اثر متقابل شوری و آلودگی بر کادمیم قابل جذب و فعالیت آنزیمی یک خاک آهکی تیمار شده با بقایای گیاهی

الهام صادقی*، فایز رئیسی و علیرضا حسین‌پور[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۱۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۶/۱۹)

چکیده

تنش‌های غیرزیستی مانند شوری و آلودگی به‌صورت انفرادی تأثیر منفی بر فعالیت‌های آنزیمی خاک دارند درحالی که مصرف مواد آلی باعث تعدیل اثرات این تنش‌ها بر فعالیت آنزیمی خاک خواهد شد. با این وجود، اثر همزمان و مشترک این گونه تنش‌ها بر شرایط بیوشیمیایی خاک و نقش مواد آلی بر این برهم‌کنش‌ها مشخص نیست. هدف این پژوهش مطالعه اثر متقابل تنش‌های شوری NaCl و آلودگی کادمیم بر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، فسفاتاز قلیایی، آریل سولفاتاز و هیدرولیز فلورسین دی‌استات در یک خاک آهکی آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی طی سه ماه انکوباسیون بود. آزمایش به‌صورت فاکتوریل با دو سطح کادمیم، سه سطح شوری و دو تیمار بقایای گیاهی در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار و در شرایط آزمایشگاهی اجرا شد. نتایج نشان داد افزایش سطح شوری در خاک‌های آلوده و غیرآلوده افزایش کادمیم قابل جذب و کاهش فعالیت آنزیمی را به‌همراه داشت. با این وجود، افزودن ماده آلی آثار مخرب شوری و آلودگی بر فعالیت آنزیمی خاک را کاهش داد. این مطالعه نشان می‌دهد در خاک‌های آلوده شور با محدودیت فراوان کربن، مصرف مواد آلی اصلاحی به‌منظور تقویت ماده آلی خاک غلظت کادمیم قابل دسترس و اثرات شوری را کاهش و در نتیجه فعالیت آنزیمی خاک را افزایش می‌دهد. به‌طور خلاصه، این پژوهش نشان داد که اثر مشترک نمک NaCl و کادمیم بر فعالیت آنزیمی خاک در غیاب بقایای گیاهی اغلب سینرژیسمی ولی در حضور بقایای گیاهی آنتاگونیسمی است.

واژه‌های کلیدی: اثر متقابل، آلودگی، زیست‌فراهمی فلز، شوری، فعالیت آنزیمی

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: el.sadeghi70@gmail.com

مقدمه

بخش قابل توجهی از اکوسیستم‌های طبیعی و زراعی دنیا تحت تنش شوری قرار دارند. طبق تخمین FAO در سطح جهان بیش از ۸۳۰ میلیون هکتار از زمین‌های زراعی شور هستند (۲۸). اکثر مطالعات مربوط به‌ویژگی‌های بیولوژیک در خاک‌های شور، بیانگر کاهش فعالیت آنزیم‌ها هستند (۱۱، ۱۳، ۱۷، ۲۶ و ۲۷). آنزیم‌های خاک عوامل اصلی و پایه‌ای فرایندهای بیولوژیکی خاک محسوب می‌شوند (۲۱) و با وجود مقادیر کم نقش قابل ملاحظه‌ای در کنترل چرخه عناصر غذایی مهم (نیتروژن، کربن، فسفر و گوگرد) دارند (۲۵). شوری سبب کاهش فعالیت آنزیمی خاک مانند فسفاتاز قلیایی (۱۳ و ۲۶)، آریل سولفاتاز (۲۸)، کاتالاز (۱۴)، و سایر آنزیم‌های خاک (۹، ۱۳، ۲۶ و ۲۸) شد. علاوه بر این، تنش ناشی از آلودگی و سمیت فلزات سنگین نیز در اغلب کشورهای صنعتی و پیشرفته از معضلات جدی زیست‌محیطی است که رشد و فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۳ و ۹). نتایج اکثر پژوهش‌ها حاکی است کادمیم تأثیر منفی بر فعالیت آنزیمی خاک دارد (۳، ۸، ۱۰ و ۱۵). لورنز و همکاران (۲۱) در آزمایشی با افزودن مقادیر ۳۴ و ۱۳۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم اثر این عنصر را بر فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز قلیایی، آریل سولفاتاز، پروتئاز و زایلاناز، اوره‌آز و اینورتاز بررسی کردند. کادمیم باعث کاهش قابل توجهی (۷۰ درصد) در فعالیت آنزیم‌های پروتئاز و اوره‌آز، فسفاتاز قلیایی و آریل سولفاتاز شد. از سوی دیگر، مطالعات ثابت کرده‌اند که افزایش سطح ماده آلی خاک در نتیجه کاربرد کودهای آلی می‌تواند تنش شوری (۱، ۵، ۱۷ و ۳۰) و دسترسی آلاینده‌ها و فلزات سنگین (۱، ۲۳ و ۳۰) را برای گیرنده‌های زیستی کاهش دهد. مادجون و همکاران (۲۲) اثر افزودن بقایای آلی در دو خاک رسی و شنی حاوی مقادیر متفاوت از عناصر سمی را بررسی و دریافتند که افزودن ماده آلی باعث افزایش فعالیت آنزیمی خاک می‌شود. نتایج پژوهش‌ها پیشین حاکی است ماده آلی اثر منفی شوری و آلودگی کادمیم را کاهش می‌دهد. با این وجود در پژوهش‌های گذشته برهم‌کنش دو جانبه شوری و آلودگی و همچنین برهم‌کنش سه جانبه آلودگی، شوری و ماده آلی به‌طور همزمان بر فعالیت آنزیمی خاک به‌طور کامل مورد بررسی و توجه قرار نگرفته است. برهم‌کنش شوری، آلودگی و ماده آلی می‌تواند تأثیر متفاوتی بر فعالیت آنزیمی خاک داشته باشند. از این‌رو با توجه به اهمیت ماده آلی و تنش شوری و آلودگی کادمیم بر فعالیت میکروبی و افزایش روز افزون این تنش‌ها و کاهش ماده آلی خاک‌های کشاورزی بر اساس مدیریت نامناسب، این پژوهش با هدف اثر متقابل شوری و آلودگی بر کادمیم قابل جذب و فعالیت آنزیمی در یک خاک آهکی تیمار شده با بقایای گیاهی انجام گرفت. در واقع سوال پژوهش عبارت است: آیا اثر همزمان یا مشترک تنش های شوری و آلودگی بر فعالیت آنزیمی خاک بزرگ‌تر از مجموع اثر آنها به‌تنهایی خواهد بود و اینکه مصرف ماده آلی چگونه این اثر مشترک را تغییر خواهد داد؟

مواد و روش‌ها

این پژوهش در آزمایشگاه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل با سه سطح شوری (۱/۳۵ (شاهد)، ۷/۵ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر)، دو سطح آلودگی کادمیم (۰ و ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و دو سطح بقایای گیاهی یونجه (۰ و ۱ درصد) در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در چهار تکرار انجام شد. برای تهیه خاک، ابتدا یک خاک زراعی از اراضی دانشگاه شهرکرد انتخاب، و از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری به‌میزان لازم نمونه‌برداری شد. پس از انتقال به آزمایشگاه و هوا خشک شدن، خاک از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. خاک مورد آزمایش دارای pH=۷/۶، قابلیت هدایت الکتریکی (عصاره اشباع) ۱/۳۵ دسی‌زیمنس بر متر، کربن آلی ۵/۶۹ گرم بر کیلوگرم، کربنات کلسیم معادل ۳۵۰ گرم بر کیلوگرم، نیتروژن کل ۰/۵۴ گرم بر کیلوگرم، جرم مخصوص ظاهری ۱/۳۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و بافت این خاک به روش هیدرومتری لوم رسی بود. کادمیم کل ۱/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم و غلظت کادمیم قابل جذب پس از عصاره‌گیری

نمونه‌ها با DTPA-TEA ۰/۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود.

به‌منظور انجام پژوهش، ۴۰۰ گرم خاک معادل وزن آون خشک (۱۰۵ درجه سانتی‌گراد) برداشت و در ظروف پلاستیکی یک لیتری ریخته شد. ابتدا با استفاده از نمک کلرید کادمیم، خاک مورد مطالعه در دو سطح صفر و ۳۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک آلوده شد. سپس معادل یک درصد وزنی پودر بقایای گیاهی یونجه کاملاً آسیاب شده (یک میلی‌متری) به آن افزوده و محتوی جارها به‌طور 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 NaCl اعمال شد. برای فعال شدن جمعیت میکروبی و برقراری تعادل نسبی، رطوبت مخلوط خاک- بقایای گیاهی- نمک در حد ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه خاک نگهداری شد و جارها چهار هفته در دمای معمولی محیط به حالت پیش انکوباسیون قرار گرفتند. نمونه‌ها در انکوباتور و در دمای ۱±۲۵ درجه سانتی‌گراد 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. طی انکوباسیون کادمیم قابل جذب (۱۸)، آنزیم کاتالاز (۱۹)، آریل سولفاتاز، آلکالین فسفاتاز و هیدرولیز فلورسین دی‌استات (۴) طی سه دوره به فاصله زمانی ۳۰ روز یک بار اندازه‌گیری شدند و میانگین هندسی فعالیت آنزیمی با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد.

میانگین هندسی فعالیت آنزیمی خاک (GME) از ریشه چهارم حاصل‌ضرب فعالیت سه آنزیم اندازه گیری شده و FDA محاسبه شد (۱۲):

$$\sqrt[4]{ALP \times ARY \times CAT \times FDA} \qquad (1)$$

که در آن GME میانگین هندسی فعالیت آنزیمی خاک، ALP فعالیت آنزیم آلکالین فسفاتاز، ARY فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز، CAT فعالیت آنزیم کاتالاز، FDA فعالیت هیدرولیز فلورسین دی‌استات است.

