نشریه علمی زیست‌شناسی خاک / جلد ۱۱ / شماره ۱ / ۱۴۰۲/ص۱-۱۵
dx.doi.org/10.22092/sbj.2023.360855.244

تأثیر قارچ *Claroideoglomus etunicatum* بر رشد و جذب عناصر غذایی ذرت تحت تنش ترکیبی بور و شوری

نرگس آبدار*و مهدی زارعی

دانشجوی دکتری بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز؛ **n.abdar7395@yahoo.com**

دانشیار بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز و گروه کشاورزی و منابع طبیعی، مرکز آموزش عالی اقلید؛ **mehdizarei@shirazu.ac.ir**

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۶و پذیرش:۱۴۰۲/۶/۲۰

«مقاله پژوهشی»

چکیده

تنش شوری و بور در خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک جهان رشد گیاه را محدود می‌کند. این پژوهش با هدف بررسی اثر قارچ بر عملکرد و میزان جذب عناصر غذایی ذرت تحت تنش شوری و سمیت بور انجام گردید. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل دو سطح شوری شاهد (بدون افزایش شوری) و ۸ دسی زیمنس بر متر و بور شامل دو سطح شاهد و ۳۰ میلی‌گرم بور در کیلوگرم خاک از منبع اسیدبوریک و سدیم کلرید و دو سطح قارچی (با حضور و بدون قارچ Claroideoglomus etunicatum) بود. نتایج نشان داد که تنش شوری و سمیت بور تأثیر معنی‌داری بر درصد کلونیزاسیون ریشه نداشت (سطح احتمال ۵٪). با افزایش بور خاک، مایه‌زنی قارچ میزان کلروفیل، جذب بور اندام هوایی، جذب پتاسیم و فسفر را به ترتیب ۷/۰۹٪، ۱۵/۸۳٪، ۳۱/۶۲٪ و ۵۱/۵۷٪ در سطح احتمال ۵٪ به‌طور معنی‌دار افزایش داد، درحالی‌که جذب بور ریشه، جذب آهن، مس و منگنز را به ترتیب ۳۵/۱۵٪، ۲۸/۷۲٪، ۳۹/۶۲٪ و ۴۲/۱۲٪ در سطح احتمال ۵٪ به‌طور معنی‌دار کاهش داد. همچنین با افزایش شوری خاک و مایه‌زنی قارچ، میزان کلروفیل، جذب مس، منگنز به ترتیب ۵/۰۵٪، ۳۵/۳۸٪ و ۲۵/۹۷٪ به‌طور معنی‌دار افزایش و جذب سدیم ۴۰/۳۱٪ به‌طور معنی‌دار کاهش یافت (سطح احتمال ۵٪). در تنش ترکیبی شوری و بور، مایه‌زنی قارچ توانست کلروفیل برگ، جذب بور ریشه، پتاسیم، فسفر و آهن را به ترتیب ۸/۴۲٪، ۶۱/۵۶٪، ۶۸/۵۵٪، ۸۲/۰۱٪ و ۲۳/۶۳٪ به‌طور معنی‌دار افزایش و جذب سدیم، روی، مس و بور اندام هوایی را به ترتیب ۲۰/۹۸٪، ۴۰/۰۷٪، ۷۲/۵۴٪ و ۳۴/۳۸٪ به‌طور معنی‌دار کاهش دهد (سطح احتمال ۵٪). نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مایه‌زنی قارچ می‌تواند به بهبود رشد و جذب عناصر غذایی در شرایط سمیت بور و تنش شوری خاک کمک کند.

واژه‌های کلیدی: ذرت، سمیت بور، شوری خاک، میکوریزا آربسکولار

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول:n.abdar7395@yahoo.com

مقدمه

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، محصولات کشاورزی هم‌زمان در معرض تنش‌های شوری و سمیت بور قرار می‌گیرند. محققان شوری خاک را همدم بور می‌دانند، به علت ماهیت محلولی بور به‌صورت نمک سدیم در مناطق شور تجمع می‌یابد. ترکیب تنش بور و شوری را "بورسال" می‌نامند (باروا و همکاران، ۲۰۲۲). بورسال می‌تواند به طور طبیعی از طریق ۱) آبیاری با آب حاوی مقادیر زیاد نمک و بور (کاپولا-رودریگز و همکاران، ۲۰۱۶) یا ۲) قرار گرفتن در معرض خاک‌هایی که دارای سطح بالایی از شوری و بور طبیعی هستند ایجاد شود (گارسیا سانچز و همکاران، ۲۰۲۰). در مناطق شور، کم‌آب و خشک کشور نظیر کرمان، یزد، قم، جنوب فارس و جنوب خراسان که با مشکل شوری مواجه می‌باشند مقدار بور قابل استفاده در خاک بسیار بالا بوده و در آب‌های این مناطق نیز بور به وفور یافت می‌شود (حسنی و همکاران، ۱۳۹۹). شوری و سمیت بور باعث اختلال در فعالیت اجزای مختلف غشاء می‌شود که بر جذب و انتقال آب و عناصر غذایی تأثیر می‌گذارد و به دنبال آن بر جوانه‌زنی، طول ساقه و ریشه، وزن خشک ریشه و اندام هوایی و افزایش نفوذپذیری غشا نیز تأثیر می‌گذارد (محمد و همکاران، ۲۰۱۶). تحقیقات نشان داد که رشد و عملکرد ذرت و سورگوم (اسماعیل، ۲۰۰۴)، آفتاب‌گردان (جبین و احمد، ۲۰۱۱)، کلم بروکلی (اسمیت و همکاران، ۲۰۱۳)، گندم (محمد و همکاران، ۲۰۱۶) تحت سمیت بور و شوری کاهش یافته است.

علائم سمیت بور در غلظت ۵ میلی گرم بر کیلوگرم ظاهر می‌شود و در غلظت ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم علائم شدیدتر می‌شود (پاندی و همکاران، ۲۰۱۹). تحقیقات نشان داد که ذرت در غلظت‌های بالاتر ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نیز زنده مانده است (باروا و همکاران، ۲۰۲۲). سمیت بور با ایجاد لکه‌های نکروز در برگ که درنهایت به‌صورت بافت مرده درمی‌آیند باعث کاهش سطح برگ، فتوسنتز و به دنبال آن کاهش عملکرد گیاه می‌شود (بن گال و شانی، ۲۰۰۲). ازنظر شوری خاک، ذرت در خاک‌هایی با دامنه شوری ۱ تا ۴ میلی‌موس بر سانتی‌متر رشد می‌کند (باستیاس و همکاران، ۲۰۰۴). در مطالعات مختلف، هم شوری و هم سمیت بور کاهش قابل‌توجهی در عملکرد گیاه ذرت نشان داده است (اسماعیل، ۲۰۰۴؛ محمد و همکاران، ۲۰۱۶؛ باروا و همکاران، ۲۰۲۲). کومار و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که با کاربرد ترکیبی بور (۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بور در لیتر) و شوری (۶۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار سدیم کلرید) وزن خشک اندام هوایی و ریشه گندم به‌طور معنی‌داری کاهش‌یافته است. الاگرودی و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که شوری آب آبیاری (۸/۴ دسی زیمنس بر متر) تحمل ذرت را به سطوح مختلف بور (۱، ۲ و ۳ میلی‌گرم بور در لیتر) کاهش می‌دهد و عملکرد گیاه نیز کاهش می‌یابد.

یک رویکرد مؤثر برای کاهش سمیت بور و تنش شوری می‌تواند ریز جاندارانی باشد که با ریشه گیاه ارتباط دارند. مزیت آن، متابولیت‌های میکروبی است که قادر به کاهش اثرات منفی سمیت هستند (موراگا و همکاران، ۲۰۱۴). ازجمله ریز جانداران میکوریزا آربسکولار است. یافته‌های لیو و همکاران (۲۰۱۸) نشان می‌دهد که مایه‌زنی قارچ‌های F. mosseae و C. etunicatum نامزدهای بالقوه‌ای برای تسهیل رشد گیاه P. tenuiflora تحت سمیت بور با تنش شوری و خشکی هستند. اما مایه‌زنی قارچ هیچ اثر تسکین دهنده‌ای بر سمیت بور به‌تنهایی نداشته است (لیو وهمکاران، ۲۰۱۸). محققین گزارش کردند که ریزوباکتر Bacillus pumilus، در گوجه‌فرنگی و برنج (خان و همکاران، ۲۰۱۶؛ سیراجودین و همکاران، ۲۰۱۶) در کاهش سمیت بور مؤثر بودند در حالیکه سونمز و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که مایه‌زنی گندم با Glomus clarum تأثیری در کاهش سمیت بور نداشته است. این نتایج حاکی از آن است که تلقیح میکوریزا، بسته به گونه قارچی، زمانی‌که

گیاه در معرض بور اضافی همراه با نمک و تنش خشکی قرار بگیرد، اثر تسکین‌دهنده بیشتری دارد.

