نقش عناصر غذایی میکرو در

مورفولوژی و فعالیت ریشه

عناصر ریزمغذی، همان‌طور که از نامشان مشخص است، در مقایسه با عناصر ماکرو به مقدار کمتری مورد نیاز گیاهان می‌باشد. هر چند این عناصر با غلظت‌های پایین مورد نیاز گیاهان می‌باشد، کمبود این عناصر برای گیاهان، بخصوص گیاهان زراعی و باغی (در مقایسه با گیاهان موجود در اکوسیستم‌های طبیعی) مشکل شایعی در جهان است. عمده این مشکل نه به دلیل عدم وجود کافی این عناصر در خاک، بلکه به دلیل راندمان پایین مصرف آنها توسط گیاهان است. ریشه به عنوان یکی از اندام‌های گیاهان می‌تواند تحت تاثیر کمبود و بیش بود این عناصر در خاک قرار گیرد. این مطالعه جهت بررسی تاثیر عناصر ریز مغذی بر روی رشد و فعالیت ریشه انجام شد.

واژه‌های کلیدی: ریشه، وزن خشک، طول ریشه، ریزمغذی‌ها

مقدمه

در کنار عناصر ماکرو همچون نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیوم و گوگرد که از خاک تامین می‌شوند، هشت عنصر میکرو شامل مس، آهن، منگنز، مولبیدن، نیکل، روی، بور و کلر به عنوان عناصر ضروری گیاهان شناخته می‌شوند. عناصر ریزمغذی، همان‌طور که از نامشان مشخص است، در مقایسه با عناصر ماکرو به مقدار کمتری مورد نیاز گیاهان می‌باشد. اما این کمتر مورد نیاز بودن به این معنی نیست که حذف این عناصر باعث ایجاد اختلال جدی در رشد گیاه و در نهایت منجر به مرگ گیاه نشود.

به غیر از دو عنصر بور و کلر، سایر عناصر ریز مغذی از فلزات می‌باشند. بنابراین، این عناصر به طور عمده از از اکتشاف معادن در زیر زمین حاصل می‌شوند. در سال ۲۰۱۴ مقدار ذخایر موجود در کل جهان برای آهن ۱۷۰ میلیارد میلیون تن، منگنز ۵۷۰۰۰۰ میلیون تن، روی ۲۳۰۰۰۰ میلیون تن، مس ۶۹۰۰۰۰ میلیون تن، بور ۲۱۰۰۰۰ میلیون تن، مولیبدن ۱۱۰۰۰۰۰۰ میلیون تن و نیکل ۷۴۰۰۰۰۰۰ میلیون تن تخمین زده شده است.

هر چند که به طور معمول در خاک مقدار کافی از عناصر ریزمغذی وجود دارد، اما به دلایل مربوط به خصوصیات خاک و همچنین به دلایل بیولوژیکی مانند اسیدیته خاک، کوبیدگی خاک و نوع تنوع و جمعیت میکروبی موجود در خاک، گیاهان با مشکل کمبود دسترسی با این عناصر مواجه هستند. راندمان مصرف برای عناصر میکرو به طور معمول کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد. این در حالی است که راندمان مصرف برای عناصر ماکرو (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) بین ۲۰ تا ۸۰ درصد گزارش شده است. کمبود دسترسی به عناصر ریزمغذی در خاک به دلیل پایین بودن راندمان مصرف توسط گیاهان، یک مشکل جهانی است. کمبود عناصر ریزمغذی می‌تواند بر روی گلدهی، تولید ماده خشک (هم در شاخساره و هم در ریشه)، باروری گرده‌ها، نمو مراحل مختلف فنولوژیک گیاه و تشکیل دانه اثرات منفی داشته باشد. همچنین کمبود این عناصر می‌تواند باعث به تاخیر افتادن رسیدگی گیاه و کاهش عملکرد شود. در این مطالعه به طور مختصر از طریق بررسی منابع، به بحث در مورد تاثیر عناصر میکرو آهن، روی، بور و مس بر روی رشد ریشه پرداخته شده است.

