نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۱، شماره ۶، بهمن – اسفند ۱۳۹۶، ص. ۱۶۳۶-۱۶۲۳

Journal of Water and Soil
Vol. 31, No. 6, Jan.-Feb. 2018, p. 1623-1636

اثر متقابل شوری و آلودگی کادمیم بر کادمیم قابل جذب، تنفس و زیست‌توده میکروبی در یک خاک آهکی تیمار شده با بقایای گیاهی

الهام صادقی[1*]- فایز رئیسی[2]- علیرضا حسین پور[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۱۵

چکیده

خاک به عنوان یکی از اجزای اکوسیستم، محیط رشد گیاه و زیستگاه موجودات زنده متنوع با انواع تنش‌های زیستی روبه‌رو است. اگر چه اثرات منفرد تنش‌های شوری و آلودگی بر فعالیت‌های زیستی خاک عموماً شناخته شده است ولی اثر مشترک این دو تنش بر رشد، جمعیت و فعالیت موجودات زنده خاک مورد توجه قرار نگرفته است. هدف این تحقیق مطالعه اثر متقابل و یا مشترک تنش‌های شوری و آلودگی کادمیم بر کادمیم قابل جذب، تنفس و زیست‌توده میکروبی و ضریب متابولیکی در یک خاک آهکی آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی طی سه ماه انکوباسیون بود. آزمایش به صورت فاکتوریل (دو سطح کادمیم، سه سطح شوری و دو سطح تیمار بقایای گیاهی) در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار و در شرایط آزمایشگاهی اجرا گردید. نتایج نشان داد افزایش سطح شوری باعث افزایش غلظت کادمیم قابل جذب، کاهش تنفس و کربن زیست‌توده میکروبی و همزمان افزایش ضریب ویژه تنفسی خاک گردید. مصرف بقایای گیاهی آثار منفی شوری و آلودگی را بر تنفس و کربن زیست‌توده میکروبی کاهش داد به گونه‌ای که در خاک‌های تیمار نشده با بقایای گیاهی اثرات متقابل این دو تنش اثرات منفی همدیگر را تشدید نموده ولی در خاک‌های تیمار شده با بقایای گیاهی اثرات منفی تعدیل شده بود. این نشان می‌دهد در خاک‌های شور و آلوده با محدودیت کربن، افزایش سطح ماده آلی خاک افزایش غلظت کادمیم قابل جذب ناشی از شوری خاک را کاهش و در نتیجه از اثر بازدارنده شوری بر فعالیت و جمعیت میکروبی می‌کاهد.

واژه‌های کلیدی: اثر متقابل، آلودگی، تنفس میکروبی، زیست‌توده میکروبی، زیست‌فراهمی فلز، شوری

مقدمه

ویژگی‌های میکروبی خاک از شاخص‌های مهم کیفیت آن به شمار می‌آیند و به همین دلیل کیفیت و سلامت خاک با استفاده از خواص مختلف میکروبی نیز قابل ارزیابی می‌باشند (۱۱ و ۱۹). ریزجانداران خاک نقش مهمی در افزایش زیست‌فراهمی عناصر غذایی، تجزیه مواد آلی، بهبود و ارتقاء رشد گیاه و حاصلخیزی خاک دارند (۸ و ۲۴). با این حال، موجودات خاکزی در معرض انواع تنش-های زیستی و غیرزیستی در محیط خاک قرار دارند. شوری و آلودگی دو تنش مهم و متداول غیرزیستی محسوب می‌شوند که در اغلب خاک‌های دنیا به ویژه مناطق خشک و نیمه خشک فرآیندهای مهم خاک و زندگی ریزجانداران را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۳، ۶، ۷، ۲۱ و ۲۶). معمولاً تنش شوری باعث از بین رفتن ریزجانداران خاک و کاهش فعالیت آن‌ها می‌گردد (۲۱ و ۳۱). طبق نتایج چاودهری و همکاران (۶) شوری و تغییر پتانسیل اسمزی خاک ممکن است فعالیت و رشد ریزجانداران را تحت تأثیر قرار دهد. نتایج اغلب مطالعات حاکی است که شوری باعث کاهش زیست‌توده میکروبی در خاک می‌شود (۱۰ و ۲۱). تریپاتی و همکاران (۲۶) نشان دادند که کاهش رشد میکروب‌ها در خاک‌های شور به دلیل تنش ناشی از فزونی نمک می‌باشد و همین عامل موجب کاهش تنفس خاک می گردد. علاوه بر این، تنش ناشی از آلودگی و سمیت فلزات سنگین نیز رشد و فعالیت موجودات زنده خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۳ و ۷). از جمله این عناصر سمی می‌توان به کادمیم اشاره کرد که عنصری غیرضروری و فاقد نقش بیولوژیک خاصی است (۹ و ۲۵). نتایج اکثر تحقیقات حاکی است که کادمیم نیز تأثیر منفی بر فعالیت میکروبی خاک دارد (۷، ۱۳، ۱۷ و ۲۲). آقابابایی و همکاران (۳) گزارش کردند که با افزایش کادمیم فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک کاهش می‌یابد. اگر چه تنش‌های شوری و آلودگی به تنهایی سبب کاهش فعالیت‌های زیستی خاک می‌گردند ولی اثر مشترک و یا متقابل این دو تنش بر موجودات زنده خاک مورد توجه قرار نگرفته است. نتایج برخی

۱، ۲ و ۳– به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و استادان گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
(*– نویسنده مسئول: Email: el.sadeghi70@gmail.com)
DOI: 10.22067/jsw.v31i6.60958

مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که شوری می‌تواند تحرک و زیست‌فراهمی عناصر سمی مانند کادمیم (۱، ۲، ۱۸، ۲۷، ۲۸ و ۳۰) و سرب (۱، ۲ و ۲۸) را در خاک‌های آلوده افزایش دهد. شوری ناشی از نمک‌های کلریدی مانند کلرید سدیم به دلیل ورود یون کلر و متعاقب آن تشکیل کمپلکس پایدار کلر- فلز محلول سبب افزایش تحرک و غلظت شکل قابل استفاده فلزات سمی می‌شوند (۱ و ۲). بنابراین، انتظار می‌رود اثر مسمومیت ناشی از فلزات سنگین بر فعالیت‌های زیستی خاک آلوده در شرایط شور تشدید گردد. به بیان دیگر، شوری ممکن است آثار منفی فلزات سمی را بر رشد و فعالیت موجودات زنده تحریک نماید. مطالعات ثابت کرده‌اند که افزایش مقدار ماده آلی خاک در نتیجه کاربرد کودهای آلی اثر شوری بر موجودات زنده خاک را کاهش می‌دهد (۲۳). افزودن کربن سهل‌الوصول به خاک به دلیل فراهم کردن منبع انرژی در شرایط تنش از کاهش فعالیت میکروبی جلوگیری می‌کند (۶). مواد آلی خاک می‌توانند از طریق تشکیل کمپلکس‌های پایدار با گروه‌های عامل سبب غیرمتحرک شدن فلزات سمی گردد (۱۵). در حال حاضر تعداد زیادی از اصلاح‌کننده‌های آلی مانند کود دامی و کمپوست در اصلاح خاک‌های شور و شور و قلیا مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱۶). به علاوه افزودن مواد آلی می‌تواند روش مفید جهت کاهش اثرات مخرب آبیاری با آب شور و بهبود ویژگی‌های میکروبیولوژیکی خاک در شرایط شور باشد (۶). با این حال اثر همزمان شوری، کادمیم و ماده آلی بر زیست‌توده و فعالیت میکروبی هنوز مورد مطالعه و بررسی قرار نگرفته است. از این رو با توجه به بروز همزمان تنش شوری و آلودگی و افزایش روز افزون این تنش‌ها، این تحقیق با هدف اثر متقابل شوری و آلودگی کادمیم بر کادمیم قابل جذب، تنفس و کربن زیست‌توده میکروبی در یک خاک آهکی تیمار شده با بقایای گیاهی انجام گرفت. در این تحقیق فرض می‌گردد که (۱) شوری سبب افزایش تحرک و زیست‌فراهمی کادمیم و در نتیجه کاهش زیست‌توده و فعالیت میکروبی می‌گردد و اثرات متقابل آنها هم‌کرداری است و (۲) افزایش ماده آلی خاک از اثر شوری بر زیست‌فراهمی کادمیم و فعالیت میکروبی می‌کاهد و اثر مشترک شوری و آلودگی در خاک تیمار شده با بقایای گیاهی پادکرداری خواهد بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در آزمایشگاه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد انجام شد. آزمایش به صورت 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 به میزان لازم نمونه‌برداری شد. پس از انتقال به آزمایشگاه و هوا خشک شدن، خاک از الک ۲ 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، وزن 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.

