson C. M, Stout P. R, Broyer T. C, Carlton A. B. Comparative chloride requirements of different plant species. PS. 1975; 8: 337-353.
- [5] Day S, Aasim M. Role of Boron in Growth and Development of Plant: Deficiency and Toxicity Perspective. PM. 2020; 435-453.
- [6] Greenwood E. A. N, Hallsworth E. G. Studies

همزمان بور و کلسیم به طور معنی‌داری وزن خشک گیاهان را افزایش می‌دهد [۵۷].

بور نقش اساسی در حفظ یکپارچگی ساختاری و عملکردی غشاهای زیستی دارد [۳]. افزایش غلظت ترکیبات فنلی در شرایط کمبود بور (B-) باعث تشکیل کونینون‌ها و رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌شود که این رادیکالها به ساختار غشاء و عملکرد سلولی آسیب وارد کرده و سبب افزایش نشت غشایی می‌شوند [۵۸، ۵۹]. در کمبود آهن (Fe-) نیز فعالیت آنزیم پراکسیداز کاهش یافته و تولید رادیکال‌های آزاد افزایش می‌یابد [۳] و بنابراین موجب افزایش بیشتر نشت در شرایط کمبود توام آهن و بور می‌شود [۶۰]. کاهش فعالیت تلمبه پروتون [۴۹] و نیز نشت یون‌های پتاسیم در شرایط کمبود بور نیز مشاهده شده است (Cakmak and Römheld, 1997). افزایش بیشتر نشت پتاسیم در تیمار توام کمبود بور و کلسیم (B-Ca-) به دلیل نقش کلسیم در تنظیم تراوایی غشاهاست و مطالعات نشان داده است که کمبود کلسیم نیز موجب نشت غشایی می‌شود و غشای سلولی مکانی برای میان کشش بور و کلسیم می‌باشد [۲۵].

افزایش آزادسازی پروتون [۶۱] و اسیدی شدن pH ریزوسفر در کمبود بور احتمالاً بدلیل کاهش جذب نیترا و افزایش نسبت جذب کاتیون به آنیون بوده است [۶۲]. تیمار کمبود آهن (B-+Fe) نیز موجب افزایش اسیدی شدگی pH ریزوسفر شد. اسیدی شدگی محیط در تیمار توام کمبود بور و آهن (B-Fe-) بیش از آن نسبت به شرایط کمبود هر دو عنصر به تنهایی بود. اساساً یکی از علائم کمبود آهن آزادسازی پروتون و اسیدی کردن ریزوسفر و آزادسازی اسیدهای آلی به محیط است [۲۲، ۶۲ و ۱۳]. در گیاهانی که در کفایت بور و کلسیم (B+Ca+) رشد کرده بودند، میزان OH آزاد شده بیشتر بود که موجب قلیایی شدن محیط شد. ریشه این گیاهان احتمالاً با جذب بیشتر آنیون‌هایی نظیر نیترا از محیط باعث برداشت یون‌های پروتون از محیط شده و در نتیجه pH ریزوسفر قلیایی شده است. در تیمار توام کمبود بور و کلسیم (B-Ca-) میزان اسیدی شدن افزایش یافت. گیاهان از کلسیم برای تقویت دیواره های سلولی و غشا استفاده می‌کنند و کاهش سطح کلسیم موجب نشت غشایی می‌شود [۲۵].

در تیمار توام کمبود بور و آهن (B-Fe-) مقدار بور در اندام هوایی و ریشه کاهش یافت و مطابق انتظار در کفایت هر دو

