تأثیر گیاهان همراه سویا، لوبیا و ماش بر جذب کادمیم از خاک توسط ذرت و آفتابگردان به‌عنوان گیاه اصلی

آرا حسن پور[۱*]، مرتضی زاهدی[۱] و امیرحسین خوش‌گفتارمنش[۲]

(تاریخ دریافت:۱۳۹۱/۰۱/۱۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۹/۳۰)

چکیده

در آزمایشی گلدانی، اثر هر یک از گیاهان همراه سویا، ماش و یا لوبیا بر جذب کادمیم توسط ذرت و آفتابگردان در یک خاک آلوده به کادمیم، در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار مورد بررسی قرار گرفت. تیمارهای مورد استفاده شامل کشت مخلوط ذرت و ماش، ذرت و لوبیا، ذرت و سویا، آفتابگردان و ماش، آفتابگردان و لوبیا ، آفتابگردان و سویا، کشت خالص ذرت و کشت خالص آفتابگردان بودند. تأثیر گیاهان همراه بر وزن خشک، غلظت کادمیم و روی در اندام هوایی و محتوای کلروفیل برگ ذرت و آفتابگردان معنی‌دار بود. وزن خشک اندام هوایی ذرت در کشت مخلوط با سویا و لوبیا و وزن خشک اندام هوایی آفتابگردان در کشت مخلوط با لوبیا به‌ترتیب نسبت به کشت خالص ذرت و آفتابگردان کاهش یافت. کشت ذرت همراه با سویا و ماش سبب افزایش معنی‌دار غلظت کادمیم در ذرت، در مقایسه با کشت خالص آن گردید، درحالی‌که افزایش غلظت کادمیم در آفتابگردان فقط در کشت مخلوط این گیاه با سویا معنی‌دار بود. کشت مخلوط با لوبیا تأثیر معنی‌داری بر غلظت کادمیم در ذرت و آفتابگردان نداشت. از بین گیاهان همراه، غلظت کادمیم در اندام هوایی لوبیا به‌طور معنی‌داری بیشتر از غلظت آن در سویا و ماش بود. در کشت مخلوط با ماش، با افزایش غلظت کادمیم محتوای کلروفیل در ذرت افزایش یافت. در دیگر تیمارهای آزمایشی، افزایش غلظت کادمیم تأثیر معنی‌داری بر محتوای کلروفیل نداشت. نتایج نشان داد که کشت مخلوط با سویا و یا ماش می‌تواند موجب افزایش جذب کادمیم توسط ذرت و آفتابگردان شده و خطر ناشی از ورود این عنصر سمی به زنجیره غذایی را افزایش دهد. بااین‌حال، مطالعات تکمیلی در رابطه با بررسی نحوه تأثیر کشت گیاه همراه بر تجمع کادمیم در اندام‌های خوراکی ذرت و آفتابگردان ضرورت دارد.

کلمات کلیدی: کشت مخلوط، آلودگی کادمیم، روی، ذرت، آفتابگردان، گیاه همراه

۱. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ara_hasanpour@yahoo.com

مقدمه

امروزه، موضوع ورود عناصر سنگین به خاک‌های کشاورزی، یکی از نگرانی‌های مهم زیست محیطی در دنیا می‌باشد (۳۷). بسیاری از عناصر سنگین حتی در غلظت‌های بسیار پایین نیز سمی به‌شمار می‌آیند (۲۷). از بین عناصر سنگین، کادمیم که هیچ‌گونه نقش زیستی در موجودات زنده‌ی آبزی و خشکی زی ندارد، به‌عنوان یک فلز بسیار سمی برای انسان و همه موجودات زنده شناخته شده است (۵). پیشرفت‌های اخیر در صنعت و کشاورزی موجب افزایش غلظت کادمیم در خاک‌های کشاورزی شده است. کادمیم از طرق مختلف وارد خاک می‌شود. برخی از این راه‌ها عبارتند از: استفاده از کودهای فسفاته، کودهای حیوانی، آب فاضلاب، لجن فاضلاب آلوده به کادمیم و صنایعی مانند ذوب کاری فلزات (۱، ۷، ۴۲ و ۴۵). کادمیم به‌خاطر اثرهای مختلفی که روی فرایندهای فیزیولوژیک و زیستی گیاه دارد می‌تواند از رشد گیاه جلوگیری کند و در غلظت‌های بالا موجب مرگ سلول گردد (۳۳ و ۴۴). جذب کادمیم توسط گیاه موجب کاهش رشد آن می‌گردد که می‌تواند به‌دلیل کاهش تثبیت کربن درنتیجه کاهش سرعت فتوسنتز و محتوای کلروفیل، باشد (۱۴).

به‌خاطر تحرک زیاد کادمیم در خاک، انباشت آن در گیاهانی که در خاک‌های آلوده به کادمیم رشد می‌کنند، خطری جدی برای سلامت انسان و حیوانات ایجاد می‌کند. کادمیم به‌روش‌های مختلفی مانند خاک، آب آشامیدنی، هوا، گیاهان و حیوانات به بدن انسان راه پیدا می‌کند (۲۴)؛ اما منبع اصلی آن برای انسان، مصرف غذاهای آلوده به کادمیم است (۱۱). گیاهان زراعی حاوی کادمیم نقش مهمی در وارد کردن این عنصر به رژیم غذایی انسان دارند چراکه بیش از ۷۰ درصد کادمیمی که وارد بدن انسان می‌شود از طریق گیاهان زراعی حاوی کادمیم انتقال می‌یابد (۳۴). سازمان بهداشت جهانی (WHO) و سازمان خوار و بار کشاورزی (FAO) حد مجاز معادل ۰/۱ میلی‌گرم در هر کیلوگرم دانه را برای غلات و بقولات مشخص کرده است (۶ و ۱۲)، درحالی‌که اتحادیه اروپا حد مجاز معادل ۰/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم را برای محصول دانه گندم تعیین نموده است (۸). حد مجاز کادمیم در رژیم غذایی انسان توسط این اتحادیه معادل ۷۰ میکروگرم در روز تعیین شده است (۳۴ و ۴۰). هرچند این عنصر روی برخی از اندام‌های بدن انسان تأثیر می‌گذارد، اما بیشترین مقدار کادمیم در کلیه‌ها انباشته می‌شود که بسته به سن، نیمه‌عمری بین ۱۰ تا ۳۰ سال دارد و موجب آسیب به کلیه‌ها می‌گردد (۳۴). بنابراین لازم است که ورود کادمیم به زنجیره غذایی به‌حداقل برسد. دو راهکار مختلف برای کاهش ورود کادمیم به زنجیره غذایی وجود دارد. اولین راهکار استفاده از روش‌های پالایش برای حذف کادمیم از خاک است (۲۲). دومین راهکار تثبیت این عنصر در خاک و کاهش جذب آن توسط گیاه زراعی است (۳۲). از آنجاکه پالایش خاک‌های آلوده به عناصر سنگین به زمان زیادی نیاز دارد و زمین‌های کشاورزی در همهٔ کشورها و به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه محدود هستند (۳۸)، محققان در حال مطالعه روی روش‌های تولید گیاهان غیرآلوده و به‌تبع آن تولید محصولات غذایی حاوی غلظت‌های کم عناصر سنگین در زمین‌های کشاورزی آلوده هستند.

