نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار
جلد یازدهم، شماره دوم، ۱۴۰۰
۱-۲۴
http://ejsms.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/ejsms.2021.18121.1961
(مقاله کامل علمی- پژوهشی)

اثر شوری و بقایای گیاهی بر فعالیت آنزیمی و غلظت عناصر معدنی یک خاک آلوده به کادمیوم در شرایط آزمایشگاهی

الهام صادقی*[۱] و فایز رئیسی[۲]

[۱]دانش‌آموخته دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، [۲]استاد گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۸

چکیده

سابقه و هدف: خاک به عنوان محیط رشد گیاه و زیست‌گاه موجودات زنده گوناگون با انواع تنش‌های زیستی روبه‌رو است. ریزجانداران خاک نقش مهمی در عملکرد و حفظ کیفیت خاک دارند، زیرا آن‌ها مسئول تجزیه مواد آلی، گردش چرخه عناصر غذایی و تخریب آلاینده‌های خطرناک هستند. سمیت فلزی و شوری از مهم‌ترین تنش‌های مؤثر بر فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک در بسیاری از مناطق جهان به ویژه مناطق خشک می‌باشند. شوری ممکن است تأثیرات منفی آلودگی بر فعالیت میکروبی خاک را برانگیزد. در سوی دیگر، کاربرد مواد آلی در خاک‌های شور یا خاک‌های آلوده به فلز سمی ممکن است پیامدهای منفی این دو تنش را بر جمعیت و فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک کاهش دهد. هدف این پژوهش بررسی اثرهای شوری و بقایای گیاهی یونجه به عنوان یک سوبسترای آلی بر غلظت عناصر محلول، فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی، ساکاراز و تنفس ناشی از سوبسترا (SIR) در یک خاک آهکی آلوده به کادمیوم بود.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در شرایط آزمایشگاهی کنترل شده در دانشگاه شهرکرد انجام شد. آزمایش به صورت طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل و در چهار تکرار انجام شد. فاکتورها شامل دو سطح کادمیوم (۰ و ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، سه سطح شوری (۱/۳۵، ۷/۵ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر) و دو سطح بقایای گیاهی (با و بدون بقایای یونجه) انجام شد. نخست خاک با استفاده از نمک کلرید کادمیوم آلوده و سپس با بقایای یونجه (۱٪ وزنی- وزنی) مخلوط گردید. پس از اختلاط کامل خاک و بقایای گیاهی، تیمارهای شوری (کلرید سدیم) اعمال شدند. برای فعال‌سازی دوباره جمعیت میکروبی، رطوبت خاک در پیرامون ۷۰ درصد از گنجایش مزرعه تنظیم و ظروف به مدت ٤ هفته در دمای اتاق و سپس به مدت ۹۰ روز در دمای ۱±۲۵ درجه سلسیوس انکوبه شدند. سپس فعالیت آنزیم‌های فسفومنواستراز اسیدی و ساکاراز در سه دوره به صورت ماهانه و تنفس ناشی از سوبسترا و غلظت عناصر محلول (کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم) یک بار در طول دوره انکوباسیون اندازه‌گیری شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد افزایش سطح شوری در خاک کاهش فعالیت آنزیمی، تنفس ناشی از سوبسترا و غلظت عناصر محلول کلسیم، منیزیم و پتاسیم را به همراه داشت. اثر منفی شوری بر ویژگی‌های میکروبی (حدوداً ساکاراز ۲۰ درصد

* مسئول مکاتبه: el.sadeghi70@gmail.com

و فسفومنواستراز اسیدی ۵۰ درصد) در خاک آلوده به کادمیوم بسیار محسوس‌تر از خاک غیرآلوده بود. کاربرد بقایای یونجه آثار منفی شوری بر تنفس و فعالیت آنزیمی خاک را کاهش داد و افزایش غلظت عناصر کلسیم، منیزیم و پتاسیم در محلول خاک را در پی داشت. این یافته‌ها نشان می‌دهد در خاک‌های شور و آلوده که محدودیت کربن دارند، کاربرد مواد آلی غلظت کادمیوم قابل دسترس را کاهش، فراهمی سوبسترای موجود در خاک را افزایش و در نتیجه فعالیت آنزیمی و میکروبی خاک را بهبود می‌بخشد.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان می‌دهد در خاک‌های آلوده شور با محدودیت فراوان کربن، مصرف بقایای گیاهی برای تقویت ماده آلی خاک غلظت کادمیوم قابل دسترس و اثرات شوری را کاهش و در نتیجه تنفس و فعالیت آنزیمی خاک (ساکاراز، فسفومنواستراز اسیدی) را افزایش می‌دهد. هم‌چنین سبب افزایش غلظت عناصر محلول در خاک (کلسیم، منیزیم و پتاسیم) می‌شود. به طور خلاصه، این پژوهش نشان داد که اثر مشترک نمک کلرید سدیم و کادمیوم بر فعالیت آنزیمی و غلظت عناصر محلول خاک در نبودِ بقایای گیاهی اغلب از نوعِ هم‌کرداری ولی در بودن بقایای گیاهی از نوعِ پادکرداری است.

واژه‌های کلیدی: اصلاح‌کننده‌های آلی، تنش غیرزیستی، شوری، فعالیت آنزیم، کادمیوم قابل‌جذب

مقدمه

موجودات زنده خاک در تغییر شرایط زیست‌گاه خود سهیم هستند. این موجودات اگرچه از نظر اندازه بسیار کوچک‌اند اما اثرهای چشم‌گیری بر محیط پیرامون خود و فرایندهای مهم زیستی دارند. فعالیت ریزجانداران موجود در خاک با تعامل و همکاری موجودات بزرگ‌تر باعث تغییرات مهم فیزیکی و شیمیایی در محیط خاک می‌شوند. این موجودات در طول چرخه زندگی خود از راه تولید یک‌سری مواد ویژه باعث بروز این تغییرات در خاک می‌گردند (۸). به سبب درک اهمیت نقش ریزجانداران در نگه‌داری و رهاسازی انرژی و نیز تغییر شکل عناصر غذایی در خاک، در سال‌های گذشته توجه روزافزون به آثار تنش‌های زیستی روی جمعیت، تنوع و فعالیت موجودات زنده خاک شده است. معمولاً جمعیت ریزجانداران در خاک بسیار بالا است، اما شماری از این ریزجانداران در درون خاک غیرفعال بوده و یا در شرایط نامساعد محیطی مانند شوری و غلظت بالای عناصر سمی فعالیت اندکی دارند (۲۱). شوری سبب کاهش فعالیت آنزیم‌هایی مانند فسفومنواستراز (۱۹) و آریل سولفاتاز در خاک می‌گردد. گارسیا و هرناندز (۱۹۹۶) کاهش فعالیت بیش‌ترِ آنزیم‌های هیدرولیزکننده مانند پروتئازها، بتاگلوکوسیداز، فسفومنواستراز و اکسیدوردوکتازها مانند کاتالاز و دهیدروژناز را در پیِ شوری خاک مشاهده نمودند ولی گزارش کردند که اثر منفی شوری بر فعالیت آنزیم‌های هیدرولیزکننده بیش‌تر از اکسیدوردوکتازها بود (۱۶).

آلودگی فلزهای سمی یکی دیگر از چالش‌های زیست محیطی دنیای امروز است که در پیِ فعالیت‌های انسانی مانند معدن کاوی، ذوب فلزها و رهاسازی لجن فاضلاب در زمین‌های کشاورزی ایجاد می‌گردد و در واقع تبدیل به یک مشکل جدی جهانی شده است. آلودگی خاک‌ها با انواع فلزهای سمی پدیده‌ای است که به‌طور گسترده در نتیجه فعالیت‌های بشر مانند کشاورزی و فعالیت‌های صنعتی رُخ می‌دهد (۲۲). از این عناصر سمی می‌توان به کادمیوم اشاره

کرد که نه تنها اثرهای زیان‌بار بر سلامت انسان‌ها و حیوانات دارد بلکه می‌تواند بدترین پیامدها را بر جمعیت میکروبی خاک و فعالیت آن‌ها که نقش مهمی در چرخه عناصر غذایی خاک و حاصل‌خیزی خاک دارند، داشته باشد (۱۳). یافته‌های بیشترِ پژوهش‌گران نشان می‌دهد که کادمیوم پیامد منفی بر فعالیت‌های میکروبی (۱۳ و ۳۲) و فعالیت آنزیمی خاک (۱۱ و ۱۵) دارد. کادمیوم با ایجاد کمپلکس با سوبسترای آنزیم‌ها، سوبسترا را از دسترس ریزجانداران خارج می‌کند و یا با کشتن و از بین بردن ریزجانداران تجزیه‌کننده مواد آلی باعث کاهش تنفس خاک و فعالیت میکروبی می‌گردد (۲۵). آقابابایی و همکاران (۲۰۱٤) گزارش کردند که با افزایش کادمیوم خاک فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک کاهش چشم‌گیر می‌یابد (۲).

با این وجود، بررسی‌های گوناگون ثابت کرده‌اند که تقویت مقدار ماده آلی خاک در نتیجه کاربرد کودهای آلی و به‌سازها می‌تواند تنش شوری (۱، ۱۰، ۳۸) و در دسترس بودن آلاینده‌ها و فلزهای سنگین (۱، ۳۸) را کاهش دهد. تجادا و گونزالز (۲۰۰۸) بیان کردند که عموماً افزایش در کربن زیست‌توده میکروبی، به پیامدهای سودمندِ کودهای آلی در خاک برمی‌گردد و هم‌چنین مواد ساده و قابل دسترسی که کودهای آلی در اختیار میکروب‌ها قرار می‌دهند باعث تحریک فعالیت میکروبی و آنزیمی در خاک می‌گردد (۳۷). مادجون و همکاران (۲۰۰۱) پیامد افزودن بقایای آلی در دو خاک رسی و شنی که دارای مقادیر متفاوتی از عناصر سمی بود را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که افزودن بقایای گیاهی باعث افزایش فعالیت آنزیمی خاک می‌شود (۳۰). هم‌چنین در مناطقی که مقدار بقایای گیاهی بالاتری وجود دارد جمعیت ریزجانداران خاک توانایی بیش‌تری برای تحمل آلودگی کادمیوم خواهند داشت (۳۱). لیانگ و همکاران (۲۰۰۵) به منظور بررسی اثر افزودن کود آلی بر فعالیت آنزیمی خاک و سرعت تنفس آزمایش‌هایی را تحت تیمار شوری انجام دادند (۲۷). نتایج آن‌ها نشان داد که قرار دادن کود آلی در محیط رایزوسفر سبب می‌شود که فعالیت آنزیم اوره‌آز تا اندازه چشم‌گیری افزایش یابد. عثمان (۲۰۱۵) گزارش کرد که شوری ناشی از نمک کلرید سدیم (۳۰ تا ۱۲۰ میلی‌مول بر لیتر NaCl) و سمیت ناشی از کادمیوم (۰/۵ تا ۱۲ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک) تنفس میکروبی و معدنی شدن کربن را در خاک آهکی کاهش داد در حالی‌که مصرف کود دامی (۳۰ گرم در کیلوگرم خاک) افزایش تولید CO_2 را به همراه داشت (۳۸). نتایج وی نشان داد که کم‌ترین میزان تولید CO_2 در بالاترین سطح NaCl (۱۲۰ میلی‌مول بر لیتر) به همراه بالاترین سطح کادمیوم دیده می‌شود (۳۸). ریزجانداران موجود در خاک برای رشد به مواد غذایی کافی نیاز دارند. این میزان دسترسی در جریان زیست‌پالایی و هنگامی که گیاهان و ریزجانداران تحت‌تأثیر تنش آلاینده‌ها قرار دارند، تغییر می‌کند. مواد آلی مستقیماً می‌تواند به افزایش تامین و دسترسی به عناصر غذایی مانند فسفر و پتاسیم برای افزایش فعالیت میکروبی و آنزیمی ریزجانداران خاک کمک کند.