عنصر آهن

عنصر آهن نقش مهمی در تولید DNA، تنفس و فتوسنتز دارد. این عنصر در تولید، حفظ ساختار و فعالیت کلروفیل در گیاهان ایفای نقش می‌کند. همچنین این عنصر در ساختاری بسیاری از آنزیم‌های حیاتی مانند سیتوکروم‌ها فعال در زنجیره انتقال الکترون وجود دارد. در سطح جهان عنصر آهن در بین تمامی عناصر ضروری مورد نیاز گیاهان، از نظر محدودیت در رتبه سوم قرار دارد.

عنصر ریزمغذی آهن در همه گیاهان به عنوان یک عنصر ضروری محسوب می‌شود، اما گیاهان خانواده بقولات که با باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن همزیستی دارند، در مقایسه با سایر گیاهان به عنصر آهن بیشتری نیاز دارند. چون در این گیاهان علاوه بر نیازهای خود گیاه، این عنصر برای ساخته شدن مقدر زیادی لگ هموگلوبین جهت انجام فرایند تثبیت در گره‌های موجود بر روی ریشه، مورد نیاز می‌باشد. کمبود عنصر آهن در بقولات، در تولید و نمو گره‌های ریشه اثر منفی دارد. مقدار تثبیت نیتروژن با غلظت آهن موجود در گره‌ها رابطه مستقیمی دارد. وجود این رابطه مستقیم در گیاهان مختلف بقولات از قبیل نخود، لوبیا، بادام زمینی، سویا، عدس و لوپین گزارش شده است.

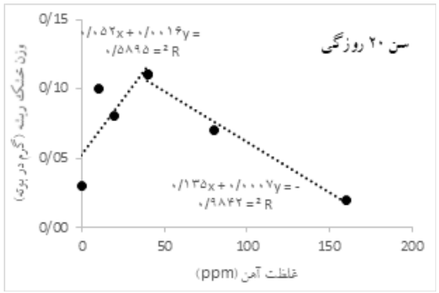
نکته بسیار مهمی که در مورد کمبود آهن در ریشه برخی از بقولات وجود دارد این است که، جابجایی این عنصر از یک بخش ریشه بوته که به حد کافی آهن دریافت شده و گره تشکیل شده است به بخش دیگر ریشه با شرایط کمبود آهن، انجام نمی‌شود. همچنین، کمبود آهن در ریشه از طریق محلول‌پاشی شاخساره قابل تامین نیست. این در حالی است که در مورد گیاه بادام زمینی عکس این موضوع مشاهده شده و در این گیاه کمبود آهن در ریشه از طریق محلول‌پاشی شاخساره برطرف شده است.

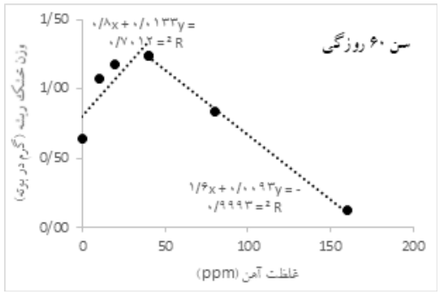
کمبود آهن در گیاهان می‌تواند بر خصوصیات رشد ریشه از قبیل طول ریشه، حجم ریشه، مساحت ریشه و وزن خشک ریشه اثر منفی داشته باشد. این موضوع در گیاه استویا گزارش شده است، بطوری‌که در شرایطی که مقدار آهن در خاک ۲/۱۲ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (استخراج شده با DTPA)، محلول‌پاشی این عنصر به مقدار ۴ کیلوگرم در هکتار در گیاه استویا، طول (۲۵ درصد)، حجم (۵۰ درصد)، مساحت (۵۰ درصد)، قطر(۲۰ درصد) و وزن خشک ریشه (۳۲ درصد) را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد. اما چگالی ریشه در شرایط محلول‌پاشی با آهن در حدود ۲۰ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داشت. نکته حائز اهمیت این بود که، محلول‌پاشی استویا با عنصر آهن در شرایط شوری در مقایسه با تیمار شوری بدون محلول‌پاشی آهن نیز سبب بهبود خصوصیات

رشدی ریشه شد که این موضوع می‌تواند موجب تاثیر مثبت عنصر آهن در افزایش مقاومت گیاه در مقابل شرایط تنش شوری شود. باید توجه داشت که نیاز گیاهان به آهن یکسان نیست. به عنوان مثال در شرایطی که غلظت آهن اولیه موجود در خاک برابر ۲/۴۸ پی‌پی‌ام بود، در گیاه جو تیمارهای آهن (مصرف ۰، ۲/۵ و ۵ کیلوگرم در هکتار کود آهن) بر تولید وزن خشک ریشه، طول ریشه و چگالی ریشه اختلاف معنی‌داری نداشت.