کشت مخلوط در بسیاری از کشورها یک روش زراعی رایج است، چراکه موجب افزایش عملکرد و کاهش بیماری‌ها می شود (۲۹). هم‌چنین کشت مخلوط در خاک‌های آلوده، برجذب عناصر سنگین توسط یکی از گیاهان تأثیر می‌گذارد. برای مثال در خاک آلوده به ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیم، گیاه *Brassica chinensis* هنگامی‌که با گیاه *Brassica junica* کاشته شد، نسبت به کشت خالص آن، زیست توده بیشتری تولید کرد و کادمیم کمتری انباشته نمود (۲۱). جیانگ و همکاران (۱۸) گزارش کردند که میزان عنصر روی جذب شده توسط گیاه *Sedum alfredii*، هنگامی‌که به همراه ذرت و یا سویا کشت شد، افزایش یافت. در آزمایش ایشان جذب کادمیم، روی و سرب توسط *S. alfredii* هنگامی‌که به‌همراه ریگراس (*Lolium perenne*) کشت شد تغییری نکرد و جذب

جدول ۱. نتایج آزمون خاک مورد آزمایش قبل از اجرای پژوهش

هدایت الکتریکی ($dS\ m^{-1}$)	pH	نیتروژن (٪)	فسفر قابل جذب ($mgkg^{-1}$)	پتاسیم قابل جذب ($mgkg^{-1}$)	کادمیم قابل جذب ($mgkg^{-1}$)	روی قابل جذب ($mgkg^{-1}$)	بافت خاک	آهک (٪)	رس (٪)	سیلت (٪)	شن (٪)
۴/۱	۷/۵	۰/۰۵۷	۴۷	۱۴۳	<۰/۰۲	۰/۹۶	لومی رسی	۱۶	۳۸	۴۶	۱۶

کادمیم و روی در ذرت هنگامی‌که به‌همراه *S. alfredii* کشت شد، کاهش یافت. لی و همکاران (۲۰) نیز گزارش کردند که ذرت هنگامی‌که با بقولات کشت می‌شود، نسبت به کشت خالص، کادمیم بیشتری از خاک جذب می‌کند. چن و همکاران (۵) نشان دادند که رشد گیاه و جذب کادمیم توسط گیاه *S. alfredii* درحضور گیاه ذرت افزایش یافت. سلوام و ونگ (۳۵) دریافتند که کشت مخلوط گیاه *B. napus* با گیاه *B. parachinensis* و ذرت در خاک آلوده به غلظت‌های مختلف کادمیم، به‌طور معنی‌داری غلظت کادمیم را در گیاه *B. napus* افزایش داد.

هرچند آزمایش‌های زیادی در مورد جذب کادمیم توسط گیاهان مختلف انجام شده است، با این‌حال اطلاعات قابل دسترس در رابطه با تأثیر گیاه همراه برجذب کادمیم از خاک توسط گیاه اصلی اندک است (۱۱). این آزمایش باهدف مطالعه تأثیر هر یک از گیاهان همراه سویا، لوبیا و ماش بر رشد و میزان جذب کادمیم توسط ذرت و آفتابگردان اجرا شد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و تعیین ویژگی‌های خاک

خاک مورد استفاده در این آزمایش از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری (۲۰ و ۴۱) خاک زراعی مزرعه لورک واقع در منطقه‌ی نجف‌آباد اصفهان از فامیل فاین- لومی- میکسد، تیپک هاپل آرجید برداشت شد. حدود ۲۰۰۰ کیلوگرم خاک جمع‌آوری و پس از خشک شدن در هوای آزاد از الک ۲ سانتی‌متری عبور داده شد (۲۰) و جهت انجام تجزیه‌های لازم فیزیکی و شیمیایی، یک نمونه یک کیلوگرمی از آن به آزمایشگاه منتقل شد. نتایج تجزیه خاک در جدول ۱ ثبت شده است. قابلیت هدایت الکتریکی خاک در عصاره اشباع با استفاده از دستگاه هدایت سنج مدل CC۵۰۱ (ال مترون)، pH خاک در گل اشباع با دستگاه pH متر مدل CP۵۰۱ (ال مترون) و بافت خاک به روش هیدرومتری تعیین شد. فسفر قابل جذب خاک به‌روش اولسن (۳۰) عصاره‌گیری شده و به‌روش رنگ سنجی اندازه‌گیری شد. پتاسیم قابل جذب خاک با استفاده از استات آمونیوم عصاره‌گیری و با دستگاه شعله سنج (۱۵) اندازه‌گیری شد. نیتروژن خاک به‌روش کلدال (۴) اندازه‌گیری شد. کادمیم قابل جذب خاک با استفاده از DTPA عصاره‌گیری و توسط دستگاه جذب اتمی مجهز به کوره گرافیتی مدل RayLeight (WFX-210) تعیین گردید.

تیمارهای آزمایشی و نحوه انجام آزمایش

این آزمایش گلدانی در طی ماه‌های تیر و مرداد سال ۱۳۸۹ در فضای باز محوطه دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان در قالب طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار (هر گلدان به‌عنوان یک تکرار) و ۸ تیمار انجام شد. تیمارهای مورد استفاده در این آزمایش شامل:کشت مخلوط ذرت (رقم ۷۰۴) و ماش (توده محلی اصفهان)، ذرت و لوبیا (توده محلی اصفهان)، ذرت و سویا (رقم ویلیامز)، آفتابگردان (رقم هایسان ۲۴) و ماش، آفتابگردان و لوبیا،آفتابگردان و سویا بودند. از کشت خالص ذرت و

آفتابگردان به‌عنوان تیمارهای شاهد استفاده شد. ذرت به‌خاطر تولید زیست‌توده زیاد و آفتابگردان به‌دلیل تولید زیست‌توده زیاد و هم‌چنین متحمل بودن نسبت به‌عناصر سنگین، به‌عنوان گیاه اصلی انتخاب شدند. میانگین دمای روزانه طی انجام آزمایش ۲۸ درجه سانتی‌گراد و میانگین رطوبت نسبی ۱۹ درصد بود.

جهت آماده‌سازی بستر کاشت، ابتدا خاک الک شده به‌دستگاه همزن منتقل شد و سپس محلول نیترات کادمیم $Cd(NO_3)_2$ با غلظت ۵ میلی‌گرم بر لیتر، در حالی‌که همزن خاک را به‌هم می‌زد، به‌طور یکنواخت به‌خاک اضافه شد. سپس حدود ۲۰ کیلوگرم خاک آلوده به کادمیم در هر گلدان (با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و قطر دهانه ۳۷ سانتی‌متر) ریخته شد. قبل از کاشت بذور، گلدان‌ها به‌منظور به‌تعادل رسیدن خاک از لحاظ غلظت کادمیم، مدت ۲ هفته با آب مقطر تا رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه آبیاری شدند. بذور گیاهان ذرت، آفتابگردان، سویا، ماش و لوبیا قبل از کشت، ابتدا با قارچ‌کش تیرام به‌میزان ۲ گرم در کیلوگرم ضدعفونی شدند و سپس در تاریخ ۱۳۸۹/۴/۸ در خاک آلوده به کادمیم و در عمق مناسب برای هرگیاه کاشته شدند. در هر گلدان گیاه اصلی در مرکز گلدان و گیاهان فرعی در اطراف آن کشت شدند. ابتدا از بذر هرگیاه به تعداد ۲ برابر تعداد نهایی در نظر گرفته شده برای هر گیاه، کشت شد و پس از اینکه ارتفاع گیاهان به حدود ۱۰ سانتی‌متر رسید گیاهان اصلی به ۲ عدد در هر گلدان و گیاهان فرعی به ۴ عدد در هر گلدان کاهش داده شدند. در تیمار شاهد ۲ عدد گیاه اصلی در هر گلدان کشت شد. کود نیتروژن براساس آزمون خاک معادل ۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به‌صورت کود اوره پیش از کشت گیاهان به خاک اضافه شد. مقادیر کافی فسفر و پتاسیم در خاک وجود داشت (جدول ۱). آبیاری گیاهان براساس تخلیه ۵۰ درصد رطوبت قابل استفاده در خاک، با اندازه‌گیری ظرفیت زراعی مزرعه و نقطه پژمردگی و از طریق وزن کردن گلدان‌ها انجام شد. گیاهان ۶۰ روز پس از کاشت برداشت شدند. در این زمان گیاهان ذرت در مرحله ظهور گل نر و گیاهان آفتابگردان در مرحله شروع گرده‌افشانی بودند.