- on the nutrition of forage legumes II Some interactions of Ca, P, Cu and Mo on the growth and chemical composition of *Trifolium subterraneum* L. PS. 1960; 12: 97-127.
- [7] Brown P. H, Bellaloui N, Wimmer M. A, Bassil E. S, Ruiz J, Hu H, Pfeiffer H, Dannel F, Römheld V. Boron in plant biology. PB. 2002; 4: 205-223.
- [8] Goldbac H. E, Yu Q, Wingender R, Schulz M, Wimmer M, Findekle P, Baluska F. Rapid response reactions of roots to boron deprivation. JOPNASS. 2001; 164: 173-181.
- [9] Oliveira R, Milanez C, Moraes-D. M, Rosolem C. Boron Deficiency Inhibits Petiole and Peduncle Cell Development and Reduces Growth of Cotton. JOPN. 2006; 29:2035-2048.
- [10] Sheng O, Song S, Peng S, Deng X. The effects of low boron on growth, gas exchange, boron concentration and distribution of "Newhall" navel orange (*Citrus sinensis* Osb.) plants grafted on two rootstocks. SH. 2009; 121: 278-283.
- [11] Zhao D, Oosterhuis D. M. Cotton carbon exchange, nonstructural carbohydrates, and boron distribution in tissues during development of boron deficiency. FCR. 2002; 78: 75-87.
- [12] Pommerrenig B, Junker A, Abreu I, Bieber A, Fuge J, Willner E, Bienert M. D, Altmann T, Bienert G. P. Identification of Rapeseed (*Brassica napus*) Cultivars With a High Tolerance to Boron-Deficient Conditions. FIPS.2018; 9. 10.3389/fpls.2018.01142.
- [13] Saboora A, Behjati R. The effect of boron and iron deficiency on the contents of photosynthetic pigments, carbohydrates and phenolic compounds in two cultivars of sorghum bicolor L. IJOPB. 2017; 9(33): 19-39.
- [14] Grusak M. A, Pezeshgi S. Shoot-to-root signal transmission regulates root Fe (III) reductase activity in the dgl mutant of pea. PPh. 1996; 110: 329-334.
- [15] Afshari H, Talaei A, Panahi B, Hokmabadi H. Morphological and qualitative study of pistachio pollen grains and effect of different temperatures on pomological traits. AJOCS. 2008;1(3): 108-114.
- [16] Brdar-Jokanović M. Boron Toxicity and Deficiency in Agricultural Plants. IJOMS. 2020; 21(4): 1424.
- [17] Rosolem C. A, Costa A. Cotton growth and boron distribution in the plants as affected by temporary deficiency of boron. JOPN. 2000; 23: 815-825.
- [18] Bonilla I, Cadahia C, Caprena O. Effect of boron on nitrogen metabolism and sugar levels of sugar beet. PAS. 1980; 57(1): 3-9.
- [19] Shintinawy F. E. L. Structural and functional damage caused by boron deficiency in sunflower leaves. PH. 1999; 36(4): 565-573.
- [20] Askary M, Talebi SM, Shafieigavari M. Effect of iron oxid nanoparticle on the growth and physiology of inoculated alfalfa (*Medicago sativa* L.) with *Rhizobium meliloti*. JCT. 2020; 11(1).
- [21] Gul H, Husna M.H, Khan Y, Sayyed A. Effect of Boron, Manganese and Iron on Growth, Biochemical Constituents and Ionic Composition of Cowpea Grown under Salinity. JAEBS. 2019; 9(3): 1-12.
- [22] Kieu N, Aznar A, Segond D, Rigault M, Simond-CÔTe E, Kunz C, Soulie M, Expert D, Dellagi A. Iron deficiency affects plant defence responses and confers resistance to *Dickeya dadantii* and *Botrytis cinerea*. MPP. 2012; 13: 816-827.
- [23] Aref F. Manganese, iron and copper contents in leaves of maize plants (*Zea mays* L.) grown with different boron and zinc micronutrients. AJOB. 2012;10.5897/ajb11.165.
- [24] Simon E. W. The Symptoms of Calcium Deficiency in Plants. NP. 1978; 80:1-15.
- [25] Gao H, Wu X, Zorrilla C, Vega S, Palta J. Fractionating of calcium in tuber and leaf tissues explains the calcium deficiency symptoms in potato plant overexpressing CAX1. FIPS. 2020; 2019.01793.
- [26] AL-Abtan T.A.I, Dawood W.M, Obaid A.A. Effect Of Spraying With Sorbitol And Boron On Growth Characteristics And Oil Percentage In Rapeseed *Brassica napus* L. QJAS. 2021;11(2): 17-20.
- [27] Manaf A, Kashif M, Sher A, Qayyum A, Sattar A, Hussain S. Boron nutrition for improving the quality of diverse canola cultivars. JOPN. 2019; 42, 2114-2120.
- [28] Wang Y, Zhao Z, Wang S, Shi L, Xu F. Genotypic differences in the synergistic effect of nitrogen and boron on the seed yield and nitrogen use efficiency of *Brassica napus*. JO SOFAA. 2021;<https://doi.org/10.1002/jsfa.11700>.
- [29] Elegba W, Gruissem W, Vanderschuren H. Screening for Resistance in Farmer-Preferred Cassava Cultivars from Ghana to a Mixed Infection of CBSV and UCBSV. PL. 2020; 9, 1026.
- [30] Adamska E, Teresa-Taras T, Kaczmarek Z, Szala L. Multivariate approach to evaluating the fatty acid composition of seed oil in a doubled haploid population of winter oilseed rape (*Brassica napus* L). JOAG. 2004; 45(4): 419-425.
- [31] Gemic M, Aktas Y. L, Turkyilmaz B, Guven A. The effects of the boron application on indole-3-acetic acid levels in *triticum durum*