در شکل ۱، واکنش وزن خشک ریشه برنج به غلظت‌های مختلف عنصر ریزمغذی آهن برای دو بازه زمانی مختلف ۲۰ و ۶۰ روز پس از کاشت، نشان داده شده است. در هر دو سن گیاه، با افزایش غلظت عنصر آهن در محیط ریشه تا غلظت ۴۰ پی‌پی‌ام، وزن خشک ریشه افزایش داشت ولی با افزایش بیشتر غلظت آهن از ۴۰ پی‌پی‌ام، به دلیل ایجاد سمیت این عنصر در ریشه، وزن خشک ریشه برنج کاهش یافت (شکل ۱). با اینکه در هر دو سن ۲۰ و ۶۰ روزگی برنج، الگوی رفتاری رشد ریشه یکسان بود ولی شدت واکنش رشد ریشه به میزان غلظت آهن در این دو سن متفاوت بود. به طوری‌که در سن ۲۰ روزگی در دامنه غلظت بین ۰ تا ۴۰ پی‌پی‌ام، به ازای هر واحد افزایش غلظت عنصر آهن حدود ۰/۰۰۱۶ گرم وزن خشک ریشه افزایش داشت که این مقدار معادل ۱/۴۵ درصد وزن خشک ریشه نسبت به بیشترین حالت وزن خشک ریشه (یعنی در غلظت ۴۰ پی‌پی‌ام) در این سن بود. در حالی‌که در سن ۶۰ روزگی به ازای هر واحد افزایش غلظت عنصر در محیط ریشه، در حدود ۰/۰۱۳ گرم وزن خشک ریشه افزایش داشت که معادل ۱ درصد نسبت به وزن خشک ریشه در بیشترین حالت (یعنی غلظت ۴۰ پی‌پی‌ام) برای سن ۶۰ روزگی بوته بود. بنابراین، واکنش افزایش وزن خشک ریشه در غلظت‌های ۰ تا ۴۰ پی پی ام، در ۲۰ روزگی شدیدتر از ۶۰ روزگی بود. در مورد اثر سمیت آهن در غلظت‌ها بالای ۴۰ پی‌پی‌ام نیز همین شرایط وجود داشت و واکنش منفی وزن خشک ریشه با افزایش سمیت در ۲۰ روزگی، شدیدتر از ۶۰ روزگی بود (شکل ۱).

شکل ۱ - مقدار وزن خشک ریشه بوته برنج در دو سن مختلف ۲۰ و ۶۰ روز پس از کاشت در واکنش به غلظت عنصر آهن



