

برهمکنش کلرید سدیم و کادمیوم بر برخی صفات فیزیولوژیک و محتوای سدیم و کادمیوم ریشه و اندام هوایی خرفه (*Portulaca oleracea*)

مینا رفیعی^۱، *شهاب مداح حسینی^۲، محسن حمیدپور^۳ و علی اکبر محمدی میریک^۴

^۱دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه زراعت، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، دانشیار گروه زراعت، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان،

^۲دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ^۳استادیار گروه زراعت، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۵/۲۲

چکیده

سابقه و هدف: شوری یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی است که در مناطق خشک دنیا مانند ایران تولید محصول را محدود می‌نماید. علاوه بر شوری، آلودگی فلزات سنگین در خاک و آب‌های سطحی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه افزایش یافته است که می‌تواند سبب کاهش عملکرد گیاهان زراعی نیز گردد. یکی از مهم‌ترین نمک‌های ایجادکننده تنش شوری، کلرید سدیم است که اثرات بازدارنده آن بر رشد گیاه می‌تواند تحت تأثیر میزان کادمیوم خاک (و برعکس) قرار گیرد. خرفه یکی از قدیمی‌ترین و متحمل‌ترین گیاهان به شوری در مناطق خشک است که مصارف دارویی و خوراکی دارد. دانش کافی در مورد واکنش خرفه به اثرات توام کلرید سدیم و کادمیوم خاک وجود ندارد. هدف از این پژوهش بررسی برهمکنش کلرید سدیم و کادمیوم بر صفات رویشی، فیزیولوژیک و جذب و تجمع سدیم و کادمیوم در ریشه و اندام هوایی خرفه می‌باشد.

مواد و روش‌ها: به‌منظور بررسی اثر سمیت کادمیوم و کلرید سدیم بر برخی صفات خرفه، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل و در چارچوب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار طراحی و در اتاقک رشد با دمای ۱۸ و ۲۵ درجه سلسیوس (شب-روز) اجرا شد. عامل‌های آزمایش عبارت بودند از شوری حاصل از کلرید سدیم در چهار سطح (۰، ۲۳/۱، ۵۷/۴ و ۱۰۰/۲ میلی‌مولار) و کادمیوم در پنج سطح (۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ میلی‌گرم بر لیتر) که به‌مدت ۸۷ روز در محلول غذایی هوگلند اعمال گردیدند. بذور خرفه (توده محلی جیرفت) در بستر کوکوپیت پرلیت (۲:۱) در گلدان‌های یک لیتری کاشته شدند و تا زمان سبز شدن استقرار گیاهچه با آب مقطر آبیاری شدند. آنگاه گیاهچه‌ها به‌مدت ۸۷ روز با محلول غذایی هوگلند همراه با مقادیرهای محاسبه شده نمک و کادمیوم تیمار شدند.

یافته‌ها: کاهش معنی‌دار زیست‌توده اندام هوایی از ۲۳/۱ میلی‌مولار کلرید سدیم و ۲ میلی‌گرم بر لیتر کادمیوم شروع شد. همچنین شاخص سبزی‌نگی برگ با افزایش میزان کادمیوم در هر سطح کلرید سدیم کاهش یافت اما در شرایط بدون کادمیوم تا سطح ۵۷/۴ میلی‌مولار کلرید سدیم کاهش معنی‌داری نداشت. مشابه همین روند برای محتوای نسبی آب برگ نیز مشاهده شد به‌گونه‌ای که کلرید سدیم به‌تنهایی اثر کاهنده معنی‌داری بر آن نداشت اما در هر سطح کلرید

* مسئول مکاتبه: shahab.mhoseini@vru.ac.ir

سدیم مقدار آن با افزایش مقدار کادمیوم کاهش یافت. از سوی دیگر نشت یونی با افزایش میزان کلرید سدیم به طور معنی داری افزایش یافت اما به جز در سطح ۲۳/۱ میلی مولار کلرید سدیم افزایش محتوای کادمیوم اثر مشخصی بر آن نداشت. محتوای سدیم اندام هوایی و ریشه با افزایش سطح کلرید سدیم به صورت خطی افزایش یافتند اما در هر سطح کلرید سدیم و کادمیوم محتوای سدیم ریشه بسیار بیش تر از اندام هوایی بود. مشابه همین نتیجه برای محتوای کادمیوم ریشه و اندام هوایی نیز مشاهده شد. افزایش میزان کادمیوم بستر تا سطح ۲ میلی گرم بر لیتر اثری بر محتوای سدیم اندام هوایی نداشت و تنها ۴ میلی گرم بر لیتر کادمیوم سبب افزایش معنی دار آن شد.