- Desf. cv. gediz seedlings. CUFEFFBD. 2002; 23(2): 17-24.
- [32] Seyis F, Friedt W, Luhs W. Development of resynthesized rapeseed (*Brassica napus* L.) forms with low erucic acid content through in ovulum culture. AJOPS. 2005; 4(10): 6-10.
- [33] Sikorska A, Gugala M, Zarzecka K. The response of different kinds of rapeseed cultivars to foliar application of nitrogen, sulphur and boron. SR. 2021; 11, 21102.
- [34] Du J, Guo Z, Li R, Ali A, Guo D, Lahori A.H, Wang P, Liu X, Wang X, Zhang Z. Screening of Chinese mustard (*Brassica juncea* L.) cultivars for the phytoremediation of Cd and Zn based on the plant physiological mechanisms. EP. 2020; 261, 114213.
- [35] Kaur H, DeSouza M, Singh R.R. Screening of Existing and New Boxwood Cultivars for Disease Resistance and In Vitro Fungicide Screening to Manage Boxwood Dieback Caused by *Colletotrichum theobromicola*. PHP. 2021.
- [36] Singh B, Reddy K.R, Redoña E.D, Walker T. Developing a Screening Tool for Osmotic Stress Tolerance Classification of Rice Cultivars Based on In Vitro Seed Germination. CS. 2017; 57, 387-394.
- [37] Xu Z.-M, Tan X.-Q, Mei X.-Q, Li Q.-S, Zhou C, Wang L.-L, Ye H.-J, Yang P. Low-Cd tomato cultivars (*Solanum lycopersicum* L.) screened in non-saline soils also accumulated low Cd, Zn, and Cu in heavy metal-polluted saline soils. ESAPR. 2018; 25, 27439-27450.
- [38] Mousavi S, M, Motesharezadeh B. Chapter 15 – Boron deficiency in fruit crops. FCDAMONC. 2020; 191-209.
- [39] Liu Y, Riaz M, Yan L, Zeng Y, Cuncang J. Boron and calcium deficiency disturbing the growth of trifoliolate rootstock seedlings (*Poncirus trifoliolate* L.) by changing root architecture and cell wall. PPhAB. 1019; 144:345-354.
- [40] Asad A, Bel R.W, Dell B, Huang L. External boron requirement for Canol (*Brassica napus* L.) in boron buffered solution culture. AOB. 1997; 80: 65-73.
- [41] Tennant D. A test of modified line intersect method of estimating root length. JOE. 1975; 63: 995-1001.
- [42] Oxborough K. Imaging of chlorophyll a fluorescence: theoretical and practical aspects of an emerging technique for the monitoring of photosynthetic performance. JEB. 2004; 55: 1195-1205.
- [43] Lohse G. Microanalytical azomethine-H method for boron determination in plant tissues. CISSAPA. 1982; 13: 127-134.
- [44] Hajiboland R, Joudmand A. The K/Na replacement and function of antioxidant defence system in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) cultivars. Acta. Agri. Scandhnavica, Sec. B – SAPS. 2009; 59: 249-259.
- [45] Bahmani Z, Hajiboland R, hashemi Z, Rezanejad F. Effect of boron deficiency on vegetative growth, flowering and seed yield in oilseed rape plants (*Brassica napus*). IJOPB. 2020; 12: 23-44.
- [46] Alves M, Francisco R, Martins I, Ricardo C. P. P. Analysis of *Lupinus albus* leaf apoplastic proteins in response to boron deficiency. PS. 2006; 279:1-11.
- [47] Kocábek T, Svoboda Z, Al-Zwi A. M, Rolfe S. A, Fellner M. Boron-regulated hypocotyl elongation is affected in *Arabidopsis* mutants with defects in light signaling pathways. EAEB. 2009; 67: 101-111.
- [48] O'Neil M. A, Ishii T, Albersheim P, Darvi A. G. (2004). Rhamnogalacturonan II: structure and function of a borate cross-linked cell wall pectic polysaccharide. ARPB. 2004; 55: 109-139.
- [49] Camacho-Cristóbal J. J, González-Fontes A. Boron deficiency decreases plasmalemma H⁺-ATPase expression and nitrate uptake, and promotes ammonium assimilation into asparagines in tobacco roots. PL. 2007; 226: 443-451.
- [50] Hajiboland R, Farhanghi F. Remobilization of boron, photosynthesis, phenolic metabolism and anti-oxidant defense capacity in boron-deficient turnip (*Brassica rapa* L.) plants. SSAPN. 2010; 56 (427-437).
- [51] Baker N. R, Rosenqvist E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. JOEB. 2004; 55 (403): 1607-1621.
- [52] Sotiria S, Georgios L, George K. Boron deficiency effects on growth, photosynthesis and relative concentration of phenolics of *Dittrichia viscosa* (*Asteraceae*). EAEB. 2006; 56: 293-300.
- [53] Mouhtaridou G. N, Sotiropoulos T. E, Dimassi K. N, Therios I. N. Effect of boron on growth, and chlorophyll and mineral contents of shoots of the apple rootstock mm 106 cultured in vitro. B P. 2004; 48(4): 617-619.
- [54] Rawashdeh H.M, Sala F. The Effect of Follar Application Of Iron and Boron On Early Growth Parameters Of Wheat (*Triticum aestivum* L.) .RJOAS. 2013; 45 (1).
- [55] Hajiboland R. The role of mineral elements in plants: absorption and analysis, displacements and physiological functions. Shayesteh, Tabriz (in persian). 2018.
- [56] Chatterjee C, Sinha P, Nautiyal N, Agarwala S. C, Sharma C.P. Metabolic Changes