اندازه‌گیری صفات مورد بررسی

در این آزمایش صفات مورد ارزیابی شامل تعیین میزان ماده خشک اندام هوایی، اندازه‌گیری غلظت کلروفیل و نیز غلظت عناصر کادمیم و روی در گیاه بود.

ماده خشک اندام هوایی

اندام هوایی گیاهان اصلی و همراه از ارتفاع ۲ سانتی‌متری طوقه جدا شده و به‌مدت ۳ روز در دمای ۷۰ درجه سلسیوس در خشک‌کن قرار گرفتند و سپس نمونه‌های خشک گیاهی توزین شدند.

غلظت عناصر کادمیم و روی

بدین‌منظور ابتدا مقدار ۱ گرم از نمونه خشک گیاهی در کوره با دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس به مدت ٦ ساعت قرار گرفت و تبدیل به خاکستر شد. سپس مقدار ۱۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۲ نرمال به‌نمونه‌ها اضافه شد و روی گرم‌کن قرار داده شد تا زمانی که دوسوم حجم اسید تبخیر شود(۱۶). سپس نمونه هضم شده با آب مقطر به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد و در ظروف عصاره‌گیری مخصوص ریخته شد. غلظت عناصر کادمیم و روی در عصاره‌های به‌دست آمده توسط دستگاه جذب اتمی دارای کوره گرافیتی مدل RayLeight (WFX-210) اندازه‌گیری شد.

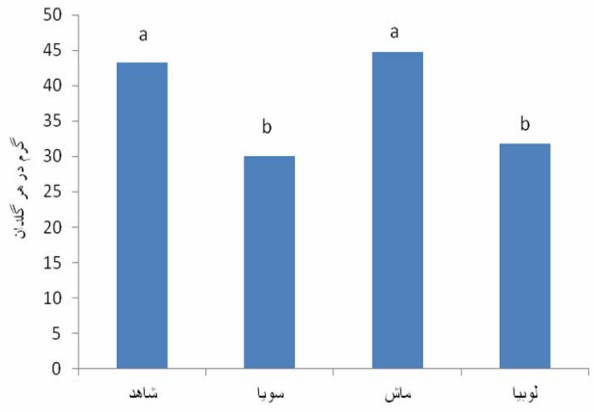
غلظت کلروفیل

قبل از برداشت گیاهان در پایان مرحله رشد رویشی، مقداری برگ بالغ جوان توسعه یافته جهت اندازه‌گیری غلظت کلروفیل نمونه‌برداری و در دمای ۲۰- درجه سلسیوس فریزر نگهداری شد. مطابق روش آرنون (۲) نیم گرم بافت تازه برگ توسط

جدول۲. تجزیه واریانس وزن خشک، غلظت کادمیم و روی و محتوای کادمیم اندام هوایی ذرت

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		وزن خشک	غلظت کادمیم	محتوای کادمیم	غلظت روی
تیمار	۳	۱۷۶**	۰/۰۵*	۸۳/۲**	۱۵۷/۷**
خطا	۹	۱۱/۸	۰/۰۱	۷/۱	۱۸/۶
ضریب تغییرات		۹/۱۹	۲۸/۹	۱۶/۹	۱۴/۹

* و**: به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۰/۰۵ و۰/۰۱ می‌باشند.



شکل ۱. اثر کشت مخلوط بر وزن خشک اندام هوایی ذرت

استون ۸۰٪ کاملاً عصاره‌گیری شد و به حجم ۱۵ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس با استفاده از سانتیریفیوژ مواد جامد موجود در عصاره رسوب داده شد. میزان جذب نوری نمونه‌ها در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر به‌وسیله طیف‌سنج تعیین و محتوای کلروفیلa وb محاسبه گردید(۲).

تجزیه و تحلیل آماری نتایج

تجزیه آماری نتایج حاصل از آزمایش با استفاده از نرم‌افزار SAS و رسم شکل‌ها با EXCEL انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش LSD و در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

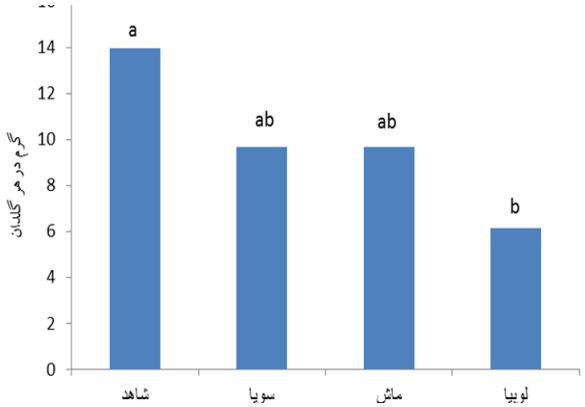
وزن خشک اندام هوایی ذرت و آفتابگردان

تأثیر گیاهان همراه در کشت مخلوط بر وزن خشک اندام هوایی ذرت در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول۲). وزن خشک اندام هوایی ذرت کاشته شده با سویا و لوبیا به‌ترتیب ۳۰/۷ و ۲۶/۷ درصد نسبت به کشت خالص ذرت کاهش یافت، اما بین وزن خشک ذرت در کشت مخلوط با ماش و وزن خشک آن در کشت خالص تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۱). کاهش وزن خشک ذرت در کشت مخلوط با سویا و لوبیا به‌خاطر وجود رقابت قابل ملاحظه با این گیاهان در برداشت آب و مواد غذایی از بستر کشت مشترک بوده است. لی و همکاران (۲۰) نیز کاهش وزن خشک ذرت به‌عنوان گیاه اصلی را در کشت مخلوط آن با تعدادی از گیاهان لگوم و غیرلگوم گزارش کردند. تأثیر گیاهان همراه در کشت مخلوط بر وزن خشک اندام هوایی آفتابگردان معنی‌دار بود (جدول ۳). کشت مخلوط آفتابگردان با لوبیا موجب کاهش ۵۶ درصدی در وزن خشک اندام هوایی آفتابگردان نسبت به کشت خالص آن شد اما تأثیر کشت مخلوط با سویا و یا ماش در این رابطه ازنظر

جدول ۳. تجزیه واریانس وزن خشک، غلظت کادمیم و روی و محتوای کادمیم اندام هوایی آفتابگردان