در پژوهش‌های گذشته برهم‌کنش دو گانه شوری و آلودگی و هم‌چنین برهم‌کنش سه‌گانه آلودگی، شوری و بقایای گیاهی به طور هم‌زمان بر فعالیت آنزیمی و غلظت برخی عناصر موجود در خاک به‌طور کامل مورد بررسی و توجه قرار نگرفته است. از این‌رو، با توجه به اهمیت نقش بقایای گیاهی و تنش‌های شوری و آلودگی کادمیوم بر فعالیت میکروبی و افزایش روزافزون این تنش‌ها و نیز کاهش ذخیره بقایای گیاهی و عناصر غذایی موجود در خاک‌های کشاورزی بر اساس مدیریت نامناسب، این

پژوهش با هدف بررسی برهم‌کنش شوری و آلودگی کادمیوم بر فعالیت آنزیم‌های فسفومنواستراز اسیدی، ساکاراز و تنفس ناشی از سوبسترا و غلظت عناصر کلسیم، منیزیم، پتاسیم و سدیم در یک خاک آهکی تیمار شده با بقایای گیاهی یونجه انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به صورت فاکتوریل با سه سطح شوری (۱/۳۵ (شاهد)، ۷/۵ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر)، دو سطح آلودگی کادمیوم (۰ و ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و دو سطح بقایای گیاهی یونجه (۰ و ۱ درصد وزنی) در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در چهار تکرار انجام شد. ابتدا از لایه‌های سطحی یک خاک کشاورزی نمونه‌برداری انجام شد. پس از انتقال به آزمایشگاه و هوا خشک شدن، خاک از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. طبق نتایج به‌دست آمده در این آزمایش خاک مورد آزمایش دارای pH=۷/٦ (۲۳)، قابلیت هدایت الکتریکی (عصاره اشباع) ۱/۳۵ دسی‌زیمنس بر متر (۲۳)، کربن آلی ۵/٦۹ گرم بر کیلوگرم (۳۳)، کربنات کلسیم معادل ۳۵۰ گرم بر کیلوگرم (۲۹)، نیتروژن کل ۰/٥٤ گرم بر کیلوگرم (۷)، جرم مخصوص ظاهری ۱/۳۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب (٦) و بافت این خاک که به روش هیدرومتری تعیین شد لوم رسی بود (۱۷). کادمیوم کل ۱/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم (۳۵) و غلظت کادمیوم قابل‌جذب پس از عصاره‌گیری نمونه‌ها با DTPA-TEA ۰/۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به دست آمد (۲۸).

برای انجام پژوهش، ٤۰۰ گرم خاک معادل وزن آون خشک (۱۰۵ درجه سلسیوس) در جارها پلاستیکی یک لیتری ریخته شد. ابتدا با استفاده از نمک کلرید کادمیوم، خاک مورد مطالعه در سطح ۳۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم آلوده گردید. سپس معادل یک درصد وزنی پودر بقایای گیاهی یونجه کاملاً آسیاب شده (عبور کرده از الک یک میلی‌متری) به آن افزوده و محتوی جارها به طور کامل با هم مخلوط شدند. پس از مخلوط کردن کامل خاک و بقایای گیاهی، تیمار شوری شامل ۱/۳۵ (شاهد)، ۷/۵ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر با استفاده از نمک کلرید سدیم اعمال گردید. برای فعال شدن جمعیت میکروبی و برقراری تعادل نسبی، رطوبت مخلوط خاک-بقایای گیاهی-نمک در حد ۷۰ درصد گنجایش مزرعه خاک اولیه تنظیم و جارها چهار هفته در دمای معمولی محیط به حالت پیش انکوباسیون قرار گرفتند. پس از این مدت، نمونه‌ها در انکوباتور و در دمای ۱±۲۵ درجه سلسیوس نگه‌داری شدند و تا انتهای دوره آزمایش (۹۰ روز) کنترل رطوبت آن‌ها به روش وزنی هر چند روز یک بار با توزین جارها انجام گرفت. در دوره انکوباسیون فعالیت آنزیم‌های ساکاراز (اینورتاز) و فسفومنواستراز اسیدی در سه دوره به فاصله زمانی ۳۰ روز یک بار اندازه‌گیری شد (۳). تنفس ناشی از سوبسترا (۳)، غلظت کلسیم و منیزیم به روش کمپلکسومتری (۱۲)، غلظت پتاسیم و سدیم به روش فلیم فتومتری (۲۰) یک بار پایان دوره انکوباسیون اندازه‌گیری شدند.

تجزیه واریانس داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال α=۰/۰۵ با استفاده از نرم افزار SPSS انجام شد. در این پژوهش اثر زمان انکوباسیون به روش اندازه‌های تکرار شده[1] با استفاده از نرم‌افزار SPSS بررسی شد. هم‌چنین برای تعیین نوع و ماهیت برهم‌کنش‌ها (هم‌کرداری و پادکرداری) بین شوری و آلودگی از مدل مستقل بلیس[2] استفاده شد. به کمک این مدل اثرات پیش‌بینی‌شده (P) محاسبه و با اثرات مشاهده‌شده (O) در حضور دو تنش مقایسه و نوع برهم‌کنش مشخص می‌گردد.

1- Repeated Measure
2- Bliss independence model

اثرات مشاهده شده اثر کادمیوم در دو سطح شوری طی آزمایش را نشان می‌دهد و اثرات پیش‌بینی شده نیز محاسبه شده است (۳۹).

نتایج و بحث

آنزیم ساکاراز (SAC): در این آزمایش اثر شوری، آلودگی و بقایای گیاهی و برهم‌کنش دو گانه شوری × آلودگی، شوری × بقایای گیاهی و آلودگی × بقایای گیاهی و هم‌چنین برهم‌کنش سه‌گانه شوری × آلودگی × بقایای گیاهی بر فعالیت آنزیم ساکاراز معنی‌دار (P<۰/۰۰۱) بود (جدول ۱). در خاک غیرآلوده بدون بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب باعث کاهش ۱۱، ۱۰ و ۹ درصدی فعالیت آنزیم ساکاراز نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) در ماه اول، دوم و سوم شد (شکل ۱). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب باعث کاهش ۱۵، ۱٤ و ۱٤ درصدی فعالیت آنزیم ساکاراز در سه ماه انکوباسیون نسبت به تیمار شاهد (غیرآلوده غیرشور) گردید (شکل ۱). در خاک آلوده بدون بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر فعالیت آنزیم ساکاراز خاک را به ترتیب ۱۷، ۱۵ و ۱٤ درصد در مقایسه با شاهد (خاک آلوده غیرشور) در ماه اول، دوم و سوم آزمایش کاهش داد و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در سه ماه انکوباسیون به ترتیب باعث کاهش ۲٤، ۲۱ و ۱۸ درصدی فعالیت آنزیم ساکاراز نسبت به تیمار شاهد (خاک آلوده غیرشور) در انکوباسیون گردید (شکل ۱). طبق خروجی معادله بلیس اثر مشترک شوری و آلودگی بر فعالیت آنزیم ساکاراز در خاک بدون بقایای گیاهی در هر دو سطح شوری، از نوع هم‌کرداری (هم‌سو) است (جدول ۲). این نشان می‌دهد که شوری اثر سمی کادمیوم را تحریک نموده است و به دلیل افزایش مقدار کادمیوم قابل‌جذب در خاک فعالیت آنزیم ساکاراز کاهش یافته است. قلاب و عثمان (۲۰۰۷) همبستگی مثبت و معنی‌دار بین غلظت کادمیوم و کلر محلول در دو خاک آهکی با بافت لوم رسی و شنی مشاهده کردند (۱۸). آن‌ها گزارش کردند که شوری سبب تشکیل کمپلکس‌های کلر-کادمیوم گردید و در واقع این کمپلکس‌ها گونه (شکل) قالب کادمیوم در محلول خاک بودند و از این‌رو افزایش غلظت کادمیوم را به همراه داشت. عناصر سمی با ایجاد کمپلکس با سوبسترای مورد نیاز آنزیم‌ها و خارج نمودن سوبسترا از دسترس ریزجانداران و یا با کشتن و از بین بردن ریزجاندارن تجزیه‌کننده مواد آلی باعث کاهش فعالیت‌های میکروبی و آنزیمی می‌گردند (۲۵).

همین‌طور در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر در سه دوره آزمایش کاهش ۱۲، ۱۰ و ۱۰ درصدی فعالیت آنزیم ساکاراز را نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) به‌ترتیب در ماه اول، دوم و سوم به همراه داشت و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب باعث کاهش ۵، ۳ و ۵ درصدی فعالیت آنزیم ساکاراز نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) در سه ماه انکوباسیون گردید (شکل ۱). نتایج نشان داد که در حضور بقایای آلی نیز با افزایش سطح شوری فعالیت آنزیم ساکاراز کاهش می‌یابد و این‌که کاهش فعالیت آنزیم ساکاراز در شوری‌های بالا بیش‌تر از شوری‌های پایین بود (شکل ۱). در خاک آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر میزان فعالیت آنزیم ساکاراز خاک را در ماه‌های اول، دوم و سوم انکوباسیون به ترتیب ۷، ۸، ۸ درصد افزایش داد و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در ماه‌های اول و دوم انکوباسیون منجر به افزایش ۱ درصدی و در ماه سوم منجر به کاهش ۱ درصدی فعالیت آنزیم ساکاراز نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) گردید (شکل ۱).