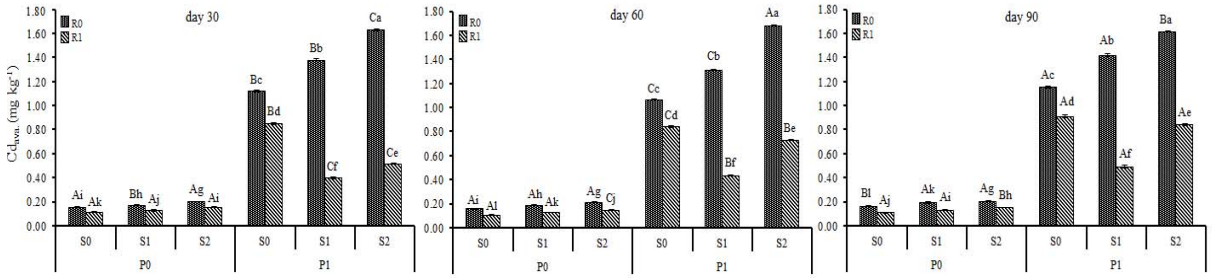
در پایان تجزیه واریانس داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال ۰/۰۵= α با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. در این آزمایش برای تعیین نوع و ماهیت اثرات متقابل (سینرژیسمی و آنتاگونیسمی) بین شوری و آلودگی از مدل مستقل بلیس (Bliss independence model) استفاده شد (۱۶ و ۳۱).

معادله بلیس $(Ysp)_p = (Ys + Yp) - (Ys \times Yp)$ که در آن $(Ysp)_p$ اثرات مشترک پیش‌بینی شده در حضور هر دو تنش شوری و آلودگی، Ys اثر مشاهده شده در حضور تنش شوری به‌تنهایی و Yp اثر مشاهده شده در حضور تنش آلودگی به تنهایی است. در این مدل چنانچه اثر مشترک مشاهده شده $(Ysp)_O$ بزرگ‌تر از اثر مشترک پیش‌بینی شده $(Ysp)_P$ باشد، بین دو تنش رابطه سینرژیسمی (Bliss synergism) وجود دارد درحالی که $(Ysp)_O$ کوچک‌تر از $(Ysp)_P$ باشد به این رابطه آنتاگونیسمی (Bliss antagonism) گفته می‌شود، در غیر این صورت اثرات مشترک دو تنش مستقل یا جمع‌پذیر (Additive) خواهد بود.

نتایج و بحث

کادمیم قابل جذب ($Cd_{ava.}$)

اثر اصلی شوری، آلودگی و ماده آلی و برهم‌کنش دو جانبه شوری × آلودگی، شوری × ماده آلی و آلودگی × ماده آلی و همچنین برهم‌کنش سه جانبه شوری × آلودگی × ماده آلی بر کادمیم قابل جذب معنی‌دار ($p<0/001$) شد اما اثر دو جانبه شوری و ماده آلی غیر معنی‌دار ($p>0/05$) بود (نتایج گزارش نشده‌اند). در خاک غیرآلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون باعث افزایش ۳۰، ۴۰ و ۳۱ درصدی کادمیم قابل جذب نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) به‌ترتیب طی ماه اول، دوم و سوم شد (شکل ۱). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر باعث افزایش بیشتر (به‌ترتیب ۷۵، ۸۰ و ۶۲ درصدی طی ماه اول، دوم و سوم) کادمیم قابل جذب نسبت به تیمار شاهد (غیرآلوده غیرشور) شد (شکل ۱). در خاک آلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر کادمیم قابل جذب خاک را



شکل ۱. اثر بقایای گیاهی، آلودگی کادمیم و شوری بر غلظت کادمیم قابل جذب ($Cd_{ava.}$) (n=4) طی آزمایش. 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، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند. خطای معیار به‌صورت خطوط عمودی نشان داده شده است.

به‌ترتیب ۱۴، ۲۲ و ۲۲ درصد در مقایسه با خاک شاهد (آلوده غیرشور) طی ماه اول، دوم و سوم آزمایش افزایش داد و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون سبب افزایش بیشتر کادمیم قابل جذب (به‌ترتیب ۲۶، ۳۸ و ۳۷ درصد) نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۱). بررسی نتایج حاصل از معادله بلیس نشان داد اثر مشترک شوری و آلودگی بر کادمیم قابل جذب در خاک تیمار نشده با بقایای گیاهی در هر دو سطح شوری معمولاً سینرژیسمی بوده است (نتایج گزارش نشده است). به عبارت دیگر شوری اثر کادمیم را تحریک کرده و غلظت کادمیم قابل جذب در خاک با افزایش شوری افزایش یافت. همین‌طور در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه دوره آزمایش به‌ترتیب افزایش ۹، ۹ و ۱۸ درصدی کادمیم قابل جذب را نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) طی ماه اول، دوم و سوم به همراه داشت (شکل ۱). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه اول، دوم و سوم انکوباسیون به‌ترتیب باعث افزایش ۴۵، ۲۷ و ۳۶ درصدی کادمیم قابل جذب نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) شد (شکل ۱). نتایج نشان می‌دهد در حضور ماده آلی نیز با افزایش سطح شوری، فراهمی کادمیم قابل جذب نیز افزایش می‌یابد و افزایش کادمیم قابل جذب در شوری‌های بالا بیشتر از شوری‌های پایین بود. کلر ناشی از نمک NaCl از طریق تشکیل کمپلکس پایدار با کادمیم فراهمی، جذب و حلالیت آن را در خاک افزایش می‌دهد (۱ و ۲).

در خاک آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر میزان کادمیم قابل جذب خاک را طی ماه‌های اول، دوم و سوم انکوباسیون به‌ترتیب ۳۰، ۶۶ و ۶۸ درصد نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) افزایش داد و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انجام آزمایش افزایش بیشتر (به‌ترتیب ۱۱۲، ۹۱ و ۸۲ درصد طی ماه اول، دوم و سوم) کادمیم قابل جذب نسبت به تیمار شاهد را به همراه داشت (شکل ۱). نتایج حاکی است در تیمارهای با بقایای گیاهی و بدون بقایای گیاهی، شوری سبب افزایش غلظت کادمیم قابل جذب در خاک آلوده می‌شود (شکل ۱). نتایج معادله بلیس نیز این یافته را تأیید می‌کند (نتایج گزارش نشده است). بنابراین مصرف ماده آلی منجر به تغییر نوع اثر متقابل بین شوری و آلودگی کادمیم از حالت سینرژیسمی در غیاب ماده آلی به حالت آنتاگونیسمی شد (نتایج گزارش نشده است). مصرف مواد آلی با جذب و غیرمتحرک ساختن کادمیم سبب محدود شدن حلالیت و زیست‌فراهمی آن می‌شود و بدین ترتیب کاربرد مواد اصلاحی آلی می‌تواند نقش مهمی در کاهش سمیت فلزات سمی خاک‌های آلوده تحت تنش شوری داشته باشد (۱ و ۳۰).

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرات اصلی آلودگی کادمیم، شوری و بقایای گیاهی و اثرات متقابل بین آنها (بین گروهی)، اثر زمان و اثر متقابل زمان (درون گروهی) بر فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT)، فسفاتاز قلیایی (ALP)، آریل سولفاتاز (ARY)، هیدرولیز فلورسین دی‌استات (FDA) و میانگین هندسی فعالیت آنزیمی (GME)