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		وزن خشک	غلظت کادمیم	محتوای کادمیم	غلظت روی
تیمار	۳	۳۰/۷^{ns}	۰/۰۱**	۲/۵^{ns}	۱۲۱/۷**
خطا	۹	۹	۰/۰۰۱	۰/۹	۹/۳
ضریب تغییرات		۳۰/۴	۱۲/۶	۱۰/۹	۳۷/۷

* و** به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱ می‌باشند. ns: غیر معنی‌دار

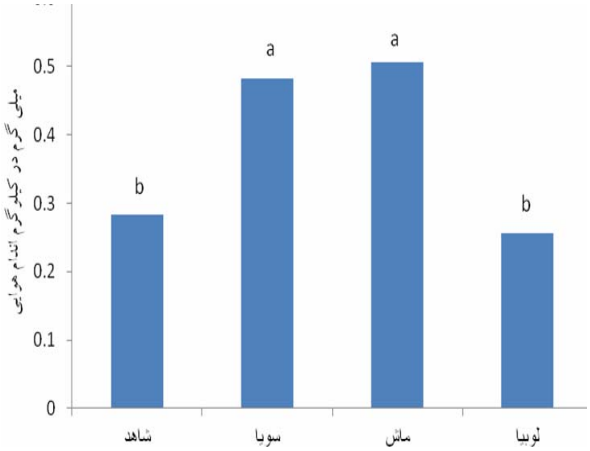


شکل ۲. اثر کشت مخلوط بر وزن خشک اندام هوایی آفتابگردان

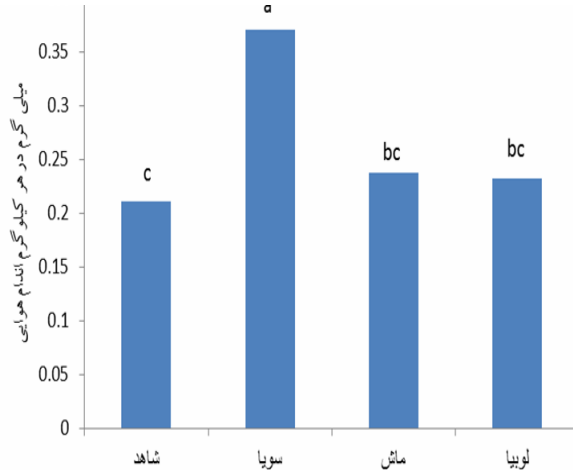
آماری معنی‌دار نشد (شکل ۲). عدم کاهش وزن خشک ذرت و آفتابگردان در کشت مخلوط این گیاهان با ماش می‌تواند به‌دلیل پائین بودن زیست توده و عدم توان رقابت ماش با ذرت و آفتابگردان باشد. از سویی دیگر، تفاوت نیاز غذایی و نیاز آبی گیاهان متفاوت در کشت مخلوط می‌تواند دلیلی بر تفاوت در رشد و تولید ماده خشک گیاهان اصلی باشد. در مطالعه سو و همکاران (۳۹) نیز در کشت مخلوط *Brassica napus* var. Xikou Huazi به‌عنوان گیاه فرعی، با *Brassica campestris* var. Zhongyou 821 به‌عنوان گیاه اصلی، هنگامی که از مانع بین ریشه دو گیاه استفاده نکردند، زیست توده گیاه اصلی در مقایسه با کشت خالص آن کاهش یافت.

غلظت کادمیم در اندام هوایی ذرت و آفتابگردان

تأثیر گیاهان همراه بر غلظت کادمیم در اندام هوایی ذرت در سطح احتمال ۵ درصد و بر غلظت کادمیم در اندام هوایی آفتابگردان در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (به‌ترتیب جداول ۲ و ۳). غلظت کادمیم در اندام هوایی ذرت در کشت مخلوط با سویا و ماش به‌ترتیب ۷۰/۷ و ۷۸/۹ درصد نسبت به غلظت کادمیم در اندام‌هوایی ذرت در کشت خالص آن افزایش یافت (شکل۳)، تفاوت در کشت مخلوط ذرت با لوبیا با کشت خالص از این نظر معنی‌دار نبود. غلظت کادمیم در اندام هوایی آفتابگردان، در کشت مخلوط با سویا، ماش و لوبیا به ترتیب ۵۷، ۱۲/۳ و ۹/۵ درصد نسبت به غلظت کادمیم در اندام هوایی آفتابگردان در کشت خالص افزایش یافت، هرچند این افزایش تنها در کشت مخلوط با سویا از لحاظ آماری معنی‌دار بود (شکل ۴). نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که انباشت کادمیم در ذرت و آفتابگردان می‌تواند توسط گیاهان همراه تنظیم شود. پریگووی و همکاران (۳۱) اظهار نمودند که جذب کادمیم توسط سلول‌های ریشه ذرت، یک فرآیند غیراختصاصی است و به‌نظر می‌رسد ورود عناصر سنگین به سیمپلاست ریشه ذرت غیرانتخابی باشد. انتظار می‌رود ترشحات ریشه‌ای نظیر پروتون و یا اسیدهای آلی و انواع سیدروفورها به‌عنوان مکانیزم‌های



شکل۳. اثر کشت مخلوط بر غلظت کادمیم اندام هوایی ذرت



شکل۴. اثر کشت مخلوط بر غلظت کادمیم اندام هوایی آفتابگردان

متفاوت برای افزایش حلالیت و جذب عناصر توسط برخی گونه‌های گیاهی که وارد ریزوسفر می‌شوند، در جذب کادمیم توسط گیاه مؤثر باشند. تغییرات در pH ریزوسفر بر قابلیت استفاده‌ی کادمیم موجود در خاک تأثیر دارد(۲۶). در مطالعه مهارج و مکنیر (۲۵) بین توانایی ترشح ترکیبات شناخته نشده‌ای از ریشه گیاهان *Nicotiana tabacum* L., *Nicotiana rustica* L. و ذرت در خاک و قابلیت استفاده‌ی کادمیم توسط این گیاهان، همبستگی مثبتی وجود داشت. در آزمایش لی و همکاران (۲۰) نیز غلظت کادمیم در اندام هوایی ذرت که با تعدادی گیاه لگوم و غیرلگوم به‌صورت مخلوط کشت شده بود، به‌ویژه درکشت مخلوط با لگوم‌ها، افزایش یافت. آنها دلیل اصلی تأثیر کشت مخلوط بقولات بر غلظت کادمیم در گیاه اصلی را کاهش pH خاک توسط گیاه همراه ذکر کردند. وو و همکاران (۴۳) نیز گزارش کردند که کشت مخلوط گیاه *Alocasia marorrhiza* به‌عنوان گیاه اصلی با گیاه همراه *S. alfredii* موجب کاهش جذب کادمیم توسط گیاه اصلی شد. در آزمایش حاضر غلظت کادمیم در اندام هوایی هردو گیاه ذرت و آفتابگردان چندان زیاد نبود. احتمال می‌رود این دو گیاه مقادیر بیشتری از کادمیم را در ریشه‌های خود انباشته باشند و بخش اندکی از آن را به اندام هوایی خود انتقال داده باشند.