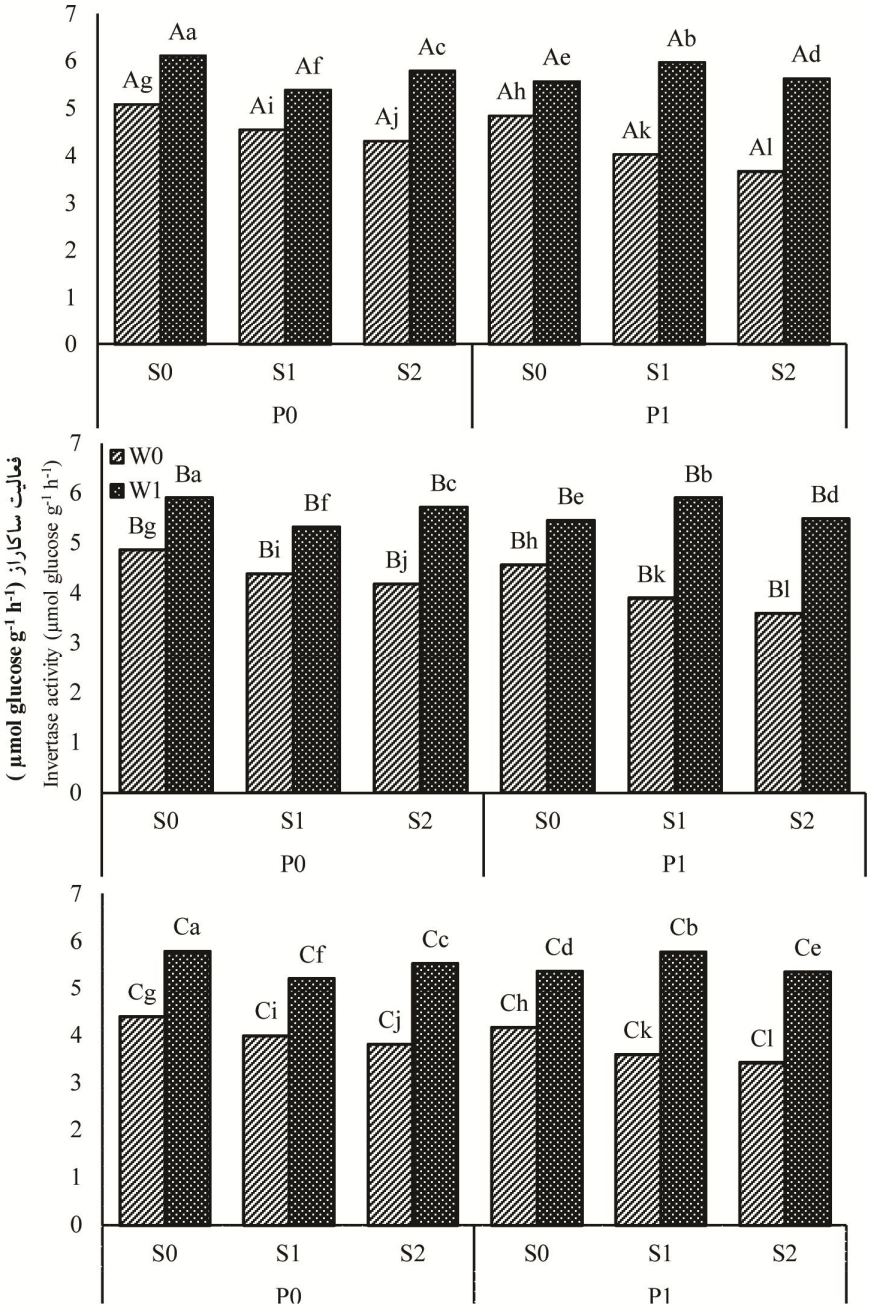
جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربع‌ها) اثرهای آلودگی کادمیوم، شوری و بقایای گیاهی و برهم‌کنش بین آن‌ها (بین گروهی)، اثر زمان و برهم‌کنش زمان (درون گروهی) بر فعالیت آنزیم فسفومنواستراز اسیدی (ACP) و ساکاراز (SAC).

Table 1. ANOVA results (mean square values) for the main effects of cadmium pollution, salinity and plant residue; and their interactions with time (T) for phosphomonoesterase activity (ACP) and invertase (SAC).

فسفومنواستراز اسیدی ACP	ساکاراز SAC	df	منبع تغییرات Sources of variations
	اثرهای بین گروهی Between-Subjects Effects		
19.5***(0.99)	1.81***(0.97)	1	آلودگی (P) Pollution
36.4***(1.00)	2.83***(1.00)	2	شوری (S) Salinity
180***(1.00)	74.7***(1.00)	1	بقایا (R) Residue
0.55***(0.85)	0.70***(0.97)	2	P×S
1.80***(0.90)	1.40***(0.97)	1	P×R
2.38***(0.96)	1.58***(0.98)	2	S×R
4.30***(0.98)	1.20***(0.98)	2	P×S×R
0.005	0.001	36	خطا Error
0.76	0.64		C.V. (٪)
	اثرهای درون گروهی Within-Subjects Effects		
357***(1.00)	1.78***(1.00)	2	زمان (T) Time
0.35***(0.90)	0.23***(0.62)	2	T×P
0.52***(0.95)	0.27***(0.79)	4	T×S
0.95***(0.85)	0.27***(0.95)	2	T×R
0.14***(0.91)	0.01**(0.26)	4	T×P×S
0.08***(0.96)	0.01**(0.42)	2	T×P×R
0.44***(0.95)	0.03**(0.79)	4	T×S×R
0.15***(0.82)	0.01***(0.59)	4	T×P×S×R
0.001	0.001	72	خطا (زمان) Error (Time)
0.34	0.64		C.V. (٪)

**، *** به‌ترتیب به مفهوم معنی‌دار در سطح احتمال ۱، ۰/۱ درصد می‌باشد. C.V. ضریب تغییرات، df درجه آزادی.

**, *** Significant at 1, 0.1%, respectively. C.V.: coefficient of variation, df: degree of freedom.



شکل ۱- اثر آلودگی کادمیوم، شوری و بقایای گیاهی بر فعالیت آنزیم ساکاراز (اینورتاز) خاک (n=4). آلودگی (P0) ۰ و (P1) ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، شوری (S0) شاهد، (S1) ۷/۵ و (S2) ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر و (R0) بدون بقایای گیاهی و (R1) ۱ درصد بقایای گیاهی یونجه. میانگین‌ها دارای حروف کوچک مشابه در یک دوره بدون اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD در همان دوره هستند. میانگین‌ها دارای حروف بزرگ مشابه، بدون اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بین زمان‌های مختلف (۳۰، ۶۰ و ۹۰) بر اساس آزمون LSD هستند.

Figure 1. The effect of plant residue, cadmium pollution and salinity on soil invertase activity. P0 unpolluted and P1 Cd-polluted (30 mg kg^{-1}) soil; S0 control, S1 7.5 and S2 15 dS m^{-1}; R0 without plant residue and R1 with alfalfa residue (1%, w/w). Within each column the means sharing similar lowercase letters do not have significant differences among treatments at 5% level according to the LSD test. Within each row the means sharing similar uppercase letters do not have significant differences at 5% level between different sampling times (30, 60 and 90) at 5% level according to the LSD test.

جدول ۲- ماهیت نوع برهم‌کنش شوری و آلودگی بر فعالیت آنزیم‌های فسفومنواستراز اسیدی (ACP) و ساکاراز (SAC) محاسبه شده بر اساس معادله مستقل بلیس در خاک‌های تیمار نشده (R0) و تیمار شده (R1) با بقایای گیاهی.

Table 2. The nature of interactions between salinity and Cd pollution on Acid phosphomonoesterase (ACP) and invertase (SAC). Estimated based on the Bliss independence model in soils untreated (R0) and treated (R1) with plant residue.

۹۰ روز 90 day		۶۰ روز 60 day		۳۰ روز 30 day		تیمار Treatment	شوری Salinity ($dS\ m^{-1}$)
R1	R0	R1	R0	R1	R0		
			SAC				
+10.1	+9.25	+9.86	+9.86	+11.8	+10.6	S	
+7.33	+5.28	+7.62	+6.11	+8.86	+4.71	P	
+0.26	+18.3	+1.32	+19.9	+2.33	+20.8	$(PS)_O$	
+16.7	+14.0	+16.7	+15.4	+19.7	+14.8	$(PS)_P$	۷/۵
0.65	0.66	0.68	0.72	0.44	0.78	$CI_{95\%}$	
-40.2	5.35	-71.5	6.86	-63.6	11.0	t-statistic	
<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	p-statistic	
ANT	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	Interaction	
+4.52	+13.6	+3.17	+14.0	+5.19	+15.2	S	
+7.33	+5.28	+7.62	+6.11	+8.86	+4.71	P	
+7.59	+22.2	+6.98	+26.1	+7.76	+27.8	$(PS)_O$	
+11.5	+18.1	+10.5	+19.2	+13.6	+19.1	$(PS)_P$	۱۵
0.71	0.80	0.46	0.81	0.50	0.85	$CI_{95\%}$	
-10.4	7.88	-9.13	13.5	-13.0	16.1	t-statistic	
<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	p-statistic	
ANT	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	Interaction	
			ACP				
+27.1	+16.0	+34.2	+8.87	+18.9	+5.46	S	
+17.6	+12.5	+22.7	+3.63	+10.4	+2.25	P	
+30.0	+61.3	+31.8	+46.1	+20.3	+26.3	$(PS)_O$	
+39.9	+26.5	+49.2	+12.2	+27.3	+7.58	$(PS)_P$	۷/۵
1.06	2.17	1.27	2.11	0.97	1.21	$CI_{95\%}$	
-16.6	24.1	-29.4	25.6	-12.8	21.4	t-statistic	
<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	p-statistic	
ANT	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	Interaction	
+41.9	+27.2	+51.0	+11.5	+23.5	+12.4	S	
+17.6	+12.5	+22.7	+3.63	+10.4	+2.25	P	
+50.3	+81.2	+53.8	+70.5	+29.4	+41.2	$(PS)_O$	
+52.1	+36.3	+62.2	+14.7	+31.5	+14.4	$(PS)_P$	۱۵
3.15	2.95	0.91	1.15	0.78	0.80	$CI_{95\%}$	
-1.28	27.7	-20.3	51.1	-3.16	47.9	t-statistic	
<0.001	<0.001	<0.001	0.002	0.009	0.032	p-statistic	
ANT	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	Interaction	

S خاک شور به تنهایی، P خاک آلوده به تنهایی، $(PS)_O$ اثر مشترک مشاهده شده شوری و آلودگی، $(PS)_P$ اثر مشترک پیش‌بینی شده شوری و آلودگی، $CI_{95\%}$ حدود اطمینان در سطح احتمال ۹۵ درصد، t statistic و p statistic (two-tail) آماره t و p در آزمون t test، Interaction نوع برهم‌کنش، SYN (هم‌کرداری) و ANT (پادکرداری).

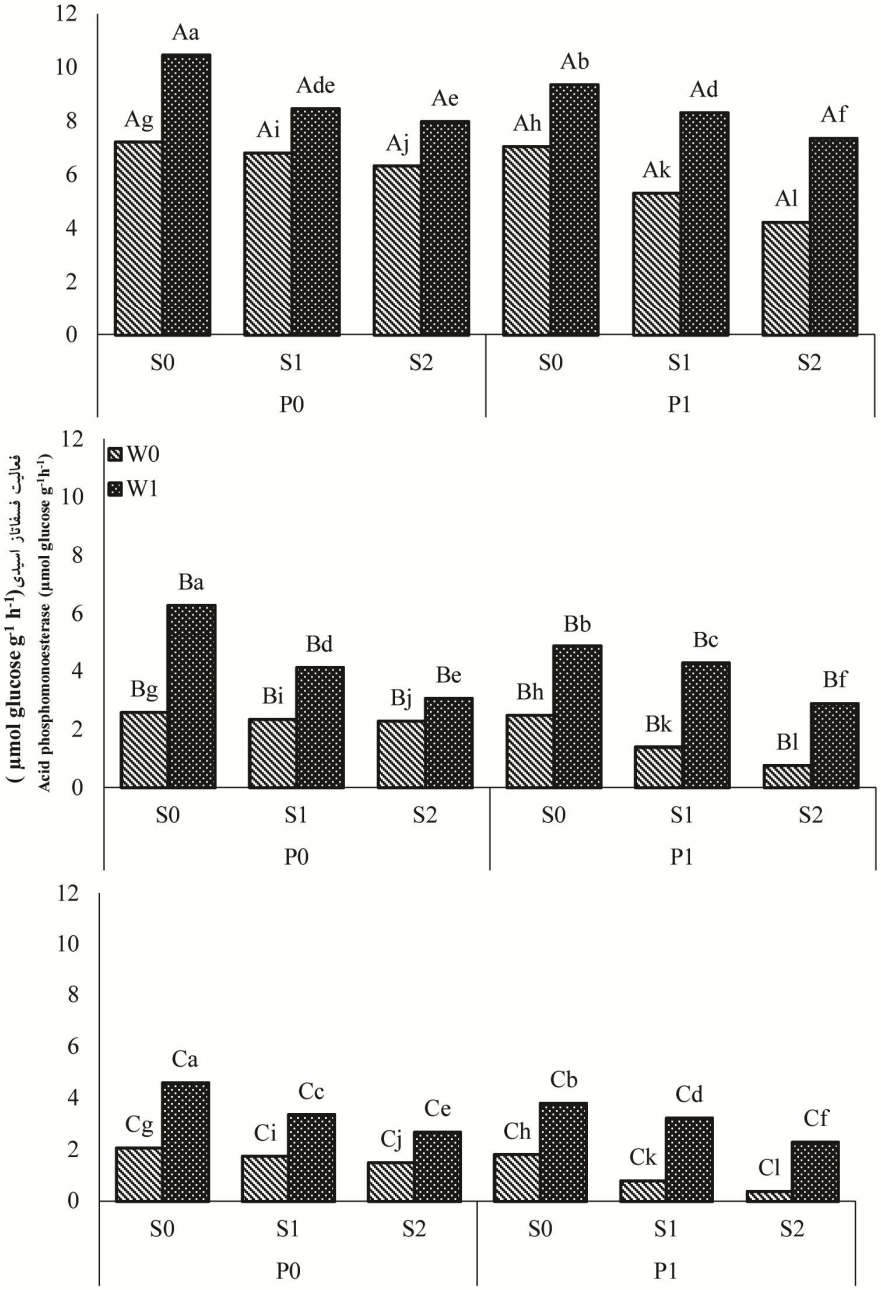
S saline soil, P Cd-polluted soil, $(PS)_o$ the observed effect of salinity and pollution, $(PS)_p$ the predicted effect of salinity and pollution, $CI_{95\%}$ confidence interval at 95% ; t-statistic student's t test; p-statistic two-tail p value; SYN synergistic, ANT antagonistic.