مقالات زیادی در مورد اثرات شوری و بور به صورت ترکیبی یا به تنهایی بر روی گونه‌های مختلف گیاهی موجود است. بااین‌حال، تحقیقات کمتری در مورد اثر قارچ بر رشد ذرت تحت تنش ترکیبی شوری و سمیت بور انجام شده است. بنابراین بررسی اینکه آیا میکوریزا آربسکولار عملکرد گیاه تحت تنش ترکیبی بور و شوری افزایش می‌دهد یا نه، بسیار مهم است. هدف‌های پژوهش حاضر عبارت بودند از: ۱) ارزیابی اثر قارچ Claroideoglomus etunicatum بر بهبود عملکرد ذرت تحت تنش ترکیبی شوری و سمیت بور ۲) ارزیابی اثر قارچ Claroideoglomus etunicatum بر میزان جذب بور، عناصر پرمصرف و کم‌مصرف ذرت تحت تنش ترکیبی شوری و سمیت بور.

مواد و روش

خاک از افق سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متری) از سری چیتگر از منطقه سروستان استان فارس با نام تاکسونومی Fine-loamy, carbonatic, thermic, Typic Calcixerepts (طول جغرافیای "۲۵ '۱۶ °۲۹ شمالی و عرض جغرافیایی "۱۳ '۱۳ °۵۳ شرقی) جمع‌آوری شد. برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن نظیر غلظت روی، آهن، مس و منگنز قابل استخراج با DTPA (لیندسی و نورول، ۱۹۷۸) ، بور محلول در آب داغ (برگر و تروگ، ۱۹۳۹)، pH گل اشباع خاک با pHمتر مدل pH 7110 (توماس، ۱۹۹۶)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره خمیر اشباع خاک با ECمتر مدل CON500 (رودس و همکاران، ۱۹۹۶)، ماده آلی به روش اکسایش با اسیدکرومیک (نلسون و همکاران، ۱۹۹۶)، نیتروژن کل به روش کجلدال (برمنر، ۱۹۹۶)، فسفر به روش اولسن با اسپکتوفتومتر مدل Spectronic 20D (اولسن و همکاران، ۱۹۸۲)، پتاسیم به روش استات‌آمونیوم و با دستگاه فلیم فتومتر (نادسن و همکاران، ۱۹۸۲) و بافت خاک به روش هیدرومتر (بویوکوس، ۱۹۶۲) تعیین شد. آزمایش در گلخانه به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با تیمارها شامل دو سطح شوری شاهد (بدون افزایش شوری (S_0)) و ۸ دسی زیمنس بر متر (S_8) و بور شامل دو سطح شاهد (B_0) و ۳۰ میلی‌گرم بور در کیلوگرم خاک (B_{30})) (کومار و همکاران، ۲۰۱۵؛ الاگرودی و همکاران، ۲۰۱۶؛ باروا و همکاران، ۲۰۲۲) از منبع اسیدبوریک و سدیم کلرید و دو سطح میکروبی (بدون حضور (M_0) و با قارچ (M_1) Claroideoglomus etunicatum) (لیو و همکاران، ۲۰۱۸) با سه تکرار با گیاه ذرت (Zea mays L) (رقم سینگل کراس ۷۰۴) انجام گرفت. نیتروژن، فسفر، آهن، منگنز، مس و روی به ترتیب به مقدار ۱۵۰، ۲۵، ۱۰، ۱۰، ۲/۵ و ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، از اوره، منوکلسیم-فسفات، FeEDDHA ، سولفات منگنز، سولفات مس و سولفات روی به شکل محلول به‌طور یکنواخت به تمام گلدان‌ها اضافه گردید. نصف نیتروژن و تمام عناصر غذایی دیگر به‌صورت پیش‌کشت اضافه شد و باقی‌مانده نیتروژن در هفته چهارم به شکل محلول افزوده شد. مقدار خاک مورد استفاده در هر گلدان برای ذرت ۳ کیلوگرم بود. در بستر کشت (غیر استریل) ۱۰۰ گرم مایه تلقیح قارچ (هر گرم حاوی ۱۰ اسپور، تهیه شده از بخش علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز) در فاصله‌ی ۳-۲ سانتی‌متری زیر بذرها قرار داده شد و سپس سطح بذرها توسط دو سانتی‌متر از بستر پوشانده شد (زارعی و همکاران، ۲۰۰۸؛ قنبرزاده و همکاران، ۲۰۲۱). ۵ عدد بذر در هر گلدان کشت شد و سه هفته پس از کشت، گیاهان تنک گردید به‌طوری‌که دو بوته ذرت برای رشد رویشی در هر گلدان نگهداری شد. در هفته دهم گیاه از محل طوقه قطع و اندام گیاهی پس از شست و شو با آب مقطر، در دمای ۶۵ درجه سلسیوس خشک و وزن خشک گیاه تعیین گردید. قبل از برداشت گیاه، میزان کلروفیل برگ ذرت با دستگاه کلروفیل متر مدل SPAD-502 اندازه‌گیری شد. از ریشه‌های ریز تازه گیاه نمونه‌برداری و برای تعیین درصد کلونیزاسیون ریشه استفاده شد (کورمانیک و مک گراو، ۱۹۸۲). ریشه‌ها در ۸٪ KOH پاکسازی شدند، در ۲٪ HCl اسیدی شدند و با جوهر لاکتیک-گلیسرول-آبی رویال

رنگ آمیزی شدند. درصد کلونیزاسیون ریشه با استفاده از روش تقاطع خط شبکه برآورد شد (جووانتی و موس، ۱۹۸۰). نمونه‌های گیاهی به‌وسیله آسیاب رقی پودر گردید و عصاره گیری به روش هضم خشک انجام گردید (جونز و همکاران، ۱۹۹۱). پتاسیم و سدیم با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر (CORNIN 405)، روی، آهن، منگنز و مس با استفاده از دستگاه جذب اتمی (AA-67OG) تعیین گردید. غلظت بور در عصاره گیاهی و ریشه با استفاده از آزومتین اچ (برگر و تروگ، ۱۹۳۹) اندازه‌گیری شد. میزان جذب عناصر با فرمول زیر محاسبه شد.

(۱) غلظت = جذب (میلی‌گرم در گلدان)
وزن خشک × (میلی‌گرم در کیلوگرم)
(گرم در گلدان)

تجزیه آماری و مقایسه میانگین داده‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن با احتمال ۵٪ با کمک نرم فزار آماری SAS 9.2 انجام و نمودارها با اکسل ۲۰۱۳ رسم گردید.

نتایج و بحث

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، بافت خاک سیلتی لومی، شوری خاک کم است. مقدار فسفر و بور این خاک کم و بقیه عناصر پرمصرف و کم مصرف در حد بهینه و یا نزدیک به حد بهینه هستند. به دلیل کم بودن میزان فسفر و بور قابل‌استفاده، این خاک برای اعمال تیمارهای آزمایش مناسب است.

جدول ۱- برخی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (واحد)	مقدار
pH گل اشباع خاک	۷/۶۸
قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (دسی زیمنس بر متر)	۰/۶
شن (٪)	۲۴/۹
سیلت (٪)	۵۳/۳
رس (٪)	۲۱/۸
ماده آلی (٪)	۱/۲
نیتروژن کل (٪)	۰/۰۵
فسفر قابل‌استخراج با بی‌کربنات سدیم (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۱۰/۳
پتاسیم قابل‌جذب (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۲۹۳
بور محلول در آب داغ (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۰/۲۵
مس قابل‌استخراج با DTPA (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۰/۵
روی قابل‌استخراج با DTPA (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۰/۶
منگنز قابل‌استخراج با DTPA (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۴/۷
آهن قابل‌استخراج با DTPA (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۲/۱

تأثیر قارچ بر پارامترهای رشد ذرت

اثر اصلی بور و شوری ناشی از سدیم کلرید، مایه‌زنی قارچی و برهمکنش آن‌ها بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه و میزان کلروفیل برگ در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود. همچنین مایه‌زنی قارچی بر درصد کلونیزاسیون ریشه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار و اثر اصلی بور و شوری و برهمکنش آن‌ها غیر معنی‌دار بود (جدول ۲). علائم ظاهری سمیت بور و شوری در برگ ذرت مشاهده شد (شکل ۱). در ابتدا، برگ‌ها کلروز زرد–سبز را نشان دادند و به‌تدریج از نوک و حاشیه برگ زرد شدند که با نتایج لیو و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت داشت. محققین بیان کردند که سمیت بور و تنش شوری با لکه‌هایی نکروز روی برگ ایجاد و درنهایت به‌صورت بافت مردگی درمی‌آیند و باعث کاهش سطح برگ، فتوسنتز و به دنبال آن عملکرد گیاه کاهش می‌یابد (پاندی و همکاران، ۲۰۱۹). مشاهدات نشان داد که مایه‌زنی قارچ تأثیری در بهبود علائم ظاهری تنش شوری و سمیت بور نداشته است. مایه‌زنی قارچ در B_0S_0، وزن خشک اندام هوایی و میزان کلروفیل