مستشارزاده و همکاران (۲۸) گزارش کردند که آفتابگردان کادمیم جذب شده را به نسبت بیشتری در ریشه خود نگه

جدول ۴. تجزیه واریانس غلظت کادمیم اندام هوایی سویا، ماش و لوبیا در کشت مخلوط با ذرت و آفتابگردان

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
		غلظت کادمیم
تیمار	۵	۰/۰۴**
خطا	۱۲	۰/۰۰۲
ضریب تغییرات		۱۵/۱

**: نشان‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۰/۰۱ می‌باشد.

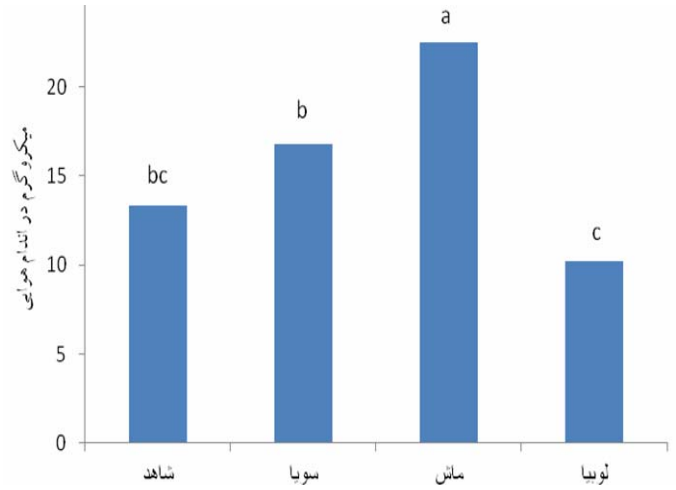
شکل ۵. غلظت کادمیم اندام هوایی گیاهان همراه ذرت و آفتابگردان

می‌دارد و لذا تأثیر آن در گیاه پالایی نیز بیشتر از طریق تثبیت گیاهی است. مطالعات دیگری نیز نشان می‌دهند که تجمع کادمیم در ریشه ذرت بیش از اندام هوایی است. به‌عبارت دیگر ذرت از انتقال کادمیم ازریشه به‌اندام هوایی جلوگیری می‌کند (۲۳).

غلظت کادمیم در اندام هوایی گیاهان همراه ذرت و آفتابگردان

تفاوت بین گیاهان همراه ذرت و آفتابگردان ازنظر غلظت کادمیم در اندام هوایی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). در کشت مخلوط با هر دو گیاه ذرت و آفتابگردان غلظت کادمیم در اندام هوایی لوبیا بیشتر از غلظت آن در سویا و ماش بود. در کشت مخلوط با ذرت غلظت کادمیم در لوبیا، سویا و ماش به‌ترتیب ۰/۵۰، ۰/۲۶ و ۰/۲۳ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک گیاهی بود. این مقادیر در کشت مخلوط با آفتابگردان به‌ترتیب برابر ۰/۳۹، ۰/۱۹ و ۰/۱۲ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. در آزمایش لی و همکاران (۲۰) که از تعدادی گیاه لگوم و غیرلگوم جهت کشت مخلوط با ذرت استفاده شد، سه حالت ازنظر رابطه بین تجمع کادمیم در گیاه همراه و گیاه اصلی مشاهده شد.

برخی از گیاهان همراه در حین اینکه کادمیم بیشتری در خود انباشتند، غلظت کادمیم در گیاه اصلی را نیز افزایش دادند. در این حالت انتظار می‌رود که گیاه همراه قابلیت استفاده کادمیم را در خاک افزایش داده و درنتیجه هم گیاه اصلی و هم گیاه همراه کادمیم بیشتری را جذب می‌کنند. برخی دیگر کادمیم زیادی را جذب می‌کنند و غلظت کادمیم را در گیاه اصلی کاهش می‌دهند. گروه سوم گیاهانی هستند که کادمیم اندکی را جذب می‌کنند اما غلظت کادمیم را در گیاه اصلی افزایش می‌دهند. در آزمایش حاضر، از آنجائی‌که لوبیا غلظت بیشتری از کادمیم را نسبت به گیاه اصلی در خود انباشته است، به‌نظر



شکل۶. اثر کشت مخلوط بر محتوای کادمیم اندام هوایی ذرت

می‌رسد این گیاه جزو گیاهان دسته دوم قرار می‌گیرد. ماش و سویا نیز در گروه سوم قرار می‌گیرند. چراکه این دو گیاه مقدار اندکی کادمیم را در خود تجمع دادند، در حالی‌که غلظت کادمیم را در گیاه اصلی افزایش دادند (شکل ۵). لی و همکاران (۲۰) دلیل اصلی تأثیر کشت مخلوط بقولات بر افزایش غلظت کادمیم ذرت را کاهش pH خاک ذکر کردند. نتایج حاصل از آزمایش حاضر با نتایج ایشان هم‌خوانی دارد. هرچند در مطالعات برخی دیگر از محققان بین pH خاک و غلظت کادمیم در دانه آفتابگردان همبستگی معنی داری وجود نداشت (۱۹).

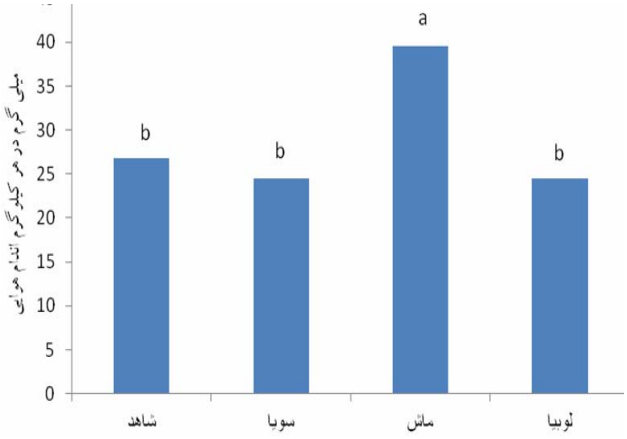
محتوای کادمیم در اندام هوایی ذرت و آفتابگردان

تأثیر گیاهان همراه برمحتوای کادمیم در اندام هوایی ذرت در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). کشت مخلوط ذرت با ماش و سویا به‌ترتیب موجب افزایش ۶۹ و۱۴ درصدی محتوای کادمیم اندام هوایی ذرت شد. در حالی‌که در کشت مخلوط ذرت با لوبیا محتوای کادمیم در اندام هوایی ذرت نسبت به کشت خالص آن کاهش یافت، گرچه این کاهش ازنظر آماری معنی‌دار نبود (شکل ۶).

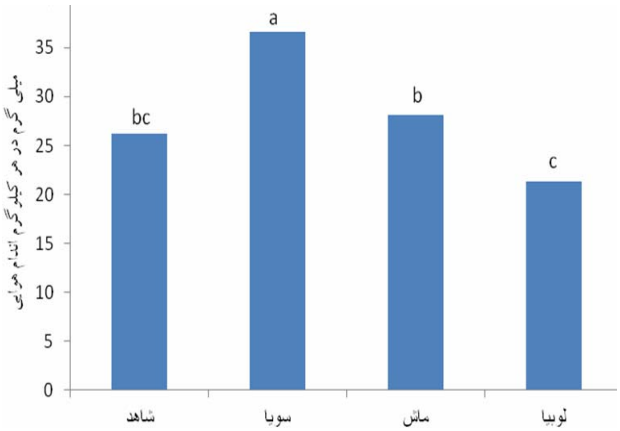
در آزمایش لی و همکاران (۲۰) نیز که شامل تیمارهای کشت مخلوط ذرت با تعدادی گیاه لگوم و غیرلگوم بود محتوای کادمیم در ذرت نسبت به‌محتوای آن در کشت خالص در برخی تیمارها افزایش و در برخی تیمارها کاهش یافت. سلوام و ونگ (۳۵) نیز گزارش کردند که کشت مخلوط گیاه *B. napus* به‌عنوان گیاه اصلی با ذرت و *B. parachinensis* به‌عنوان گیاهان فرعی موجب افزایش معنی‌دار محتوای کادمیم در *B. napus* گردید. تأثیر گیاهان همراه بر محتوای کادمیم اندام هوایی آفتابگردان ازنظر آماری معنی‌دار نبود (جدول ۳).