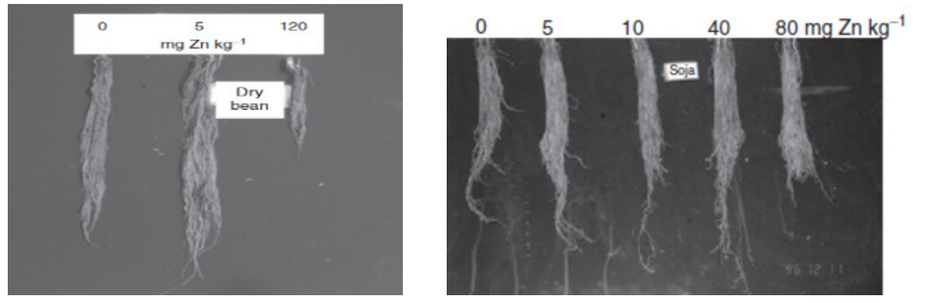


عنصر روی

عنصر روی نقش مهمی در فعالیت‌های آنزیم‌ها و متابولیسم گیاهان دارد. این عنصر به عنوان بخش ساختاری یا تنظیم‌کننده بسیاری از کوفاکتورها برای آنزیم‌ها و پروتین‌های مختلف در گیاه است که نقش مهمی در فعالیت‌های بیوشیمیایی از قبیل متابولیسم کربوهیدارت در فرآیند فتوسنتز، تبدیل قند به نشاسته، متابولیسم پروتئین‌ها، متابولیسم اکسین، تشکیل گرده، حفظ تمامیت غشای سلولی و ایجاد مقاومت در مقابل برخی از پاتوژن‌ها دارد. با وجود اهمیت بالای این عنصر در رشد گیاهان، کمبود روی در خاک‌های جهان شایع می‌باشد، به طوری‌که نزدیک به ۵۰ درصد اراضی با کمبود این عنصر مواجه هستند.

در مطالعه‌ای تاثیر روی بر وزن خشک ریشه و ترشحات اسیدهای آلی ریشه دو ژنوتیپ ذرت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، با افزایش غلظت عنصر در محلول غذایی از صفر به ۱ میکرومولار، وزن خشک ریشه در ژنوتیپ کرج ۷۰۳ از ۵/۳ گرم در گلدان به ۹/۶ گرم در گلدان و در ژنوتیپ کرج ۷۰۴ از ۴/۸ به ۹/۵ گرم در گلدان افزایش یافت. این در حالی است که در گزارش دیگری اعلام شد اثر تیمارهای روی (مصرف صفر، ۲۵ و ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سولفات روی) بر تولید وزن خشک ریشه، طول ریشه و چگالی ریشه جو اختلاف معنی‌داری نداشت.

شکل ۲ - رشد ریشه سویا در پنج سطح روی و رشد ریشه لوبیا در سه سطح مختلف روی

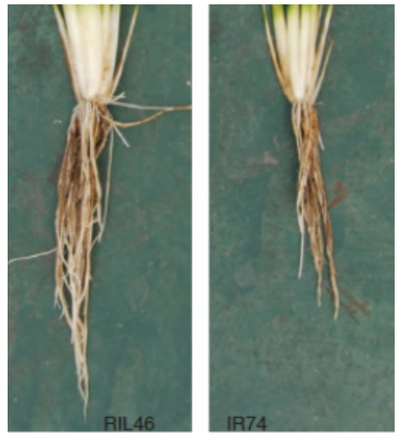


لازم به ذکر است که در این آزمایش غلظت روی موجود در خاک برابر ۴/۲۸ پی‌پی‌ام بود. در شکل ۲، به خوبی تاثیر عنصر روی بر روی رشد لوبیا و سویا نشان داده شده است.

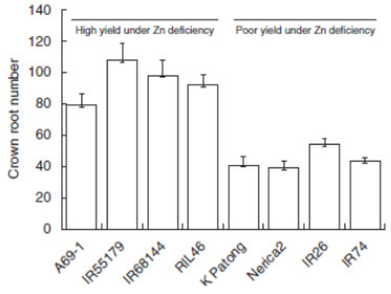
در گیاه ذرت با افزایش غلظت روی در محلول غذایی از صفر به ۱ میکرومولار، ترشح اسیدهای آلی (اسید مالیک، اسید سیتریک و اسید استیک) به صورت معنی‌داری کاهش یافت. همچنین در شرایط افزایش غلظت روی در محلول غذایی، نفوذپذیری غشا ریشه به صورت معنی‌داری کاهش یافت. نتایج مشابهی برای ژنوتیپ‌های گیاه گندم نیز گزارش شده است. در شرایط کمبود روی در محیط ریشه، افزایش نفوذپذیری غشای ریشه و افزایش ترشحات اسیدهای آلی راهکاری برای افزایش توان ریشه برای جذب عنصر روی و کاهش صدمات ناشی از کمبود این عنصر بر روی رشد گیاه است.