برگ ذرت را به ترتیب ۲۸/۹۵٪ و ۵/۸۸٪ نسبت به تیمار $B_0S_0M_0$ در سطح احتمال ۵٪ به‌طور معنی‌داری افزایش داد (جدول ۳). تحقیقات نشان داده است که گسترش هیف و توسعه سیستم ریشه، سطح جذب آب بیشتری برای گیاه فراهم کرده و به دنبال آن عناصر غذایی بیشتری نیز جذب‌شده که منجر به تولید و تجمع ماده خشک بیشتری در گیاه می‌گردد (هگازی و همکاران، ۲۰۱۷). تورهان و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که مایه‌زنی قارچ سنتز رنگ‌دانه کلروفیل و کاروتنوئید را در گیاه گوجه‌فرنگی تحت سمیت بور افزایش داد. در تیمار $B_{30}S_0M_0$، وزن خشک اندام هوایی و ریشه و میزان کلروفیل برگ را نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۳۰/۵۴٪، ۴۵/۵۳٪ و ۱۲/۶۶٪ در سطح احتمال ۵٪ به‌طور معنی‌داری کاهش داد (جدول ۳).

تحقیقات نشان داد که قدرت اتصال بور به‌اندازه‌ای است که می‌تواند به کوآنزیم‌های نوکلئوتیدی پیریدینی (NAD^+)، ATP، RNA و قندهای متعدد متصل گردد. حتی تغییرات ساختاری ناچیز در اثر اتصال بور به این مولکول‌ها، باعث عدم کارایی و ایجاد اختلال در فعالیت‌های آنزیمی شده و اختلالات متابولیکی را به همراه خواهد داشت (ویمر و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین سمیت بور باعث ناهنجاری کروموزومی و اثرات ژنوتوکسیک ذرت می‌شود که به دنبال آن تقسیم سلولی کاهش می‌یابد. افزایش غلظت بور باعث آسیب کلروپلاست در سلول‌های مزوفیل برگ و ساختار تیلاکوئید شده و به این دلیل غلظت کلروفیل درنتیجه مصرف بور کاهش می‌یابد (نابل و همکاران، ۱۹۹۷). اراسلن و همکاران (۲۰۰۷) و لیو و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که یک رابطه منفی بین میزان کلروفیل و کاربرد بور وجود دارد. در تیمار B_0S_0، مایه‌زنی قارچ میزان کلروفیل برگ را ۷/۰۹٪ نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی در سطح احتمال ۵٪ به‌طور معنی‌داری افزایش داد (جدول ۲). تورهان و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند در گیاه گوجه مایه‌زنی شده با قارچ، غلظت کلروفیل و میزان فتوسنتز افزایش می‌یابد. در تیمار $B_0S_8M_1$، میزان کلروفیل برگ ۵/۰۵٪ نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی افزایش یافت (جدول ۲). تحقیقات نشان داد که همزیستی از طریق جلوگیری از پر اکسیداسیون غشا به پایداری غشا کمک کرده و با حفاظت از کلروفیل از کاهش عملکرد فتوسنتزی جلوگیری می‌کند (عموآقایی و نیک اندیش، ۱۳۹۶). تنش ترکیبی $B_{30}S_8$، بدون مایه‌زنی قارچ وزن خشک ریشه ۷/۱۶ به ۱/۱۹ گرم در گلدان کاهش یافت و در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد داشت اما وزن خشک اندام هوایی و میزان کلروفیل برگ در سطح احتمال ۵٪ کاهش معنی‌داری نداشت (جدول ۲). تحقیقات نشان داده است که سمیت بور مانع از رشد طولی ریشه می‌گردد زیرا این عنصر یکی از اجزای تشکیل‌دهنده دیواره سلولی اولیه بوده و مقادیر بیش‌ازحد آن باعث اختلال در فرآیند ساخت دیواره سلولی می‌شود و درمجموع سمیت بور می‌تواند تقسیم دیواره سلولی و رشد ریشه را کاهش دهد (پاندی و همکاران، ۲۰۱۹). در تیمار $B_{30}S_8$، مایه‌زنی قارچ توانست وزن خشک ریشه ۷۶/۵۷٪ و میزان کلروفیل برگ را ۸/۴۲٪ نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی در سطح احتمال ۵٪ به‌طور معنی‌داری افزایش دهد (جدول ۲). لیو و همکاران (۲۰۱۸) نیز گزارش کردند تلقیح C. etunicatum وزن زیست‌توده گیاهی P. tenuiflora را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد.

در تیمارهای تلقیح شده با قارچ، درصد کلونیزاسیون ریشه‌های ذرت از ۲/۵٪ تا ۸۵/۹٪ بدون توجه به شرایط تنش متغیر بود (جدول ۳). تنش شوری و سمیت بور تأثیری بر درصد کلونیزاسیون ریشه نداشت (جدول ۳). لیو و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که درصد کلونیزاسیون ریشه‌های P. tenuiflora در شرایط بدون تنش به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از تنش‌های ترکیبی (۵۰ میلی‌گرم بور در کیلوگرم و ۴ گرم سدیم کلرید در کیلوگرم) بود، که با نتایج ما مطابقت نداشت. اما نشان دادند که کلونیزاسیون C. etunicatum به‌طور معنی‌داری بیشتر از F. mosseae بوده است (لیو و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین گیاه ذرت می‌تواند در تیمار $B_{30}S_8$ با قارچ C. etunicatum همزیستی برقرار کند و عملکرد گیاه ذرت را بهبود بخشد. ما و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که رشد

ذرت با C. etunicatum به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از بدون قارچ در هر مرحله رشد بوده است.

جدول ۲-تجزیه واریانس وزن خشک و جذب بور اندام هوایی و ریشه، میزان کلروفیل برگ

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		کلروفیل	وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه	درصد کلونیزاسیون	جذب بور اندام هوایی	جذب بور ریشه
بور و شوری	۳	۳۱/۳۳**	۵۸**	۲۷/۱۱**	۶/۸۹ns	۲۱۲/۷۳**	۰/۱۹۹**
مایه‌زنی قارچ	۱	۳/۹۸*	۲۴/۷۲*	۴/۴۲*	۳۸۹۸۱/۳۸**	۱/۰۱ns	۰/۰۰۰۸ns
بور و شوری × مایه‌زنی قارچ	۳	۲/۹۷**	۴۳/۷۲**	۶/۱۷**	۱۲/۶۳ns	۸/۵۸**	۰/۰۴**
خطا	۱۶	۰/۵۳	۴/۳۸	۱/۰۱	۵۳/۶۶	۱/۰۴	۰/۰۰۱۷

** در سطح ۱٪ * در سطح ۵٪ معنی‌دار می باشند و ns از لحاظ آماری معنی‌دار نمی‌باش

جدول۳-مقایسه میانگین اثر قارچ بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه، میزان کلروفیل برگ و درصد کلونیزاسیون ریشه ذرت تحت تنش شوری و بور

تیمار			کلونیزاسیون ریشه (٪)	کلروفیل	وزن خشک ریشه (g pot^{-1})	وزن خشک اندام هوایی ($g\ pot^{-1}$)
شوری	بور	مایه‌زنی قارچ				
۰	۰	بدون مایه‌زنی	۲/۹۲b	۲۲/۱۰d	۷/۱۶a	۲۰/۶۹bc
۰	۰	قارچ	۸۱/۱۴a	۲۳/۴۰c	۷/۰۶a	۲۶/۶۸a
۰	۳۰	بدون مایه‌زنی	۲/۹۰b	۱۹/۳۰f	۳/۹۰b	۱۴/۳۷d
۰	۳۰	قارچ	۸۵/۹۰a	۲۰/۶۷e	۳/۵۳b	۱۷/۷۷cd
۸	۰	بدون مایه‌زنی	۲/۵۰b	۲۴/۹۵b	۷/۰۵a	۱۸/۹۶bcd
۸	۰	قارچ	۸۵/۷۳a	۲۶/۲۱a	۷/۰۷a	۲۳/۵۵ab
۸	۳۰	بدون مایه‌زنی	۴/۱۶b	۲۱/۹۵d	۱/۱۹c	۱۷/۸۱cd
۸	۳۰	قارچ	۸۲/۱۳a	۲۳/۸۰bc	۵/۰۸b	۱۷/۱۶cd