منبع تغییرات	CAT	ALP	ARY	FDA	GME
Between-Subjects Effects					
Pollution (P)	۳۴۵ ***(۰/۹۱)	۴۳/۶***(۰/۹۷)	۰/۱۲***(۰/۹۹)	۰/۰۰۳***(۰/۹۱)	۱/۸۶***(۰/۹۹)
Salinity (S)	۴۶۷***(۰/۹۶)	۴۰/۶***(۰/۹۸)	۰/۱۴***(۱/۰۰)	۰/۰۰۶***(۰/۹۸)	۲/۲۳***(۱/۰۰)
Residue (R)	۲۸۵۱***(۰/۹۹)	۲۳۳***(۰/۹۹)	۱/۳۱***(۱/۰۰)	۰/۰۵***(۰/۹۹)	۱۷/۴***(۱/۰۰)
P×S	۱۰/۶***(۰/۳۷)	۱/۷۰***(۰/۶۷)	۰/۰۰۱***(۰/۷۷)	۳×۱۰$^{-۵*}$(۰/۲۱)	۰/۰۱***(۰/۷۰)
P×R	۲/۳۱* (۰/۷۹)	۰/۲۹***(۰/۱۷)	۰/۰۰۱^{ns}(۰/۰۵)	۱×۱۰$^{-۵ns}$(۰/۰۴)	۰/۰۰۱^{ns}(۰/۰۴)
S×R	۱۰/۷*** (۰/۳۸)	۴/۰۶***(۰/۸۵)	۰/۰۱***(۰/۸۱)	۲×۱۰$^{-۵ns}$(۰/۱۳)	۰/۰۱***(۰/۵۳)
P×S×R	۱۴/۴***(۰/۴۵)	۲/۴۶***(۰/۷۷)	۰/۰۰۲***(۰/۸۷)	۱×۱۰$^{-۵ns}$(۰/۰۸)	۰/۰۴***(۰/۸۸)
Error	۰/۹۹	۰/۰۹	۲×۱۰$^{-۵}$	۸×۱۰$^{-۶}$	۳×۱۰$^{-۴}$
(٪) C.V.	۱/۸۱	۳/۱۷	۱/۰۸	۱/۸۰	۰/۷۵
Within-Subjects Effects					
Time (T)	۵۶۵***(۰/۹۹)	۴۱۳***(۱/۰۰)	۲/۰۳***(۱/۰۰)	۰/۰۳***(۰/۹۹)	۱۸/۶***(۱/۰۰)
T×P	۱/۹۰***(۰/۳۸)	۰/۲۷***(۰/۵۰)	۰/۰۰۵***(۰/۹۱)	۰/۰۰۱***(۰/۳۵)	۰/۰۱***(۰/۵۸)
T×S	۰/۴۱ **(۰/۲۱)	۰/۵۷ ***(۰/۸۱)	۰/۰۲***(۰/۹۹)	۶×۱۰$^{-۵**}$(۰/۲۳)	۰/۰۴***(۰/۹۱)
T×R	۸/۱۷***(۰/۷۲)	۰/۵۲***(۰/۶۷)	۰/۱۲***(۱/۰۰)	۰/۰۰۱***(۰/۶۳)	۰/۲۰***(۰/۹۶)
T×P×S	۳/۸۱***(۰/۷۱)	۰/۰۳**(۰/۲۰)	<۰/۰۰۱***(۰/۵۸)	۲×۱۰$^{-۵ns}$(۰/۰۹)	۰/۰۰۱**(۰/۲۰)
T×P×R	۲/۴۹***(۰/۴۵)	۰/۲۲***(۰/۴۶)	۰/۰۰۲***(۰/۷۷)	۹×۱۰$^{-۶ns}$(۰/۲۱)	۰/۰۱***(۰/۴۲)
T×S×R	۲/۰۷***(۰/۵۷)	۰/۱۱*** (۰/۴۶)	۰/۰۰۱***(۰/۸۱)	۶×۱۰$^{-۵}$ **(۰/۲۳)	۰/۰۰۴***(۰/۴۵)
T×P×S×R	۱/۰۹***(۰/۴۱)	۰/۷۸***(۰/۸۶)	<۰/۰۰۱***(۰/۵۶)	۲×۱۰$^{-۵ns}$(۰/۰۸)	۰/۰۰۴***(۰/۴۶)
Error (Time)	۰/۰۹	۰/۰۷	۲×۱۰$^{-۵}$	۱×۱۰$^{-۵}$	۲×۱۰$^{-۴}$
(٪) C.V.	۰/۵۵	۲/۸۱	۰/۹۸	۲/۱۵	۰/۶۴

اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده Eta^2 جزئی (SS_{effect}/ (SS_{effect} + SS_{error})) هستند. ^{ns}، *، **، *** به‌ترتیب به مفهوم غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح ۵، ۱، ۰/۱ درصد است. (C.V.) ضریب تغییرات.

آنزیم کاتالاز (CAT)

اثر اصلی شوری، آلودگی و ماده آلی و برهم‌کنش دوجانبه شوری × آلودگی و شوری × ماده آلی و همچنین برهم‌کنش سه جانبه شوری × آلودگی × ماده آلی در سطح P<۰/۰۰۱ و برهم‌کنش دو جانبه شوری و ماده آلی در سطح P<۰/۰۵ بر فعالیت آنزیم کاتالاز معنی‌دار شد (جدول ۱). در خاک غیرآلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون باعث کاهش ۵، ۶ و ۴ درصدی فعالیت آنزیم کاتالاز نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) به‌ترتیب طی ماه اول، دوم و سوم شد (جدول ۲). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب باعث کاهش ۷، ۸ و ۷ درصدی فعالیت آنزیم کاتالاز طی سه ماه انکوباسیون نسبت به تیمار شاهد (غیرآلوده غیرشور) شد (جدول ۲). در خاک آلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر فعالیت

جدول ۲. اثر شوری، آلودگی کادمیم و بقایای گیاهی بر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز (CAT) و فسفاتاز قلیایی (ALP).

بقایای گیاهی	کادمیم ($g\ kg^{-1}$)	شوری ($dS\ m^{-1}$)	زمان نمونه برداری (روز) ۳۰	۶۰	۹۰
Catalase activity ($\mu mol\ O_2\ g^{-1}\ 24h^{-1}$)					
بدون بقایای گیاهی	۰	۱/۳۵	۵۸/۱±۰/۱۷^{Ae}	۵۴/۱±۰/۰۹^{Be}	۵۱/۰±۰/۰۵^{Cf}
		۷/۵	۵۵/۴±۰/۱۳^{Ag}	۵۱/۱±۰/۱۹^{Bg}	۴۸/۷±۰/۱۲^{Cg}
		۱۵	۵۳/۹±۰/۲۳^{Ah}	۴۹/۶±۰/۲۲^{Bh}	۴۷/۵±۰/۳۶^{Cg}
	۳۰	۱/۳۵	۵۶/۷±۰/۲۴^{Af}	۵۲/۴±۰/۲۹^{Bf}	۴۹/۸±۰/۲۴^{Cfg}
		۷/۵	۵۲/۵±۰/۲۰^{Ai}	۴۷/۴±۰/۵۳^{Bi}	۴۴/۳±۰/۲۴^{Ch}
		۱۵	۵۱/۱±۰/۳۳^{Aj}	۴۴/۱±۰/۹۰^{Bj}	۴۰/۸±۰/۷۸^{Ci}
با بقایای گیاهی	۰	۱/۳۵	۶۸/۲±۰/۲۸^{Aa}	۶۴/۵±۰/۳۰^{Ba}	۶۲/۱±۰/۴۴^{Ca}
		۷/۵	۶۲/۹±۰/۲۸^{Ac}	۵۷/۶±۰/۲۸^{Bc}	۵۵/۲±۰/۲۸^{Cc}
		۱۵	۶۱/۰±۰/۳۷^{Ad}	۵۹/۱±۰/۲۷^{Bd}	۵۶/۵±۰/۰۷^{Cd}
	۳۰	۱/۳۵	۶۴/۷±۰/۵۵^{Ab}	۶۱/۲±۰/۷۲^{Bb}	۵۸/۷±۰/۴۵^{Bb}
		۷/۵	۵۹/۷±۰/۲۴^{Ade}	۵۶/۵±۰/۲۱^{Bd}	۵۴/۲±۰/۲۲^{Cd}
		۱۵	۵۸/۹±۰/۱۵^{Ae}	۵۵/۱±۰/۲۶^{Be}	۵۲/۵±۰/۳۵^{Ce}
Alkaline phosphatase ($\mu mol\ p\text{-}nitrophenol\ g^{-1}\ h^{-1}$)					
بدون بقایای گیاهی	۰	۱/۳۵	۱۲/۳±۰/۱۱^{Acd}	۷/۸۰±۰/۰۳^{Bcd}	۶/۹۴±۰/۰۵^{Cc}
		۷/۵	۱۲/۳±۰/۱۲^{Acd}	۷/۷۰±۰/۰۸^{Bcd}	۶/۴۰±۰/۰۶^{Ccd}
		۱۵	۱۱/۶±۰/۰۸^{Ad}	۷/۳۰±۰/۰۸^{Bcd}	۶/۱۳±۰/۰۶^{Ccd}
	۳۰	۱/۳۵	۱۲/۳±۰/۱۷^{Acd}	۷/۷۰±۰/۰۹^{Bcd}	۶/۴۴±۰/۰۶^{Ccd}
		۷/۵	۱۰/۶±۰/۱۳^{Ade}	۶/۵۰±۰/۰۰^{Bd}	۵/۴۰±۰/۰۴^{Cd}
		۱۵	۹/۴۰±۰/۰۷^{Ae}	۵/۹۰±۰/۰۷^{Bd}	۴/۹۹±۰/۰۵^{Cd}
با بقایای گیاهی	۰	۱/۳۵	۱۶/۷±۰/۰۸^{Aa}	۱۱/۵±۰/۰۳^{Ba}	۱۰/۰±۰/۰۴^{Ca}
		۷/۵	۱۳/۹±۰/۲۰^{Abc}	۹/۳۰±۰/۰۱^{Bb}	۸/۴۰±۰/۰۶^{Cb}
		۱۵	۱۳/۷±۰/۲۷^{Abc}	۹/۷۰±۰/۰۴^{Bbc}	۸/۶۰±۰/۰۶^{Cb}
	۳۰	۱/۳۵	۱۴/۷±۰/۲۵^{Ab}	۱۰/۵±۰/۰۸^{Bd}	۹/۰۰±۰/۰۷^{Ca}
		۷/۵	۱۳/۳±۰/۰۹^{Ac}	۸/۷۰±۰/۰۴^{Bbc}	۷/۵۰±۰/۱۰^{Cbc}
		۱۵	۱۲/۷±۰/۰۹^{Acd}	۸/۳۰±۰/۰۶^{Bc}	۶/۷۰±۰/۰۵^{Ccd}

اعداد میانگین (n=۴) به همراه خطای معیار (SE) هستند. در هر ستون میانگین‌های دارای حروف کوچک مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند. در هر ردیف میانگین‌های دارای حروف بزرگ مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد بین زمان‌های مختلف بر اساس آزمون LSD هستند.