غلظت روی در اندام هوایی ذرت و آفتابگردان

تأثیر گیاهان همراه بر غلظت روی در اندام هوایی ذرت و آفتابگردان در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (به‌ترتیب جداول ۲و۳). غلظت روی در اندام هوایی ذرت در کشت مخلوط با ماش نسبت به غلظت آن در کشت خالص ذرت بیشتر بود، در حالی‌که کشت مخلوط با لوبیا و سویا تأثیر معنی‌داری بر غلظت روی در اندام هوایی ذرت نداشت (شکل ۷). کشت مخلوط با سویا موجب افزایش معنی‌دار غلظت روی در اندام هوایی آفتابگردان، نسبت به کشت خالص آن گردید، ولی کشت مخلوط با لوبیا و ماش تأثیر معنی‌داری بر غلظت روی در آفتابگردان نداشت (شکل۸). جیانگ و همکاران (۱۸) گزارش کردند که کشت مخلوط تفاوت معنی‌داری در جذب کادمیم و روی نسبت به کشت خالص آن در گیاهان غیر بیش انباشتگر ایجاد نمی‌کند و چنین نتیجه‌ای فقط در مورد گیاهان بیش انباشتگر می‌تواند صادق باشد. در آزمایش حاضر شباهت‌هایی در الگوی تجمع کادمیم و روی در دو گیاه ذرت و



شکل۷. اثر کشت مخلوط بر غلظت روی اندام هوایی ذرت



شکل۸. اثر کشت مخلوط بر غلظت روی اندام هوایی آفتابگردان

آفتابگردان مشاهده شد که ممکن است به این دلیل باشد که مکانیسم‌های جذب و انتقال برای هر دو عنصر مشترک است (۹). هرچند برخی محققان گزارش کرده‌اند که بین جذب روی و جذب کادمیم رابطه آنتاگونیستی وجود دارد (۱۰).

محتوای کلروفیل برگ ذرت و آفتابگردان

تأثیر گیاهان همراه بر محتوای کلروفیل a در برگ‌های ذرت و آفتابگردان در سطح احتمال ۱ درصد (جدول‌های ۵ و ۶) معنی‌دار بود. محتوای کلروفیل a در هر دو گیاه ذرت و آفتابگردان در کشت مخلوط این گیاهان با ماش نسبت به کشت خالص آنها بیشتر بود. کشت مخلوط لوبیا و سویا تأثیر معنی‌داری بر محتوای کلروفیل a در برگ‌های ذرت و آفتابگردان نداشت (شکل‌های ۹ و ۱۰).

تأثیر گیاهان همراه برمحتوای کلروفیل b در برگ‌های ذرت در سطح احتمال ۵ درصد و بر محتوای کل کلروفیل در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). محتوای کلروفیل b و کل در برگ‌های ذرت در کشت مخلوط با ماش نسبت به محتوای آن در کشت خالص ذرت بیشتر بود (به‌ترتیب شکل های ۱۱ و ۱۲). تأثیر گیاهان همراه بر محتوای کلروفیل b و کل در برگ‌های آفتابگردان معنی‌دار نبود (جدول۶).

از آنجاکه غلظت کادمیم مورد استفاده در این آزمایش جزو غلظت‌های پایین به‌حساب می‌آید، نتایج به‌دست آمده در این آزمایش با نتایج حاصل از آزمایش جین و همکاران (۱۷) مطابقت دارد. در آزمایش ایشان غلظت کلروفیل در گیاه ذرت در سطح ۰/۱ میلی‌مولار کادمیم اندکی افزایش ولی در سطح ۰/۵ میلی‌مولار کاهش پیدا می‌کند. آنها نتیجه گرفتند که غلظت

جدول۵. تجزیه واریانس غلظت کلروفیل a، b و کل برگ ذرت

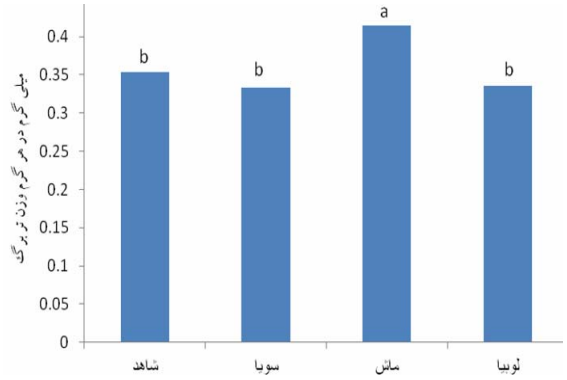
منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل
تیمار	۳	۰/۰۰۴**	۰/۰۲*	۰/۰۴**
خطا	۹	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵
ضریب تغییرات		۵/۶	۱۸/۷	۱۱/۴

* و**: به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۰/۰۵ و۰/۰۱ می‌باشند.

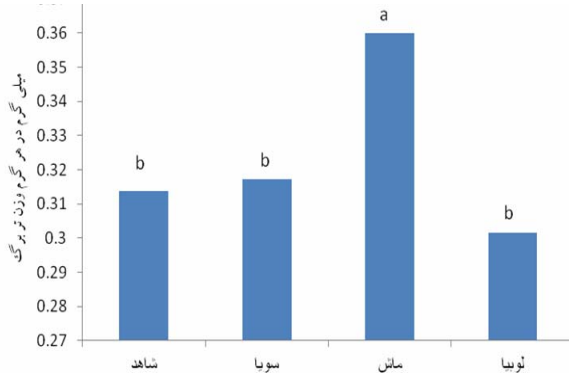
جدول۶. تجزیه واریانس غلظت کلروفیل a، b و کل برگ آفتابگردان

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل
تیمار	۳	۰/۰۰۱**	۰/۰۰۱ns	۰/۰۰۵ns
خطا	۹	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲
ضریب تغییرات		۴/۶	۱۵/۸	۸/۹

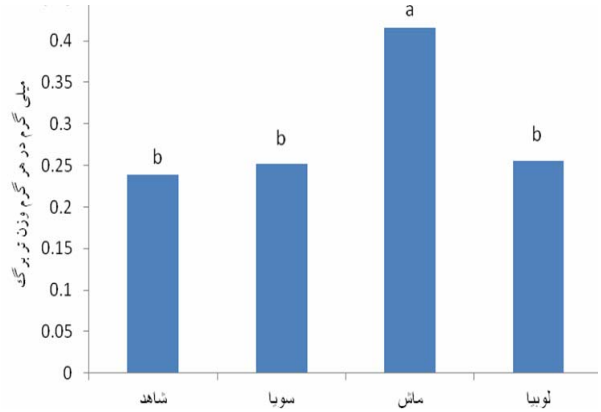
**: نشان‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۰/۰۱ می‌باشد. ns: غیر معنی‌دار