اعدادی که در هر ردیف یا ستون دارای یک حرف مشترک کوچک یا بزرگ هستند از لحاظ آماری در سطح ۵٪ براساس آزمون دانکن معنی‌دارنمی باشند. (منظور از تیمارهای صفر شوری و بور،عدم اعمال شوری و بور است)

شکل ۱- علائم ظاهری سمیت بور و تنش شوری در ذرت

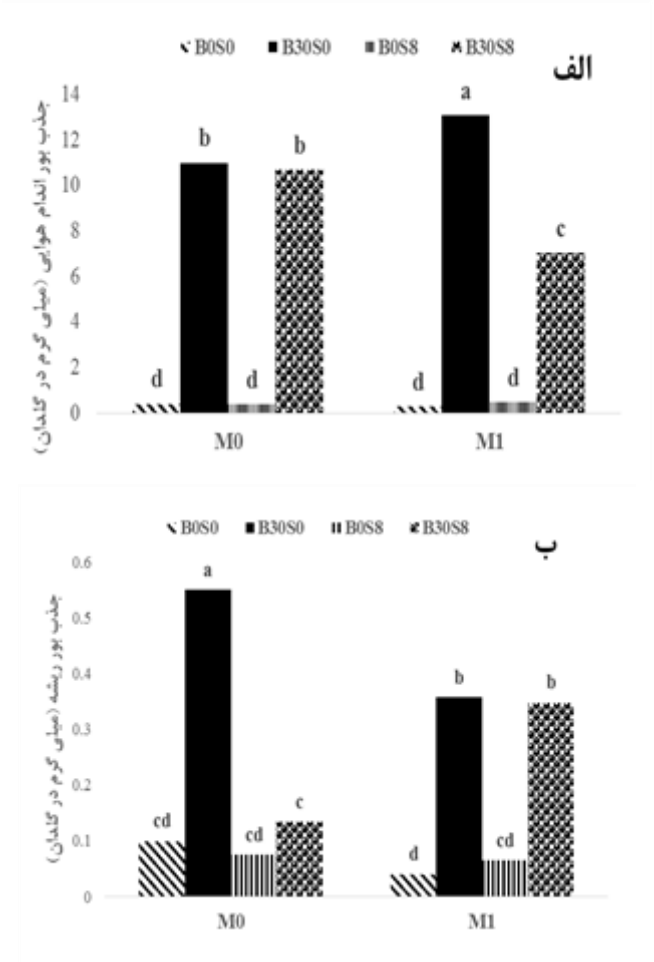
تأثیر قارچ بر میزان جذب بور اندام هوایی و ریشه ذرت

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی بور و شوری و برهمکنش آن‌ها در سطح احتمال ۱٪ بر میزان جذب بور ریشه و اندام هوایی ذرت معنی‌دار، اما اثر اصلی مایه‌زنی قارچی غیر معنی‌دار بود (جدول ۲). میزان جذب بور اندام هوایی و ریشه با مایه‌زنی قارچ در تیمارهای شاهد در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار نیست. با افزودن ۳۰ میلی‌گرم بور، جذب بور ریشه و اندام هوایی به ترتیب ۸۱/۹۷٪ و ۹۶/۳۶٪ نسبت شاهد در سطح احتمال ۵٪ افزایش معنی‌دار داشته است (شکل ۲). درحالی‌که با مایه‌زنی قارچ میزان جذب بور اندام هوایی از ۱/۰۸۶ به ۱۳/۰۵۴ میلی‌گرم در گلدان در سطح احتمال ۵٪ افزایش معنی‌دار و میزان جذب بور ریشه از ۰/۵۵۰۲۵ به ۰/۳۵۶۸۲ میلی‌گرم در گلدان در سطح احتمال ۵٪ کاهش معنی‌دار داشت (شکل ۲). جذب گیاه تابع دو عامل رشد ریشه و فراهمی عناصر غذایی در خاک است و کاربرد تیمار قارچی به دلیل افزایش سطح مؤثر جذب ریشه از طریق ایجاد هیف سبب افزایش جذب آب و عناصر غذایی به‌وسیله گیاهان می‌شوند (تورهان، ۲۰۲۱).

حسینی و همکاران (۱۳۸۳) بیان کردند کاربرد بور در تمام سطوح، ابتدا باعث افزایش جذب بور توسط ذرت شد اما سطوح بالاتر موجب کاهش گردید که ممکن است افزایش جذب به دلیل تأثیر بور بر غلظت این عنصر در گیاه و کاهش جذب به دلیل اثر بور بر کاهش ماده خشک است. سونمز و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کرد که بور طی تعرق فعال در طول یک شیب غلظت به داخل گیاهان حرکت می‌کند و به‌آسانی از طریق آوند چوبی در جریان تعرق حرکت می‌کند و در نقطه‌ای که آب از طریق روزنه‌های موجود در برگ از بین می‌رود تجمع می‌یابد. بنابراین، یافتن غلظت بور بالاتر در اندام هوایی نسبت به ریشه تعجب‌آور نیست. لیو و همکاران (۲۰۱۸) نیز گزارش کردند که با مایه‌زنی F. mosseae و C. etunicatum، غلظت بور اندام هوایی گیاه افزایش‌یافته است. در این تحقیق کاربرد شوری و مایه‌زنی قارچی تأثیری بر میزان جذب بور گیاه نداشته است. اما در شرایط تنش ترکیبی $B_{30}S_8$، میزان جذب بور اندام هوایی و ریشه نسبت به تیمار شاهد ۹۶/۲۶٪ و ۳۴/۸۴٪ افزایش‌یافته است اما نسبت به کاربرد جداگانه بور، میزان جذب بور ریشه از ۰/۵۵۰۲۵ به ۰/۱۳۳۷۵ میلی‌گرم در گلدان در سطح احتمال ۵٪ کاهش معنی‌دار داشته است و میزان جذب بور اندام هوایی تغییری نداشت (شکل ۲). با مایه‌زنی قارچ در شرایط تنش ترکیبی بور و شوری، میزان جذب بور اندام هوایی ۳۴/۳۸٪ کاهش و میزان جذب بور ریشه ۶۱/۵۶٪ در سطح احتمال ۵٪ افزایش معنی‌دار نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی داشته است (شکل ۲). در غلظت‌های بالای بور، جذب بور عمدتاً با فرآیند غیرفعال در جهت شیب غلظت انجام و انتقال بور از ریشه به ساقه توسط جریان تعرق هدایت می‌شود (ویمر و گلدبچ، ۲۰۱۲). شوری می‌تواند پتانسیل اسمزی آب خاک را کاهش دهد و باعث بسته شدن روزنه شود این ممکن است دلیل اصلی مهار تبخیر و تعرق در جذب بور و محدودیت انتقال بور از ریشه به ساقه باشد (بن گال و شانی، ۲۰۰۲؛ یرمیاهو و همکاران، ۲۰۰۸؛ بانوئلوس و همکاران، ۲۰۱۰). کاهش جذب بور و افزایش تحمل بور ناشی از نمک باعث سمیت بور کمتری در گیاه می‌شود. تنش شوری همچنین باعث افزایش میزان پروتئین ATPase شد که باعث تقویت فعالیت ATPase و مقاومت در برابر تنش بور و نمک می‌شود (یرمیاهو و همکاران، ۲۰۰۸). محمد و همکاران (۲۰۱۶) نیز گزارش کردند که به‌طورکلی شوری جذب بور را کاهش می‌دهد، شوری می‌تواند سمیت بور را در گندم کاهش دهد.

از طرف دیگر لیو و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که تحت تنش ترکیبی، غلظت بور اندام هوایی با مایه‌زنی قارچ به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و اثرات سه تلقیح قارچی تفاوت معنی‌داری نشان نداد. بااین‌حال، تلقیح قارچ غلظت بور ریشه را کاهش نداد، در مقابل، که به‌طور قابل‌توجهی با تلقیح F. mosseae + C. etunicatum افزایش یافت و با نتایج ما مطابقت داشت. این نتایج نشان می‌دهد که تلقیح C. etunicatum در شرایط تنش شوری،

تجمع بور را در اندام هوایی محدود می‌کند، اما باعث افزایش تجمع بور در ریشه می‌شود. تحقیقات نشان داده است که کاهش غلظت بور اندام هوایی ممکن است تا حدی یک "اثر رقت" ناشی از افزایش زیست‌توده باشد (لیو و همکاران، ۲۰۱۸). «اثر رقت» به‌عنوان مکانیسم احتمالی افزایش تحمل میکوریزا نسبت به سمیت فلزی گیاهان میزبان در نظر گرفته‌شده است (لی و همکاران، ۲۰۱۶). شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد میکوریزا نقش مهمی در کاهش انتقال عناصر سمی به گیاهان داشته و به‌عنوان مانعی برای انتقال این عناصر از ریشه به شاخساره عمل می‌کند (کابرال و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۲- اثر قارچ بر میزان جذب بور الف) اندام هوایی و ب) ریشه ذرت تحت تنش شوری و بور