در برنج که دارای ریشه افشان است تقریباً همه ریشه‌ها از محل طوقه رشد می‌کنند. تعداد ریشه‌های رشد یافته از این محل به کمبود دسترسی به روی حساس است. به طوری‌که در یک محیط رشد با محدودیت عنصر روی، در ارقام برنج که به کمبود روی حساس بودند، تعداد ریشه‌ها در حدود ۷۵ درصد نسبت به ارقام مقاوم به کمبود روی، کاهش یافت (شکل ۳). تحقیقات نشان داده است که تقریباً در تمامی ارقام برنج مقاوم به کمبود روی (مانند ارقام A69-1، IR55179، IR68144، RIL46)، تعداد ریشه‌ها همواره در شرایط کمبود روی تغییری نمی‌کند (شکل ۴).

شکل ۳ - شرایط رشد ریشه دو رقم حساس (شکل راست) و مقاوم (شکل چپ) به کمبود روی در یک محیط با شرایط کمبود روی



شکل ٤ - تعداد ریشه‌های رشد یافته از محل طوقه برنج برای ارقام حساس و مقاوم به کمبود روی در شرایط محدودیت عنصر روی



بررسی‌های بیوشیمیایی بر روی ارقام برنج مقاوم و حساس به کمبود روی نشان می‌دهد که در شرایط کمبود روی مقدار رادیکال‌های آزاد در ریشه ارقام مقاوم نسبت به اراقام حساس کمتر است. از طرفی دیگر، مقدار و فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها در ریشه ارقام مقاوم بیشتر از اراقام حساس است (جدول ۱). بنابراین، می‌توان چنین بیان کرد که کمبود روی در گیاه می‌تواند باعث ایجاد تنش اکسیداتیو و در نهایت منجر به کاهش رشد ریشه، کاهش توان جذب ریشه و در نهایت کاهش تولید ماده خشک و عملکرد گیاه شود.

جدول ۱ - تفاوت بیوشیمیایی ریشه بین ژنوتیپ‌های حساس و مقاوم برنج به کمبود عنصر روی در شرایط محدودیت این عنصر در محیط رشد گیاه

مقدار رادیکال‌های آزاد در ریشه برنج (ژنوتیپ مقاوم به کمبود روی نسبت به ژنوتیپ حساس)	مقدار آنتی اکسیدان در ریشه برنج (ژنوتیپ مقاوم به کمبود روی نسبت به ژنوتیپ حساس)
عدم اختلاف معنی‌دار MDA عدم اختلاف معنی‌دار H2O2 عدم اختلاف سوپراکسید	عدم اختلاف SOD مقدار بیشتر POD عدم اختلاف معنی‌دار CAT عدم اختلاف APX
مقدار کمتر H2O2 مقدار کمتر MAD	مقدار بیشتر SOD مقدار بیشتر POD عدم اختلاف معنی‌دار CAT عدم اختلاف APX
مقدار کمتر H2O2	عدم اختلاف SOD عدم اختلاف POD عدم اختلاف APX مقدار بیشتر گلوکونیک اسید مقدار بیشتر اکسولاتریک اسید

MDA, malondialdehyde; SOD, superoxide dismutase; POD, peroxidase; CAT, catalase; APX, ascorbate peroxidase