این نتایج نشان می‌دهد که افزودن بقایای گیاهی به‌ساز به خاک می‌تواند اثر شوری به ویژه در سطح ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر را در ماه‌های اول و دوم انکوباسیون تعدیل نماید (شکل ۱) و احتمالاً با ایجاد کمپلکس قوی و پایدار با کادمیوم از درجه سمیت آن بکاهد. بنابراین مصرف بقایای گیاهی منجر به تغییر نوع برهم‌کنش بین شوری و آلودگی کادمیوم از حالت هم‌کرداری (هم‌سو) در نبودِ بقایا به حالت پادکرداری (غیر هم‌سو) در حضور آن گردید (جدول ۲). نتایج نشان داد که بین غلظت کادمیوم قابل جذب و فعالیت آنزیم ساکاراز هم‌بستگی منفی و معنی‌دار ($P<۰/۰۱$، $r= -۰/۵۶$) وجود داشت (نتایج گزارش نشده است). بنابراین، یکی از دلایل تغییر فعالیت آنزیم ساکاراز بر اثر شوری می‌تواند به دلیل تغییرات غلظت کادمیوم قابل‌جذب خاک باشد و مصرف بقایای گیاهی می‌تواند اثرهای هم‌کرداری دو تنش شوری و آلودگی را به ویژه در پایان انکوباسیون کاهش و به شکل پادکرداری تغییر دهد. بدین ترتیب، نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که مصرف بقایای گیاهی در خاک‌های غیرآلوده و آلوده به منظور تقویت ذخیره ماده آلی خاک ممکن است تا اندازه‌ای از آثار منفی شوری بر فعالیت آنزیم ساکاراز بکاهد و این کاهش در خاک‌های آلوده بیش‌تر از خاک‌های غیرآلوده بود. در پژوهش مشابه، مصرف کود دامی در خاک‌های آهکی نیز سبب کاهش فراهمی کادمیوم و در نتیجه افزایش تولید دی‌اکسید کربن (تنفس خاک) در خاک‌های شور شده با نمک کلرید سدیم گردید (۳۸). افزودن مواد آلی در خاک‌های آلوده از راه افزایش کربن محلول فعالیت آنزیمی خاک را افزایش می‌دهد (۳۶).

آنزیم فسفومنواستراز اسیدی (ACP): در این پژوهش اثر شوری، آلودگی و بقایای گیاهی و برهم‌کنش دو گانه شوری × آلودگی، شوری × بقایای گیاهی و آلودگی × بقایای گیاهی و هم‌چنین برهم‌کنش سه‌گانه شوری × آلودگی × بقایای گیاهی بر فعالیت آنزیم فسفومنواستراز اسیدی معنی‌دار ($P<۰/۰۰۱$) بود (جدول ۱). در خاک غیرآلوده بدون بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر در ماه اول، دوم و سوم انکوباسیون به ترتیب باعث کاهش ۵، ۹ و ۱۶ درصدی فعالیت آنزیم فسفومنواستراز اسیدی نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) شد (شکل ۲). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر نیز در سه ماه انکوباسیون به ترتیب باعث کاهش ۱۲، ۱۱ و ۲۷ درصدی فعالیت آنزیم فسفومنواستراز اسیدی نسبت به تیمار شاهد (غیرآلوده غیرشور) گردید (شکل ۲). در خاک آلوده بدون بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر فعالیت آنزیم فسفومنواستراز اسیدی را به ترتیب ۲۵، ٤٤ و ٥٦ درصد در مقایسه با خاک شاهد (آلوده غیرشور) در ماه اول، دوم و سوم آزمایش کاهش داد (شکل ۲). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر نیز فعالیت آنزیم فسفومنواستراز اسیدی را در سه ماه انکوباسیون به ترتیب ٤٠، ٦٩ و ۷۸ درصد نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) کاهش داد (شکل ۲). طبق نتایج مدل بلیس برهم‌کنش شوری و آلودگی کادمیوم بر فعالیت آنزیم فسفومنواستراز اسیدی در خاک بدون بقایای گیاهی در هر دو سطح شوری هم‌کرداری (هم‌سو) بود (جدول ۲). قول‌لرعطا و رئیسی (۲۰۰۷) نیز نشان دادند که افزایش شوری تا $dS\ m^{-1}$ ۱۰ باعث کاهش معنی‌دار ($P<۰/۰۰۱$) فعالیت آنزیم فسفومنواستراز اسیدی در خاک‌های آهکی گردید (۱۹).

همین‌طور در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر در سه دوره آزمایش ماهانه به‌ترتیب کاهش ۱۹، ۳٤ و ۲۷ درصدی فعالیت آنزیم فسفومنواستراز اسیدی را نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) به همراه داشت (شکل ۲). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر نیز در سه ماه انکوباسیون باعث کاهش بیش‌تر (به ترتیب ۲٤، ۵۱ و ٤۲ درصدی در ماه‌های اول، دوم و سوم) فعالیت آنزیم فسفومنواستراز اسیدی نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) گردید (شکل ۲). در خاک آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر میزان فعالیت آنزیم فسفومنواستراز اسیدی خاک را در ماه‌های اول، دوم و سوم انکوباسیون به‌ترتیب ۱۱، ۱۲ و ۱۵ درصد نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) کاهش داد (شکل ۲). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر نیز در ماه‌های اول، دوم و سوم انکوباسیون به ترتیب منجر به کاهش ۲۱، ٤۰ و ٤۰ درصدی فعالیت آنزیم فسفومنواستراز اسیدی نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) گردید (شکل ۲). نتایج نشان داد که در بود و نبودِ بقایای گیاهی با افزایش سطح شوری در هردو خاک آلوده و غیرآلوده به کادمیوم میزان فعالیت آنزیم فسفومنواستراز اسیدی کاهش می‌یابد و کاهش فعالیت آنزیم فسفومنواستراز اسیدی در شوری‌های بالا بیش‌تر از شوری‌های پایین بود. هم‌چنین نتایج نشان داد که فعالیت آنزیم فسفومنواستراز اسیدی در خاک تیمار شده با بقایای گیاهی بیشتر از خاک بدون بقایای گیاهی بود. بنابراین مصرف بقایای گیاهی منجر به تغییر نوع برهم‌کنش بین شوری و آلودگی کادمیوم از حالت هم‌کرداری در نبود مواد آلی به حالت پادکرداری (غیرهم‌سو) در حضور آن گردید (جدول ۲). مادجون و همکاران (۲۰۰۱) با افزودن مواد آلی به خاک‌های آلوده به عناصر سنگین دیدند که فعالیت آنزیم فسفومنواستراز اسیدی افزایش یافت و علت این افزایش را رشد جمعیت میکروبی مقاوم به عناصر سمی بر اثر افزودن مواد آلی عنوان کردند (۳۰).

لیلاهاونگ و پنجسیلپ (۲۰۰۹) فعالیت آنزیم‌های فسفومنواستراز باکتری‌های گرهک ریشه‌ای و عوامل تغذیه‌ای مؤثر بر تولید فسفومنواستراز توسط باکتری‌های مسئول را مورد مطالعه قرار دادند (۲٦). آن‌ها نتیجه گرفتند که استفاده از مواد آلی، عاملی است که تولید فسفومنواستراز قلیایی و اسیدی را توسط تمام سویه‌های مورد آزمایش افزایش داد (۲٦).



شکل ۲- اثر آلودگی کادمیوم، شوری و بقایای گیاهی بر فعالیت آنزیم فسفومنواستراز اسیدی (ACP) خاک (n=4). آلودگی (P0) ۰ و (P1) ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، شوری (S0) شاهد، (S1) ۷/۵ و (S2) ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر و (R0) بدون بقایای گیاهی و (R1) ۱ درصد بقایای گیاهی یونجه. میانگین‌ها دارای حروف کوچک مشابه در یک دوره بدون اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD در همان دوره هستند. میانگین‌ها دارای حروف بزرگ مشابه، بدون اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بین زمان‌های مختلف (۳۰، ۶۰ و ۹۰) بر اساس آزمون LSD هستند.

Figure 2. The effect of plant residue, cadmium pollution and salinity on Acid phosphomonoesterase (AC). P0 unpolluted and P1 Cd-polluted (30 mg kg^{-1}) soil; S0 control, S1 7.5 and S2 15 dS m^{-1}; R0 without plant residue and R1 with alfalfa residue (1%, w/w). Within each column the means sharing similar lowercase letters do not have significant differences among treatments at 5% level according to the LSD test. Within each row the means sharing similar uppercase letters do not have significant differences at 5% level between different sampling times (30, 60 and 90) at 5% level according to the LSD test.

اثر شوری و آلودگی کادمیوم بر تنفس ناشی از سوبسترا[1] (SIR): اثر شوری، آلودگی و بقایای گیاهی و برهم‌کنش دو گانه شوری × آلودگی، شوری × بقایای گیاهی و آلودگی × بقایای گیاهی و هم‌چنین برهم‌کنش سه‌گانه شوری × آلودگی × بقایای گیاهی بر تنفس ناشی از سوبسترا معنی‌دار (P<۰/۰۰۱) بود (جدول ۳). در خاک غیرآلوده بدون بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب باعث کاهش ۵ و ۳۱ درصدی SIR نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) شد (شکل ۳). در خاک آلوده بدون بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر SIR را به ترتیب ۴۰ و ۵۴ درصد در مقایسه با خاک شاهد (آلوده غیرشور) کاهش داد (شکل ۳).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربع‌ها) اثرهای آلودگی کادمیوم، شوری و بقایای گیاهی و برهم‌کنش بین آن‌ها بر تنفس ناشی از سوبسترا (SIR) خاک.

Table 3. ANOVA results (mean square values) for the main effects of cadmium pollution, salinity and plant residue; and their interactions for Substrate Induced Respiration (SIR).