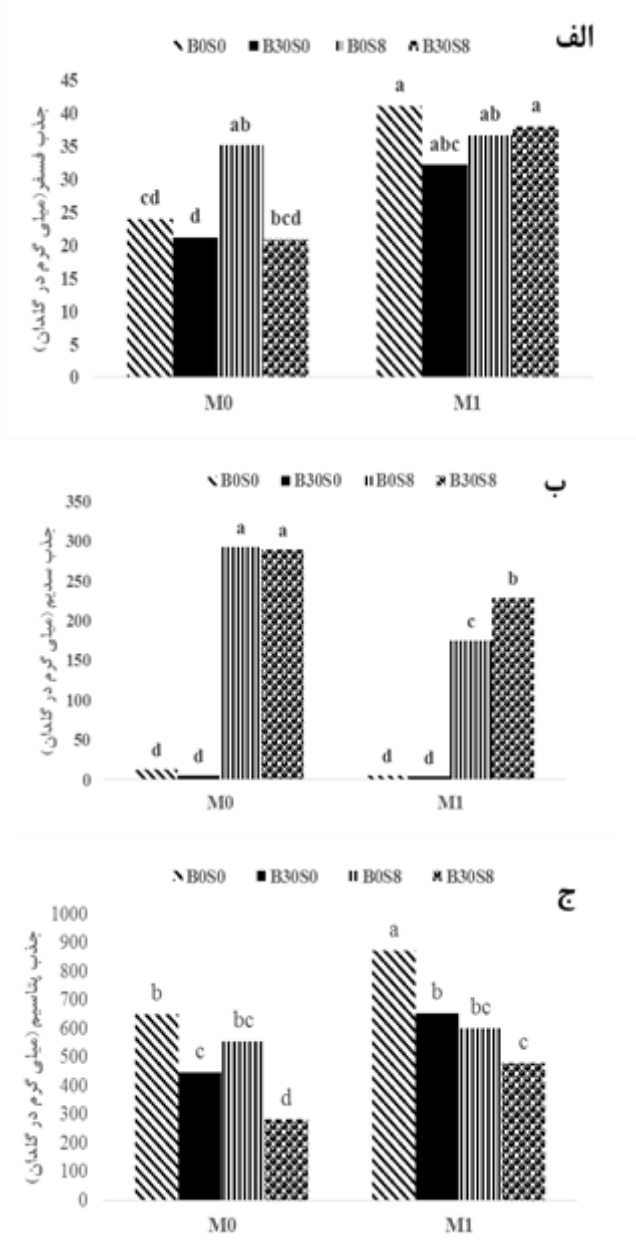
تأثیر قارچ بر میزان جذب عناصر پرمصرف اندام هوایی ذرت

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی مایه‌زنی قارچی بر میزان جذب فسفر اندام هوایی در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار بود اما اثر اصلی بور و شوری و برهمکنش آن‌ها غیر معنی‌دار بود (جدول ۴). در تیمار $B_0S_0M_1$ میزان جذب فسفر از ۲۳/۹۸۵ به ۴۱/۱۱۹ میلی‌گرم در گلدان در سطح احتمال ۵٪ نسبت به $B_0S_0M_0$ افزایش معنی‌داری داشت (شکل ۳ الف). در تیمار $B_{30}S_0M_0$، جذب فسفر تغییری نکرد درحالی‌که با مایه‌زنی قارچ ۵۱/۵۷٪ افزایش نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی مشاهده شد (شکل ۳ الف). با افزایش شوری خاک، میزان جذب

فسفر را از ۲۳/۹۸۵ به ۳۵/۱۰۹ میلی‌گرم در گلدان در سطح احتمال ۵٪ افزایش معنی‌داری داشت اما با مایه‌زنی قارچ تغییری در جذب فسفر مشاهده نشد (شکل ۳ الف). تحقیقات نشان داده است که گسترش هیف به گیاهان میکوریزایی اجازه می‌دهد حجم بیشتری از خاک را در برگرفته و میزان بیشتری فسفر به دست آورند (چندرسکاران و همکاران، ۲۰۱۴). افزایش فعالیت اسید فسفات از خاک ناشی از مایه‌زنی قارچ است که به‌عنوان یک مکانیسم اصلی مؤثر در تغذیه گیاهان در نظر گرفته‌شده است (هیو و همکاران، ۲۰۱۳). اثر اصلی بور و شوری و مایه‌زنی قارچ و برهمکنش آن‌ها با احتمال ۱٪ تأثیر معنی-داری بر میزان جذب سدیم اندام هوایی ذرت داشته است (جدول ۴). مایه‌زنی قارچ در تیمارهای B_0S_0 و $B_{30}S_0$، تأثیری بر میزان جذب سدیم نداشت اما با افزایش شوری خاک تا ۸ دسی زیمنس بر متر، میزان جذب افزایش چشمگیری داشت. با مایه‌زنی قارچ، میزان جذب سدیم ۴۰/۳۱٪ در سطح احتمال ۵٪ کاهش معنی‌داری نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی داشت (شکل ۳ ب). در $B_{30}S_8M_0$، جذب سدیم نسبت به شاهد افزایش‌یافته است اما تفاوتی با تیمار کاربرد جداگانه بور نداشته است.

همچنین در این شرایط با مایه‌زنی قارچ نیز میزان جذب سدیم نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی ۲۰/۹۸٪ در سطح احتمال ۵٪ کاهش اما نسبت به تیمار شوری با مایه-زنی قارچ ۳۰/۹۱٪ افزایش‌یافته است (شکل ۳ ب). لیو و همکاران (۲۰۱۸) بیان کرد که بور بر غلظت سدیم تأثیر کمی داشته است بااین‌حال تحت تنش بور و شوری مانع از انتقال سدیم از ریشه به اندام هوایی و افزایش جذب سدیم توسط ریشه دارد که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد. از طرف دیگر در تنش ترکیبی، مایه‌زنی قارچ افزایش غلظت سدیم اندام هوایی را محدود کرد. محدودیت جذب و یا انتقال سدیم از ریشه به ساقه به‌طور گسترده گزارش‌شده است (ناوارو و همکاران، ۲۰۱۴؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۸). این را می‌توان با دو مکانیسم توضیح داد: ۱) مایه‌زنی قارچ جذب پتاسیم را افزایش می‌دهد، که با جذب سدیم رقابت می‌کند (پاندی و همکاران، ۲۰۱۹). و ۲) میکوریزا آربسکولار رشد گیاه را تسهیل می‌کند و درنتیجه اثر رقت سدیم بافت، به‌ویژه در اندام هوایی ایجاد می‌کند (کومار و همکاران، ۲۰۱۵). اثر اصلی بور و شوری، مایه‌زنی قارچی بر میزان جذب پتاسیم اندام هوایی معنی‌دار بود، اما برهمکنش آن‌ها اثر معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۴). با مایه‌زنی قارچ در تیمار B_0S_0 میزان جذب پتاسیم ۳۴/۴۰٪ افزایش یافت. افزودن ۳۰ میلی‌گرم بور، جذب پتاسیم را نسبت به B_0S_0 ۳۱/۱۹٪ کاهش داد و با مایه‌زنی قارچ، جذب پتاسیم در سطح احتمال ۵٪ افزایش معنی‌داری نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی داشت (شکل ۳ ج). $B_{30}S_8M_0$، جذب پتاسیم اندام هوایی ذرت را از ۶۵۰/۰۳۵ به ۲۸۴/۳۷۳ میلی‌گرم در گلدان کاهش داد. اما با مایه‌زنی قارچ ۶۸/۵۵٪ میزان جذب افزایش یافت (شکل ۳ ج). لیو و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که تنش‌های ترکیبی به‌طور قابل‌توجهی غلظت پتاسیم اندام هوایی را در مقایسه با گیاه شاهد کاهش داد، درحالی‌که مایه‌زنی قارچ به‌طور قابل‌توجهی غلظت پتاسیم اندام هوایی را افزایش داد (لیو و همکاران ، ۲۰۱۸). هنگامی‌که گیاهان در معرض شوری بالا قرار می‌گیرند، تمایل بیشتری به جذب سدیم دارند و درنتیجه جذب پتاسیم محدود می‌شود. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که میکوریزا می‌تواند جذب پتاسیم را در شرایط شور افزایش دهد (لاتف و میرانساری، ۲۰۱۴). که به گیاه کمک می‌کند نسبت K/Na بالاتری را حفظ کند، بنابراین از اختلال در فرآیندهای آنزیمی و مهار سنتز پروتئین ناشی از سدیم اضافی جلوگیری می‌کند (گیر و همکاران، ۲۰۰۷).