آزمایش در دو سری نمونه انجام گردید. در نمونه سری اول به منظور اندازه‌گیری تنفس میکروبی به صورت هفتگی ۱۰۰ گرم خاک خشک (۱۰۵ درجه سانتی‌گراد) و در نمونه سری دوم به منظور اندازه گیری کربن زیست‌توده میکروبی، ۴۰۰ گرم خاک معادل وزن آون خشک (۱۰۵ درجه سانتی‌گراد) برداشت و در جارهای پلاستیکی ۱ لیتری ریخته شد. ابتدا با استفاده از نمک کلرید کادمیم، خاک مورد مطالعه در سطح ۳۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم آلوده گردید. سپس معادل ۱ درصد وزنی پودر بقایای گیاه یونجه کاملاً آسیاب شده (۱ 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 NaCl اعمال گردید. برای فعال شدن جمعیت میکروبی و برقراری تعادل نسبی، رطوبت مخلوط خاک- بقایای گیاهی- نمک در حد ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه خاک اولیه تنظیم و جارها ۳-۴ هفته در دمای معمولی محیط به حالت پیش انکوباسیون قرار گرفتند. در ادامه نمونه ها داخل انکوباتور و در دمای ۱±۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند و تا انتهای دوره آزمایش (۹۸ روز) کنترل رطوبت آن‌ها به روش وزنی هر چند روز یک بار با توزین جارها انجام گرفت. طی انکوباسیون تنفس میکروبی (۴) به صورت هفتگی و کادمیم قابل جذب (۱۴) و مقدار کربن زیست‌توده میکروبی (۲۹) طی سه دوره به فاصله زمانی ۳۰ روز اندازه‌گیری شدند. در پایان تجزیه واریانس فاکتوریل با اندازه-گیری مکرر (Repeated measures) و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال α=۰/۰۵ با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. در این آزمایش برای تعیین نوع و ماهیت اثرات متقابل (هم-کرداری و پادکرداری) بین شوری و آلودگی از مدل مستقل بلیس (Bliss independence model) استفاده شد (۱۲ و ۳۲).

نتایج و بحث

کادمیم قابل جذب

نتایج نشان داد 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 ($p<۰/۰۰۱$) گشت اما اثر دو جانبه شوری و ماده آلی غیر معنی‌دار ($p>۰/۰۵$) بود (جدول ۱). 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) به ترتیب طی ماه اول، دوم و سوم شد (جدول ۲). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر باعث افزایش بیشتر (به ترتیب ۷۵، ۸۰ و ۶۲ درصدی طی ماه اول، دوم و سوم) کادمیم قابل جذب نسبت به تیمار شاهد (غیرآلوده غیرشور) گردید (جدول ۲). در خاک آلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر کادمیم قابل جذب خاک را به ترتیب 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 (به ترتیب ۲۶، ۳۸ و ۳۷ درصد) نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۲). 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 هم‌کرداری است (جدول ۳). به عبارت دیگر شوری اثر کادمیم را تحریک نموده و غلظت کادمیم قابل جذب در خاک با افزایش شوری افزایش یافت.

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 کادمیم قابل جذب ($Cd_{ava.}$)، کربن زیست‌توده میکروبی (MBC)، سرعت تنفس میکروبی (MRR) و ضریب ویژه تنفسی (qCO_2)

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 soil available cadmium (Cd_{ava}), microbial biomass C (MBC), microbial respiration rate (MRR) and specific respiratory quotient (qCO_2)

منبع تغییرات Sources of variation	df	کادمیم قابل جذب $Cd_{ava.}$	کربن زیست‌توده میکروبی MBC	سرعت تنفس میکروبی MRR	ضریب ویژه تنفسی qCO_2
		اثرات متقابل بین گروهی Between-Subjects Effects			
Pollution (P)	1	$24.2^{***}(1.00)$	$19901^{***}(0.88)$	$21.6^{***}(1.00)$	$285^{***}(0.97)$
Salinity (S)	2	$0.68^{***}(0.99)$	$30751^{***}(1.00)$	$18.8^{***}(1.00)$	$1036^{***}(0.99)$
Residue (R)	1	$4.74^{***}(1.00)$	$170693^{***}(1.00)$	$172^{***}(1.00)$	$876^{***}(0.99)$
P×S	2	$0.31^{***}(0.99)$	$423^{***}(0.96)$	$0.08^{***}(0.93)$	$305^{***}(0.98)$
P×R	1	$2.81^{***}(1.00)$	$0.42^{***}(0.01)$	$0.58^{***}(0.98)$	$392^{***}(0.96)$
S×R	2	$0.001^{ns}(0.06)$	$1499^{***}(0.99)$	$0.26^{***}(0.98)$	$705^{***}(0.99)$
P×S×R	2	$0.01^{***}(0.71)$	$340^{***}(0.95)$	$1.31^{***}(1.00)$	$19.3^{***}(0.80)$
خطا (Error)	36	25×10^{-5}	0.92	3×10^{-4}	0.26
C.V.(٪)		2.71	1.01	0.52	1.44
		اثرات متقابل درون گروهی Within-Subjects Effects			
Time (T)	2	$0.053^{***}(0.89)$	$73096^{***}(1.00)$	$214^{***}(1.00)$	$3115^{***}(0.99)$
T×P	2	$0.055^{***}(0.89)$	$520^{***}(0.95)$	$1.36^{***}(0.99)$	$7181^{***}(0.64)$
T×S	4	$0.008^{***}(0.71)$	$1053^{***}(0.99)$	$3.73^{***}(1.00)$	$134^{***}(0.87)$
T×R	2	$0.004^{***}(0.35)$	$10569^{***}(1.00)$	$21.8^{***}(1.00)$	$199^{***}(0.83)$
T×P×S	4	$0.007^{***}(0.69)$	$136^{***}(0.91)$	$0.04^{***}(0.84)$	$16.2^{***}(0.45)$
T×P×R	2	$0.004^{***}(0.35)$	$532^{***}(0.96)$	$0.17^{***}(0.92)$	$55.9^{***}(0.58)$
T×S×R	4	$0.007^{***}(0.68)$	$379^{***}(0.97)$	$0.25^{***}(0.97)$	$155^{***}(0.88)$
T×P×S×R	4	$0.006^{***}(0.67)$	$76.3^{***}(0.86)$	$0.33^{***}(1.98)$	$2.26^{*}(0.10)$
Error (Time)	72	18×10^{-5}	0.70	4×10^{-4}	0.70
C.V. (%)		2.31	0.88	0.63	0.88