منبع تغییرات Sources of variations	df	نفس ناشی از سوبسترا SIR
آلودگی (P) Pollution	1	549***(1.00)
شوری (S) Salinity	2	1168***(1.00)
بقایا (R) Residue	1	8928***(1.00)
P×S	2	3.11***(0.89)
P×R	1	26.2***(0.97)
S×R	2	12.4***(0.97)
P×S×R	2	142***(1.00)
خطا Error	36	0.02
C.V. (٪)		0.32

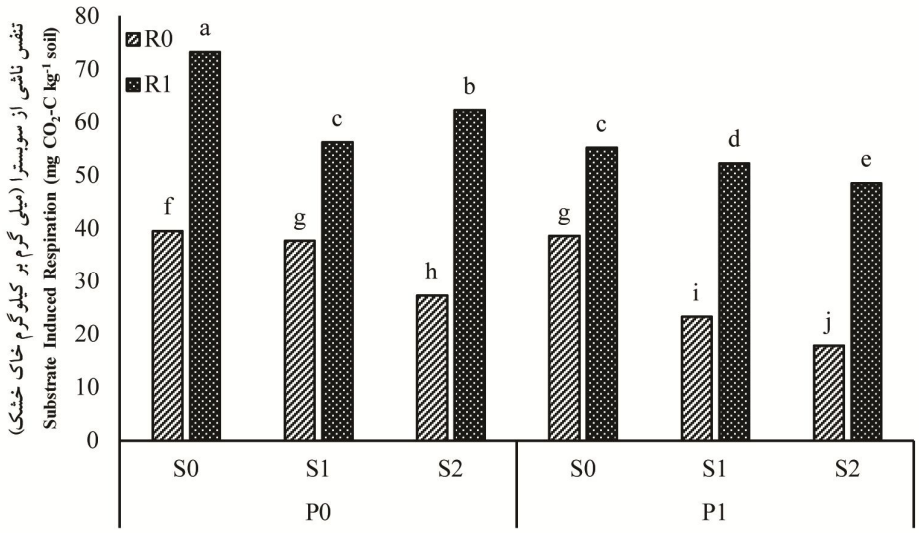
*** به مفهوم معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۱ درصد می‌باشد. .C.V: ضریب تغییرات، df: درجه آزادی.

*** Significant at 0.1% probability level. C.V.; coefficient of variation, df; degree of freedom.

همین‌طور در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر کاهش ۲۳ و ۲۹ درصدی SIR را نسبت به خاک شاهد (غیرشور غیرآلوده) به همراه داشت (شکل ۳). در خاک آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی شوری ۷/۵ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر SIR را به ترتیب ۱۱ و ۲۲ درصد نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) کاهش داد (شکل ۳). نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شوری در خاک غیرآلوده و آلوده، SIR خاک را کاهش می‌دهد. در این آزمایش همبستگی منفی و معنی‌دار (P<۰/۰۱، r= -۰/۶۲) بین غلظت کادمیوم قابل‌جذب و SIR مشاهده شد (نتایج گزارش نشده است). بنابراین کاهش SIR در این تیمارها می‌تواند به دلیل افزایش غلظت کادمیوم قابل‌جذب و میزان سمیت آن برای ریزجانداران فعال و جوان خاک باشد. مصرف بقایای گیاهی منجر به تغییر نوع برهم‌کنش بین شوری و آلودگی کادمیوم از حالت هم‌کرداری (هم‌سو) در نبودِ بقایا به حالت پادکرداری در حضور آن گردید (نتایج گزارش نشده است). این نتایج نشان

1- Substrate Induced Respiration

می‌دهد که با افزودن بقایای گیاهی ریزجانداران جوان و فعال افزایش یافته است، زیرا این شاخص زیست‌توده یا جمعیت فعال میکروبی خاک را نشان می‌دهد (۵). افزایش SIR می‌تواند به‌دلیل افزایش مقدار عناصر غذایی در نتیجه افزودن مواد آلی به خاک باشد (شکل ۳). بلاگوداسکایا و کوزیاکو (۲۰۱۳) نیز گزارش کردند که افزودن کربن فراهم به خاک سبب افزایش بسیار زیاد (۵ تا۱۰ برابر) تنفس ناشی از سوبسترا می‌شود (٤).



شکل ۳- اثر آلودگی کادمیوم، شوری و بقایای گیاهی بر تنفس ناشی از سوبسترا (n=4). آلودگی (P0) ۰ و (P1) ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، شوری (S0) شاهد، (S1) ۷/۵ و (S2) ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر و (R0) بدون بقایای گیاهی و (R1) ۱ درصد بقایای گیاهی یونجه. حروف مشابه، بدون اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند.

Figure 3. The effect of plant residue, cadmium pollution and salinity on Substrate Induced Respiration. P0 unpolluted and P1 Cd-polluted (30 mg kg^{-1}) soil; S0 control, S1 7.5 and S2 15 dS m^{-1}; R0 without plant residue and R1 with alfalfa residue (1%, w/w). Similar letters indicate no significant differences among treatments at 5% level according to the LSD test.

اثر شوری و آلودگی بر غلظت عناصر در خاک

غلظت کلسیم: نتایج تجزیه واریانس (جدول ٤) نشان داد که اثر شوری، آلودگی، بقایای گیاهی و برهم‌کنش دو گانه شوری × بقایای گیاهی و آلودگی × بقایای گیاهی و هم‌چنین برهم‌کنش سه‌گانه شوری × آلودگی × بقایای گیاهی بر غلظت کلسیم محلول در خاک معنی‌دار بود (P<۰/۰۰۱). برهم‌کنش دو گانه بقایای گیاهی × آلودگی بر غلظت این عنصر معنی‌دار نشد (P>۰/۰۵). در خاک غیرآلوده بدون بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر باعث کاهش ۸ درصدی و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر باعث کاهش بیش‌تر (۳٦ درصد) غلظت کلسیم محلول در مقایسه با تیمار شاهد (غیرآلوده غیرشور) شد (شکل ٤). در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب کاهش ۲۳ و ۳۵ درصدی غلظت کلسیم محلول را در مقایسه با خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) به همراه داشت (شکل ٤). هم‌چنین طبق نتایج معادله بلیس اثر مشترک شوری و آلودگی بر غلظت کلسیم محلول در خاک بدون بقایای گیاهی در هر دو سطح شوری هم‌کرداری (هم‌سو) است (جدول ۵).

جدول ٤- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربع‌ها) اثرهای آلودگی کادمیوم، شوری و بقایای گیاهی و برهم‌کنش بین آن‌ها (بین گروهی) بر غلظت عناصر کلسیم (Ca)، منیزیم (Mg)، پتاسیم (K) و سدیم (Na) در محلول خاک.

Table 4. ANOVA results (mean square values) for the main effects of cadmium pollution, salinity and plant residue; and their interactions for Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Potassium (K) and Sodium concentration (Na) in soil solution.

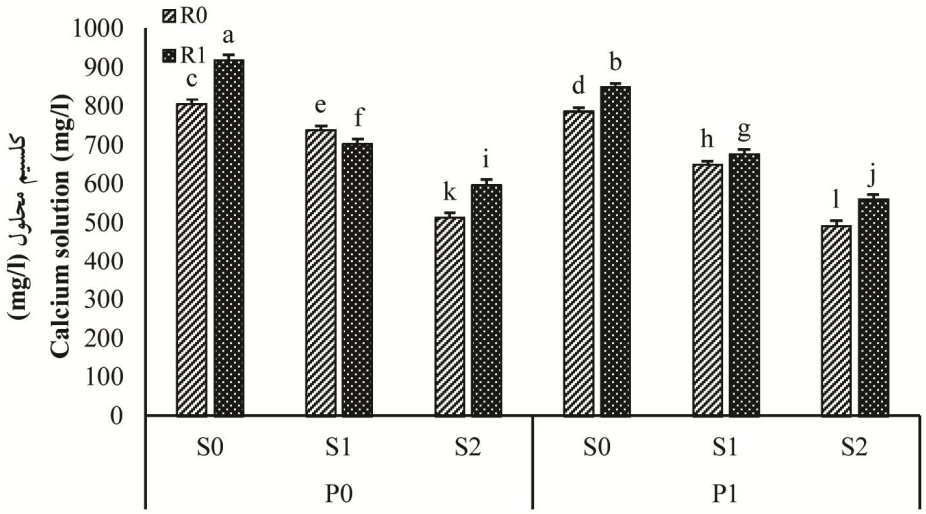
سدیم Na	پتاسیم K	منیزیم Mg	کلسیم Ca	منبع تغییرات Sources of variations
7.239^{***}(0.39)	20.8^{***}(0.96)	12784^{***}(0.95)	22742^{***}(0.95)	آلودگی Pollution (P)
2285^{***}(1.00)	83.0^{***}(1.00)	104204^{***}(1.0)	356899^{***}(1.00)	شوری Salinity (S)
229.9^{***}(0.95)	1372^{***}(1.00)	14068^{***}(0.96)	34048^{***}(1.00)	بقایا Residue (R)
0.9620^{ns}(0.15)	1.26^{***}(0.77)	194.3^{***}(0.38)	869.2^{***}(0.59)	P×S
162.1^{***}(0.94)	8.98^{***}(0.92)	568.1^{***}(0.47)	9.013^{ns}(0.01)	P×R
49.44^{***}(0.90)	11.3^{***}(0.97)	2478^{***}(0.89)	9678^{***}(0.94)	S×R
45.96^{***}(0.89)	3.48^{***}(0.90)	370.6^{***}(0.54)	3479^{***}(0.85)	P×S×R
0.309	0.021	17.61	33.37	خطا Error
3.46	0.99	1.67	0.83	C.V. (٪)

***، ns به ترتیب به مفهوم معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۱ و غیرمعنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد. .C.V: ضریب تغییرات، df: درجه آزادی.

***, ns denote significant and –non significant at 0.1 and 5% probability levels, respectively. C.V.; coefficient of variation, df; degree of freedom.

در خاک آلوده بدون بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر غلظت کلسیم محلول خاک را ۱۸ درصد در مقایسه با خاک شاهد (آلوده غیرشور) کاهش داد (شکل ٤). افزایش شوری به ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر سبب کاهش بیش‌تر (۳۷ درصد) غلظت کلسیم محلول خاک در مقایسه با تیمار شاهد (آلوده غیرشور) گردید (شکل ٤). در خاک آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر غلظت کلسیم محلول را ۲۰ درصد نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) کاهش داد (شکل ٤). با این حال شوری ۱۵دسی‌زیمنس بر متر باعث کاهش ۳٤ درصدی غلظت کلسیم محلول در مقایسه با خاک شاهد (آلوده غیرشور) گردید (شکل ٤). نتایج نشان داد که در پیِ افزایش شوری با بودن و نبودن بقایای گیاهی غلظت کلسیم محلول کاهش می‌یابد و بیش‌ترین کاهش در شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر و بدون بقایای گیاهی به دست آمد. نتایج معادله بلیس اثر مشترک شوری و آلودگی بر غلظت کلسیم محلول در خاک تیمار شده با بقایای گیاهی در هر دو سطح شوری پادکرداری است (جدول ۵). این نتایج نشان می‌دهد که افزودن بقایای گیاهی به خاک آلوده و شور می‌تواند اثر هم‌زمان شوری و آلودگی خاک را از طریق افزایش مقدار کلسیم محلول و دیگر عناصر غذایی کاهش دهد. افزایش در میزان کلسیم محلول در خاک تیمار شده با بقایای گیاهی می‌تواند به این علت باشد که خود بقایای گیاهی دارای مقداری کلسیم بوده و با افزودن آن به خاک، مقدار کلسیم محلول خاک افزایش یافته است. لیرد و همکاران (۲۰۱۰) نیز مشاهده کردند که افزودن بیوچار به خاک میزان کلسیم و منیزیم خاک را افزایش داد (۲۵). بر اساس

نتایج به دست آمده بقایای گیاهی غلظت کادمیوم قابل جذب را کاهش (نتایج گزارش نشده است) و غلظت کلسیم محلول در خاک را افزایش داده است و بدین‌ترتیب منجر به تغییر نوع برهم‌کنش بین شوری و آلودگی کادمیوم از حالت هم‌کرداری در نبود بقایای گیاهی در هر دو خاک آلوده و غیرآلوده به حالت پادکرداری گردید. هم‌چنین شوری کاهش مقدار کلسیم محلول خاک را به همراه داشت که این می‌تواند به دلیل افزایش مقدار سدیم در محلول خاک و جذب بیش‌تر کلسیم به ذرات خاک به دلیل بار بیش‌تر آن باشد که در نهایت منجر به کاهش غلظت کلسیم در محلول خاک شده است. نتایج بررسی‌های داونپورت و همکاران (۱۹۹۷) نیز نشان داد که شوری کاهش کلسیم محلول خاک را به همراه دارد و این امر منجر به کمبود کلسیم در گیاهان می‌شود (۱٤).