اثرات میکوریزا بر وضعیت آب گیاه و تعادل یونی با بهبود تغذیه گیاه میزبان، به‌ویژه برای فسفر و پتاسیم، که در تحمل به سمیت بور و تنش شوری مفید هستند، مرتبط است (ناوارو و همکاران، ۲۰۱۴؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۸). ما و همکاران (۲۰۲۲) نیز گزارش کردند که قارچ C. etunicatum با تحریک ترشحات ریشه‌ای میزان جذب پتاسیم را افزایش می‌دهد.



شکل ۳- اثر قارچ بر میزان جذب الف) فسفر، ب) سدیم و ج) پتاسیم اندام هوایی ذرت تحت تنش شوری و بور

تأثیر قارچ بر میزان جذب عناصر کم‌مصرف اندام هوایی ذرت

اثر اصلی بور و شوری و برهمکنش آن‌ها بر میزان جذب آهن، مس، روی و منگنز در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود اما اثر اصلی مایه‌زنی قارچی تنها بر میزان جذب روی و مس در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بوده است (جدول ۴). با مایه‌زنی قارچ، در تیمار B_0S_0 میزان جذب روی، مس و آهن به ترتیب ۳۳/۳۰، ۶۹/۷۲ و ۳۰/۵۷٪ و در تیمار $B_{30}S_0$ میزان جذب منگنز، مس و آهن به ترتیب ۴۴/۴۹، ۳۹/۶۲ و ۲۸/۷۲٪ نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی کاهش یافت (جدول ۵). کاهش غلظت منگنز برگ با کاربرد B ممکن است به دلیل اثر رقت یا رابطه متضاد بین B و منگنز باشد (عارف، ۲۰۱۲). سامت و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که سمیت بور غلظت منگنز و آهن در تربچه را کاهش داده است. همچنین علی و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که نسبت روی به مس گیاه تنباکو و ذرت در غلظت‌های پایین‌تر بور افزایش و در غلظت‌های بالاتر بور کاهش‌یافته است. تیمار B_0S_8 برجذب منگنز و روی بی‌تأثیر بود،

درحالی‌که میزان جذب مس و آهن را کاهش داد. با مایه‌زنی قارچ میزان جذب منگنز و مس نسبت به تیمار بدون مایه-زنی به ترتیب ۲۵/۹۷ و ۳۵/۳۸٪ افزایش یافت (جدول ۵). لیو و همکاران (۲۰۰۴) افزایش جذب روی، مس، منگنز و آهن را در گیاه ذرت تلقیح شده با قارچ Glomus intraradices گزارش نمودند. همچنین گونه‌های مختلف میکوریزا توانایی متفاوتی در جذب عناصر کم‌مصرف نشان می‌دهند. به نظر می‌رسد که میسلیوم قارچ با گسترش در خاک میزان جذب عناصر را افزایش می‌دهد که دلیل این امر متفاوت است. برخی شواهد حاکی از این است که میکوریز از طریق ترشح انواعی از سیدروفورها و کلاته کردن عناصر توانسته‌اند جذب و انتقال آن‌ها را افزایش دهند. همچنین افزایش جذب عناصر غذایی به دلیل انتشار میسلیوم‌های قارچ کلنیزه کننده بافت‌های درونی ریشه و تشکیل یک سیستم مکمل جذب در سیستم ریشه‌ای گیاه بوده که بهره‌گیری از حجم بیشتر خاک را که ریشه‌های تغذیه‌کننده به آن دسترسی ندارند، ممکن می‌سازد (برین و همکاران، ۱۳۹۶). در تیمار $B_{30}S_8M_0$ تنها میزان جذب مس را از ۰/۰۸ به ۰/۱۱۵ میلی‌گرم در گلدان در سطح احتمال ۵٪ نسبت به $B_0S_0M_0$ افزایش معنی‌داری داشت (جدول ۵). مایه‌زنی قارچ در تیمار $B_{30}S_8$، میزان جذب روی و مس را نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی ۴۰/۰۷ و ۷۲/۵۴٪ کاهش و میزان جذب آهن ۲۳/۶۳٪ افزایش داد (جدول ۵). بر اساس گزارش لیو و همکاران (۲۰۰۴)، همزیستی قارچ Glomus intraradices با ذرت، جذب آهن، مس و روی افزایش می‌دهد (لیو و همکاران، ۲۰۰۴). درحالی‌که این تحقیق نشان می‌دهد که قارچ C. etunicatum تنها بر جذب آهن تأثیر مثبت دارد. دلیل اینکه میکوریزا آربسکولار بر غلظت منگنز و مس تأثیر نمی‌گذارد، می‌تواند به این دلیل باشد که هیف‌های میکوریزی تنها مسئول جذب این عناصر هستند، اما در جابه‌جایی آن‌ها دخیل نیستند (وو و همکاران، ۲۰۱۱).

مطالعاتی وجود دارد که نشان می‌دهد همزیستی قارچ C. etunicatum ممکن است اثرات کمی در بهبود یا حتی مانع از جذب مس و منگنز داشته باشد (حسینی و قراقانی، ۲۰۱۵). جدا الله و السعدی (۲۰۲۱) گزارش کردند که کمترین غلظت روی در برگ ذرت بین سویه‌های مختلف قارچ میکوریزا مربوط به مایه‌زنی C.etunicatum بوده است.

جدول ۴- تجزیه واریانس جذب عناصر پرمصرف و کم مصرف اندام هوایی ذرت

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات						
		جذب سدیم	جذب فسفر	جذب پتاسیم	جذب آهن	جذب مس	جذب روی	جذب منگنز
بور و شوری	۳	۱۱۵۴۳۳**	۹۴/۴۸*	۷۷۴۰۶**	۰/۰۶**	۰/۰۰۰۷**	۰/۰۳**	۰/۴۰۸**
مایه‌زنی قارچ	۱	۱۳۳۱۵**	۸۱۷/۹۶**	۷۴۵۸۱**	۰/۰۰۹ ^{ns}	۰/۰۰۷**	۰/۰۲**	۰/۰۳۳^{ns}
بور و شوری × مایه‌زنی قارچ	۳	۴۴۰۴**	۸۱/۴۲*	۱۶۵۱۱^{ns}	۰/۰۵**	۰/۰۰۲**	۰/۰۱**	۰/۰۸۶**
خطا	۱۶	۲۰۷/۶۹	۲۰/۰۰۸	۷۵۸۸	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۱۶	۰/۰۱۲
CV	–	۱۱/۳۸	۱۴/۳۶	۱۶/۱۲	۱۱/۱۱	۱۰/۹۶	۱۲/۷۶	۱۳/۳۶

** در سطح ۱ ٪ * در سطح ۵٪ معنی‌دار می باشند و ns از لحاظ آماری معنی‌دار نمی‌باشد

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر قارچ برجذب عناصر کم‌مصرف اندام هوایی ذرت تحت تنش شوری و بور

تیمار			جذب منگنز (mg pot^{-1})	جذب روی (mg pot^{-1})	جذب مس (mg pot^{-1})	جذب آهن (mg pot^{-1})
شوری	بور	سطوح میکروبی				
۰	۰	بدون مایه‌زنی	۰/۹۸۴bc	۰/۳۵۰bc	۰/۰۸۰۹b	۰/۷۳۹ab
۰	۰	قارچ	۰/۸۰۲cd	۰/۲۳۴de	۰/۰۲۴۲e	۰/۵۱۳ed
۰	۳۰	بدون مایه‌زنی	۰/۶۷۳d	۰/۳۰۰cd	۰/۰۵۸۸cd	۰/۵۹۷cd
۰	۳۰	قارچ	۰/۳۸۹e	۰/۲۴۱de	۰/۰۳۵۵e	۰/۴۲۶e
۸	۰	بدون مایه‌زنی	۱/۰۲۶b	۰/۴۰۵ab	۰/۰۴۹۵d	۰/۵۶۰cd
۸	۰	قارچ	۱/۲۹۳a	۰/۴۵۴a	۰/۰۶۷۱c	۰/۶۴۲bcd
۸	۳۰	بدون مایه‌زنی	۰/۸۲۹bcd	۰/۳۳۷bc	۰/۱۱۵a	۰/۶۷۸bc
۸	۳۰	قارچ	۰/۷۲۷d	۰/۲۰۲e	۰/۰۳۱۵e	۰/۸۳۸a

اعدادی که در هر ردیف یا ستون دارای یک حرف مشترک کوچک یا بزرگ هستند ازلحاظ آماری در سطح ۵٪ بر اساس آزمون دانکن معنی‌دارنمی باشند. (منظور از تیمارهای صفر شوری و بور،عدم اعمال شوری و بور است)

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که تنش شوری و سمیت بور تأثیری بر درصد کلونیزاسیون ریشه نداشت و مایه‌زنی قارچ C. etunicatum توانسته باریشه ذرت همزیستی برقرار کند. افزودن ۳۰ میلی‌گرم بور به خاک همراه با مایه‌زنی قارچ C. etunicatum کلروفیل، جذب بور اندام هوایی، جذب پتاسیم و فسفر افزایش و جذب بور ریشه، جذب آهن، مس و منگنز کاهش یافت. شوری ۸ دسی زیمنس بر متر، با مایه‌زنی قارچ میزان کلروفیل، جذب مس، منگنز افزایش و جذب سدیم را کاهش داد. در شرایط تنش ترکیبی بور و شوری، جذب پتاسیم کاهش و جذب بور گیاه، جذب سدیم و مس افزایش یافت و با مایه‌زنی قارچ وزن خشک‌ریشه، کلروفیل برگ، جذب بور ریشه، پتاسیم، فسفر، آهن را افزایش و جذب روی، مس و بور اندام هوایی را کاهش داد. نتایج این مطالعه نشان داد که در شرایط تنش ترکیبی بور و شوری مایه‌زنی قارچ C. etunicatum می‌تواند رشد ذرت را بهبود بخشد. با این‌حال ارزیابی‌های بیشتر برای بررسی اثرات میکوریز آربوسکولار بر تنش ترکیبی شوری و سمیت بور مورد نیاز است.