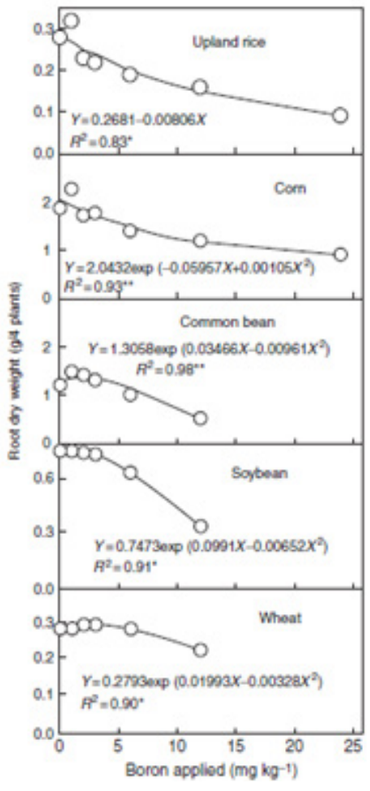
عنصر بور

بنا به سه شرط لازم برای اینکه یک عنصر به عنوان عنصر ضروری شناخته شود، اخیرا ضروری بودن این عنصر برای گیاه توسط Lewis (۲۰۱۹) به چالش کشیده شده است. بر اساس نظر این محقق، گیاه بدون عنصر بور نمی‌تواند چرخه زندگی خود را کامل کند. همچنین نقش این عنصر در گیاه توسط هیچ عنصر دیگری قابل جایگزین نیست. اما شرط سوم یعنی "نقش مستقیم عنصر در یک فعالیت متابولیسمی گیاه" برای عنصر بور به چالش کشیده شده است. بنابراین، با توجه به گزارشاین محقق عنصر بور فاقد همه شرط‌های لازم برای تبدیل شدن به یک عنصر ضروری در گیاه می‌باشد. اما در مقابل این چالش محققین دیگری تأکید دارند که در گیاهان آوندی هر سه شرط لازم برای عنصر بور وجود دارد.

ایجاد سمیت در گیاهان در غلظت‌های پایین عنصر بور اتفاق می‌افتد. همین موضوع یکی از دلایلی است که با استناد به آن ضروری نبودن این عنصر برای گیاهان به چالش کشیده شده است. به هر حال، بر اساس گزارش محققین عنصر بور در گیاهان آوندار، نقش مستقیمی در ایجاد و پایداری دیواره سلولی دارد. اثرات کمبود عنصر بور سریعاً در مریستم‌ها نمایان می‌شود. بنابراین، بور نقش مهمی در فعالیت مریستم‌ها ایفا می‌کند. وجود عنصر بور برای جوانه‌زنی گرده‌ها و ایجاد و رشد لوله گرده در هنگام گرده‌افشانی ضروری است. به طور معمول نیاز به عنصر بور در گیاهان دولپه بیشتر از گیاهان تک لپه است. به عنوان مثال، بیشترین رشد ریشه در برنج در غلظت ۰/۴ پی‌پی‌ام بور حاصل می‌شود ولی در گیاه دو لپه‌ای لوبیا بیشترین مقدار رشد ریشه در غلظت ۱/۹ پی‌پی‌ام مشاهده شده است.

در شکل ۵، تاثیر غلظت‌های مختلف بور در رشد ریشه برنج، ذرت، لوبیا، سویا و گندم نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، اثر سمیت عنصر بور از طریق کاهش وزن خشک ریشه این گیاهان در غلظت‌های پایین به خوبی دیده می‌شود. همچنین افت وزن خشک ریشه در دو گیاه تک لپه برنج و ذرت نسبت به دو گیاه دو لپه سویا و لوبیا در غلظت‌های پایین‌تری شروع می‌شود.

شکل ۵ - واکنش وزن خشک ریشه برای گیاهان برنج، ذرت، لوبیا، سویا و گندم به سطوح مختلف عنصر بور