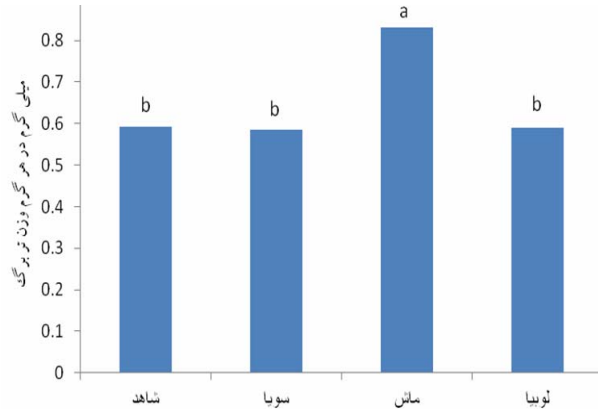
شکل۹. اثر کشت مخلوط بر غلظت کلروفیل a برگ ذرت



شکل۱۰. اثر کشت مخلوط بر غلظت کلروفیل a برگ آفتابگردان



شکل ۱۱. اثر کشت مخلوط بر غلظت کلروفیل b برگ ذرت



شکل ۱۲. اثر کشت مخلوط بر غلظت کلروفیل کل برگ ذرت

پایین کادمیم تولید کلروفیل را در گیاه تحریک می‌کند و غلظت بالاتر آن مانع از سنتز کلروفیل می‌گردد. در آزمایش ست و همکاران (۳۶) نیز غلظت کلروفیل a، b و کل در گیاه *Brassica juncea* در اثر قرار گرفتن در معرض غلظت پایین کادمیم (۱۰ میکرومولار) افزایش ولی در غلظت‌های بالاتر کادمیم غلظت کلروفیل در گیاه کاهش یافت. هاتاتا و عبدل- آل (۱۳) گزارش کردند که با قرار دادن آفتابگردان در معرض غلظت‌های مختلف کادمیم (۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار)، با افزایش غلظت کادمیم محتوای کلروفیل a، b و کل کاهش یافت و میزان این کاهش برای کلروفیل a بیشتر از کلروفیل b بود. در آفتابگردان غلظت کادمیم به‌کار رفته در این آزمایش (۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) موجب کاهش محتوای کلروفیل برگ آفتابگردان در کشت خالص آن و نیز در کشت مخلوط آفتابگردان با سویا شد و در کشت مخلوط آفتابگردان با لوبیا که غلظت کادمیم اندام هوایی آفتابگردان کاهش یافت محتوای کلروفیل افزایش پیدا کرد. شافی و همکاران (۳۷) گزارش کردند که با قرار دادن گیاه گندم در معرض تنش کادمیم (۰/۲ و ۴ میکرو مولار) و شوری، محتوای کلروفیل کاهش یافت هرچند این کاهش در تنش کادمیم به‌تنهایی، معنی‌دار نبود. نتایج فوق با نتایج حاصل از این آزمایش مطابقت دارد. آزودو و همکاران (۳) نیز نتایج مشابهی در مورد اثر کادمیم بر غلظت کلروفیل گیاه آفتابگردان گزارش نمودند. در این آزمایش احتمال می‌رود گیاهان همراه از طریق افزایش قابلیت انحلال و ورود آهن به فاز محلول خاک و درنتیجه افزایش جذب آهن توسط گیاه اصلی، بر غلظت کلروفیل گیاه اصلی مؤثر باشند. از طرف دیگر، گیاهان همراه مورد استفاده در آزمایش حاضر همگی گیاهان لگوم هستند که

نیتروژن خاک را تثبیت می‌کنند و در این زمینه باهم متفاوت هستند. احتمال می‌رود این گیاهان از طریق تفاوت در تثبیت نیتروژن موجب تفاوت‌هایی در غلظت کلروفیل گیاهان اصلی شده‌اند.

نتیجه‌گیری

در این آزمایش غلظت کادمیم در اندام هوایی ذرت در کشت مخلوط با هر یک از گیاهان سویا و ماش و غلظت کادمیم در اندام هوایی آفتابگردان در کشت مخلوط با سویا در مقایسه با غلظت کادمیم در گیاه ذرت و آفتابگردان در کشت خالص آنها افزایش یافت. در حالی‌که کشت مخلوط با لوبیا تأثیر معنی‌داری بر غلظت کادمیم در ذرت و آفتابگردان نداشت. به‌نظر می‌رسد این نتیجه به این دلیل به‌دست آمده که لوبیا غلظت بالاتری از کادمیم را نسبت به گیاهان ماش و سویا در خود تجمع داده بود. روند تغییرات غلظت روی در کشت مخلوط نسبت به کشت خالص تا حدود زیادی مشابه روند تغییرات غلظت کادمیم بود که می‌تواند به‌واسطه وجود مکانیسم‌های مشترک جذب و انتقال این دو عنصر باشد. همراه با افزایش غلظت کادمیم در ذرت در کشت مخلوط با ماش، محتوای کلروفیل نیز افزایش یافت. احتمالاً پایین بودن غلظت کادمیم در این آزمایش منجر به‌چنین نتیجه‌ای شده است.

منابع مورد استفاده

1. Alloway B. J. and A. P. Jackson. 1991. The behaviour of heavy metals in sewage sludge-amended soils. Sci Total Environ. 100: 151–176
2. Arnon, D. I. 1948. Copper enzymes in isolated chloroplasts, Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*, plant physiol, 24:1-10.
3. Azevedo, H., C. G. G. Pinto, J. Fernandes, S. Loureiro and C. Santo. 2005. Cadmium effects on sunflower growth and photosynthesis. Plant Nutr. 28: 2011-2020.
4. Bremner, J. M. and C. S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-total. PP. 595- 624. *In*: Page, A.L. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 2. American Sosiety of Agronomy, Madison, Washington.
5. Chen, F., J. Dong, F. Wang, F. Wu, G. Zhang, G. Li. Z. Chen, J. Chen and K. Wei. 2007. Identification of barley genotypes with low grain Cd accumulation and its interaction with four microelements, chemosphere. 67: 2082-2088
6. Codex, A. C. 2002. Codex general standard for contaminants and toxins in foods. Report of the 34th Session of the Codex Committee on Food Additives and Contaminants, Rotterdam, The Netherlands. FAO/WHO, Rome, Italy, pp. 11–15.
7. di-Toppi, L. S. and R. Gabrielli. 1999. Response to cadmium in higher plants. Environ. Exp. Bot. 41:105–130
8. European Commission, Commission regulation. 2001. (EC) No 466/2001 of 8 March 2001. Setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. Off. J. Eur. Commun. 77:1–13
9. Fässler, E., B. H. Robinson, G. K. Satish and R. Schulin. 2010. Uptake and allocation of plant nutrients and Cd in maize, sunflower and tobacco growing on contaminated soil and the effect of soil conditioners under field conditions. Nutr. Cycl. in Agroecosys. 67:339-352.
10. Florijn, P. J. and van Beusichem, M. L. 1993a. Uptake and distribution of cadmium in maize inbred lines. Plant Soil 150: 25–32.
11. Grant. C. A. and L. D. Bailey. 1997. Effect of phosphorus and zinc fertilizer management on cadmium accumulation in flaxseed. J. Sci. Food Agric. 73:307–314.
12. Harris. N. S. and G. J. Taylor. 2001. Remobilization of cadmium in maturing shoots of near isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmiumaccumulation. J. Exp. Bot. 52:1473–1481.
13. Hatata. M. M. and E. A. Abdel-al. 2008. Oxidative stress and antioxidant defense mechanisms in response to cadmium treatments. Agric. and Environ. Sci. 4 (6): 655-669
14. Hassan. M. J., F. A. S. Wang and G. Zhang. 2005. Toxic effects of cadmium on rice as affected by nitrogen fertilizer form. Plant Soil 277:359–365.
15. International Soil Refrence and Information Center (ISRIC). 1986. Procedure for soil analysis. Wageningen Griculture University.