فهرست منابع

۱. برین، م.، رسولی صدقیانی، م.، اشرفی سعیدلو، س.، و شکوری، ف. (۱۳۹۶). تأثیر شوری و تلقیح میکروبی بر عملکرد و شاخص‌های کارآیی فسفر در گیاه ذرت. تحقیقات کاربردی خاک, ۷(۱), ۱۴۸-۱۶۵.

۲. حسنی, قاسم, مجیدی, عزیز, فرخزاد, و سپهر. (۱۳۹۹). اثر برهمکنش بور× پایه بر ویژگی‌های رشدی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیائی سیب رقم گلدن دلیشز. نهال و بذر, ۳۷(۱), ۲۳-۳۹.

۳. حسینی، س م.، مفتون، م, کریمیان، ن.، رونقی، ع.، و امام، ی. (۱۳۸۳). تاثیر سولفات روی بر مقاومت به سمیت بور در ذرت. مجله علوم خاک و آب، ۲(۱۸): ۱۲۵-۱۳۵.

۴. عمو آقایی، ر.، و نیک اندیش، ف. (۱۳۹۴). اثر مایه‌زنی دو رقم یونجه با جدایه‌هایی از گونه‌های سینوریزوبیوم و باسیلوس بر رشد، مقدار کلروفیل و تمامیت غشای سلول در شرایط تنش شوری. مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست شناسی ایران)، ۱: ۱۴۰-۱۵۲.

5. Ali, F., Ali, A., Gul, H., Sharif, M., Sadiq, A., Ahmed, A., & Kalhoro, S. A. (2015). Effect of boron soil application on nutrients efficiency in tobacco leaf. American Journal of Plant Sciences, 6(09), 1391.

6. Aref, F. (2012). Manganese, iron and copper contents in leaves of maize plants (Zea mays L.) grown with different boron and zinc micronutrients. African Journal of Biotechnology, 11(4), 896-903.
7. Banuelos, G. S., Wu, L., Akohoue, S., Zambrzuski, S., & Mead, R. (2010). Trace element composition of different plant species used for remediation of boron-laden soils. In Plant Nutrition—from Genetic Engineering to Field Practice (pp. 425-428). Springer, Dordrecht: New York.
8. Barua, D., Mishra, A., Kirti, P. B., & Barah, P. (2022). Identifying signal-crosstalk mechanism in maize plants during combined salinity and boron stress using integrative systems biology approaches. BioMed Research International, 2022.
9. Bastías, E. I., González-Moro, M. B., & González-Murua, C. (2004). Zea mays L. amylacea from the Lluta Valley (Arica-Chile) tolerates salinity stress when high levels of boron are available. Plant and Soil, 267, 73-84.
10. Ben-Gal, A., & Shani, U. (2002). Yield, transpiration and growth of tomatoes under combined excess boron and salinity stress. Plant and soil, 247(2), 211-221.
11. Berger, K. C., & Truog, E. (1939). Boron determination in soils and plants. Industrial and Engineering Chemistry Analytical Edition, 11(10), 540-545.
12. Bouyoucos, G. J. (1962). A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soils 1. Agronomy Journal, 43(9), 434-438.
13. Bremner, J. M. (1996). Nitrogen-total. Methods of Soil Analysis Part 3—Chemical Methods, (methodsofsoilan3), 1085-1121.
14. Cabral, L., Soares, C. R. F. S., Giachini, A. J., & Siqueira, J. O. (2015). Arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of contaminated areas by trace elements: mechanisms and major benefits of their applications. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 31, 1655-1664.
15. Capula-Rodríguez, R., Valdez-Aguilar, L. A., Cartmill, D. L., Cartmill, A. D., & Alia-Tejacal, I. (2016). Supplementary calcium and potassium improve the response of tomato (Solanum lycopersicum L.) to simultaneous alkalinity, salinity, and boron stress. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 47(4), 505-511.
16. Chandrasekaran, S., Sato, N., Tölle, F., Mülhaupt, R., Fiedler, B., & Schulte, K. (2014). Fracture toughness and failure mechanism of graphene based epoxy composites. Composites Science and Technology, 97, 90-99.
17. El-Agrodi, M., EL-Shebiny, G., Mosa, A., & El-sherpiny, M. (2016). Maize tolerance to different levels of boron and salinity in irrigation water. Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering, 7(1), 35-44.
18. Eraslan, F., Inal, A., Gunes, A., & Alpaslan, M. (2007). Boron toxicity alters nitrate reductase activity, proline accumulation, membrane permeability, and mineral constituents of tomato and pepper plants. Journal of Plant Nutrition, 30(6), 981-994.
19. García-Sánchez, F., Simón-Grao, S., Martínez-Nicolás, J. J., Alfosea-Simón, M., Liu, C., Chatzissavvidis, C., & Cámara-Zapata, J. M. (2020). Multiple stresses occurring with boron toxicity and deficiency in plants. Journal of hazardous Materials, 397, 122713.
20. Ghanbarzadeh, Z., Zamani, H., Mohsenzadeh, S., Marczak, Ł., Stobiecki, M., & Zarei, M. (2021). Rhizosphere symbionts improve water stress tolerance in Moldavian balm through modulation of osmolytes. Rhizosphere, 19, 100367.
21. Giovannetti, M., & Mosse, B. (1980). An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. New Phytologist, 489-500.
22. Giri, C., Pengra, B., Zhu, Z., Singh, A., & Tieszen, L. L. (2007). Monitoring mangrove forest dynamics of the Sundarbans in Bangladesh and India using multi-temporal satellite data from 1973 to 2000. Estuarine, coastal and shelf science, 73(1-2), 91-100.
23. Hegazi, A. M., El-Shraiy, A. M., & Ghoname, A. A. (2017). Mitigation of salt stress negative effects on sweet pepper using arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), Bacillus megaterium and brassinosteroids (BRs). Gesunde Pflanzen, 69(2), 91-102.
24. Hosseini, A., & Gharaghani, A. (2015). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and nutrient uptake of apple rootstocks in calcareous soil. International Journal of Horticultural Science and Technology, 2(2), 173-185.