نتیجه گیری: اگر چه کلرید سدیم و آلودگی به کادمیوم سبب کاهش رشد گیاه خرفه شد اما به نظر می رسد در این گیاه با انباشتگی مقدارهای قابل توجه سدیم و کادمیوم در ریشه از انتقال بیش از حد آن ها به اندام هوایی و کاهش بیش تر رشد گیاه جلوگیری می شود.

واژه های کلیدی: خرفه، زیست توده، کادمیوم، کلرید سدیم، محتوای نسبی آب برگ

مقدمه

شوری، که بخش قابل توجهی از آن را کلرید سدیم تشکیل می دهد، به عنوان یکی از تنش های مهم زیست محیطی اثر بازدارندگی قابل توجهی بر رشد و فعالیت های متابولیسمی گیاهان، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک جهان، دارد (۴۷). علاوه بر شوری، آلودگی فلزات سنگین در خاک و آب های سطحی به ویژه در کشورهای در حال توسعه افزایش یافته است که این منجر به کاهش بهره وری کشاورزی و عواقب بهداشتی خطرناک می شود (۱۲). در میان فلزات سنگین، کادمیوم یکی از مهم ترین آلاینده های زیست محیطی محسوب می شود که به روش های مختلف منابع آب و خاک را آلوده می نماید. کودهای فسفاتی، لجن فاضلاب و گازهای گلخانه ای صنعتی عمده منابع انسانی تولید کادمیوم می باشند (۱۳). کادمیوم اگرچه یک عنصر غذایی نیست اما به سهولت از طریق ریشه های گیاه جذب و با غلظت هایی که برای زنجیره غذایی خطرناک است، در گیاه انباشته می شود. تجمع کادمیوم در سطوح سلولی نیز می تواند سمی باشد و موجب کاهش رشد گردد (۴۹).

خرفه با نام علمی *Portulaca oleracea* گیاهی است یک ساله از خانواده *Portulacaceae* که ساقه ای گوشتی، برگ های متقابل و گل های کوچک زرد رنگ دارد (۱۵) و به عنوان انباشت کننده فلزات سنگین شناخته می شود. از سوی دیگر، متحمل به خشکی و شوری نیز می باشد (۱۰) و حتی می توان از آب های زهکش برای آبیاری این گیاه استفاده کرد. بذور خرفه در شوری های بالا جوانه زده و می توانند چرخه زندگی خود را کامل کرده، بذور تولید کنند. این گیاه، همچنین یک منبع گیاهی غنی از اسیدهای چرب امگا ۳، مواد معدنی، ویتامین ها و مواد آنتی اکسیدان است (۱۰ و ۴۷). ظرفیت جذب نمک توسط خرفه و تحمل بالای آن به سمیت کلر (۱۰)، این گیاه را به عنوان یک گونه هالوفیت معرفی کرده است به گونه ای که تقریباً هیچ کاهش عملکردی را در محیط های با شوری متوسط نشان نمی دهد (۱۸). با این حال در برخی پژوهش های دیگر اثر سطوح مختلف شوری بر این گیاه کاهش یافته است (۲۲، ۳۸، ۴۷ و ۵۰).