آنزیم کاتالاز خاک را به‌ترتیب ۷، ۱۰ و ۱۱ درصد در مقایسه با شاهد (خاک آلوده غیرشور) طی ماه اول، دوم و سوم آزمایش کاهش داد و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انجام آزمایش به‌ترتیب باعث کاهش ۱۰، ۱۶ و ۱۸ درصدی فعالیت آنزیم کاتالاز نسبت به تیمار شاهد طی انکوباسیون شد (جدول ۲). طبق نتایج معادله بلیس اثر مشترک شوری و آلودگی بر فعالیت آنزیم کاتالاز در خاک تیمار نشده با بقایای گیاهی در شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه‌های اول و سوم سینرژیسمی و طی ماه دوم مستقل بود و در شوری ۱۵ دسی‌زینمس بر متر طی سه ماه هم‌کرداری (سینرژیسمی) است (جدول ۳). این نشان می‌دهد که شوری اثر کادمیم را تحریک کرده است و به‌دلیل افزایش مقدار کادمیم قابل جذب در خاک فعالیت آنزیم کاتالاز کاهش یافته است. در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه دوره آزمایش کاهش ۸، ۱۱ و ۱۱ درصدی فعالیت آنزیم کاتالاز را نسبت به خاک شاهد (غیرشور غیرآلوده) به‌ترتیب طی ماه اول، دوم و سوم به همراه داشت و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر باعث کاهش ۱۱، ۸ و ۹ درصدی فعالیت آنزیم کاتالاز نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) طی ماه اول، دوم و سوم انکوباسیون شد (جدول ۲). در خاک آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز خاک را طی سه ماه انکوباسیون ۸ درصد نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) کاهش داد و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه‌های اول، دوم و سوم انکوباسیون به‌ترتیب منجر به کاهش ۹، ۱۰ و ۱۱ درصدی فعالیت آنزیم کاتالاز نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۲).

نتایج نشان می‌دهد در حضور ماده آلی با افزایش سطح شوری فعالیت آنزیم کاتالاز کاهش می‌یابد و اینکه کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز در شوری‌های بالا بیشتر از شوری‌های پایین بود (جدول ۲). حمید و همکاران (۱۴) نیز نشان دادند که با افزایش سطح شوری فعالیت آنزیم کاتالاز کاهش می‌یابد. این نتایج حاکی است که حضور ماده آلی در تیمار آلوده و غیرآلوده کاهش کمتر فعالیت آنزیم کاتالاز را به همراه داشته است. طبق معادله بلیس اثر متقابل شوری و آلودگی بر فعالیت آنزیم کاتالاز در خاک تیمار شده با بقایای گیاهی در شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه دوم و سوم آنتاگونیسمی و طی ماه اول مستقل شد و در شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون مستقل بود (جدول ۳). نتایج نشان داد که بین غلظت کادمیم قابل جذب و فعالیت آنزیم کاتالاز همبستگی منفی و معنی‌دار ($r= -۰/۶۲$ ،$p<۰/۰۱$) وجود داشت. بنابراین، تغییرات فعالیت آنزیم کاتالاز بر اثر شوری به‌دلیل تغییرات غلظت کادمیم قابل جذب خاک است و مصرف مواد آلی می‌تواند اثرات سینرژیسمی دو تنش شوری و آلودگی را به‌ویژه در پایان انکوباسیون کاهش و اغلب به شکل آنتاگونیسمی تغییر دهد (جدول ۳). اضافه کردن مواد آلی در خاک‌های آلوده از طریق افزایش کربن محلول فعالیت آنزیمی خاک را افزایش می‌دهد (۲۹).

آنزیم فسفاتاز قلیایی (ALP)

اثر اصلی شوری، آلودگی و ماده آلی و برهم‌کنش دو جانبه شوری × آلودگی، شوری × ماده آلی و آلودگی × ماده آلی و همچنین برهم‌کنش سه جانبه شوری × آلودگی × ماده آلی بر فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی معنی‌دار ($P<۰/۰۰۱$) بود (جدول ۱). در خاک غیرآلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه دوم و سوم انکوباسیون باعث کاهش غیرمعنی‌دار (به‌ترتیب ۱ و ۸ درصد) فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) شد ولی طی ماه اول تغییری نداشت (جدول ۲). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر فعالیت این آنزیم را نسبت به شاهد (غیرآلوده غیرشور) بین ۶ تا ۱۲ درصد کاهش داد (جدول ۲). در خاک آلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی را به‌ترتیب ۱۴، ۱۶ و ۱۶ درصد در مقایسه با خاک شاهد (آلوده غیرشور) طی ماه اول، دوم و سوم آزمایش کاهش داد (جدول ۲). شوری ۱۵

جدول ۳. ماهیت نوع اثرات متقابل شوری و آلودگی بر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز (CAT) و فسفاتاز قلیایی (ALP) محاسبه شده بر اساس معادله مستقل بلیس در خاک‌های تیمار نشده (R0) و تیمار شده (R1) با بقایای گیاهی

شوری ($dS\ m^{-1}$)	تیمار	۳۰ روز		۶۰ روز		۹۰ روز	
		W۰	W۱	W۰	W۱	W۰	W۱
		CAT					
۷/۵	S	−۴/۷۶	−۷/۷۳	−۵/۵۳	−۱۰/۶	−۴/۵۵	−۱۱/۲
	P	−۲/۴۵	−۵/۱۰	−۳/۰۵	−۵/۱۹	−۲/۲۸	−۵/۶۰
	$(PS)_O$	−۹/۷۵	−۱۰/۵	−۱۲/۳	−۸/۳۰	−۱۳/۰	−۹/۱۲
	$(PS)_P$	−۷/۱۰	−۱۲/۴	−۸/۴۱	−۱۵/۳	−۶/۷۲	−۱۶/۲
	$CI_{95\%}$	۱/۰۸	۱/۷۱	۳/۱۰	۱/۴۱	۱/۵۳	۱/۴۶
	t-statistic	۴/۸۷	−۱/۱۴	۲/۶۶	−۳/۹۸	۱۲/۷	−۶/۸۰
	p-statistic	۰/۰۰۸	۰/۳۱۸	۰/۰۵۶	۰/۰۱۶	<۰/۰۰۱	۰/۰۰۲
	Interaction	SYN	ADD	ADD	ANT	SYN	ANT
۱۵	S	−۷/۲۱	−۱۲/۴	−۸/۱۷	−۱۲/۴	−۶/۸۳	−۱۲/۷
	P	−۲/۴۵	−۵/۱۰	−۳/۰۵	−۵/۱۹	−۲/۲۸	−۵/۶۰
	$(PS)_O$	−۱۲/۱	−۱۳/۶	−۱۸/۳	−۱۴/۵	−۱۹/۹	−۱۵/۴
	$(PS)_P$	−۹/۵۰	−۱۶/۸	−۱۰/۹	−۱۷/۰	−۸/۹۵	−۱۷/۶
	$CI_{95\%}$	۱/۸۲	۰/۶۸	۲/۷۶	۱/۲۶	۰/۹۷	۱/۸۰
	t-statistic	۲/۹۱	−۲/۳۷	۵/۹۳	−۱/۵۱	۲۳/۱	−۱/۴۸
	p-statistic	۰/۰۴۴	۰/۰۷۷	۰/۰۰۴	۰/۲۰۶	<۰/۰۰۱	۰/۲۱۲
	Interaction	SYN	ADD	SYN	ADD	SYN	ADD
		ALP					
۷/۵	S	−۰/۲۶	−۱۶/۷	−۱/۲۴	−۱۹/۳	−۸/۱۹	−۱۶/۵
	P	−۰/۰۹	−۱۲/۰	−۰/۲۴	−۹/۰۰	−۷/۱۲	−۱۰/۷
	$(PS)_O$	−۱۴/۲	−۱۸/۳	−۱۶/۲	−۱۵/۱	−۲۲/۰	−۱۵/۲
	$(PS)_P$	−۰/۳۵	−۲۶/۷	−۱/۴۸	−۲۶/۶	−۱۴/۷	−۲۵/۴
	$CI_{95\%}$	۳/۱۷	۴/۷۹	۰/۴۷	۰/۴۱	۲/۱۵	۲/۰۶
	t-statistic	۸/۸۷	−۳/۰۶	۳۰/۲	−۱۷/۸	۵/۱۷	۸/۷۴
	p-statistic	<۰/۰۰۱	۰/۰۲۲	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	<۰/۰۰۱
	Interaction	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	ANT
۱۵	S	−۵/۸۰	−۲۰/۵	−۵/۸۸	−۲۴/۹	−۱۱/۷	−۲۶/۱
	P	−۰/۰۹	−۱۲/۰	−۰/۲۴	−۹/۰۰	−۷/۱۲	−۱۰/۷
	$(PS)_O$	−۲۳/۶	−۲۴/۲	−۲۳/۹	−۲۸/۱	−۲۸/۱	−۳۳/۵
	$(PS)_P$	−۵/۸۸	−۳۰/۱	−۶/۱۲	−۳۱/۷	−۱۷/۹	−۳۴/۰
	$CI_{95\%}$	۲/۱۵	۱/۴۹	۲/۱۹	۰/۸۸	۱/۹۵	۱/۵۰
	t-statistic	۱۴/۸	−۴/۵۹	۱۲/۷	−۶/۹۴	۱۲/۷	−۰/۵۰
	p-statistic	<۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۰/۶۳۳
	Interaction	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	ADD

اعداد میزان تغییرات برحسب درصد نسبت به شاهد {۱۰۰× شاهد/(شاهد− تیمار)} هستند. 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 اثر متقابل، SYN (سینرژیسمی)، ANT (آنتاگونیسمی) و ADD (مستقل).