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

The numbers in parentheses represent the partial Eta^2 ($(SS_{effect}/SS_{effect})+SS_{error}$) as a measure of the effect size; ^{ns}, *, **, *** non-significant and significant at 5, 1, 0.1%, respectively. C.V. coefficient of variation

جدول ۲- اثر بقایای گیاهی، آلودگی کادمیم و شوری بر غلظت کادمیم قابل جذب ($Cd_{ava.}$) در خاک. اعداد میانگین (n=4) به همراه خطای معیار (SE) می‌باشند

Table 2- The effect of plant residue, cadmium pollution and salinity on soil available cadmium (Cdava.) concentration. Values are mean (n = 4) with standard error (SE) of the mean

بقایای گیاهی Plant residue	کادمیم Pollution ($mg\ kg^{-1}$)	شوری Salinity ($dS\ m^{-1}$)	زمان نمونه‌برداری (روز) Sampling time (day) 30	60	90
بدون بقایای گیاهی Without plant residue	0	1.35	0.16 ± 0.003^{Ai}	0.15 ± 0.004^{Ai}	0.16 ± 0.006^{Ai}
		7.5	0.21 ± 0.005^{Ah}	0.21 ± 0.011^{Ah}	0.21 ± 0.012^{Ah}
		15	0.28 ± 0.006^{Ag}	0.27 ± 0.006^{Ag}	0.26 ± 0.006^{Ag}
	30	1.35	1.12 ± 0.005^{Bc}	1.07 ± 0.006^{Cc}	1.15 ± 0.011^{Ac}
		7.5	1.28 ± 0.006^{Cb}	1.31 ± 0.005^{Cb}	1.40 ± 0.011^{Ab}
		15	1.41 ± 0.009^{Ba}	1.48 ± 0.005^{Aa}	1.57 ± 0.007^{Ca}
با بقایای گیاهی With plant residue	0	1.35	0.11 ± 0.004^{Aj}	0.11 ± 0.003^{Ak}	0.11 ± 0.005^{Ak}
		7.5	0.12 ± 0.006^{Aj}	0.12 ± 0.003^{Aj}	0.13 ± 0.004^{Aj}
		15	0.16 ± 0.002^{Ai}	0.14 ± 0.005^{Cij}	0.15 ± 0.004^{Ai}
	30	1.35	0.40 ± 0.009^{Cf}	0.44 ± 0.006^{Cf}	0.50 ± 0.013^{Af}
		7.5	0.52 ± 0.002^{Ce}	0.73 ± 0.006^{Be}	0.84 ± 0.009^{Ae}
		15	0.85 ± 0.007^{Bd}	0.84 ± 0.009^{Bd}	0.91 ± 0.011^{Ad}

در هر ستون میانگین‌ها دارای حروف کوچک مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند

در هر ردیف میانگین‌ها دارای حروف بزرگ مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین زمان‌های مختلف بر اساس آزمون LSD هستند

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 at 5% level according to the LSD test

جدول ۳- ماهیت نوع اثرات متقابل شوری و آلودگی بر غلظت کادمیم قابل جذب ($Cd_{ava.}$) محاسبه شده بر اساس معادله مستقل بلیس در خاک‌های تیمار نشده (R0) و تیمار شده (R1) با بقایای گیاهی

Table 3- The nature of interactions between salinity and Cd pollution on concentration of soil available Cd in soils untreated (R0) and treated (R1) with plant residue determined on the basis of the Bliss independence model

شوری Salinity ($dS\ m^{-1}$)	تیمار Treatment	۳۰ روز (30 days) R0	R1	۶۰ روز (60 days) R0	R1	۹۰ روز (90 days) R0	R1
7.5	S	+36.8	+13.4	+36.4	+19.4	+31.2	+19.5
	P	+616	+260	+596	+309	+618	+351
	$(PS)_O$	+718	+365	+754	+584	+773	+669
	$(PS)_P$	+879	+308	+849	+389	+842	+439
	$CI_{95\%}$	13.6	8.35	12.1	19.4	21.2	25.6
	t-statistic	17.5	26.9	11.4	35.7	8.09	23.4
	p-statistic	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	Interaction	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	ANT
15	S	+74.1	+40.4	+72.6	+36.4	+62.7	+38.3
	P	+616	+260	+596	+309	+618	+351
	$(PS)_O$	+800	+666	+865	+692	+876	+733
	$(PS)_P$	+1146	+406	+1101	+458	+1069	+523
	$CI_{95\%}$	15.7	20.9	9.79	24.5	14.5	31.4
	t-statistic	12.8	54.1	41.9	32.7	22.0	46.0
	p-statistic	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	<0.001
	Interaction	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	ANT

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 (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

همین‌طور در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه دوره آزمایش به ترتیب 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 (جدول ۲). شوری

۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه اول، دوم و سوم انکوباسیون به ترتیب باعث افزایش ۴۵، ۲۷ و ۳۶ درصدی کادمیم قابل جذب نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) گردید (جدول 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 به ترتیب 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 (به ترتیب ۱۱۲، ۹۱ و ۸۲ درصد طی ماه اول، دوم و سوم) کادمیم قابل جذب نسبت به تیمار شاهد را به همراه داشت (جدول ۲). مصرف مواد آلی در خاک آلوده و غیرآلوده موجب ایجاد اثرات متقابل پادکرداری بین شوری و آلودگی گردید (جدول ۳). نتایج نشان می‌دهد در حضور ماده آلی با افزایش سطح شوری در خاک آلوده و غیرآلوده، فراهمی کادمیم قابل جذب نیز افزایش می‌یابد و افزایش کادمیم قابل جذب در شوری‌های بالا بیشتر از شوری‌های پایین بود. نتایج معادله بلیس نیز این یافته را تأیید می‌کند (جدول ۳). بنابراین مصرف ماده آلی منجر به تغییر نوع اثر متقابل بین شوری و آلودگی کادمیم از حالت هم‌کرداری در غیاب ماده آلی به حالت پادکرداری در حضور ماده آلی گردید (جدول ۳). کلر ناشی از نمک NaCl از طریق تشکیل کمپلکس پایدار با کادمیم فراهمی، جذب و حلالیت آن را در خاک افزایش می‌دهد (۱). مصرف مواد آلی با جذب و غیرمتحرک ساختن کادمیم سبب محدود شدن حلالیت و زیست فراهمی آن می‌گردد و بدین ترتیب ممکن است از تشکیل کمپلکس کلر- کادمیم محلول جلوگیری نماید. کاربرد مواد اصلاحی آلی می‌تواند نقش مهمی در کاهش سمیت فلزات سمی خاک‌های آلوده تحت تنش شوری داشته باشد (۱ و ۲۷).

کربن زیست‌توده میکروبی (MBC)

طی این آزمایش 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 کربن زیست‌توده میکروبی معنی‌دار ($p<۰/۰۰۱$) بود (جدول ۱). در خاک غیرآلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون باعث کاهش ۲۴، ۲۷ و ۱۱ درصدی MBC نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) به ترتیب طی ماه اول، دوم و سوم شد (جدول ۴). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه اول، دوم و سوم انکوباسیون به ترتیب باعث کاهش ۴۵، ۵۳ و ۳۵ درصدی MBC نسبت به تیمار شاهد (غیرآلوده غیرشور) گردید (جدول ۴). در خاک آلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر MBC را به ترتیب ۴۸، ۵۲ و ۳۲ درصد در مقایسه با خاک شاهد (آلوده غیرشور) طی ماه اول، دوم و سوم آزمایش کاهش داد و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر سبب کاهش بیشتر (به ترتیب ۷۲، ۷۷ و ۷۳ درصد) MBC نسبت به تیمار شاهد گردید (جدول ۴). در این آزمایش بین غلظت کادمیم قابل جذب و میزان MBC همبستگی منفی معنی‌دار ($p<۰/۰۱$، $r=-۰/۵۹$) وجود داشت. بنابراین با افزایش میزان کادمیم قابل جذب در خاک مقدار MBC کاهش می‌یابد. بررسی نتایج حاصل از معادله بلیس نشان داد اثر متقابل شوری و آلودگی بر MBC در خاک تیمار نشده با بقایای گیاهی در هر دو سطح شوری هم‌کرداری است (جدول ۵). عثمان و همکاران (۲۸) اظهار کردند که افزایش شوری فراهمی و جذب فلزات سمی در خاک را افزایش می‌دهد و این افزایش منجر به کاهش MBC می‌گردد.