گیاه دارد (۵). دانش اندکی در مورد اثرات تلفیقی کلرید سدیم و کادمیوم و برهمکنش این دو بر رشد و نمو خرفه وجود دارد و این پژوهش با هدف بررسی تغییرات برخی صفات فیزیولوژیک آن در سطوح مختلف کلرید سدیم و کادمیوم طراحی و اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به صورت فاکتوریل و در چارچوب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار اجرا گردید. عامل‌های آزمایش عبارت بودند از شوری حاصل از کلرید سدیم در چهار سطح (۰، ۲۳/۱، ۵۷/۴ و ۱۰۰/۲ میلی‌مولار نمک کلرید سدیم برابر با ۱/۳۴، ۳، ۸ و ۱۳ دسی‌زیمنس بر متر) و کادمیوم (از منبع نترات کادمیوم) در پنج سطح (۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ میلی‌گرم بر لیتر) (۲۱، ۸، ۶). سطح شاهد شوری (۱/۳۴ دسی‌زیمنس بر متر) مربوط به هدایت الکتریکی محلول استاندارد هوگلند بود و با افزودن نمک کلرید سدیم به سطوح متوسط و شدید شوری در تیمارهای مختلف افزایش یافت. ابتدا بذور خرفه، تهیه شده از اداره منابع طبیعی شهرستان جیرفت، در گلدان‌های حاوی کوکوپیت و پرلیت (به نسبت ۲:۱) با قطر دهانه ۸ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر کاشته و با آب مقطر آبیاری شدند. در مرحله دو برگی تعداد بوته‌های هر گلدان به شش عدد کاهش یافت. پس از استقرار کامل گیاهچه و حدود ۱۰ روز پس از کاشت اعمال تیمارها آغاز شد. گیاهان هر سه روز یکبار با محلول غذایی با میزان محاسبه شده از نمک کلرید سدیم و یا نترات کادمیوم آبیاری شدند به گونه‌ای که مقدار کمی زه‌آب از ته گلدان‌ها خارج می‌شد. هر دو هفته یکبار به منظور جلوگیری از انباشتگی نمک درون گلدان‌ها، آب‌شویی با آب دو بار تقطیر با حجم تقریبی ۱۰۰ میلی‌لیتر (۱۰ برابر حد ظرفیت مزرعه‌ای بستر کشت) صورت گرفت و آبیاری با محلول غذایی دوباره آغاز

از طرف دیگر کادمیوم اگرچه برای رشد گیاه ضروری نیست اما به‌آسانی از طریق پوست ریشه جذب می‌شود و سپس از راه سیمپلاستی یا آپوپلاستی وارد بافت چوب می‌شود. تاخیر در رشد از نشانه‌های سمیت این فلز در گیاهان است بدین صورت که بر تقسیم سلولی در منطقه مریستمی و تنظیم رشد و نمو اثر می‌گذارد. اثرات منفی کادمیوم بر روی رشد گیاه همراه با افزایش نسبت وزن خشک به وزن تر در همه اندام‌ها می‌باشد (۴۴). با این حال، ممکن است غلظت‌های پایین کادمیوم غشاها را به شدت قطبی کرده و بدین ترتیب با افزایش جذب کاتیون‌ها و آماس سلولی و همچنین تحریک فعالیت برخی آنزیم‌ها مانند برخی پروتئازها، سبب افزایش رشد شود. (۱۹). گزارش شده است که در خاک‌های شور به دلیل تشکیل کمپلکس کلر با کادمیوم حلالیت و قابلیت جذب زیستی آن توسط گیاه افزایش می‌یابد (۱۲ و ۲۱). از این رو می‌توان از یون کلر به عنوان عامل افزایش‌دهنده توان گیاه‌پالایی کادمیوم استفاده کرد (۲۷ و ۴۱). با این حال، در گیاه هالوفیت *Portulacastrum sesuvium* با افزودن کلرید سدیم به بستر کشت آلوده به ۵۰ یا ۱۰۰ میلی‌مولار کادمیوم، نشانه‌های کلروز و بافت مردگی کاهش و محتوای کلروفیل برگ‌های بالایی افزایش یافت (۸). به همین ترتیب، در گیاهان تیمار شده با ترکیبی از کادمیوم و کلرید سدیم کاهش کم‌تر سرعت فتوسنتز و تعرق خالص نسبت به گیاهانی که تنها تحت تیمار شوری قرار داشتند، مشاهده شد (۴۳).