شکل ٤- اثر آلودگی کادمیوم، شوری و بقایای گیاهی بر غلظت کلسیم محلول در خاک (n=4). آلودگی (P0) ۰ و (P1) ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، شوری (S0) شاهد، (S1) ۷/۵ و (S2) ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر و (R0) بدون بقایای گیاهی و (R1) ۱ درصد بقایای گیاهی یونجه. حروف مشابه، نشان‌دهنده نبود اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند. خطای معیار به صورت خطوط عمودی نشان داده شده است.

Figure 4. The effect of plant residue, cadmium pollution and salinity on calcium concentration in soil solution. P0 unpolluted and P1 Cd-polluted (30 mg kg^{-1}) soil; S0 control, S1 7.5 and S2 15 dS m^{-1}; R0 without plant residue and R1 with alfalfa residue (1%, w/w). Similar letters indicate no significant differences among treatments at 5% level according to the LSD test. The vertical lines shown as standard error.

جدول ۵- ماهیت نوع برهم‌کنش شوری و آلودگی بر غلظت عناصر کلسیم (Ca)، منیزیم (Mg)، پتاسیم (K) و سدیم (Na) محاسبه شده بر اساس معادله مستقل بلیس در خاک‌های تیمار نشده (R0) و تیمار شده (R1) با بقایای گیاهی.

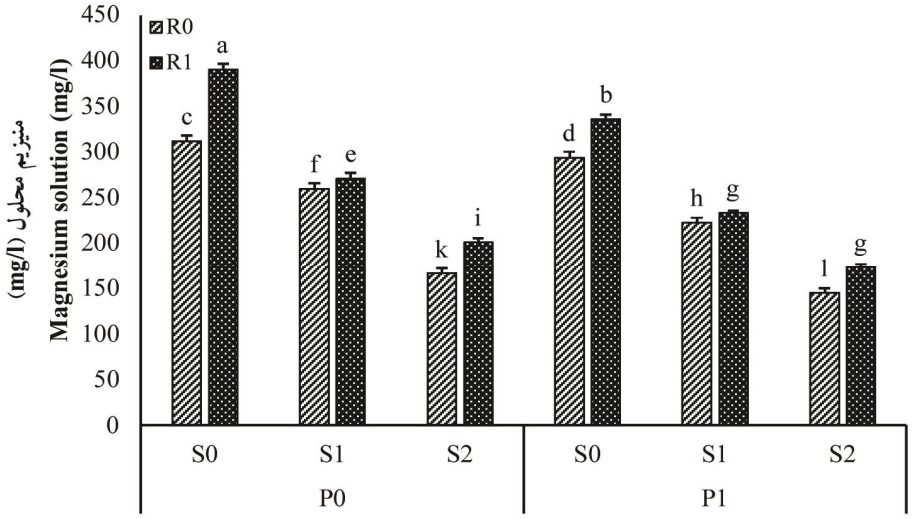
Table 5. The nature of interactions between salinity and Cd pollution on Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Potassium (K) and Sodium (Na) concentrations. Estimated based on the Bliss independence model in soils untreated (R0) and treated (R1) with plant residue.

سدیم Na		پتاسیم K		منیزیم Mg		کلسیم Ca		تیمار Treatment	شوری Salinity ($dS\ m^{-1}$)
R1	R0	R1	R0	R1	R0	R1	R0		
-0.82	-2.63	+0.19	+0.12	+0.31	+0.17	+0.23	+0.08	S	7.5
-0.18	-0.40	+0.15	+0.01	+0.14	+0.06	+0.08	+0.02	P	
-1.78	-1.36	+0.25	+0.14	+0.40	+0.29	+0.26	+0.19	$(PS)_O$	
-1.14	-4.07	+0.32	+0.12	+0.40	+0.22	+0.29	+0.11	$(PS)_P$	
21.7	17.1	1.15	1.43	1.44	0.83	0.97	1.44	$CI_{95\%}$	
-7.23	25.0	-9.63	1.84	-0.18	6.42	-6.15	10.8	t-statistic	
<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	p-statistic	
ANT	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	Interaction	
-3.81	-5.95	+0.30	+0.23	+0.48	+0.47	+0.35	+0.36	S	15
-0.18	-2.63	+0.15	+0.01	+0.14	+0.06	+0.08	+0.02	P	
-4.79	-4.63	+0.35	+0.33	+0.55	+0.54	+0.39	+0.39	$(PS)_O$	
-4.65	-8.72	+0.41	+0.23	+0.56	+0.50	+0.40	+0.38	$(PS)_P$	
19.7	23.3	0.81	1.33	0.71	0.89	0.72	0.84	$CI_{95\%}$	
-1.32	19.6	-13.3	7.04	-0.11	3.87	-2.23	2.05	t-statistic	
<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	p-statistic	
ANT	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	Interaction	

S خاک شور به تنهایی، P خاک آلوده به تنهایی، $(PS)_O$ اثر مشترک مشاهده شده شوری و آلودگی، $(PS)_P$ اثر مشترک پیش‌بینی شده شوری و آلودگی، $CI_{95\%}$ حدود اطمینان در سطح احتمال ۹۵ درصد، t statistic و p statistic (two-tail) آماره t و p در آزمون t test، Interaction نوع برهم‌کنش، SYN (هم‌کرداری) و ANT (پادکرداری).

S saline soil, P Cd-polluted soil, $(PS)_o$ the observed effect of salinity and pollution, $(PS)_p$ the predicted effect of salinity and pollution, $CI_{95\%}$ confidence interval at 95%; t-statistic student's t test; p-statistic two-tail pvalue; SYN synergistic, ANT antagonistic.

غلظت منیزیم محلول در خاک: در این آزمایش اثر شوری، آلودگی و بقایای گیاهی و برهم‌کنش دوگانه شوری × آلودگی، شوری × بقایای گیاهی و آلودگی × بقایای گیاهی و هم‌چنین برهم‌کنش سه‌گانه شوری × آلودگی × بقایای گیاهی بر غلظت منیزیم محلول خاک معنی‌دار ($P<۰/۰۰۱$) بود (جدول ۳). در خاک غیرآلوده بدون بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب باعث کاهش ۱۷ و ۴۷ درصدی غلظت منیزیم نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) شد (شکل ۵). در خاک آلوده بدون بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر غلظت منیزیم محلول را به ترتیب ۲۴ و ۵۱ درصد در مقایسه با خاک شاهد (آلوده غیرشور) کاهش داد و در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر کاهش ۳۱ و ۴۸ درصدی غلظت منیزیم محلول را نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) به همراه داشتند (شکل ۵). شوری ۷/۵ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در خاک آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی به ترتیب کاهش ۲۹ و ۴۵ درصدی غلظت منیزیم محلول را نسبت به خاک شاهد (آلوده غیر شور) به همراه داشت (شکل ۵).



شکل ۵- اثر آلودگی کادمیوم، شوری و بقایای گیاهی بر غلظت منیزیم محلول در خاک (n=4). آلودگی (P0) ۰ و (P1) ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، شوری (S0) شاهد، (S1) ۷/۵ و (S2) ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر و (R0) بدون بقایای گیاهی و (R1) ۱ درصد بقایای گیاهی یونجه. حروف مشابه، نشان‌دهنده نبود اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند. خطای معیار به صورت خطوط عمودی نشان داده شده است.

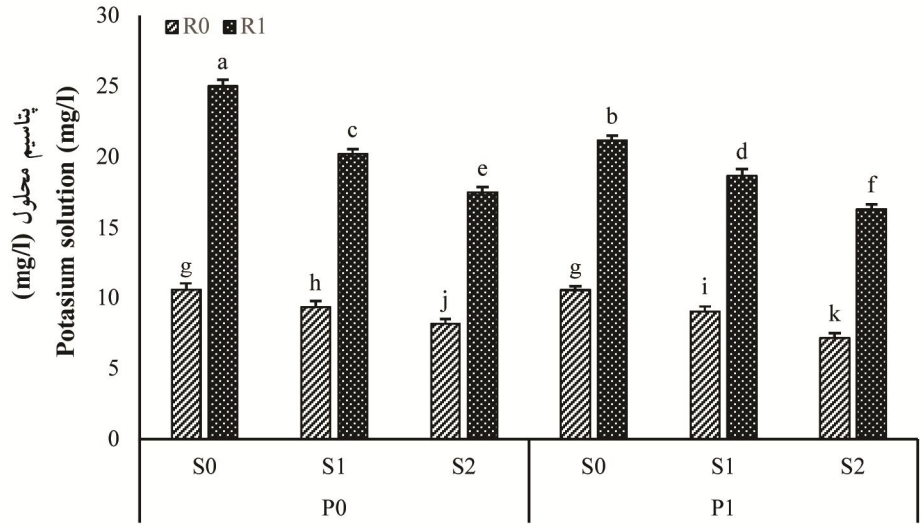
Figure 5. The effect of plant residue, cadmium pollution and salinity on magnesium concentration in soil solution. P0 unpolluted and P1 Cd-polluted (30 mg kg^{-1}) soil; S0 control, S1 7.5 and S2 15 dS m^{-1}; R0 without plant residue and R1 with alfalfa residue (1%, w/w). Similar letters indicate no significant differences among treatments at 5% level according to the LSD test. The vertical lines shown as standard error.

با مقایسه غلظت منیزیم محلول بین تمامی تیمارها و سطوح مختلف شوری و آلودگی می‌توان مشاهده کرد که کم‌ترین غلظت منیزیم محلول در نبود بقایای گیاهی مربوط به شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر و بیش‌ترین میزان غلظت منیزیم محلول در حضور بقایای گیاهی مربوط به تیمار شاهد (غیرآلوده غیرشور) بود (شکل ۵). کاهش منیزیم محلول در خاک شور و آلوده می‌تواند به دلیل غلظت زیاد نمک در محلول و جذب بیش‌تر منیزیم به ذرات خاک باشد. هم‌چنین کاربرد بقایای گیاهی غلظت منیزیم محلول خاک را افزایش داد (شکل ۵). افزایش غلظت منیزیم محلول در اثر کاربرد بقایای گیاهی یونجه در خاک نشان‌دهنده رهاسازی این کاتیون در طول دوره انکوباسیون و ورود آن به فاز محلول است. نتایج به‌دست آمده از آزمایش راندون و همکاران (۲۰۰۷) بر روی یک خاک لوم رسی نیز بیان‌گر این موضوع می‌باشد که افزودن بیوچار تنه درخت اکالیپتوس به خاک توانسته منیزیم خاک را به میزان بسیار زیادی افزایش دهد (۳٤). روی هم رفته در این پژوهش، در هر دو سطح شوری اثر مشترک شوری و کادمیوم در خاک‌های بدون بقایای گیاهی هم‌کرداری بود در حالی‌که در خاک‌های تیمار شده با بقایای گیاهی پادکرداری بود (جدول ۵). اثرهای پادکرداری تنش شوری و آلودگی ناشی از کاربرد مواد آلی در خاک‌های آلوده و غیرآلوده سبب کاهش اثر شوری نسبت به تیمارهای بدون بقایای گیاهی گردید.