همینطور در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه دوره آزمایش کاهش ۱۶، ۳۶ و ۳۸ درصدی MBC را نسبت به خاک شاهد به ترتیب طی ماه اول، دوم و سوم به همراه داشت (جدول ۴). در حالی‌که شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه اول، دوم و سوم انکوباسیون به ترتیب باعث کاهش ۲۲، ۲۶ و ۲۷ درصدی MBC نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) گردید (جدول ۴). در خاک آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر میزان MBC خاک را طی ماه‌های اول، دوم و سوم انکوباسیون به ترتیب ۲۲، ۳۷ و ۳۲ درصد نسبت به شاهد (آلوده غیرشور) کاهش داد (جدول ۴). با این حال شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون کاهش ۲۴، ۴۱ و ۴۱ درصدی MBC را نسبت به خاک شاهد (آلوده غیرشور) به همراه داشت (جدول ۴). نتایج نشان می‌دهد در حضور ماده آلی با افزایش سطح شوری در خاک آلوده و غیرآلوده میزان MBC کاهش می‌یابد و اینکه کاهش MBC در شوری‌های بالا بیشتر از شوری‌های پایین بود. نتایج معادله بلیس نشان داد اثر متقابل شوری و آلودگی بر MBC در خاک تیمار نشده با بقایای گیاهی در شوری ۷/۵ دسی زیمنس بر متر طی ماه اول مستقل و طی ماه‌های دوم و سوم پادکرداری بود و در شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون پادکرداری گردید (جدول ۵). مصرف مواد آلی در خاک های شور باعث بهبود ویژگی‌های میکروبیولوژیکی خاک و افزایش زیست‌توده میکروبی گردیده است (۲۴).

تنفس (MR) و سرعت تنفس میکروبی (MRR)

نتایج نشان داد تنش شوری و آلودگی کادمیم سبب کاهش تنفس میکروبی گردید ولی افزودن بقایای گیاهی یونجه به خاک افزایش تنفس میکروبی را به همراه داشت (شکل ۱). تنفس میکروبی در خاک‌های تیمار شده با بقایای گیاهی یونجه همواره بیشتر از تیمار بدون بقایای گیاهی بود و دلیل آن می‌تواند فراهمی ترکیبات آسان تجزیه شونده در پسماند گیاه یونجه باشد.

جدول ٤- اثر شوری، آلودگی کادمیم و بقایای گیاهی بر میزان کربن زیست‌توده میکروبی (MBC)، سرعت تنفس میکروبی (MRR) و ضریب ویژه تنفسی (qCO_2). اعداد میانگین (n=4) به همراه خطای معیار (SE) می‌باشند

Table 4- The effect of plant residue, cadmium pollution and salinity on soil microbial biomass carbon (MBC) content, microbial respiration rate (MRR) and specific respiratory quotient (qCO_2). Values are mean (n = 4) with standard error (SE) of the mean

بقایای گیاهی Plant residue	کادمیم Pollution (mg kg^{-1})	شوری Salinity (dS m^{-1})	زمان نمونه‌برداری (روز) Sampling time (day) 30	60	90
			کربن زیست‌توده میکروبی MBC (mg kg^{-1})		
بدون بقایای گیاهی Without plant residue	0	1.35	139±0.32^{Ag}	82.9±0.31^{Bf}	58.3±0.40^{Cg}
		7.5	106±0.41^{Ai}	60.2±0.51^{Bh}	52.0±0.98^{Ch}
		15	76.0±0.19^{Aj}	38.7±0.28^{Bi}	38.0±0.38^{Bi}
	30	1.35	118±0.36^{Ah}	73.1±0.48^{Bg}	53.0±0.47^{Ch}
		7.5	61.0±0.21^{Ak}	35.4±0.38^{Bj}	36.0±0.14^{Bj}
		15	32.5±0.31^{Al}	16.7±0.08^{Bk}	14.5±0.29^{Bk}
با بقایای گیاهی With plant residue	0	1.35	227±0.45^{Aa}	171±0.95^{Ba}	115±0.42^{Ca}
		7.5	191±0.45^{Ac}	109±0.34^{Bd}	71.8±0.34^{Cd}
		15	176±0.27^{Ad}	126±0.73^{Bc}	83.4±0.79^{Cc}
	30	1.35	208±0.37^{Ab}	141±0.40^{Bb}	95.7±0.39^{Cb}
		7.5	163±0.12^{Ae}	89.4±0.52^{Be}	64.7±0.44^{Ce}
		15	158±0.34^{Af}	83.4±0.31^{Bf}	56.4±0.28^{Cf}
			سرعت تنفس میکروبی MRR (mg kg^{-1} day^{-1})		
بدون بقایای گیاهی Without plant residue	0	1.35	5.38±0.006^{Ag}	2.39±0.005^{Bg}	1.59±0.006^{Cg}
		7.5	4.36±0.028^{Ai}	1.90±0.006^{Bi}	1.28±0.051^{Ci}
		15	3.36±0.007^{Aj}	1.78±0.007^{Bj}	1.15±0.009^{Cj}
	30	1.35	5.21±0.008^{Ah}	2.15±0.005^{Bh}	1.37±0.012^{Ch}
		7.5	2.92±0.007^{Ak}	1.23±0.009^{Bk}	0.90±0.002^{Ck}
		15	2.05±0.008^{Al}	1.03±0.004^{Bl}	0.52±0.004^{Cl}
با بقایای گیاهی With plant residue	0	1.35	9.65±0.008^{Aa}	4.76±0.050^{Ba}	2.55±0.050^{Ca}
		7.5	7.62±0.007^{Ac}	4.12±0.004^{Bb}	2.43±0.004^{Cb}
		15	7.21±0.008^{Ad}	3.46±0.021^{Bd}	2.20±0.006^{Cc}
	30	1.35	7.78±0.004^{Ab}	3.53±0.013^{Bc}	2.05±0.010^{Cd}
		7.5	6.63±0.008^{Ae}	2.85±0.004^{Be}	2.02±0.004^{Ce}
		15	6.41±0.006^{Af}	2.81±0.020^{Bf}	1.81±0.008^{Cf}
			ضریب ویژه تنفسی qCO_2 (µg CO_2-C mg^{-1} MBC day^{-1})		
بدون بقایای گیاهی Without plant residue	0	1.35	38.8±0.06^{Ag}	29.0±0.07^{Bg}	27.4±0.17^{Cd}
		7.5	41.2±0.32^{Ae}	31.6±0.26^{Bf}	24.8±0.44^{Ch}
		15	44.4±0.21^{Bc}	45.9±0.44^{Ab}	30.5±0.32^{Ce}
	30	1.35	44.4±0.15^{Ac}	29.5±0.22^{Bg}	26.1±0.23^{Cg}
		7.5	48.2±0.22^{Ab}	34.8±0.45^{Bd}	25.0±0.03^{Ch}
		15	63.1±0.47^{Aa}	61.8±0.41^{Aa}	35.8±0.52^{Ca}
با بقایای گیاهی With plant residue	0	1.35	42.5±0.11^{Ad}	27.8±0.13^{Bh}	22.2±0.08^{Ci}
		7.5	39.8±0.10^{Af}	38.0±0.13^{Bc}	33.8±0.13^{Cb}
		15	40.9±0.04^{Ae}	27.5±0.25^{Bh}	26.4±0.27^{Cg}
	30	1.35	37.4±0.09^{Ah}	25.1±0.06^{Bi}	21.5±0.17^{Cj}
		7.5	40.8±0.07^{Ae}	31.8±0.21^{Bf}	31.2±0.22^{Bd}
		15	40.7±0.12^{Ae}	33.7±0.35^{Be}	32.3±0.23^{Cc}