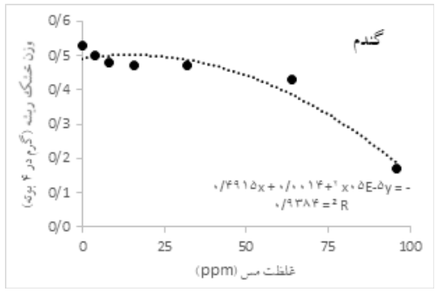
عنصر مس

در گیاهان، عنصر مس نقش حیاتی در انجام فتوسنتز و چرخه انتقال الکترون، سیگنال دریافت اتیلن و متابولیسم دیواره سلولی دارد. همچنین مس در گیاهان نقش مهمی در سیگنال‌دهی برای رونویسی و انتقال پروتئین‌ها دارد. به هر حال با وجود اهمیت بالای عنصر مس برای گیاه، همانند سایر عناصر، بخصوص عناصر میکرو، غلظت بالای این عنصر در گیاه باعث ایجاد سمیت می‌شود. در گیاه ذرت با افزایش غلظت عنصر مس در محیط رشد این گیاه، طول ریشه گیاهچه به صورت چشمگیری کاهش یافت. به طوری‌که در شرایطی که مس در محیط رشد بذرها وجود نداشت، طول ریشه ذرت برابر ۱۸ سانتی‌متر و در شرایط استفاده عنصر مس با غلظت ۱۰۰ میکرو مولار در محیط رشد بذرها، طول ریشه به ۲ سانتی‌متر رسید. به عبارتی، با افزایش غلظت عنصر مس از صفر به ۱۰۰ میکرومولار در محیط رشد بذرها، کاهش ۸۸ درصدی طول ریشه مشاهده شد. در مطالعه‌ای دیگر که در اتاقک رشد برای بررسی اثر غلظت‌های مس بر روی رشد ریشه انجام شد، مشخص شد که با افزایش غلظت عنصر مس از صفر تا ۱۰۰ میکرومولار وزن خشک و طول ریشه ذرت به صورت معنی‌داری کاهش داشت.

در شکل ۶، تاثیر غلظت‌های مختلف عنصر مس بر روی ماده خشک تولیدی ریشه گندم و طول ریشه لوبیا نشان داده شده است. مقایسه نتایج این شکل با نتایج مربوط به شکل ۵ (تاثیر عنصر بور بر ماده خشک ریشه) موید این موضوع است که اثر سمیت عنصر مس در مقایسه با عنصر بور، کمتر است. چرا که کاهش وزن خشک و طول ریشه در شکل ۶ در غلظت‌های بالای ۶۰ پی‌پی‌ام مشاهده می‌شود. این در حالی است که اثر سمیت عنصر بور در غلظت‌های پایین‌تر از ۵ پی‌پی‌ام مشاهده شد (شکل ۵).

غلظت بالای مس می‌تواند باعث تنش اکسیداتیو در گیاه شود. گزارش کردند که با افزایش غلظت مس (از صفر تا ۱۰۰۰ میکرومولار) در محیط رشد گیاه بارهنگ، فعالیت آنزیم کاتالاز، آنزیم آسکوربات پراکسیداز، آنزیم پراکسیداز و آنزیم پلی فنل اکسیداز به صورت معنی‌داری کاهش می‌یافت. این در حالی است که با افزایش غلظت مس غلظت ترکیبات فنلی در ریشه بارهنگ افزایش یافت.

شکل ۶ - واکنش وزن خشک ریشه گندم و طول ریشه لوبیا به غلظتهای مختلف مس



نتیجه‌گیری

یکی از خصوصیات گیاهان این است که رشد و نمو این موجودات حتماً از یک الگوی خاص و قابل پیش‌بینی تبعیت نمی‌کند. چرا که رفتار آنها در شرایط مختلف می‌تواند متفاوت باشد. در مواجه با یک شرایط محیطی خاص (مانند غلظت‌های مختلف عناصر میکرو در محیط)، انعطاف‌پذیری و نوع تغییر شرایط رشد و نمو، از یک گونه گیاهی به گونه‌ای دیگر متفاوت است. همچنین در داخل یک گونه نیز رفتار ژنوتیپ‌های مختلف در مواجه با شرایط محیطی یکسان، می‌تواند متفاوت باشد، همان‌طوری که در این گزارش رشد متفاوت ریشه برای ژنوتیپ‌های حساس و مقاوم برنج به کمبود روی نشان داده شد. حتی رفتار یک بوته گیاهی در مواجه با یک شرایط محیطی سخت در یک مرحله نمو می‌تواند متفاوت از مرحله دیگر نمو باشد (به عنوان نمونه در مطالعه حاضر نشان داده شد که شدت اثر غلظت‌های عنصر آهن بر روی تولید ماده خشک برنج در دو سن ۲۰ و ۶۰ روزگی متفاوت بود). این انعطاف‌پذیری بالا، باعث شده است که گیاهان بتوانند در مقابل بسیاری از محدودیت‌های محیطی سازگار شده و به حیات خود ادامه دهند.

منابع

خاقانی، ش. ۱۳۹۵. اثر مصرف ریزمغذی‌های روی و آهن بر عملکرد و خصوصیات مورفولوژیک ریشه جو مایکورایزایی. اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی. ۱۰ (۲): ۳۳۹-۳۵۲.