16. Houshmand, S., A. Arzani, A. M. Maibody and M. Feizi. 2005. Evaluation of salt-tolerant genotypes of durum wheat derived from in vitro and field experiments. Field Crops Res. 91: 345–354
17. Jain, M., M. Pal, P. Gupta and R. Gadre. 2007. Effect of cadmium on chlorophyll biosynthesis and enzymes of nitrogen assimilation in greening maize leaf segments: role of 2-oxoglutarate. Ind. J. Exprim. Biol. 45:385-389.
18. Jiang, C., Q. T. Wua, T. Sterckeman, C. Schwartz, C. Sirguey, S. Ouvrard, J. Perriguey and J. L. Morel. 2010. Co-planting can phytoextract similar amounts of cadmium and zinc to mono-cropping from contaminated soils. Ecol. Eng. 4: 391-395.
19. Li, Y-M., R. L. Chaney and A. A. Schneiter. 1994. Effect of soil chloride level on cadmium concentration in sunflower kernels. Plant Soil 167: 275–280.
20. Li, N. Y., Z. A. Li. P. Zhuang and B. Zou. 2009. Cadmium uptake from soil by Maize with in tercrops. Water Air Soil Polut. 199:45-56.
21. Liu, W., W. S. Shu and C. Y. Lan. 2004. Viola baoshanensis, a plant that hyperaccumulates cadmium. Chin. Sci. Bull. 49(1):29–32
22. McGrath, S.P. and F. J. Zhao. 2003. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. Curr. Opin. Biotechnol. 14: 277-282.
23. Marschner, H .1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, London
24. McLaughlin, M. J., M. Whatmuff, M. Warne, D. Heemsbergen, G. Barry and M. Bell. 2006. A field investigation of solubility and food chain accumulation of biosolid–cadmium across diverse soil types. Environ Chem. 3:428–432.
25. Meharg, A. and M. Macnair. 1992b. Suppression of the high-affinity phosphate-uptake system – a mechanism of arsenate tolerance in *Holcus lanatus* L. J. Exp. Bot. 43:519-524
26. Mench. M. and E. Martin. 1991. Mobilization of cadmium and other metals from two soils by root exudates of *Zea mays L.*, *Nicotiana tabacum L.* and *Nicotiana rustica* L. Plant Soil 132: 187–196.
27. Memon. A. R., D. Aktoprakligul, A. Zdemur and A. Vertii. 2001. Heavy metal accumulation and detoxification mechanisms in plants,Turk. J. Bot. 25:111-121.
28. Moteshare Zadeh, B., G. R., Savaghebi-Firozabadi, H. A. Alikhani and H. Mirseyed Hosseini. 2008. Effect of sunflower and amaranthus culture and application of inoculants on phytoremediation of the soils contaminated with cadmium. Am.-Eur. J. Agric. and Environ. 4: 93-103
29. Olowe, V. I. O and A.Y. Adeyemo. 2009. Enhanced crop productivity and compatibility through intercropping of sesame and sunflower varieties. Ann. Appl. Biol. 155 :285-291.
30. Olsen. S. R. and L. E. Sommers. 1982. Phosphorus. PP. 403- 431. *In*: A. L. Page (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part 2. Agron. Mongor. 9. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin.
31. Perriguey, J., T. Sterckeman and J. L. Morel, 2008. Effect of rhizosphere and plant-related factors on the cadmium uptake by maize (*Zea mays* L.). Environ. and Experim. Bot. 63: 333–341.
32. Pichtel, J and D. J. Bradway. 2008. Conventional crops and organic amendments for Pb, Cd and Zn treatment at a severely contaminated site. Bioresour. Technol. 99 :1242-1251.
33. Popova L. P., L.T. Maslenkova, R.Y. Yordanova, A. P. Ivanova, A. P. Krantev and G. Szalai. 2009. Exogenous treatment with salicylic acid attenuates cadmium toxicity in pea seedlings. Plant Physiol Biochem 47:224–231.
34. Ryan, J. A., H. R. Pahren and G. B. Lucas. 1982. Controlling cadmiumin thehuman food chain: a review and rationale based on health effects. Environ Res. 18:251–302.
35. Selvam, A and J. Wong. 2009. Cadmium uptake potential of *Brassica napus* cocropped with *Brassica parachinensis* and *Zea mays*, *hazardous materials*. 167:170- 178
36. Seth. C. S., P. K. Chaturvedi and V. Misra. 2008. The role of phytochelatins and antioxidants in tolerance to Cd accumulation in *Brassica juncea* L. Ecotoxicology and Environmental Safety. 71:76–85
37. Shafi, M., J. Bakht., M. J. Hasan., M. Raziuddin and G. Zhang. 2009. Effect of cadmium and salinity stresses on growth and antioxidant enzyme activities of wheat (*Triticum aestivum* L.*).* Bull. Environ. Contamin. and Toxicol. 82:772-776.
38. Shi, J., L. Q. Li and G. X. Pan. 2009. Variation of grain Cd and Zn concentrations of 110 hybrid rice cultivars grown in a low-Cd paddy soil. J. Environ. Sci. China .21:168-172.
39. Su, D. C., X. X. Lu and J. W. C. Wong. 2008. Could Cocropping or Successive Cropping with CdAccumulator Oilseed Rape Reduce Cd Uptake of Sensitive Chinese Cabbage? Waste Manage. 12:224-228.
40. Wagner, G. J. 1993. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. Adv Agron. 51:173–212.
41. Wieshammer, G., R. Unterbrunner., T. B. García., M. F. Zivkovic., M. Puschenreiter and W. W.Wenzel. 2007. Phytoextraction of Cd and Zn from agricultural soils by *Salix ssp*. and intercropping of *Salix caprea* and *Arabidopsis halleri* . Plant Soil 298: 255-264.

42. Wu, F. B., F. K. Chen, K. G. Wei and P. Zhang. 2004. Effects of cadmium on free amino acids, glutathione, and ascorbic acid concentration in two barley genotypes (*Hordeum vulgare* L.) differing in cadmium tolerance. Chemosphere 57:447–454.
43. Wu, Q. T., Z. B. Wei and Y. Ouyang. 2007. Phytoextraction of metal-contaminated soil by hyperaccumulator *Sedum alfredii* H: effects of chelator and co-planting. Water Air Soil Pollut. 180: 131–139.
44. Xu, J., H. X. Yin and X. Li. 2009. Protective effects of proline against cadmium toxicity in micropropagated hyperaccumulator, *Solanum nigrum* L. Plant Cell Rep. 28:325–333.
45. Yang, X. E., X. X. Long, H. B. Ye, Z. L. He, D.V. Calvert and P. J. Stoffella. 2004. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii* H.). Plant Soil 259:181–189.