با این حال گزارش شده است برهمکنش کادمیوم و کلرید سدیم یا پتاسیم سبب کاهش بیش‌تر رشد و افزایش قابل توجه مواد تنظیم‌کننده اسمزی در جهت کاهش آسیب تنش می‌شود (۳۴). احتمالاً در این مورد یون کلرید اثراتی شبیه یون سدیم در آسیب به رشد

اندازه‌گیری شاخص کلروفیل یا سبزینگی برگ با استفاده از دستگاه اسپد^۱ انجام شد. بدین‌منظور در هر گلدان از هر بوته دو عدد برگ بالایی انتخاب شده، شدت رنگ سبز آن خوانده شد. برای اندازه‌گیری نشت یونی از هر نمونه برگ‌گی هشت دیسک جدا شده و با آب مقطر شستشو داده شدند. آن‌گاه درون لوله‌های درب‌دار حاوی ۲۰ میلی‌لیتر آب دوبار تقطیر ریخته شدند و به‌مدت ۲۴ ساعت در همزن^۲ قرار گرفتند. پس از این مدت قابلیت هدایت الکتریکی محلول‌ها با هدایت‌سنج اندازه‌گیری شد (EC₁). سپس، نمونه‌ها به‌مدت یک ساعت در اتوکلاو با دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس و فشار یک اتمسفر قرار داده شدند و پس از خنک‌شدن در دمای اتاق، مجدداً قابلیت هدایت الکتریکی آن‌ها اندازه‌گیری شد (EC₂). آن‌گاه نشت یونی غشا با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (۱۶):

$$EL = EC_1 / EC_2 \times 100 \quad (2)$$

برای اندازه‌گیری میزان سدیم و کادمیوم اندام هوایی و ریشه از از روش سوزاندن خشک و حل کردن در اسید کلریدریک ۲ نرمال استفاده شد و سپس غلظت کادمیوم با استفاده از دستگاه جذب اتمی^۳ و سدیم با استفاده از دستگاه شعله‌سنج^۴ اندازه‌گیری گردید (۳).

تجزیه و تحلیل‌های آماری: در این آزمایش، محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام شد. تجزیه واریانس جهت صفات اندازه‌گیری‌شده انجام و پس از آن مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد محاسبه گردید.

گردید. تیمارهای کلرید سدیم و کادمیوم همراه با محلول غذایی به‌مدت ۸۷ روز اعمال گردیدند. در طول مدت آزمایش دمای اتاق رشد ۲۵ و ۱۸ درجه سلسیوس (روز و شب)، رطوبت نسبی ۷۵-۵۰ درصد و دوره نوری شامل ۱۶ ساعت روشنایی و هشت ساعت تاریکی بود. ترکیب عناصر غذایی مورد استفاده در محلول غذایی بر اساس محلول یک دوم غلظت هوگلند پایه بود. در زمان برداشت گیاهان (۸۷ روز پس از کاشت، حد نهایی گنجایش اتاق رشد و گلدان‌ها برای رشد بوته‌ها)، اندام هوایی پس از شستشو با آب مقطر در آن با دمای ۷۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند و بعد از خشک شدن، وزن خشک اندام هوایی اندازه‌گیری شد. در طول دوره رشد گیاه محتوی آب نسبی، شاخص سبزینگی و میزان نشت یونی برگ نیز اندازه‌گیری شدند. بدین‌صورت که یک برگ بالغ و کاملاً توسعه یافته انتخاب شد و پس از جدا کردن از ساقه، داخل فویل آلومینیومی پیچیده شد و بلافاصله داخل فلاسک یخ به آزمایشگاه منتقل شد و وزن آن با تراز و با دقت ۰/۰۰۰۱ اندازه‌گیری شد (وزن تر). آن‌گاه برگ‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت در پتری‌دیش‌های حاوی ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر به دور از نور قرار گرفته و سپس وزن شدند (وزن آماس)، سپس برگ‌ها به‌مدت ۴۸ ساعت در آن در دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و دوباره وزن شدند (وزن خشک). در نهایت محتوای نسبی آب برگ با استفاده از رابطه ۱ بر حسب درصد محاسبه گردید (۳۹):

$$RWC = (W_f - W_d) / (W_t - W_d) \times 100 \quad (1)$$

که در آن، W_f وزن تر، W_d وزن خشک و W_t وزن آماس

1- SPAD, Minolta, Japan

2- Shaker

3- GBC, Avanta, Australia

4- Flame photometer, Jenway PFP7, England

نتایج و بحث

تحت تأثیر اثرات اصلی کلرید سدیم و کادمیوم قرار گرفت اما برهمکنش بین این دو معنی دار نبود (جدول ۱).