غلظت پتاسیم در خاک: همه اثرهای اصلی و برهم‌کنش فاکتورهای مورد بررسی در این آزمایش بر غلظت پتاسیم در خاک معنی‌دار (P<۰/۰۰۱) گردید (جدول ٤). در خاک غیرآلوده بدون بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر باعث کاهش ۱۲ درصدی و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر باعث

کاهش ۲۳ درصدی غلظت پتاسیم در مقایسه با تیمار شاهد (غیرآلوده غیرشور) شد (شکل ٦). در خاک آلوده بدون بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر غلظت پتاسیم را به ترتیب ١٤ و ۳۲ درصد در مقایسه با خاک شاهد (آلوده غیرشور) کاهش داد (شکل ٦). در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر کاهش ۱۹ درصدی غلظت پتاسیم را در مقایسه با خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) به همراه داشت (شکل ٦). در حالی‌که شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر باعث کاهش ۳۰ درصدی غلظت پتاسیم در مقایسه با خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) گردید (شکل ٦). در خاک آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب ۱۲ و ۲۳ درصد غلظت پتاسیم را نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) کاهش داد (شکل ٦).

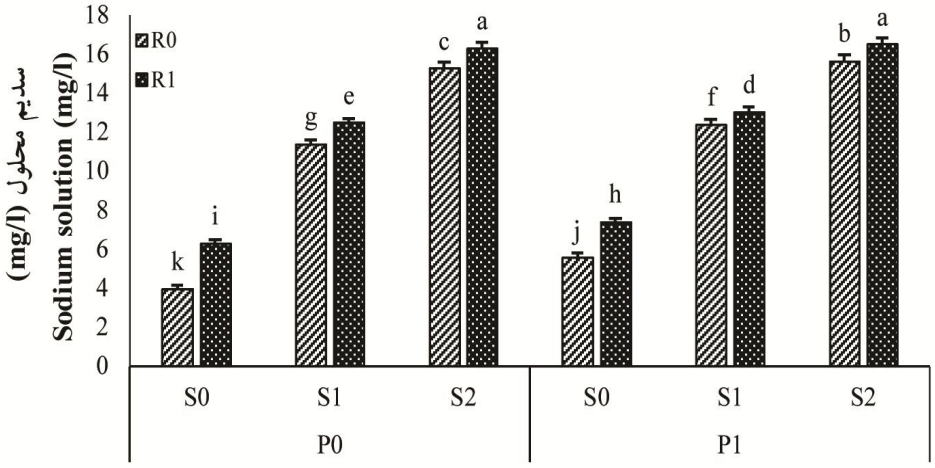
نتایج معادله بلیس (جدول ۵) نیز این یافته را تأیید می‌کند. طبق نتایج اثر مشترک شوری و آلودگی بر غلظت پتاسیم محلول در خاک بدون بقایای گیاهی در هر دو سطح شوری هم‌کرداری و در خاک تیمار شده با بقایای گیاهی پادکرداری است (جدول ۵). طبق نتایج افزایش شوری در بود و نبود بقایای گیاهی کاهش غلظت پتاسیم محلول در خاک را به همراه داشت. نتایج نشان می‌دهد بقایای گیاهی افزوده شده به خاک میزان پتاسیم محلول را افزایش داده است که علت آن احتمالاً وجود مقداری پتاسیم در این بقایا باشد. افزایش پتاسیم خاک پس از کاربرد بقایای گیاهی در خاک توسط سایر پژوهش‌گران نیز گزارش شده است (۲۵، ۳۷).



شکل ٦- اثر آلودگی کادمیوم، شوری و بقایای گیاهی بر غلظت پتاسیم محلول در خاک (n=4). آلودگی (P0) ۰ و (P1) ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، شوری (S0) شاهد، (S1) ۷/۵ و (S2) ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر و (R0) بدون بقایای گیاهی و (R1) ۱ درصد بقایای گیاهی یونجه. حروف مشابه، نشان‌دهنده نبود اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند. خطای معیار به صورت خطوط عمودی نشان داده شده است.

Figure 6. The effect of plant residue, cadmium pollution and salinity on potasium concentration in soil solution. P0 unpolluted and P1 Cd-polluted (30 mg kg^{-1}) soil; S0 control, S1 7.5 and S2 15 dS m^{-1}; R0 without plant residue and R1 with alfalfa residue (1%, w/w). Similar letters indicate no significant differences among treatments at 5% level according to the LSD test. The vertical lines shown as standard error.

غلظت سدیم در خاک: در این آزمایش اثر فاکتورهای اصلی و برهم‌کنش همه فاکتورها به‌جز برهم‌کنش دوگانه شوری × آلودگی بر غلظت سدیم در خاک معنی‌دار (P<۰/۰۰۱) بود (جدول ۵). در خاک غیرآلوده بدون بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر باعث افزایش (۱۸۷ درصدی) غلظت سدیم در مقایسه با خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) شد (شکل ۷). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر باعث افزایش بیش‌تر (۲۸٤ درصد) غلظت سدیم در مقایسه با تیمار شاهد (غیرآلوده غیرشور) شد (شکل ۷). در خاک آلوده بدون بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر غلظت سدیم را به‌ترتیب ۱۲۳ و ۱۸۲ درصد در مقایسه با خاک شاهد (آلوده غیرشور) افزایش داد (شکل ۷). در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب افزایش ۹۸ و ۱۵۹ درصدی غلظت سدیم را در مقایسه با خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) به همراه داشت (شکل ۷). در حالی‌که در خاک آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر غلظت سدیم را به‌ترتیب ۷٦ و ۱۲۳ درصد در مقایسه با خاک شاهد (آلوده غیرشور) افزایش داد (شکل ۷). بنابراین می‌توان دید که کم‌ترین غلظت سدیم در نبود بقایای گیاهی مربوط به تیمار شاهد (غیرآلوده غیرشور) و بیش‌ترین میزان غلظت سدیم در حضور بقایای گیاهی مربوط به تیمار آلوده و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر بود (شکل ۷). افزایش میزان سدیم محلول در خاک در اثر کاربرد بقایای گیاهی می‌تواند به این علت باشد که بقایای گیاهی خود دارای مقداری سدیم است. چاگانتی و همکاران (۲۰۱۵) بیان کردند که مواد آلی سرشار از کلسیم و منیزیم می‌باشد و این کلسیم و منیزیم می‌تواند جایگزین سدیم در جایگاه تبادلی کانی‌ها شود و سدیم را به درون خاک آزاد کند (۹).



شکل ۷- اثر آلودگی کادمیوم، شوری و بقایای گیاهی بر غلظت سدیم محلول در خاک (n=4). آلودگی (P0) ۰ و (P1) ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، شوری (S0) شاهد، (S1) ۷/۵ و (S2) ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر و (R0) بدون بقایای گیاهی و (R1) ۱ درصد بقایای گیاهی یونجه. حروف مشابه، نشان‌دهنده نبود اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند. خطای معیار به صورت خطوط عمودی نشان داده شده است.

Figure 7. The effect of plant residue, cadmium pollution and salinity on sodium concentration solution. P0 unpolluted and P1 Cd-polluted (30 mg kg^{-1}) soil; S0 control, S1 7.5 and S2 15 dS m^{-1}; R0 without plant residue and R1 with alfalfa residue (1%, w/w). Similar letters indicate no significant differences among treatments at 5% level according to the LSD test. The vertical lines shown as standard error.

نتایج مقایسه میانگین‌ها (شکل ۷) نشان می‌دهد که سدیم محلول در خاک‌های تیمار شده با بقایای گیاهی نسبت به شاهد افزایش پیدا کرده است. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهند که بیش‌ترین افزایش مربوط به خاک آلوده با شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در حضور بقایای گیاهی و کم‌ترین آن مربوط به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) می‌باشد. در خاک شاهد به علت نبود بقایای گیاهی و رهاسازی کلسیم و تبادل آن‌ها با سدیم تبادلی، مقدار سدیم در فاز محلول کم است. این درحالی است که در خاک‌های تیمار شده با بقایای گیاهی، کلسیم آزاد شده از این بقایا جانشین سدیم تبادلی شده و بنابراین سدیم در فاز محلول افزایش یافته است. بنابراین غلظت سدیم بالاتر در خاک تیمار شده با بقایای گیاهی احتمالاً به دلیل میزان بالای کلسیم، منیزیم و پتاسیم در این بقایا می‌باشد.

مصرف بقایای گیاهی منجر به تغییر نوع برهم‌کنش بین شوری و آلودگی کادمیوم از حالت هم‌کرداری در نبودِ بقایای آلی به حالت پادکرداری در حضور آن گردید (جدول ۵). بنابراین، تغییرات عناصر کلسیم، منیزیم، پتاسیم و سدیم بر اثر شوری می‌تواند به‌دلیل تغییرات غلظت کادمیوم قابل جذب خاک باشد و مصرف مواد آلی می‌تواند اثرهای هم‌کرداری دو تنش شوری و آلودگی را به ویژه در پایان انکوباسیون کاهش و به شکل پادکرداری تغییر دهد (جدول ۵).

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی، در این پژوهش شوری ناشی از کلرید سدیم پویایی و زیست‌فراهمی کادمیوم را افزایش داد. تنش شوری و آلودگی اثر بازدارندگی بر فعالیت آنزیم‌های فسفومنواستراز اسیدی، ساکاراز و تنفس ناشی از سوبسترا داشتند و نقش تنش شوری در این کاهش بیش‌تر از تنش آلودگی بود. در نبودِ بقایای گیاهی یونجه، شوری سبب کاهش حلالیت و زیست‌فراهمی کادمیوم قابل‌جذب و غلظت عناصر کلسیم، منیزیم و پتاسیم شد و به‌طور افزاینده کاهش بیش‌تر آنزیم‌های فسفومنواستراز اسیدی و ساکاراز را به همراه داشت. در حالی‌که افزودن بقایای گیاهی یونجه به خاک باعث تعدیل پیامدهای منفی تنش‌های شوری و آلودگی بر فعالیت آنزیم‌ها (فسفومنواستراز اسیدی و ساکاراز)، تنفس ناشی از سوبسترا و غلظت عناصر غذایی در خاک شد. هم‌چنین نتایج نشان داد که فعالیت آنزیم‌های فسفومنواستراز اسیدی و ساکاراز طی زمان کاهش معنی‌داری داشتند که این می‌تواند به‌دلیل کاهش سوبسترا و عناصر غذایی مورد نیاز فعالیت آنزیمی در خاک باشد. بنابراین، به نظر می‌رسد کاربرد بقایای گیاهی در خاک‌های آلوده و شور باعث کاهش نسبی کادمیوم قابل جذب و سمیت ناشی از آن و بهبود نسبی فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک می‌شود. هم‌چنین با افزودن بقایای آلی به خاک غلظت عناصر در محلول خاک افزایش می‌یابد و این به نوبه خود سبب افزایش فعالیت میکروبی می‌شود. بنابراین، پیشنهاد می‌گردد از بقایای گیاهی برای بهبود رشد و فعالیت آنزیمی خاک‌های آلوده شور استفاده شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از دانشگاه شهرکرد به‌خاطر حمایت‌های مالی این پژوهش قدردانی و تشکر می‌شود.