دسی‌زیمنس بر متر فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی را طی سه ماه انجام آزمایش به‌ترتیب ۲۴، ۲۳ و ۲۳ درصد نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) طی سه ماه انکوباسیون کاهش داد (جدول ۲). بررسی نتایج حاصل از معادله بلیس اثر متقابل شوری و آلودگی کادمیم بر فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی در خاک تیمار نشده با بقایای گیاهی در هر دو سطح شوری هم‌کرداری (سینرژیسمی) بوده است (جدول ۳). همین‌طور در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه دوره آزمایش به‌ترتیب کاهش ۱۷، ۱۹ و ۱۶ درصدی فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی را نسبت به خاک شاهد (غیرشور غیرآلوده) در پی داشت (جدول ۲). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه اول، دوم و سوم انکوباسیون باعث کاهش بیشتر (به‌ترتیب ۱۸، ۱۶ و ۱۴ درصدی) فعالیت این هیدرولاز خاک نسبت به خاک شاهد (غیرشور غیرآلوده) شد (جدول ۲). در خاک آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر میزان فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی خاک را طی ماه‌های اول، دوم و سوم انکوباسیون به‌ترتیب ۱۰، ۱۷ و ۱۷ نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) کاهش داد (جدول ۲). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون به‌ترتیب منجر به کاهش ۱۴، ۲۱ و ۲۶ درصدی فعالیت این آنزیم نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) شد (جدول ۲). طبق معادله بلیس اثر متقابل شوری و آلودگی بر فعالیت آنزیم کاتالاز در خاک تیمار شده با بقایای گیاهی در شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه آنتاگونیسمی شد و در شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه‌های اول و دوم انکوباسیون آنتاگونیسمی و طی ماه سوم مستقل بود (جدول ۳). بنابراین در حضور و یا عدم حضور ماده آلی با افزایش سطح شوری در خاک آلوده و غیرآلوده به کادمیم میزان فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی کاهش می‌یابد و اینکه کاهش فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی در شوری‌های بالا بیشتر از شوری‌های پایین بود. نتایج نشان داد که بین غلظت کادمیم قابل جذب و فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی همبستگی منفی و معنی‌دار ($p<0/01$، $r=-0/62$) وجود داشت. به بیان دیگر کاهش فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی بر اثر شوری به‌دلیل غلظت کادمیم قابل جذب است. مادجون و همکاران (۲۲) با افزودن مواد آلی به خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مشاهده کردند که فعالیت آنزیم فسفاتاز افزایش یافت و علت این افزایش را رشد جمعیت میکروبی مقاوم به عناصر سمی بر اثر افزودن مواد آلی عنوان کرد.

آنزیم آریل سولفاتاز (ARY)

داده‌های این مطالعه نشان دادند تمامی آثار اصلی و متقابل مورد بررسی به‌جز اثر دو جانبه آلودگی × ماده آلی معنی‌دار ($P<0/001$) بود (جدول ۱). در خاک غیرآلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه دوره آزمایش کاهش ۱۹، ۱۹ و ۱۹ درصدی آنزیم آریل سولفاتاز نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) را طی ماه اول، دوم و سوم به همراه داشت و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون باعث کاهش بیشتر (به‌ترتیب ۲۹، ۳۱ و ۲۸ درصدی) آنزیم آریل سولفاتاز نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۴). در خاک آلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون به‌ترتیب باعث افزایش ۳۲، ۳۰ و ۲۴ درصدی فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز نسبت به خاک شاهد (آلوده غیر شور) طی ماه اول، دوم و سوم شد (جدول ۴). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون سبب کاهش بیشتر (به‌ترتیب ۴۲، ۳۵ و ۲۹ درصدی) فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۴). نتایج نشان داد که بین غلظت کادمیم قابل جذب و فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز همبستگی منفی و معنی‌دار ($p<0/01$، $r=-0/61$) وجود داشت. بنابراین کاهش فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز در این تیمارها می‌تواند به‌دلیل افزایش غلظت کادمیم قابل جذب و میزان سمیت آن برای فعالیت آنزیمی در خاک باشد. نتایج معادله بلیس (جدول ۵) نیز این یافته را تأیید می‌کند. طبق نتایج اثر مشترک شوری و آلودگی بر فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز در خاک تیمار نشده با بقایای

جدول ۴. اثر شوری، آلودگی کادمیم و بقایای گیاهی بر فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز (ARY) و هیدرولیز فلورسین دی‌استات (FDA)

بقایای گیاهی	کادمیم ($g\ kg^{-1}$)	شوری ($dS\ m^{-1}$)	زمان نمونه برداری (روز) ۳۰	۶۰	۹۰
			ARY ($\mu mol\ p\text{-}nitrophenol\ g^{-1}\ h^{-1}$)		
بدون بقایای گیاهی	۰	۱/۳۵	۰/۵۹±۰/۰۰۲^{Ag}	۰/۲۶±۰/۰۰۲^{Bg}	۰/۲۱±۰/۰۰۲^{Cg}
		۷/۵	۰/۴۸±۰/۰۰۰^{Ai}	۰/۲۱±۰/۰۰۲^{Bi}	۰/۱۷±۰/۰۰۲^{Ci}
		۱۵	۰/۴۲±۰/۰۰۰^{Aj}	۰/۱۸±۰/۰۰۰^{Bj}	۰/۱۵±۰/۰۰۳^{Cj}
	۳۰	۱/۳۵	۰/۵۴±۰/۰۰۰^{Ah}	۰/۲۳±۰/۰۰۲^{Bh}	۰/۱۷±۰/۰۰۰^{Ch}
		۷/۵	۰/۳۶±۰/۰۰۲^{Ak}	۰/۱۶±۰/۰۰۲^{Bk}	۰/۱۳±۰/۰۰۲^{Ck}
		۱۵	۰/۳۱±۰/۰۰۲^{Al}	۰/۱۵±۰/۰۰۰^{Bl}	۰/۱۲±۰/۰۰۰^{Cl}
با بقایای گیاهی	۰	۱/۳۵	۰/۸۸±۰/۰۰۲^{Aa}	۰/۴۰±۰/۰۰۰^{Ba}	۰/۳۵±۰/۰۰۰^{Ca}
		۷/۵	۰/۷۵±۰/۰۰۲^{Ac}	۰/۳۷±۰/۰۰۰^{Bc}	۰/۳۲±۰/۰۰۳^{Cc}
		۱۵	۰/۷۰±۰/۰۰۲^{Ad}	۰/۳۳±۰/۰۰۰^{Bd}	۰/۲۷±۰/۰۰۰^{Cd}
	۳۰	۱/۳۵	۰/۸۱±۰/۰۰۰^{Ab}	۰/۳۵±۰/۰۰۳^{Bb}	۰/۲۸±۰/۰۰۰^{Cb}
		۷/۵	۰/۶۸±۰/۰۰۲^{Ae}	۰/۳۰±۰/۰۰۲^{Bf}	۰/۲۶±۰/۰۰۰^{Ce}
		۱۵	۰/۶۴±۰/۰۰۳^{Af}	۰/۲۹±۰/۰۰۰^{Be}	۰/۲۴±۰/۰۰۰^{Cf}
			FDA ($\mu mol\ fluorescein\ g^{-1}\ soil\ h^{-1}$)		
بدون بقایای گیاهی	۰	۱/۳۵	۰/۱۹±۰/۰۰۲^{Ag}	۰/۱۴±۰/۰۰۳^{Bf}	۰/۱۴±۰/۰۰۰^{Bd}
		۷/۵	۰/۱۷±۰/۰۰۲^{Ai}	۰/۱۳±۰/۰۰۲^{Bh}	۰/۱۲±۰/۰۰۲^{Cf}
		۱۵	۰/۱۶±۰/۰۰۰^{Aj}	۰/۱۲±۰/۰۰۰^{Bi}	۰/۱۲±۰/۰۰۰^{Bf}
	۳۰	۱/۳۵	۰/۱۷±۰/۰۰۲^{Ah}	۰/۱۴±۰/۰۰۰^{Bg}	۰/۱۴±۰/۰۰۰^{Be}
		۷/۵	۰/۱۵±۰/۰۰۳^{Ak}	۰/۱۲±۰/۰۰۰^{Bj}	۰/۱۲±۰/۰۰۲^{Bi}
		۱۵	۰/۱۴±۰/۰۰۳^{Al}	۰/۱۲±۰/۰۰۰^{Bj}	۰/۱۱±۰/۰۰۲^{Bi}
با بقایای گیاهی	۰	۱/۳۵	۰/۲۳±۰/۰۰۰^{Aa}	۰/۱۸±۰/۰۰۰^{Ba}	۰/۱۷±۰/۰۰۰^{Ca}
		۷/۵	۰/۲۱±۰/۰۰۰^{Ac}	۰/۱۷±۰/۰۰۰^{Bc}	۰/۱۵±۰/۰۰۳^{Cc}
		۱۵	۰/۲۱±۰/۰۰۰^{Ad}	۰/۱۶±۰/۰۰۰^{Bd}	۰/۱۵±۰/۰۰۲^{Cc}
	۳۰	۱/۳۵	۰/۲۲±۰/۰۰۰^{Ab}	۰/۱۷±۰/۰۰۰^{Bb}	۰/۱۷±۰/۰۰۲^{Cb}
		۷/۵	۰/۲۰±۰/۰۰۰^{Ae}	۰/۱۶±۰/۰۰۰^{Bd}	۰/۱۵±۰/۰۰۰^{Cc}
		۱۵	۰/۱۹±۰/۰۰۲^{Af}	۰/۱۵±۰/۰۰۰^{Be}	۰/۱۵±۰/۰۰۰^{Bc}

اعداد میانگین (n=۴) به همراه خطای معیار (SE) هستند. در هر ستون میانگین‌ها دارای حروف کوچک مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند. در هر ردیف میانگین‌ها دارای حروف بزرگ مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد بین زمان‌های مختلف بر اساس آزمون LSD هستند.