طاهری، ث. رونقی، ع. قاسمی، ر. و صفرزاده شیرازی، ص. ۱۳۹۷. تاثیر کمبود روی بر ترشح اسیدهای آلی ریشه دو ژنوتیپ ذرت. مهندسی زراعی. ۴۱ (۴): ۹۹-۱۱۱.

پوراکبر، ل. خیامی، م. و خارا، ج. ۱۳۸۷. بررسی اثر متقابل مس و EDTA بر نشت یون پتاسیم و میزان برخی عناصر در ریشه و اندام هوایی دانه‌رست‌های ذرت. نشریه علوم دانشگاه تربیت معلم. ۸ (۲): ۱۲۱-۱۳۲.

پوراکبر، ل. و ابراهیم‌زاده، ن. ۱۳۹۲. اثر نیکل و مس بر بیومس، محتوای رنگیزه‌ای و آنزیم‌های آنتی‌اکسیداتیو در ریشه‌ها و اندام هوایی گیاه ذرت. نشریه علوم دانشگاه خوارزمی. ۱۳ (۱): ۷۰۱-۷۱۲.

Ayyar, S. and Appavoo, S. 2017. Effect of graded levels of Zn in combination with or without microbial inoculation on Zn transformation in soil, yield and nutrient uptake by maize for black soil. Environment & Ecology, 35(1), pp.172-76.

Bindraban, P.S. Dimkpa, C. Nagarajan, L. Roy, A. and Rabbinge, R. 2015. Revisiting fertilisers and fertilisation strategies for improved nutrient uptake by plants. Biology and Fertility of Soils, 51(8), pp.897-911.

Brear, E.M. Day, D.A. and Smith, P.M.C. 2013. Iron: an essential micronutrient for the legume-rhizobium symbiosis. Frontiers in plant science, 4, p.359.

Daneshbakhsh, B. Khoshgoftarmanesh, A.H. Shariatmadari, H. and Cakmak, I. 2013. Phytosiderophore release by wheat genotypes differing in zinc deficiency tolerance grown with Zn-free nutrient solution as affected by salinity. Journal of Plant Physiology, 170(1), pp.41-46.

Dimkpa, C.O. and Bindraban, P.S. 2016. Fortification of micronutrients for efficient agronomic production: a review. Agronomy for Sustainable Development, 36(1), p.7.

Monreal, C.M. DeRosa, M. Mallubhotla, S.C. Bindraban, P.S. and Dimkpa, C. 2016. Nanotechnologies for increasing the crop use efficiency of fertilizer-micronutrients. Biology and fertility of soils, 52(3), pp.423-437.

Nadeem, F. and Farooq, M. 2019. Application of micronutrients in rice-wheat cropping system of south Asia. Rice Science, 26(6), pp.356-371.

Poza-Viejo, L. Abreu, I. González-García, M.P. Allauca, P. Bonilla, I. Bolaños, L. and Reguera, M. 2018. Boron deficiency inhibits root growth by controlling meristem activity under cytokinin regulation. Plant Science, 270, pp.176-189.

Rout, G.R. and Sahoo, S. 2015. Role of iron in plant growth and metabolism. Reviews in Agricultural Science, 3, pp.1-24.

Shahverdi, M.A. Omidi, H. and Damalas, C.A. 2020. Foliar fertilization with micronutrients improves Stevia rebaudiana tolerance to salinity stress by improving root characteristics. Brazilian Journal of Botany, 43(1), pp.55-65.

Suganya, A. Saravanan, A. and Manivannan, N. 2020. Role of zinc nutrition for increasing zinc availability, uptake, yield, and quality of maize (Zea Mays L.) grains: An overview. Commun. Soil Sci. Plant Anal, 51, pp.2001-2021.

Wimmer, M.A. Abreu, I. Bell, R.W. Bienert, M.D. Brown, P.H. Dell, B. Fujiwara, T. Goldbach, H.E. Lehto, T. Mock, H.P. and Wirén, N. 2019. Boron: an essential element for vascular plants. New Phytologist, 226(5), pp.1232-1237.