منابع

1. Abbaspour, A., Kalbasi, M., Hajrasuliha, S., and Fotovat, A. 2008. Effect of organic matter and salinity on ethylenediaminetetraacetic acid–extractable and solution species of cadmium and lead in three agricultural soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 39: 7. 983-1005.
2. Aghababaei, F., Raiesi, F., and Hosseinpur, A. 2014. The combined effects of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi on microbial biomass and enzyme activities in a calcareous soil spiked with cadmium. Applied Soil Ecology. 75: 33-42.
3. Alef, K., and Nannipieri, P. 1995. Enzyme activities. P 311-373. In: K. Alef,. and P. Nannipieri (eds.) Methods in Soil Microbiology and Biochemistry. Academic Press, New York.
4. Blagodatskaya, E., and Kuzyakov, Y. 2013. Active microorganisms in soil: critical review of estimation criteria and approaches. Soil Biology and Biochemistry. 67: 192-211.
5. Blagodatsky, A., Heinemeyer, O., and Richter, J. 2000. Estimating the active and total soil microbial biomass by kinetic respiration analysis. Biology and Fertility of Soils. 32: 73-81.
6. Blake, G., and Hartge, K. 1986. Bulk density. P 363-375. In: A. Klute (ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1. Physicala nd Mineralogical Methods, (2"ed.). American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
7. Bremner, M., and Mulvaney, S. 1982. Nitrogen. P 595-624. In: D.R. Buxton (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
8. Brussaard, L., Ruiter, P., and Brown, G. 2007. Soil biodiversity for agricultural sustainability. Agriculture, Ecosystems and Environment. 121: 233-244.
9. Chaganti, V., Crohn, D., and Simunek, J. 2015. Leaching and reclamation of biochar and compost amended saline-sodic soil with moderate SAR reclaimed water. Agricultural Water Management. 158: 255-265.
10. Chowdhury, N., Marschner, P., and Burns, R. 2011. Soil microbial activity and community composition: impact of changes in matric and osmotic potential. Soil Biology and Biochemistry. 43: 1229-1236.
11. Cortes-Lorenzo, C., Rodrlguez, M., Sipkema, D., Juarez-Jimenez, B., Rodelas, B., Smidt, H., and Gonzalez-Lopez, J. 2015. Effect of salinity on nitrification efficiency and structure of ammonia-oxidizing bacterial communities in a submerged fixed bed bioreactor. Chemical Engineering Journal. 266: 233-240.
12. Curtin, D., and Miller, J.J. 2008. Electrical conductivity and soluble ions. P 161-171. In: M.R. Carter, and E.G. Gregorich (eds). Soil Sampling and Methods of Analysis. Chapter 2- Diagnostic methods for soil and environmental management. Taylor and Francis.
13. Dai, J., Becquer, T., Rouiller, J., Reversat, G., Bernhard-Reversat, F., and Lavelle, P. 2004. Influence of heavy metals on C and N mineralisation and microbial biomass in Zn-, Pb-, Cu-, and Cd-contaminated soils. Applied Soil Ecology. 25: 99-109.
14. Davenport, R., Reid, R., and Smith, F. 1997. Sodium-calcium interactions in two wheat species differing in salinity resistance. Physiologia Plantarum. 99: 323-327.
15. Effron, D., Horra, A., Defrieri, R., Fontanive, V., and Palma, R. 2004. Effect of cadmium, copper and lead on different enzyme activities in a native forest soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 35: 1309-1321.
16. Garcia, C., and Hernandez, T. 1996. Influence of salinity on the biological and biochemical activity of a calciorthird soil. Plant and Soil. 178: 255-263.

17. Gee, G., and Bauder, J. 1986. Particle-size analysis. P 383-411. In: A. Klute (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. American Society of Agronomy, Madison Wisconsin, USA.
18. Ghallab, A., and Usman, A. 2007. Effect of sodium chloride-induced salinity on phyto-availability and speciation of Cd in soil solution. Water, Air and Soil Pollution. 185: 43-51.
19. Ghollarata, M., and Raiesi, F. 2007. The adverse effects of soil salinization on the growth of *Trifolium alexandrinum* L. and associated microbial and biochemical properties in a soil from Iran. Soil Biology and Biochemistry. 39: 1699-1702.
20. Helmke, P.A., and Sparks, D.L. 1996. Lithium, sodium, potassium, rubidium and cesium. P 551-574. In: P.A. Helmke, C.T. Johnston, R.H. Loeppert, A.L. Page, P.N. Soltanpour, D.L. Sparks, M.E. Sumner, and M.A. Tabatabai, (eds). Methods of Soil Analysis. Part 3- Chemical Methods. Madison, Wisconsin, USA.
21. Kabata-Pendias, A. 2001. Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press. 467p.
22. Kabata-Pendias, A., and Mukherjee, A. 2007. Trace Elements from Soil to Human. Springer- Heidelberg. 550p.
23. Klute, A. 1982. Soil pH and lime requirement. P 199-223. In: E.O. Mclean (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Soil Science Society of America. Madison Wisconsin, USA.
24. Laird, D., Fleming, P., Davis, D., Horton, R., Wang, B., and Karlen, D. 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. Geoderma. 158: 3. 443-449.
25. Landi, L., Renella, G., Moreno, J., Falchini, L., and Nannipieri, P. 2000. Influence of cadmium on the metabolic quotient, L-: D-glutamic acid respiration ratio and enzyme activity: microbial biomass ratio under laboratory conditions. Biology and Fertility of Soils. 32: 8-16.
26. Leelahawonge, C., and Pongsilp, N. 2009. Phosphatase activities of root-nodule bacteria and nutritional factors affecting production of phosphatases by representative bacteria from three different genera. KMITL Science Technology Journal. 9: 2. 65-83.
27. Liang, Y., Si, J., Nikolic, M., Peng, Y., Chen, W., and Jiang, Y. 2005. Organic manure stimulates biological activity and barley growth in soil subject to secondary salinization. Soil Biology and Biochemistry. 37: 1185-1195.
28. Lindsay, W., and Norvell, W. 1987. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Science Society of America Journal. 42: 421-428.
29. Loeppert, R., and Suarez, D. 1996. Carbonate and Gypsum. P 437-474. In: D.L. Suarez (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical properties. Soil Science Society of America. Madison Wisconsin, USA.
30. Madejon, E., Burgos, P., Lopez, R., and Cabrera, F. 2001. Soil enzymatic response to addition of heavy metals with organic residues. Biology and Fertility of Soils. 34: 144-150.
31. Moreno, J., Bastida, F., Ros, M., Hernandez, T., and Garcia, C. 2009. Soil organic carbon buffers heavy metal contamination on semiarid soils: Effects of different metal threshold levels on soil microbial activity. European Journal of Soil Biology. 45: 220-228.
32. Moreno, J., Hernandez, T., Perez, A., and Garcıia, C. 2002. Toxicity of cadmium to soil microbial activity: effect of sewage sludge addition to soil on the ecological dose. Applied Soil Ecology. 21: 149-158.
33. Nelson, D.W., and Sommers, L. 1983. Total carbono, rganicc arbona ndo rganicm atter. P 539-577. In: A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney (eds), Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

34.Rondon, M., Lehmann, J., Ramírez, J., and Hurtado, M. 2007. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with biochar additions. Biology and Fertility of Soils. 43: 699-708.
35.Sposito, G., Lund, L.J., and Chang, A.C. 1982. Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases. Soil Science Society of America Journal. 46: 260-264.
36.Tejada, M. 2009. Application of different organic wastes in a soil polluted by cadmium: Effects on soil biological properties. Geoderma. 153: 254-268.
37.Tejada, M., and Gonzalez, J. 2008. Influence of two organic amendments on the soil physical properties, soil losses, sediments and runoff water quality. Geoderma. 145: 325-334.
38.Usman, A. 2015. Influence of NaCl-induced salinity and Cd toxicity on respiration activity and Cd availability to barley plants in farmyard manure-amended soil. Applied and Environmental Soil Science (doi: http://dx.doi.org/10.1155/2015/483836).
39.Zhao, W., Sachsenmeier, K., Zhang, L., Sult, E., Hollingsworth, R., and Yang, H. 2014. A new bliss independence model to analyze drug combination data. Journal of Biomolecular Screening. 19: 817-821.

J. of Soil Management and Sustainable Production, Vol. 11(2), 2021
http://ejsms.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/ejsms.2021.18121.1961

(Research Full Paper)

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Effects of salinity and plant residue on enzyme activity and some mineral element concentrations in a cadmium-polluted soil under laboratory condition

E. Sadeghi[*1] and F. Raiesi[2]
[1]Ph.D. Graduate, Dept. of Soil Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources,
[2]Professor, Dept. of Soil Science, University of Shahrekord
Received: 06.24.2020; Accepted: 04.17.2021

Abstract

Background and Objectives: Soil, as an important component of terrestrial ecosystems, plant growth media, and a habitat of diverse living organisms commonly encounters a variety of abiotic stresses. Soil microorganisms play an important role in maintaining soil quality and functioning, since they are responsible for the decomposition of dead organic material, nutrient cycling and degradation of hazardous organic pollutants. Metal toxicity and salinity are the major abiotic stresses affecting soil microbial activity and community structure in many areas of the world, in particular arid regions. Salinity may prompt the negative influences of soil pollution on soil microbial activity. On the other hands, application of organic amendments to saline soils or toxic metal-polluted soils may alleviate the negative consequences of these two abiotic stresses on soil microbial activity and population.

Materials and Methods: This study was conducted under controlled laboratory conditions at Shahrekord University. The aim of this study was to investigate the effects of salinity and plant residue as an organic amendment on enzyme activity, substrate-induced respirations (SIR), and concentrations of soluble elements in a calcareous soil polluted with cadmium (Cd) over a three-month incubation experiment. A factorial experiment with two levels of cadmium (0 and 30 mg kg^{-1}), three levels of salinity (1.35, 7.5 and 15 dS m^{-1}) and plant residue treatments (with and without alfalfa residue) was conducted using a completely randomized design with four replications. Using cadmium chloride salt, the soil was contaminated, and subsequently amended with alfalfa residue (1%, w/w). After thorough mixing of soil and plant residue, salinity treatments were applied using NaCl salt. To reactivate the microbial population and for the aging effect, soil moisture was set at 70% of field capacity, and containers were pre-incubated at room temperature for 4 weeks. The samples were then incubated at 25±1 ^{o}C for 98 days.

Results: Increasing salinity levels resulted in a reduction in soil enzyme activity and SIR, and a decline in the concentrations of soluble Ca, Mg and K. The harmful impact of soil salinity on microbial properties (about 20% and 50% decline in invertase and phosphomonoesterase activities, respectively) was much greater in Cd-polluted soils than unpolluted soils.

Conclusion: Results indicated that addition of plant residue reduced the negative impacts of salinity and Cd pollution stresses on soil microbial and enzyme activity, and that resulted in increases in the concentrations of water soluble elements. The findings of the current study confirmed that application of adequate organic amendments can decrease Cd toxicity, enhance substrate availability and maintain soil microbial and enzyme activity in saline and polluted soils with substrate limitation.

Keywords: Abiotic stress, Cadmium availability, Enzyme activity, Organic amendments, Salinity

* Corresponding Author; Email: el.sadeghi70@gmail.com