جدول ۵. ماهیت نوع اثرات متقابل شوری و آلودگی بر کادمیم بر آریل سولفاتاز (ARY) و هیدرولیز فلورسین دی‌استات (FDA) محاسبه شده بر اساس معادله مستقل بلیس در خاک‌های تیمار نشده (R0) و تیمار شده (R1) با بقایای گیاهی

شوری ($dS\ m^{-1}$)	تیمار	۳۰ روز		۶۰ روز		۹۰ روز	
		W0	W1	W0	W1	W0	W1
		ARY					
۷/۵	S	−۱۸/۸	−۱۴/۸	−۱۹/۲	−۸/۰۷	−۱۹/۱	−۹/۱۱
	P	−۹/۱۱	−۸/۸۳	−۱۱/۳	−۱۳/۸	−۱۶/۲	−۱۹/۰
	$(PS)_O$	−۳۸/۸	−۱۸/۶	−۳۷/۷	−۱۹/۷	−۳۷/۹	−۲۳/۴
	$(PS)_P$	−۲۶/۲	−۲۲/۴	−۲۸/۴	−۲۰/۷	−۳۲/۲	−۲۶/۴
	$CI_{95\%}$	۰/۵۱	۰/۸۱	۲/۰۲	۱/۱۱	۱/۸۰	۱/۶۴
	t-statistic	۲۷/۴	−۹/۶۶	۱۰/۱	−۱/۳۰	۵/۳۹	−۴/۹۲
	p-statistic	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۰/۲۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳
	Interaction	SYN	ANT	SYN	ADD	SYN	ANT
۱۵	S	−۲۹/۲	−۲۲/۹	−۲۹/۰	−۲۴/۳	−۲۷/۳	−۲۶/۷
	P	−۹/۱۱	−۸/۸۳	−۱۱/۳	−۱۳/۸	−۱۶/۲	−۱۹/۰
	$(PS)_O$	−۴۷/۸	−۲۴/۴	−۴۲/۷	−۲۹/۰	−۴۳/۳	−۳۱/۱
	$(PS)_P$	−۳۵/۶	−۲۹/۷	−۳۷/۰	−۳۴/۸	−۳۹/۱	−۴۰/۷
	$CI_{95\%}$	۱/۶۴	۰/۹۶	۰/۴۳	۰/۷۱	۱/۳۸	۰/۷۴
	t-statistic	۲۲/۲	−۱۳/۹	۸/۹۳	−۱۴/۰	۴/۱۵	−۲۴/۶
	p-statistic	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۰/۰۰۶	<۰/۰۰۱
	Interaction	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	ANT
		FDA					
۷/۵	S	−۱۰/۷	−۱۱/۴	−۸/۸۶	−۱۳/۲	−۱۱/۷	−۱۱/۳
	P	−۶/۳۹	−۴/۵۴	−۴/۲۸	−۵/۷۱	−۴/۶۳	−۳/۷۸
	$(PS)_O$	−۱۶/۴	−۶/۹۳	−۱۷/۵	−۱۱/۳	−۱۷/۵	−۱۱/۰
	$(PS)_P$	−۱۶/۴	−۱۳/۱	−۱۲/۸	−۱۳/۹	−۱۵/۸	−۱۳/۶
	$CI_{95\%}$	۱/۷۵	۰/۸۱	۱/۴۵	۱/۴۵	۲/۷۲	۱/۷۸
	t-statistic	۰/۰۶	−۱۲/۷	۷/۱۷	−۴/۱۸	۱/۳۵	−۳/۱۲
	p-statistic	۰/۹۵	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۰/۰۰۶	۰/۲۲۴	۰/۰۲۰
	Interaction	ADD	ANT	SYN	ANT	ADD	ADD
۱۵	S	−۱۳/۳	−۱۱/۴	−۱۳/۴	−۱۳/۲	−۱۴/۱	−۱۱/۳
	P	−۶/۳۹	−۴/۵۴	−۴/۲۸	−۵/۷۱	−۴/۶۳	−۳/۷۸
	$(PS)_O$	−۲۲/۱	−۱۵/۴	−۱۸/۷	−۱۵/۷	−۲۰/۰	−۱۲/۶
	$(PS)_P$	−۱۸/۸	−۱۵/۴	−۱۷/۱	−۱۸/۱	−۱۸/۱	−۱۴/۷
	$CI_{95\%}$	۱/۱۹	۰/۹۳	۲/۰۷	۰/۵۵	۲/۶۳	۲/۷۲
	t-statistic	۶/۳۵	−۰/۱۳	۱/۸۳	−۴/۰۹	۲/۰۴	−۲/۱۴
	p-statistic	<۰/۰۰۱	۰/۸۹	۰/۱۱۷	۰/۰۰۶	۰/۰۸۶	۰/۰۸
	Interaction	SYN	ADD	ADD	ANT	ADD	ADD

اعداد میزان تغییرات برحسب درصد نسبت به شاهد {۱۰۰× شاهد/(شاهد− تیمار)} هستند. 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 اثر متقابل، SYN (سینرژیسمی)، ANT (آنتاگونیسمی) و ADD (مستقل).

گیاهی در هر دو سطح شوری هم‌کرداری (سینرژیسمی) است (جدول ۵).

در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز را به‌ترتیب ۱۵، ۷ و ۹ درصد در مقایسه با خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) طی ماه اول، دوم و سوم آزمایش کاهش داد و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون سبب کاهش ۲۰ تا ۲۳ درصدی فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۴). در خاک آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی شوری ۷/۵ دسی زیمنس بر متر فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز خاک را طی ماه‌های اول، دوم و سوم انکوباسیون به‌ترتیب ۱۶، ۱۴ و ۷ درصد نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) کاهش داد (جدول ۴). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون به‌ترتیب منجر به کاهش ۲۱، ۱۷ و ۱۴ درصدی فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) شد (جدول ۴). این نتایج حاکی است که افزایش ماده آلی خاک می‌تواند اثر شوری را تعدیل کند و یا با ایجاد کمپلکس با کادمیم از درجه سمیت آن بکاهد (جدول ۴). طبق نتایج اثر مشترک شوری و آلودگی بر فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز در خاک تیمار شده با بقایای گیاهی در شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه اول و سوم آنتاگونیسمی و طی ماه اول مستقل بود و در شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه آنتاگونیسمی شد (جدول ۵). پژوهشگران پیشین گزارش کردند شوری (۲۸) و آلودگی کادمیم (۲۱) باعث کاهش قابل توجه آنزیم آریل سولفاتاز شدند.

فعالیت هیدرولیز فلورسین دی‌استات (FDA)

نتایج تجزیه واریانس حاکی است اثر اصلی شوری (S)، آلودگی (P) و ماده آلی (R) معنی‌دار ($P<0/001$) شد (جدول ۱). آثار متقابل به‌جز برهم‌کنش دو جانبه شوری × آلودگی ($P<0/05$) معنی‌دار نبوند (جدول ۱).

در خاک غیرآلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب باعث کاهش ۱۰، ۷ و ۱۴ درصدی FDA نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) طی ماه اول، دوم و سوم شد (جدول ۴). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر باعث کاهش بیشتر (به‌ترتیب ۱۶، ۱۴ و ۱۴ درصد طی ماه اول، دوم و سوم) FDA نسبت به تیمار شاهد (غیرآلوده غیرشور) شد (جدول ۴). در خاک آلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر FDA را به‌ترتیب ۱۲، ۱۴ و ۱۴ درصد در مقایسه با شاهد (آلوده غیرشور) طی ماه اول، دوم و سوم آزمایش کاهش داد و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون سبب کاهش بیشتر FDA (به‌ترتیب ۱۸، ۱۴ و ۲۱ درصد) نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۴). ارزیابی حاصل از معادله بلیس نشان داد اثر متقابل شوری و آلودگی بر FDA در خاک تیمار نشده با بقایای گیاهی در شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه اول و سوم مستقل و طی ماه دوم سینرژیسمی بود و در شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه اول سینرژیسمی و طی ماه‌های دوم و سوم مستقل شد (جدول ۵).

در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه دوره آزمایش کاهش ۹، ۶ و ۱۰ درصدی FDA را نسبت به خاک شاهد (غیرشور غیرآلوده) به‌ترتیب طی ماه اول، دوم و سوم به همراه داشت و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر باعث کاهش (۱۱-۹ درصد) FDA نسبت به شاهد شد و این کاهش در ماه اول (۱۱ درصد) بیشتر از ماه سوم (۹ درصد) بود (جدول ۴). در خاک آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی تغییرات FDA طی آزمایش یکنواخت نبود. شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر میزان FDA را طی ماه‌های اول و سوم انکوباسیون به‌ترتیب ۹، ۶ و ۱۱ درصد نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) کاهش داد (جدول ۴). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه اول، دوم و سوم انجام آزمایش منجر به کاهش ۱۴، ۱۲ و ۱۱ درصدی FDA نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۴). این نتایج حاکی است که افزایش ماده آلی خاک می‌تواند اثر شوری طی سه ماه انکوباسیون را تعدیل کند. نتایج حاصل از معادله بلیس نشان داد اثر مشترک شوری و آلودگی بر FDA در خاک تیمار شده با بقایای گیاهی در شوری

جدول ۶. اثر شوری، آلودگی کادمیم و بقایای گیاهی بر میانگین هندسی فعالیت آنزیمی (GME)