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف کوچک مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند

در هر ردیف میانگین‌های دارای حروف بزرگ مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین زمان‌های مختلف بر اساس آزمون LSD هستند

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 at 5% level according to the LSD test

جدول ۵- ماهیت نوع اثرات متقابل شوری و آلودگی بر کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) و سرعت تنفس میکروبی (MRR) محاسبه شده بر اساس معادله مستقل بلیس. در خاک‌های تیمار نشده (R0) و تیمار شده (R1) با بقایای گیاهی

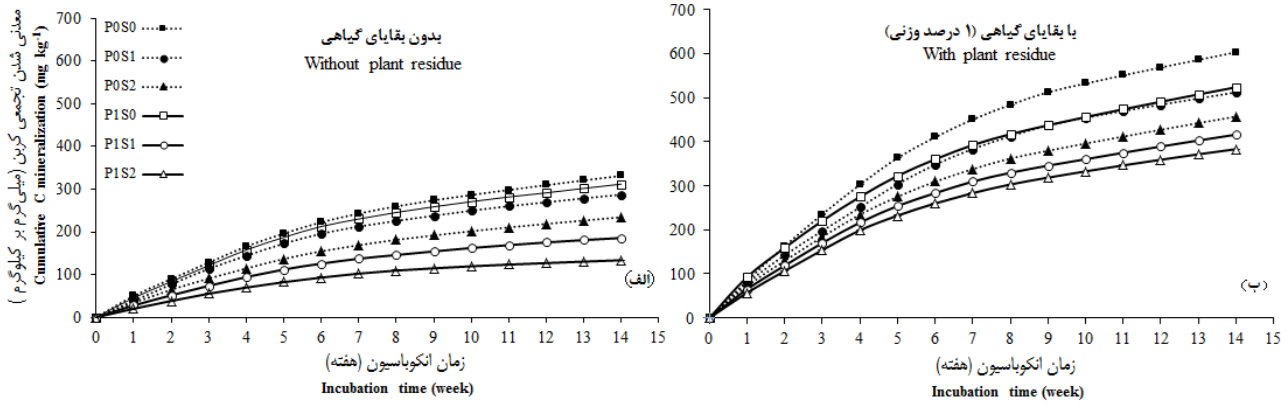
Table 5- The nature of interactions between salinity and Cd pollution on soil microbial biomass carbon (MBC) content and microbial respiration rate (MRR) in soils untreated (R0) and treated (R1) with plant residue determined on the basis of the Bliss independence model

شوری Salinity ($dS\ m^{-1}$)	تیمار Treatment	۳۰ روز (30 days)		۶۰ روز (60 days)		۹۰ روز (90 days)	
		R0	R1	R0	R1	R0	R1
		کربن زیست‌توده میکروبی MBC					
7.5	S	-23.5	-15.8	-27.3	-36.6	-10.8	-37.5
	P	-15.2	-8.52	-11.7	-17.9	-9.43	-16.7
	$(PS)_O$	-56.1	-22.5	-57.2	-26.5	-38.2	-27.4
	$(PS)_P$	-35.1	-22.9	-35.8	-48.0	-19.2	-47.9
	$CI_{95\%}$	0.47	0.38	2.00	3.86	1.50	2.18
	t-statistic	45.1	-0.90	15.8	-24.6	7.93	-30.8
	p-statistic	<0.001	0.42	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	Interaction	SYN	ADD	SYN	ANT	SYN	ANT
15	S	-45.4	-28.5	-53.3	-47.8	-34.8	-43.7
	P	-15.2	-8.52	-11.7	-17.9	-9.43	-16.7
	$(PS)_O$	-76.5	-30.6	-79.8	-51.3	-75.1	-50.9
	$(PS)_P$	-53.7	-34.6	-58.8	-57.2	-41.0	-53.1
	$CI_{95\%}$	0.71	0.48	0.32	3.09	1.56	0.76
	t-statistic	89.2	-18.2	20.6	-3.06	42.2	-3.06
	p-statistic	<0.001	<0.001	<0.001	0.04	<0.001	0.04
	Interaction	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	ANT
		سرعت تنفس میکروبی MRR					
7.5	S	-18.8	-21.0	-20.5	-13.4	-19.2	-4.83
	P	-3.12	-19.4	-9.95	-25.8	-13.7	-19.5
	$(PS)_O$	-45.6	-25.3	-48.5	-27.3	-43.6	-13.6
	$(PS)_P$	-21.4	-36.3	-28.4	-35.7	-30.3	-23.4
	$CI_{95\%}$	0.37	0.33	1.12	1.58	0.59	0.75
	t-statistic	38.5	-66.9	38.3	-12.0	16.3	-19.1
	p-statistic	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	Interaction	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	ANT
15	S	-37.6	-31.2	-25.9	-40.2	-27.5	-20.9
	P	-3.12	-19.4	-9.95	-25.8	-13.7	-19.5
	$(PS)_O$	-61.9	-33.6	-57.0	-41.1	-67.5	-28.7
	$(PS)_P$	-39.5	-44.6	-33.3	-55.6	-37.4	-36.3
	$CI_{95\%}$	0.47	0.21	0.59	1.37	0.96	1.15
	t-statistic	71.5	-106	45.8	-38.8	65.6	-12.7
	p-statistic	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	Interaction	SYN	ANT	SYN	ANT	SYN	ANT

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 statistics و p statistics (two-tail) آماره t و p در آزمون t test، Interaction نوع اثر متقابل، SYN (هم‌کرداری)، ANT (پادکرداری) و ADD (مستقل)

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, CI95% confidence interval at 95%; t-statistic student's t test; p-statistic two-tail p value; SYN synergistic, ANT antagonistic, ADD additive

این بقایا به دلیل دارا بودن کربن آلی قابل جذب فراوان و عناصر غذایی بالا مانند نیتروژن (نسبت کربن به نیتروژن پایین) فعالیت میکروبی را تحریک و موجب تولید بیشتر دی‌اکسید کربن شده‌اند. پس از ۱۴ هفته انکوباسیون و اندازه‌گیری میزان تنفس روند معدنی شدن کربن در خاک‌های دارای بقایای گیاهی تقریباً دارای شیب هموار می‌باشد. کاهش سرعت معدنی شدن کربن در تیمار بدون بقایای گیاهی می‌تواند مربوط به محدودیت مقدار کربن باشد. نتایج رئیسی (۱۹) نشان داد خاک‌های تیمار شده با پسماند گندم و یونجه دارای میزان معدنی شدن تجمعی کربن بالاتری نسبت به خاک تیمار نشده بوده است.