- Associated with Boron-Calcium Interaction in Maize'. SSPN. 1987; 33(4): 607-617.
- [57] Ahmad W.H, Munir S, Sukhdev N, Abid S. Boron Deficiency in Soils and Crops: AR. 2012; 10.5772/36702.
- [58] Dordas C, Brown P. H. Boron deficiency affects cell viability, phenolic leakage and oxidative burst in rose cell cultures. PS. 2005; 268: 293-301.
- [59] Zhou T, Hua Y, Xu F. Involvement of reactive oxygen species and Ca²⁺ in the differential responses to low-boron in rapeseed genotypes. PA S. 2017; 419(219-236).
- [60] Rajaeian S, Ehsanpour A. A, Toghiani M. A. Changes in phenolic compound, TAL, PAL activity of *Nicotiana rustica* triggered by ethanolamine pretreatment under in vitro salt stress condition. IJOPB. 2015; 7(26): 1-12.
- [61] Ferrol N, Donaire J. P. Effect of boron on plasma membrane proton extrusion and redox activity in sunflower cells. PS. 1992; 86: 41-47.
- [62] Romera F. J, García J, Lucena C, Martínez-Medina A, Aparicio M. A, Ramos J, Alcántara E, Angulo M. Induced Systemic Resistance (ISR) and Fe Deficiency Responses in Dicot Plants. FIPS.2019; 10. 10.3389/fpls.2019.00287.
- [63] Carpena R. O, Esteban E, Sarro M. J, Penalosa J, Garate A, Lucena J. J, Zornoza P. Boron and calcium distribution in nitrogen-fixing Pea plants. P S. 2000; 151: 163-170.

Genotypic differences in response to boron deficiency in oilseed rape (*Brassica napus* L.) plants and the interaction of boron deficiency with deficiency of other nutrients in hydroponic medium

Bahmani Z.* , Hajiboland R.

Department of Plant Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* (Corresponding author): Z.bahmani63@yahoo.com

DOI:10.30495/JDB.2022.1952546.1292 <https://dorl.net/dor/20.1001.1.2008692.1401.15.1.1.5>

Received: January 2022

Accepted: September.2022

Abstract

Oilseed rape (*Brassica napus* L.) is one of the important economic plants cultivated in Iran. Boron (B) and iron (Fe) as micronutrients and calcium (Ca) as a macronutrient are essential for higher plants and inadequate supply of these nutrients causes nutritional disorders. Boron deficiency (-B) is a widespread nutritional deficiency in oilseed rape throughout the world and this species has been known as a susceptible species to B deficiency. In this study, the responses of six genotypes of oilseed rape plants to B deficiency were investigated in the hydroponic medium. In addition, the interaction between B deficiency and deficiency of Fe (-Fe-B) and Ca (-B-Ca) were examined in hydroponically grown oilseed rape (cv. Hayola) plants. Results showed that B deficiency decreased shoot and root biomass and root length, decreased B content, chlorophyll fluorescence and gas exchange parameters. 'Opera' was the most susceptible and 'Okapi' the most tolerant genotype to B deficiency. The simultaneous deficiency of B and Fe (-Fe-B), B and Ca (-B-Ca) strongly reduced shoot and root growth, enhanced the release of protons leading to acidification of the rhizosphere and caused higher K⁺ leakage from the roots and reduction of B content both in the roots and leaves. Our results showed a considerable genotypic difference in oilseed rape plants in response to B deficiency. Our data further demonstrated the intensifying effect of inadequate supply of Fe and Ca on B deficiency in oilseed rape plants.

Keywords: Boron, calcium, iron, oilseed rape, genotypic differences.