25. Hu, Y., Liu, X., Bai, J., Shih, K., Zeng, E. Y., & Cheng, H. (2013). Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization. Environmental Science and Pollution Research, 20(9), 6150-6159.
26. Ismail, A.M. (2004). Response of Maize and Sorghum to Excess Boron and Salinity. Plant Biology., 47: 313-316.
27. Jabeen, N., & Ahmad, R. (2011). Effect of foliar-applied boron and manganese on growth and biochemical activities in sunflower under saline conditions. Pakistan Journal of Botany, 43(2), 1271-1282.
28. Jadallah, S. O., & ALsaadi, A. H. (2021). Evaluation of Some Mycorrhizae Strains on Improving Nutrients Absorption in Maize Plant Grown in (Sirte–Libya) Saline Soil. Mediterranean Journal of Basic and Applied Sciences (MJBAS).
29. Jones, J. B., Jr. (1991). Plant tissue analysis in micronutrients. P. 477-521. In J. J. Mortvelt et al. (eds). Micronutrient in agriculture. 2 nd. SSSA Book Sea. 4.SSSA. Madison, WI.
30. Khan, A., Zhao, X. Q., Javed, M. T., Khan, K. S., Bano, A., Shen, R. F., & Masood, S. (2016). Bacillus pumilus enhances tolerance in rice (Oryza sativa L.) to combined stresses of NaCl and high boron due to limited uptake of Na+. Environmental and experimental botany, 124, 120-129.
31. Knudsen, E. I. (1982). Auditory and visual maps of space in the optic tectum of the owl. Journal of Neuroscience, 2(9), 1177-1194.
32. Kormanik, P. P., & McGraw, A. C. (1982). Qualification of vesicular arbuscular mycorrhizae in plant root. In: Mathod and principles of mycorrhizal research, Scheneck, N. C. (Ed). American Phytopathol SocietyS Saint Paul. 37-45.
33. Kumar, A., Sharma, S. K., Lata, C., Sheokand, S., & Kulshreshta, N. (2015). Combined effect of boron and salt on polypeptide resolutions in wheat (Triticum aestivum) varieties differing in their tolerance. Indian Journal of Agricultural Sciences,, 85, 1626-1632.
34. Latef, A. A. H., & Miransari, M. (2014). The role of arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress. Use of Microbes for the Alleviation of Soil Stresses: Volume 2: Alleviation of Soil Stress by PGPR and Mycorrhizal Fungi, 23-38.
35. Li, H., Luo, N., Zhang, L. J., Zhao, H. M., Li, Y. W., Cai, Q. Y., & Mo, C. H. (2016). Do arbuscular mycorrhizal fungi affect cadmium uptake kinetics, subcellular distribution and chemical forms in rice?. Science of the Total Environment, 571, 1183-1190.
36. Lindsay, W. L., & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper 1. Soil Science Society of America Journal, 42(3), 421-428.
37. Liu Ch., Dai Zh, Xia J., Chang C., & Sun H. (2018). Combined effect of salt and drought on boron toxicity in Puccinellia tenuiflora. Ecotoxicology and Environmental Safety, 157:395–402.
38. Liu, Y., Mi, G., Chen, F., Zhang, J., & Zhang, F. (2004). Rhizosphere effect and root growth of two maize (Zea mays L.) genotypes with contrasting P efficiency at low P availability. Plant science, 167(2), 217-223.
39. Ma, J., Wang, W., Yang, J., Qin, S., Yang, Y., Sun, C., & Huang, J. (2022). Mycorrhizal symbiosis promotes the nutrient content accumulation and affects the root exudates in maize. BMC Plant Biology, 22(1), 64.
40. Mohamed, A. K. S. H., Qayyum, M. F., Shahzad, A. N., Gul, M., & Wakeel, A. (2016). Interactive effect of boron and salinity on growth, physiological and biochemical attributes of wheat (Triticum aestivum). International Journal of Agriculture And Biology, 18(2), 238-244.
41. Moraga, N. B., Amoroso, M. J., & Rajal, V. B. (2014). Strategies to ameliorate soils contaminated with boron compounds. In Bioremediation in Latin America (pp. 41-51). Springer, Cham.
42. Nable, R. O., Bañuelos, G. S., & Paull, J. G. (1997). Boron toxicity. Plant and Soil, 193(1-2), 181-198.

43. Navarro, J. M., Pérez-Tornero, O., & Morte, A. (2014). Alleviation of salt stress in citrus seedlings inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi depends on the rootstock salt tolerance. Journal of Plant Physiology, 171(1), 76-85.
44. Nelson, D. W., Sommers, L. E., Sparks, D., Page, A., Helmke, P., Loeppert, R., & Sumner, M. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. Methods of Soil Analysis. Part 3-Chemical and microbiological properties. Soil Science of America and American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin 961-1010.
45. Olsen, S. R., Sommers, L. E. (1982). Phosphorus. P. 403-424. In A. L. Page (ed.) Methods of soil analysis, Part 2. Soil Science Society of America Journal., Madison, WI.
46. Pandey, A., Khan, M. K., Hakki, E. E., Gezgin, S., & Hamurcu, M. (2019). Combined boron toxicity and salinity stress—An insight into its interaction in plants. Plants, 8(10), 364.
47. Rhoades, J., Sparks, D., Page, A., Helmke, P., Loeppert, R., Soltanpour, P., & Summer, M. (1996). Salinity: Electrical Methods of Soil Analysis Part 3-Chemical Methods conductivity and total dissolved solids., 417-435.
48. Samet, H., Cikili, Y., & Dursun, S. (2015). The role of potassium in alleviating boron toxicity and combined effects on nutrient contents in pepper (Capsicum annuum L.). Bulgarian Journal of Agricultural Science, 21(1), 64-70.
49. Shao, Y. D., Zhang, D. J., Hu, X. C., Wu, Q. S., Jiang, C. J., Xia, T. J., & Kuča, K. (2018). Mycorrhiza-induced changes in root growth and nutrient absorption of tea plants. Plant, Soil and Environment, 64(6), 283-289.
50. Sirajuddin., Khan, A., Ali, L., Chaudhary, H. J., Munis, M. F. H., Bano, A., & Masood, S. (2016). Bacillus pumilus alleviates boron toxicity in tomato (Lycopersicum esculentum L.) due to enhanced antioxidant enzymatic activity. Scientia Horticulturae, 200, 178-185.
51. Smith, T. E., Grattan, S. R., Grieve, C. M., Poss, J. A., Läuchli, A. E., & Suarez, D. L. (2013). pH dependent salinity-boron interactions impact yield, biomass, evapotranspiration and boron uptake in broccoli (Brassica oleracea L.). Plant and soil, 370, 541-554.
52. Sonmez, O., Aydemir, S. A. L. İ. H., & Kaya, C. E. N. G. İ. Z. (2009). Mitigation effects of mycorrhiza on boron toxicity in wheat (Triticum durum) plants. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 37(2), 99-104.
53. Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. Methods of Soil Analysis Part 3-Chemical Methods, (methodsofsoilan3), 457-490.
54. Turhan, A. (2021). Interactive effects of boron stress and mycorrhizal (AMF) treatments on tomato growth, yield, leaf chlorophyll and boron accumulation, and fruit characteristics. Archives of Agronomy and Soil Science, 67(14), 1974-1985.
55. Wimmer, M. A., & Goldbach, H. E. (2012). Boron-and-salt interactions in wheat are affected by boron supply. Journal of plant nutrition and soil science, 175(2), 171-179.
56. Yermiyahu, U., Ben-Gal, A., Keren, R., & Reid, R. J. (2008). Combined effect of salinity and excess boron on plant growth and yield. Plant and Soil, 304(1), 73-87.
57. Zarei M, König S, Hempel S, Nekouei MK, Savaghebi G, Buscot F. (2008). Community structure of arbuscular mycorrhizal fungi associated to Veronica rechingeri at the Anguran zinc and lead mining region. Environmental Pollution, 156:1277-1283.

Effect of Claroideoglomus etunicatum Fungus on the Growth and Nutrient Absorption of Maize plant under the combined stress of boron and salinity

N.Abdar* and M.Zarei

Ph.D. Student, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran; E-mail: **n.abdar7395@yahoo.com**

Associate Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran and Department of Agriculture and Natural Resources, Higher Education Center of Eghlid, Iran; E-mail: **mehdizarei@shirazu.ac.ir**

Accepted: January 16, 2023 and Received: September 11, 2023

Abstract

Salt stress and boron toxicity in the soils of arid and semi-arid regions of the world limit plant growth. A factorial experiment in a completely randomized design with three replications was used to investigate the effect of arbuscular mycorrhizal fungus on the growth and nutrient uptake of maize under salinity stress and boron toxicity. Two levels of boron (control and 30 mg B kg^{-1}), two salinity levels (control and 8 dS m^{-1}) from the source of boric acid and sodium chloride and two fungal levels (without inoculation, inoculation with Claroideoglomus etunicatum fungus) were considered. The results showed that salinity stress and boron toxicity had no effect on root colonization percentage ($P>0.05$). At the level of 30 mg B kg^{-1} boron, the fungus significantly increased the chlorophyll index, shoot boron, potassium, and phosphorus uptake (7.09%, 15.83%, 31.62%, and 51.57% respectively) and significantly decreased root boron, iron, copper and manganese uptake, (35.15%, 28.72%, 39.62% and 42.12% respectively). At the level of 8 dSm^{-1}, the fungus significantly increased the amount of chlorophyll, copper, and manganese uptake, (5.05%, 35.38%, 25.97% respectively) and significantly decreased sodium uptake (40.31%). Under combined stress conditions and in the presence of fungus, chlorophyll index, root boron, potassium, phosphorus, and iron uptake, (8.42%, 61.56%, 82.01%, and 23.63% respectively) were significantly increased but shoot sodium, zinc, copper, and boron absorption, (20.98%, 40.07% 72.54% and 34.38% respectively) were significantly decreased. The results of this research indicated that inoculation of fungus could help to improve the growth and absorption of nutrients in conditions of boron toxicity and soil salinity stress.

Keywords: Arbuscular mycorrhizal fungus, Boron toxicity, Maize, Soil salinity

*- Corresponding author's email: n.abdar7395@yahoo.com