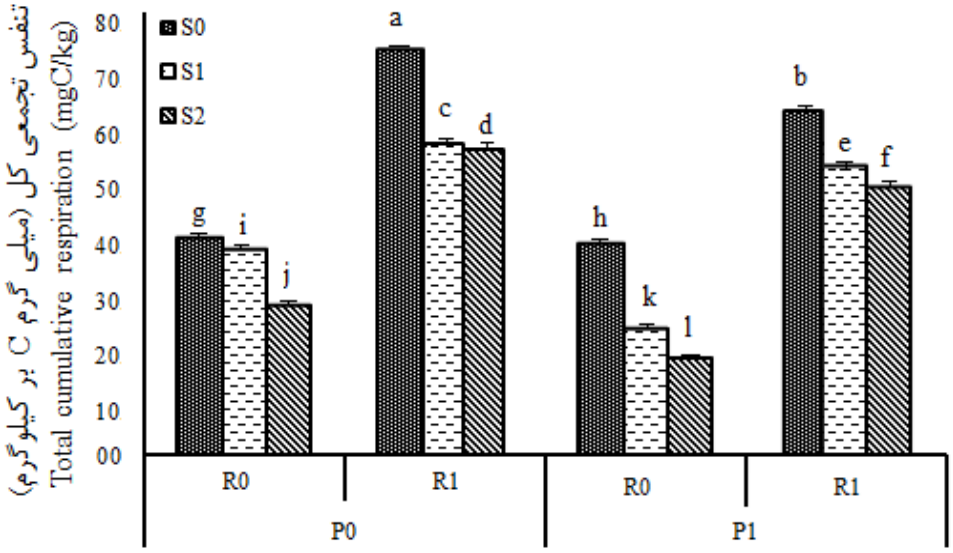
شکل ۱- روند معدنی شدن تجمعی کربن در سطوح مختلف شوری و کادمیم در خاک‌های الف) بدون بقایای گیاهی و ب) تیمار شده با بقایای گیاهی (n=٤). آلودگی (P0) ۰ و (P1) ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، شوری (S0) شاهد، (S1) ۷/۵ و (S2) ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر

Figure 1- The patterns of cumulative carbon (C) mineralization at different levels of salinity and cadmium in soils untreated (a) and treated (b) with plant residue (n=4). P0 unpolluted and P1 Cd-polluted (30 mg kg^{-1}) soil; S0 control, S1 7.5 and S2 15 dS m^{-1}

طی این آزمایش 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 سرعت تنفس میکروبی معنی‌دار ($p<۰/۰۰۱$) بود (جدول ۱). در خاک غیرآلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون باعث کاهش ۱۹، ۲۰ و ۱۹ درصدی سرعت تنفس میکروبی نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) به ترتیب طی ماه اول، دوم و سوم شد (جدول ۴). شوری ۱۵ دسی زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون باعث کاهش بیشتر (به ترتیب ۳۷، ۲۵ و ۲۸ درصدی طی اول، دوم و سوم) سرعت تنفس میکروبی نسبت به تیمار شاهد (غیرآلوده غیرشور) شد (جدول ۴). در خاک آلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر سرعت تنفس میکروبی خاک را به ترتیب ۴۴، ۴۳ و ۳۴ درصد در مقایسه با خاک 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 (به ترتیب ۶۱، ۵۲ و ۶۲ درصدی) سرعت تنفس میکروبی خاک نسبت به تیمار شاهد گردید (جدول ۴). بررسی نتایج حاصل از معادله بلیس نشان داد اثر متقابل شوری و آلودگی بر سرعت تنفس میکروبی در خاک تیمار نشده با بقایای گیاهی در هر دو سطح شوری هم‌کرداری است (جدول ۵). همین‌طور در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه دوره آزمایش به ترتیب کاهش ۲۱، ۱۳ و ۵ درصدی سرعت تنفس میکروبی را نسبت به خاک شاهد (غیرشور غیرآلوده) طی ماه اول، دوم و سوم به همراه داشت (جدول ۴). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون به ترتیب باعث کاهش ۲۵، ۲۷ و ۱۴ درصدی سرعت تنفس میکروبی نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) گردید (جدول ۴). چاودهری و همکاران (۶) گزارش کردند میزان بالای شوری باعث کاهش تنفس خاک می‌گردد. در خاک آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر میزان سرعت تنفس میکروبی خاک را طی ماه‌های اول، دوم و سوم انکوباسیون به ترتیب ۱۵، ۱۹ و ۱ درصد نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) کاهش داد و شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه‌های اول، دوم و سوم به ترتیب کاهش ۱۸، ۲۰ و ۱۳ درصدی سرعت تنفس میکروبی را نسبت به تیمار شاهد به همراه داشت (جدول ۴). بر اساس نتایج به دست آمده ماده آلی غلظت کادمیم قابل جذب را کاهش داده است (جدول ۲) و بدین ترتیب در هر دو سطح شوری منجر به بروز اثر متقابل پادکرداری بین شوری و کادمیم گردید (جدول ۵). اخیراً، عثمان (۲۷) گزارش کرد که شوری ناشی از نمک کلرید سدیم و سمیت ناشی از کادمیم تنفس میکروبی را در خاک آهکی کاهش داد در حالی‌که مصرف کود دامی افزایش تولید CO_2 را به همراه داشت. در این آزمایش همبستگی منفی و معنی‌دار بین کادمیم قابل جذب و تنفس میکروبی مشاهده شد ($p<۰/۰۱$، $r=-۰/۶۱$). به بیان دیگر، کاهش تنفس میکروبی خاک بر اثر شوری به دلیل افزایش غلظت کادمیم قابل جذب است.

نتایج نشان داد 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 تنفس تجمعی کل معنی‌دار ($p<۰/۰۰۱$) بود (نتایج گزارش نشده‌اند). مقایسه تنفس کل بین تمامی تیمارها و سطوح مختلف شوری و آلودگی نشان داد که کمترین میزان تنفس در عدم حضور بقایای گیاهی مربوط به

تیمار آلوده و شوری سطح سه و بیشترین میزان تنفس در حضور بقایای گیاهی مربوط به تیمار غیرآلوده غیرشور بود (شکل ۲). ماده آلی به مقدار زیادی تنفس میکروبی خاک را افزایش داده است و این افزایش را می‌توان به دسترسی بیشتر سوبسترا و احتمالاً بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک برای ادامه فعالیت بیشتر ریزجانداران نسبت داد.



شکل ۲- اثر بقایای گیاهی، آلودگی کادمیم و شوری بر تنفس تجمعی کل (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، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند. خطای معیار به صورت خطوط عمودی نشان داده شده است

Figure 2- The effect of plant residue, cadmium pollution and salinity on total cumulative 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 do not have significant differences among treatments at 5% level according to the LSD test.The vertical lines shown as standard error

اثر شوری و کادمیم بر ضریب ویژه تنفسی (qCO_2)

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 qCO_2 معنی‌دار ($p<۰/۰۰۱$) بود (جدول ۱). در خاک غیرآلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه‌های اول و دوم انکوباسیون باعث افزایش ۶ و ۹ درصدی و طی ماه سوم باعث کاهش ۹ درصدی qCO_2 نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) شد (جدول ۴). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی سه ماه انکوباسیون افزایش بیشتر (به ترتیب ۱۴، ۵۹ و ۱۱ درصد) qCO_2 را نسبت به تیمار شاهد (غیرآلوده غیرشور) به همراه داشت (جدول ۴). در خاک آلوده تیمار نشده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه اول و دوم باعث افزایش به ترتیب ۹ و ۱۸ درصد و در ماه سوم باعث کاهش ۴ درصدی qCO_2 نسبت به خاک شاهد (آلوده غیرشور) شد، اما این کاهش معنی‌دار نبود (جدول ۴). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر qCO_2 را طی سه ماه انکوباسیون ۴۲، ۱۱۰ و ۳۷ درصد نسبت به خاک شاهد (آلوده غیرشور) به ترتیب طی ماه اول، دوم و سوم افزایش داد (جدول ۴). نتایج حاصل از معادله بلیس نشان داد اثر متقابل شوری و آلودگی بر qCO_2 در خاک تیمار نشده با بقایای گیاهی در هر دو سطح شوری طی سه ماه انکوباسیون هم‌کرداری بود (جدول ۶).