بقایای گیاهی	کادمیم ($mg\ kg^{-1}$)	شوری ($dS\ m^{-1}$)	زمان نمونه برداری (روز)		
			۳۰	۶۰	۹۰
بدون بقایای گیاهی	۰	۱/۳۵	۲/۹۸±۰/۰۰۶^{Ag}	۲/۰۰±۰/۰۰۲^{Bg}	۱/۸۱±۰/۰۰۲^{Cg}
		۷/۵	۲/۷۱±۰/۰۱۰^{Ai}	۱/۸۲±۰/۰۰۹^{Bi}	۱/۶۱±۰/۰۵۷^{Ci}
		۱۵	۲/۵۵±۰/۰۰۲^{Aj}	۱/۷۱±۰/۰۰۸^{Bj}	۱/۵۳±۰/۰۱۰^{Cj}
	۳۰	۱/۳۵	۲/۸۴±۰/۰۱۲^{Ah}	۱/۹۰±۰/۰۰۰^{Bh}	۱/۶۷±۰/۰۰۲^{Ch}
		۷/۵	۲/۳۶±۰/۰۱۰^{Ak}	۱/۵۷±۰/۰۰۴^{Bk}	۱/۳۹±۰/۰۰۷^{Ck}
		۱۵	۲/۱۵±۰/۰۰۸^{Al}	۱/۴۷±۰/۰۰۴^{Bl}	۱/۲۹±۰/۰۰۷^{Cl}
با بقایای گیاهی	۰	۱/۳۵	۳/۹۰±۰/۰۰۵^{Aa}	۲/۷۲±۰/۰۰۲^{Ba}	۲/۴۸±۰/۰۰۶^{Ca}
		۷/۵	۳/۴۲±۰/۰۱۳^{Ac}	۲/۴۱±۰/۰۰۷^{Bc}	۲/۱۹±۰/۰۰۴^{Cc}
		۱۵	۳/۳۶±۰/۰۲۱^{Ad}	۲/۳۵±۰/۰۰۷^{Bd}	۲/۱۱±۰/۰۱۰^{Cd}
	۳۰	۱/۳۵	۳/۶۰±۰/۰۱۶^{Ab}	۲/۵۰±۰/۰۰۶^{Bb}	۲/۲۳±۰/۰۰۶^{Cb}
		۷/۵	۳/۲۴±۰/۰۱۷^{Ae}	۲/۲۱±۰/۰۰۴^{Be}	۲/۰۰±۰/۰۰۷^{Ce}
		۱۵	۳/۱۴±۰/۰۱۰^{Af}	۲/۱۲±۰/۰۰۴^{Bf}	۱/۸۹±۰/۰۱۱^{Cf}

اعداد میانگین (n=4) به همراه خطای معیار (SE) هستند. در هر ستون میانگین‌های دارای حروف کوچک مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند. در هر ردیف میانگین‌های دارای حروف بزرگ مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد بین زمان‌های مختلف بر اساس آزمون LSD هستند.

۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه اول و دوم آنتاگونیسمی و طی ماه سوم مستقل بود و در شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه‌های اول و سوم مستقل و طی ماه دوم آنتاگونیسمی شد (جدول ۵). در این آزمایش همبستگی منفی و معنی‌دار بین مقدار کادمیم قابل جذب و FDA وجود داشت ($P<0/01$، $r=-0/56$). بنابراین کاهش FDA در این تیمارها می‌تواند به‌دلیل افزایش غلظت کادمیم قابل جذب باشد. نادو و همکاران (۲۴) نیز بیان کردند که با افزودن لجن فاضلاب به خاک هیدرولیز فلورسین دی‌استات افزایش می‌یابد.

میانگین هندسی فعالیت آنزیمی (GME)

کلیه آثار اصلی و متقابل مورد بررسی در این آزمایش به‌جز اثر متقابل ماده آلی × آلودگی معنی‌دار ($P<0/001$) هستند (جدول ۱). در خاک غیرآلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون به‌ترتیب باعث کاهش ۹، ۹ و ۱۱ درصدی GME نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) طی ماه اول، دوم و سوم شد و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر باعث کاهش بیشتر (به‌ترتیب ۱۴، ۱۴ و ۱۵ درصد طی ماه اول، دوم و سوم) GME نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۶). در خاک آلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر GME را طی سه ماه انکوباسیون ۱۷ درصد در مقایسه با خاک شاهد (آلوده غیرشور) کاهش داد (جدول ۶). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر سبب کاهش ۲۴، ۲۳ و ۲۳ درصدی GME خاک نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) به‌ترتیب طی ماه اول، دوم و سوم آزمایش شد (جدول ۶). بررسی نتایج حاصل از معادله بلیس اثر متقابل شوری و آلودگی بر میانگین هندسی فعالیت آنزیمی در خاک تیمار نشده با بقایای گیاهی در هر دو سطح شوری هم‌کرداری

جدول ۷. ماهیت نوع اثرات متقابل شوری و آلودگی بر میانگین هندسی فعالیت آنزیمی (GME) محاسبه شده بر اساس معادله مستقل بلیس در خاک‌های تیمار نشده (R0) و تیمار شده (R1) با بقایای گیاهی

شوری ($dS\ m^{-1}$)	تیمار	۳۰ روز		۶۰ روز		۹۰ روز	
		W_0	W_1	W_0	W_1	W_0	W_1
۷/۵	S	−۲۳/۵	−۱۲/۲	−۲۷/۳	−۱۱/۸	−۱۰/۹	−۱۱/۸
	P	−۱۵/۲	−۷/۶۷	−۱۱/۷	−۸/۴۹	−۹/۴۳	−۹/۹۸
	$(PS)_O$	−۵۶/۱	−۱۴/۳	−۵۷/۳	−۱۶/۳	−۳۸/۲	−۱۷/۷
	$(PS)_P$	−۳۵/۲	−۱۸/۹	−۳۵/۹	−۱۹/۳	−۱۹/۳	−۲۰/۶
	$CI_{95\%}$	۰/۴۸	۰/۷۶	۲/۰۰	۰/۴۶	۱/۵۰	۱/۳۱
	t-statistic	۵۸/۷	−۶/۹۶	۱۱/۴	−۷/۱۶	۱۱/۳	−۵/۸۸
	p-statistic	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
	Interaction	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	ANT
۱۵	S	−۴۵/۴	−۱۲/۲	−۵۳/۳	−۱۱/۸	−۳۴/۹	−۱۱/۸
	P	−۱۵/۲	−۷/۶۷	−۱۱/۷	−۸/۴۹	−۹/۴۳	−۹/۹۸
	$(PS)_O$	−۷۶/۶	−۱۹/۵	−۷۹/۹	−۲۲/۱	−۷۵/۱	−۲۳/۷
	$(PS)_P$	−۵۳/۷	−۲۲/۸	−۵۸/۸	−۲۳/۵	−۴۱/۰	−۲۵/۰
	$CI_{95\%}$	۰/۷۲	۰/۷۷	۰/۳۲	۰/۳۲	۱/۵۶	۱/۴۲
	t-statistic	۸۴/۲	−۴/۵۴	۲۲/۳	−۷/۳۶	۵۱/۲	−۲/۲۵
	p-statistic	<۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۰/۰۶۵
	Interaction	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	ADD

اعداد میزان تغییرات برحسب درصد نسبت به شاهد {۱۰۰× شاهد/(شاهد− تیمار)} هستند. S خاک شور به تنهایی، P خاک آلوده بـه تنهـایی، $(PS)_O$ اثـر 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 اثر متقابل، SYN (سینرژیسمی)، ANT (آنتاگونیسمی) و ADD (مستقل).

(سینرژیسمی) بوده است (جدول ۷).

همین‌طور در خاک غیرآلوده تیمار شده بـا بقایـای گیـاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه دوره آزمـایش بـه‌ترتیب کاهش ۱۲، ۱۱ و ۱۲ درصدی GME را نسبت به خـاک شـاهد (غیرشور غیرآلوده) به همراه داشت و شوری ۱۵ دسـی‌زیمـنس بر متر باعث کاهش بیشتر (بـه‌ترتیب ۱۴، ۱۴ و ۱۵ درصـد طـی ماه اول، دوم و سوم) GME نسبت به خاک شاهد شد (جـدول ۶). در خاک آلوده تیمار شـده بـا بقایـای گیـاهی، شـوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متـر GME را طـی مـاه‌هـای اول، دوم و سـوم انکوباسیون به‌ترتیب ۱۰، ۱۲ و ۱۰ درصد نسبت به تیمار شـاهد کاهش داد (جدول ۶). با این حال شوری ۱۵ دسـی‌زیمـنس بـر متر طـی سـه مـاه انکوباسـیون بـه‌ترتیب کـاهش ۱۳، ۱۵ و ۱۵ درصدی میانگین هندسـی فعالیـت آنزیمـی خـاک را بـه‌همـراه داشت (جدول ۶).

این نتایج حاکی است که افزایش مـاده آلـی احتمـالاً بـه‌دلیل تأمین سوبسترا و ایجاد کمپلکس با کـادمیم خـاک مـی‌توانـد اثـر شوری را تعدیل کند. طبق نتایج اثر مشترک شوری و آلودگی بـر GME در خـاک تیمـار شـده بـا بقایـای گیـاهی در شـوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه آنتاگونیسمی بود و در شـوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه‌های اول و دوم آنتاگونیسمی و طی ماه سوم مستقل شد (جدول ۷). در این آزمایش بین غلظـت کـادمیم قابل جذب و میزان GME همبستگی منفی و معنـی‌دار ($p<$۰/۰۱،

(r= −۰/۶۱) وجود داشت. به‌عبارت دیگر، تغییرات GME بر اثر شوری به‌دلیل تغییرات غلظت کادمیم قابل جذب خاک است. این نتایج نشان می‌دهد که با افزودن ماده آلی به خاک بخش فعال زیست‌توده میکروبی فعال‌تر شده است، زیرا تولید آنزیم مربوط به بخش فعال زیست‌توده میکروبی است (۵).