در خاک غیرآلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی زیمنس بر متر طی ماه‌های دوم و سوم آزمایش به ترتیب باعث افزایش ۳۷ و ۵۲ درصدی و طی ماه اول کاهش ۶ درصدی qCO_2 نسبت به خاک شاهد (غیرشور غیرآلوده) گردید (جدول ۴). شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه اول کاهش ۴ درصدی و طی ماه سوم افزایش ۱۹ درصدی qCO_2 را نسبت به خاک شاهد (غیرآلوده غیرشور) به همراه داشت و در ماه دوم کاهش غیرمعنی‌دار بود (جدول ۴). پژوهشگران پیشین نیز گزارش کردند که در خاک‌های شور qCO_2 افزایش می‌یابد (۵ و ۲۰). دلیل این افزایش کاهش زیست‌توده میکروبی یا رشد میکروبی و افزایش مصرف انرژی است. در خاک آلوده تیمار شده با بقایای گیاهی، شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر

میزان qCO_2 خاک را طی سه ماه انکوباسیون به ترتیب ۹، ۲۷ و ۴۵ نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) افزایش داد و شوری ۱۵ دسی زیمنس بر متر طی ماه اول، دوم و سوم انکوباسیون به ترتیب باعث افزایش ۹، ۳۴ و ۵۰ درصدی qCO_2 نسبت به تیمار شاهد (آلوده غیرشور) گردید (جدول ۴).

جدول ٦- ماهیت اثرات متقابل (هم‌کرداری و پادکرداری) بین شوری و آلودگی کادمیم بر ضریب ویژه تنفسی (qCO_2) محاسبه شده بر اساس معادله مستقل بلیس در خاک‌های تیمار نشده (R0) و تیمار شده (R1) با بقایای گیاهی

Table 6- The nature of interactions between salinity and Cd pollution on specific respiratory quotient (qCO_2). estimated based on the Bliss independence model in soils untreated (R0) and treated (R1) with plant residue

شوری Salinity ($dS\ m^{-1}$)	تیمار Treatment	۳۰ روز (30 days)		٦۰ روز (60 days)		۹۰ روز (90 days)	
		R0	R1	R0	R1	R0	R1
		ضریب ویژه تنفسی qCO_2					
7.5	S	-23.5	-6.23	-27.3	+36.6	-10.9	+52.2
	P	-15.2	-11.9	-11.7	-9.60	-9.43	-3.32
	$(PS)_O$	-56.1	-3.65	-57.2	-1.08	-38.2	+19.0
	$(PS)_P$	-35.2	-17.4	-35.9	+23.5	-19.3	+47.1
	$CI_{95\%}$	0.48	0.32	2.00	2.84	1.50	3.87
	t-statistic	58.7	-38.7	11.4	-52.1	11.3	-25.6
	p-statistic	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	Interaction	SYN	ANT	SYN	SYN	SYN	SYN
15	S	-45.4	-3.86	-53.3	+14.6	-34.9	+40.6
	P	-15.2	-11.9	-11.7	-9.60	-9.43	-3.32
	$(PS)_O$	-76.5	-4.21	-79.9	+21.0	-75.1	+45.3
	$(PS)_P$	-53.7	-15.3	-58.8	+3.61	-41.0	+35.9
	$CI_{95\%}$	0.71	0.91	0.32	4.03	1.57	3.30
	t-statistic	84.2	-33.7	22.3	-1.21	51.2	2.37
	p-statistic	<0.001	<0.001	<0.001	0.271	<0.001	0.055
	Interaction	SYN	ANT	SYN	ADD	SYN	ADD

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 statistics و p value (two-tail) آماره t و p در آزمون t test، Interaction نوع اثر متقابل، SYN (هم‌کرداری)، ANT (پادکرداری) و ADD (مستقل)

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, ADD additive

بنابراین ماده آلی تأثیر متفاوت و معنی‌داری بر qCO_2 خاک داشت (جدول ۶). نتایج حاصل از معادله بلیس نشان داد اثر متقابل شوری و آلودگی بر qCO_2 در خاک تیمار شده با بقایای گیاهی و شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر طی ماه دوم و سوم انکوباسیون هم کرداری ولی طی ماه اول پادکرداری بود (جدول ۶). همچنین در شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر این اثر مشترک طی ماه اول انکوباسیون پادکرداری و طی ماه‌های دوم و سوم مستقل بود (جدول ۶). در این آزمایش همبستگی مثبت و معنی‌دار (P<۰/۰۱، r=۰/۵۲) بین کادمیم قابل جذب و qCO_2 مشاهده شد.

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج نشان داد شوری ناشی از NaCl تحرک و زیست فراهمی کادمیم را افزایش می‌دهد و این اثر شوری در خاک نیز منعکس گردید. تنش شوری و آلودگی اغلب اثر بازدارندگی بر خصوصیات میکروبی (تنفس و کربن زیست‌توده میکروبی) خاک داشتند و کاهش این خصوصیات در تنش شوری بیشتر از تنش آلودگی است. در غیاب بقایای گیاهی شوری سبب افزایش حلالیت و زیست‌فراهمی کادمیم شد و به طور افزاینده کاهش بیشتر تنفس و زیست‌توده میکروبی و افزایش ضریب ویژه تنفسی خاک را به همراه داشت. این در حالی است که افزودن بقایای گیاهی باعث تعدیل اثرات منفی تنش‌ها (شوری و آلودگی) در خاک شد. به همین دلیل اثر مشترک شوری و آلودگی در خاک‌های تیمار شده با بقایای گیاهی کاهنده بود. به طور کلی مصرف مواد آلی در خاک‌های آلوده و شور باعث کاهش نسبی کادمیم قابل جذب و سمیت ناشی از آن و بهبود نسبی و یا کامل فعالیت میکروبی خاک می‌شود. لذا پیشنهاد می‌گردد از مواد آلی برای بهبود رشد و فعالیت میکروبی خاک‌های آلوده شور استفاده شود.

سپاسگزاری

تحقیق قدردانی و تشکر می‌شود.

بدین وسیله از دانشگاه شهرکرد به خاطر حمایت‌های مالی این

منابع

1- Abbaspour A., Kalbasi K., and Hajrasuliha S. 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., Jansen B., Kalbitz K., Faz A., and Martinez S. 2011. Salinity increases mobility of heavy metals in soils. Chemosphere, 85:1318-1324.
3- 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.
4- Anderson J.P.E. 1982. Soil respiration. p.831-871. In: A.L. Page, R.H. Miller. (Eds.). Methods of Soil Analysis Part 2. Chemical and Microbiological Properties. ASA, Madison, WI.
5- Anderson T.H., and Domsch K.H. 1993. The metabolic quotient for CO_2 (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. Soil Biology and Biochemistry, 25:393-395.
6- Chowdhury N., Marschner P., and Burns R.G. 2011. Soil microbial activity and community composition: impact of changes in matric and osmotic potential. Soil Biology and Biochemistry, 43:1229-1236.
7- Dai J., Becquer T., Rouiller J.H., Reversat G., Bernhard-Reversat F., and Lavelle P. 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.
8- Dilly O., and Munch J.C. 1996. Microbial biomass content, basal respiration and enzyme activities during the course of decomposition of leaf litter in a black alder (*Alnus glutinosa* (L.) *Gaertn*) forest. Soil Biology and Biochemistry, 28:1073-1081.
9- Effron D., Horra A.M., Defrieri R.L., Fontanive V., and Palma R.M. 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.
10- Elgharabli A., and Marschner P. 2011. Microbial activity and biomass and N and P availability in a saline sandy loam amended with inorganic nitrogen and lupin residues. European Journal of Soil Biology, 47:310-315.
11- Herrick J.E. 2000. Soil quality: an indicator of sustainable land management. Applied Soil Ecology, 15:75-83.
12- Koizumi Y., and Iwami S. 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.
13- Landi L., Renella G., Moreno J.L., 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.
14- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1987. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Science Society of America Journal, 42:421-428.
15- Madrid F., Lopez R., and Cabera F. 2007. Metal accumulation in soil after application of municipal solid waste compost under intensive farming condition. Agriculture, Ecosystems and Environment, 119:249-256.
16- Melero S., Madejon E., Ruiz J.C., and Herencia J.F. 2007. Chemical and biochemical properties of a clay soil under dryland agriculture system as affected by organic fertilization. European Journal of Agronomy, 26:327-334.
17- Moreno J.L., Hernandez T., Perez A., and Garcia 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.
18- Muhling K.H., and Lauchli A. 2003. Interaction of NaCl and Cd stress on compartmentation pattern of cations, antioxidant enzymes and proteins in leaves of two wheat genotypes differing in salt tolerance. Plant and Soil, 253:219-231.
19- Raiesi F. 2007. The conversion of overgrazed pastures to almond orchards and alfalfa cropping system may favor microbial indicators of soil quality in central Iran. Agriculture, Ecosystems and Environment, 121:309-318.
20- Rasul G., Appuhn A., Muller T., Joergensen R.G. 2006. Salinity-induced changes in the microbial use of sugarcane filter cake added to soil. Applied Soil Ecology, 31:1-10.
21- Rietz D.N., and Haynes R.J. 2003. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. Soil Biology and Biochemistry, 35:845-854.
22- Shentu J.L., He Z.L., Yang X.E., and Li T.Q. 2008. Microbial activity and community diversity in a variable charge soil as affected by cadmium exposure levels and time. Journal Zhejiang University Science B, 9:250-260.
23- Tejada M., Garcia C., Gonzalez J.L., and Hernandez M.T. 2006. Use of organic amendment as a strategy for saline

soil remediation: influence on the physical, chemical and biological properties of soil. Soil Biology and Biochemistry, 38:1413-1421.
24- Tejada M., Gonzalez J.L., Garcia-Martinez A.M., and Parrado J. 2008. Effect of different green manures on soil biological properties and maize yield. Bioresource Technology, 99:1758-1767.
25- Thomas E.Y., Omueti J.A.I., and Ogundayomi O. 2012. The Effect of phosphate fertilizer on heavy metal in soils and *Amaranthus caudatus*. Agriculture and Biology Journal of North America, 3:145-149.
26- Tripathi S., Kumari S., Chakraborty A., Gupta A., Chakrabarti K., and Bandyapadhyay B.K. 2006. Microbial biomass and its activities in salt-affected coastal soils. Biology and Fertility of Soils, 42:273-277.
27- 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).
28- Usman A.R.A., Kuzyakov Y., and Stahrk L.A. 2005. Effect of immobilizing substances and salinity on heavy metals availability to wheat grown on sewage sludge-contaminated soil. Soil and Sediment Contamination, 14:329-344.
29- Vance E.D., Brookes P.C., and Jenkinson D.S. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil Biology and Biochemistry, 19:703-707.
30- Weggler-Beaton K., Mclaughlin M.J., and Graham R.D. 2000. Salinity increases cadmium uptake by wheat and Swiss chard from soil amended with biosolids. Australian Journal of Soil Research, 38:37-46.
31- Wichern J., Wichern F., and Joergensen R.G. 2006. Impact of salinity on soil microbial communities and the decomposition of maize in acidic soils. Geoderma, 137:100-108.
32- Zhao W., Sachsenmeier K., Zhang L., Sult E., Hollingsworth R.E., and Yang H. 2014. A new bliss independence model to analyze drug combination data. Journal of Biomolecular Screening, 19:817-821.

Journal of Water and Soil
Vol. 31, No. 6, Jan.-Feb. 2018, p. 1623-1636

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۱، شماره ۶، بهمن – اسفند ۱۳۹۶، ص. ۱۶۳۶-۱۶۲۳

Interactive Effects of Salinity and Cadmium Pollution on Microbial Respiration and Biomass in a Calcareous Soil Treated with Plant Residue

E. Sadeghi[1*]- F. Raiesi[2]- A. Hossienpur[3]

Received: 08-01-2017
Accepted: 06-11-2017

Introduction: 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. Anthropogenic activities have increased the concentration of heavy metals and soluble salts in soil, resulting in a major constrain for soil microbial performance and functions. Furthermore, soil microbial activity and biochemical processes are often limited by substrate availability in arid areas due to the low organic inputs. Although the individual effects of salinity and metal toxicity stresses on soil biological activity are generally well-known, their combined effects on microbial growth, population and functions are largely uncertain. The main aim of this study was to investigate the interactive effects of salinity and cadmium (Cd) Pollution on microbial respiration and biomass in a calcareous soil treated with plant residue. It was hypothesized that salinity would increase mobility and availability of Cd with subsequent reductions in microbial activity and biomass, and that addition of plant residue would modify these salinity effects.

Materials and Methods: This study was conducted under controlled laboratory conditions at Shahrekord University. A factorial experiment with two levels of cadmium (0 and 30 mg kg^{-1}), three levels of salinity (1.35, 7.5 and 10 dS m^{-1}) and two levels of plant residue (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 ºC for 98 days. Soil carbon (C) mineralization (microbial respiration) was measured weekly, and available Cd and microbial biomass C were measured at monthly intervals. In this experiment, the Bliss independence model was used to determine the type and nature of the interaction between salinity and pollution (synergistic and antagonistic).

Results and Discussion: The results showed that NaCl salinity increased the concentration of soil available Cd in both polluted and unpolluted soils over the experimental period, and the increases were greater at high than low salinity levels. This effect of salinity was less pronounced in residue-amended and unamended soils. In general, a strong synergistic effect of both stresses upon Cd availability was observed in residue-unamended soils while this effect was mostly antagonistic in residue-amended soils. This indicates that addition of plant residue to enhance soil organic matter may indirectly repress or lower salinity effect on Cd toxicity. Soil salinity decreased microbial biomass C and respiration with subsequent increases in specific respiratory quotient due to the increases in Cd solubility and availability. However, the changes in microbial properties were much lower in residue-amended and unamended soils. Addition of plant residue decreased the negative effects of both the individual and combined salinity and Cd pollution on microbial biomass and respiration. The interactive effect of these two stresses was mainly synergistic in residue-treated soils while it was antagonistic in residue-untreated soils. Overall, a strong synergistic effect occurred when both stresses were combined in the absence of plant residue while this effect was antagonistic in the presence of plant residue.

Conclusion: This study provided evidence that salinity could synergistically increase the mobility, bio-availability, and toxicity of Cd in Cd-polluted soils with C limitation. This was reflected by synergistic reductions in soil microbial biomass and respiration. However, addition of plant residue to increase soil organic matter lowered this effect of salinity, resulting in the antagonistic effects of salinity and pollution on soil microbial biomass and respiration. The reason for increase in the microbial activity in soils treated with plant residue was the increase of available substrate. As a result, using the plant residue increased the stimulatory effect of microbial activity. These findings point to the importance of providing adequate organic residues to

1, 2 and 3- M.Sc. Student and Professors, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Iran, Respectively
(*- Corresponding Author Email: el.sadeghi70@gmail.com)

enhance soil microbial performance and agricultural sustainability in polluted soils under salinity stress. However, further information on responses of microbial indicators to the joint effect of salinity and Cd toxicity is required.

Keywords: Interactions, Metal availability, Microbial biomass, Microbial respiration Pollution, Salinity