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد شوری ناشی از NaCl تحرک و فراهمی کادمیم را افزایش می‌دهد. تنش شوری و آلودگی اغلب اثر بازدارندگی بر فعالیت آنزیمی (کاتالاز، فسفاتاز قلیایی، آریل سولفاتاز و هیدرولیز فلورسین دی‌استات) خاک داشتند و کاهش فعالیت آنزیمی در شرایط شور بیشتر از شرایط آلودگی است. در غیاب بقایای گیاهی شوری سبب افزایش حلالیت و فراهمی کادمیم شد و به‌طور سینرژیسمی کاهش بیشتر فعالیت آنزیمی خاک را به همراه داشت. این در حالی است که افزودن بقایای گیاهی باعث تعدیل اثرات منفی این تنش‌ها و کاهش کمتر فعالیت آنزیمی خاک شد. به همین دلیل اثر مشترک شوری و آلودگی در خاک‌های تیمار شده با بقایای گیاهی اغلب آنتاگونیسمی بود. به‌طور کلی مصرف مواد آلی در خاک‌های آلوده و شور باعث کاهش نسبی کادمیم قابل جذب و سمیت ناشی از آن و بهبود نسبی فعالیت آنزیمی خاک می‌شود. لذا مصرف مواد آلی برای بهبود فعالیت آنزیمی خاک‌های آلوده شور پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

از دانشگاه شهرکرد به خاطر حمایت‌های مالی این پژوهش قدردانی و تشکر می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, A., K. Kalbasi and S. Hajrasuliha. 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: 7-8.
2. Acosta, J. A., B. Jansen, K. Kalbitz, A. Faz and S. Martinez. 2011. Salinity increases mobility of heavy metals in soils. *Chemosphere* 85: 1318-1324.
3. Aghababaei, F., F. Raiesi and A. Hosseinpur. 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.
4. Alef, K. and P. Nannipieri. 1995. Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry. Academic Press, London.
5. Blagodatskaya, E. and Y. Kuzyakov. 2013. Active microorganisms in soil: critical review of estimation criteria and approaches. *Soil Biology and Biochemistry* 67: 192-211.
6. Chowdhury, N., P. Marschner and R. G. Burns. 2011. Soil microbial activity and community composition: impact of changes in matric and osmotic potential. *Soil Biology and Biochemistry* 43: 1229-1236.
7. Cookson, P. and A. G. Lepiece. 1996. Urease enzyme activities in soils of the Batinah region of the sultanate of Oman. *Journal of Arid Environments* 32: 225-238.
8. Cortes-Lorenzo, C., M. Rodriguez-Diaz, D. Sipkema, B. Juarez-Jimenez, B. Rodelas, H. Smidt and J. Gonzalez-Lopez. 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.
9. Dai, J., T. Becquer, J. H. Rouiller, G. Reversat, F. Bernhard-Reversat and P. Lavelle. 2004. Influence of heavy metals on C and N mineralization and microbial biomass in Zn-, Pb-, Cu-, and Cd-contaminated soils. *Applied Soil Ecology* 25: 99-109.
10. Effron, D., A. M. De La Horra, R. L. Defrieri, V. Fontanive and R. M. Palma. 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.
11. Garcia, C. and T. Hernandez. 1996. Influence of salinity on the biological and biochemical activity of a calciorthird soil. *Plant and Soil* 178: 255-263.
12. Garcia-Ruiz, R., V. Ochoa, B. Vinegla, M. Hinojosa, R. Pena-Santiago, G. Liebanas, J. Linares and J. Carreira. 2009. Soil enzymes, nematode community and selected physico-chemical properties as soil quality indicators in organic and conventional olive oil farming: influence of seasonality and site features. *Applied Soil Ecology* 41: 305-314.

13. Ghollarata, M. and F. Raiesi, 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.
14. Hameed, A., Sh. Naseer, T. Iqbal, H. Sayd and M. Ashanul haq. 2008. Effects of NaCl salinity on seedling growth, senescence, catalase and protease activities in two wheat genotypes differing in salt tolerance. *Pakistan Journal of Botany* 40: 1043-1051.
15. Khan, S., Q. Cao, A. E. Hesham, Y. Xia and J. He. 2007. Soil enzymatic activities and microbial community structure with different application rates of Cd and Pb. *Journal of Environmental Sciences* 19: 834-840.
16. Koizumi, Y. and S. Iwami. 2014. Mathematical modeling of multi-drugs therapy: a challenge for determining the optimal combinations of antiviral drugs. *Theoretical Biology and Medical Modelling* 41: 1-9.
17. Liang, Y., J. Si, M. Nikolic, Y. Peng, W. Chen and Y. Jiang. 2005. Organic manure stimulates biological activity and barley growth in soil subject to secondary salinization. *Soil Biology and Biochemistry* 37: 1185-1195.
18. Lindsay, W. L. and W. A. Norvell. 1987. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42: 421-428.
19. Liu, J., J. Xie, Y. Chu, Ch. Sun, Ch. Chen and Q. Wang. 2008. Combined effect of cypermethrin and copper on catalase activity in soil. *Journal of Soils and Sediments* 8: 327-332.
20. Li, Y. T., C. Rouland, M. Benedetti, F. B. Li, A. Pando and P. Lavelle. 2009. Microbial biomass, enzyme and mineralization activity in relation to soil organic C, N and P turnover influenced by acid metal stress. *Soil Biology and Biochemistry* 41: 969-977.
21. Lorenz, N., T. Hintemann, T. Kramarewa, A. Katayama, T. Yasuta, P. Marschner and E. Kandeler. 2006. Response of microbial activity and microbial community composition in soils to long–term arsenic and cadmium exposure. *Soil Biology and Biochemistry* 38: 1430-1437.
22. Madejon, E., P. Burgos, R. Lopez and F.Cabrera. 2001. Soil enzymatic response to addition of heavy metals with organic residues. *Biology and Fertility of Soils* 34: 144-150.
23. Madrid, F., R. Lopez and F. Cabera. 2007. Metal accumulation in soil after application of municipal solid waste compost under intensive farming condition. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 119: 249-256.
24. Naidu, R., M. Megharaj and G. Owens. 2004. Recyclable urban and industrial waste-benefits and problems in agricultural use. Pp: 219-237. *In:* Schjonning, P., S. Elmholt and B. T. Christensen (Eds.), Managing Soil Quality: Challenges in Modern Agriculture. CAB International. Oxfordshire.
25. Nannipieri, P., S. Grego and B. Caccanti. 1990. Ecological significance of the biological activity in soil. pp. 293-355. *In:* Bollag, S. J. M. and G. Stotzky (Eds.). Soil Biochemistry. Marcel Dekker, New York.
26. Pathak, H. and D. L. N. Rao. 1998. Carbon and nitrogen mineralization from added organic matter in saline and alkali soils. *Soil Biology and Biochemistry* 30: 695-702.
27. Rath, K. M. and J. Rousk, 2015. Salt effects on the soil microbial decomposer community and their role in organic carbon cycling: a review. *Soil Biology and Biochemistry* 81: 108-123.
28. Rietz, D. N. and R. J. Haynes. 2003. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry* 35: 845-854.
29. Tejada, M. 2009. Application of different organic wastes in a soil polluted by cadmium effects on soil biological properties. *Geoderma* 153: 254-268.
30. Usman, A.R.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).
31. Zhao, W., K. Sachsenmeier, L. Zhang, E. Sult, R. E. Hollingsworth and H. Yang. 2014. A new bliss independence model to analyze drug combination data. *Journal of Biomolecular Screening* 19: 817-821.

Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)
Vol. 23, No. 2, Summer 2019, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Interactive Effects of Salinity and Cadmium Pollution on Enzyme Activity in a Calcareous Soil Treated With Plant Residues

E. Sadeghi*, F. Raiesi and A. Hosseinpur[1]

(Received: February 4-2017 ; Accepted: September 10-2018)

Abstract

Abiotic stresses such as salinity and contamination individually have a negative effect on the soil enzyme activities, whereas addition of organic matter to soil can alleviate the negative impacts of stresses on the enzyme activity. However, the combined effects of these stresses (multiple stresses) on soil biochemical conditions and the role of organic matter addition in these interactions are largely unknown. The objective of this research was to explore the interaction effect of NaCl salinity and cadmium (Cd)-pollution on the activities of catalase, alkaline phosphatase, arylsulfatase and fluorescein diacetate hydrolysis in a Cd-contaminated calcareous soil treated with alfalfa residue over 3 months of incubation. A factorial experiment with 2 levels of Cd, 3 levels of salinity and 2 plant residue treatments was conducted using a completely randomized design with 4 replications. The results indicated that salinity increased the Cd availability in both uncontaminated and contaminated soils and reduced the soil enzymatic activity. Nevertheless, addition of alfalfa residue reduced the detrimental effects of salinity and Cd-pollution on the soil enzyme activities. This indicated that in saline Cd-contaminated soils with low organic matter, adding plant residues could lower the concentration of available Cd and the effect of soil salinity with a concomitant increase of enzyme activities. So, this study showed that the joint effect of NaCl salt and Cd on enzyme activity was mostly synergistic in plant residue-untreated soils, but it was antagonistic in the plant residue-treated soils.

Keywords: Enzyme activity, Interactions, Metal availability, Pollution, Salinity

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
*: Corresponding Author, Email: el.sadeghi70@gmail.com