وزن خشک اندام هوایی: نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌های مربوط به وزن خشک اندام هوایی نشان داد که این صفت به‌طور معنی‌داری

جدول ۱- خلاصه نتایج تجزیه واریانس برخی صفات مورفوفیزیولوژیک و شاخص‌های جذب خرفه تحت تأثیر کلرید سدیم و کادمیوم.

Table 1. Summarized analysis of variance for some growth parameters and uptake characteristics of purslane at different levels of NaCl and cadmium.

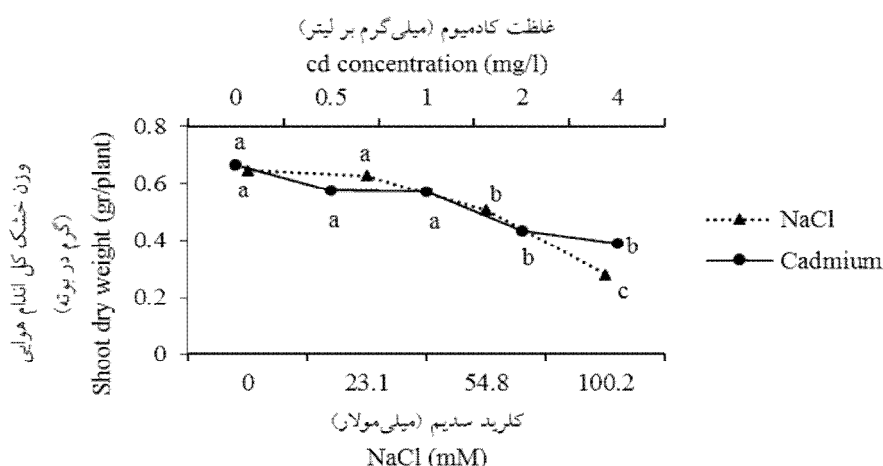
میانگین مربعات Average of squares									
منبع تغییر Source of variations	درجه آزادی Degree of freedom	وزن خشک اندام هوایی (گرم در بوته) Shoot dry weight (gr/plant)	محتوای نسبی آب برگ (%) RWC (%)	شاخص سبزیگی برگ SPAD value	سدیم اندام هوایی (گرم بر بوته) Shoot sodium (gr/plant)	سدیم ریشه (%) Root sodium (%)	کادمیوم اندام هوایی (%) Shoot cadmium (%)	کادمیوم ریشه (%) Root cadmium (%)	نشت یونی (%) Electrolyte leakage (%)
کلرید سدیم NaCl (S)	3	0.44**	354.6**	37.3**	441.6**	1289651.0**	2.5×10^{-3} **	6.4×10^{-2} **	1852.0**
کادمیوم Cadmium (C)	4	0.15**	683.1**	51.4**	27.4**	419896.1**	9.3×10^{-3} **	1×10^{-1} **	82.6 ^{ns}
کلرید سدیم × کادمیوم (S × C)	12	0.02 ^{ns}	113.6**	35.9**	10.7 ^{ns}	232302.6**	4×10^{-4} **	3×10^{-3}	230.9**
خطا error	40	0.01	25.1	7.7	5.9	5573.2	8×10^{-5}	1×10^{-3}	79.5
ضریب تغییرات CV (%)		21.63	7.3	10.3	23.0	18.0	22.4	22.1	12.9

** و ^{ns} به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و عدم معنی‌دار.

** and ^{ns} significant at the 0.05 probability level and non-significant, respectively.

۱ میلی‌گرم بر لیتر وزن خشک اندام هوایی تغییر قابل‌توجهی نداشت ولی با افزایش غلظت به ۲ و ۴ میلی‌گرم بر لیتر به ترتیب حدود ۳۵ و ۴۲ درصد نسبت به شاهد کاهش یافتند (به ترتیب ۰/۳۹ و ۰/۴۳ در برابر ۰/۶۶ گرم در بوته).

با افزایش سطح کلرید سدیم روند کاهشی در وزن خشک اندام هوایی مشاهده شد به طوری که کم‌ترین وزن خشک اندام هوایی در سطح ۱۰۰/۲ میلی‌مولار NaCl مشاهده شد (۵۲ درصد شاهد) (شکل ۱). از سوی دیگر، با افزایش غلظت کادمیوم تا



شکل ۱- تأثیر سطوح مختلف کلرید سدیم و کادمیوم بر وزن خشک اندام هوایی خرفه. در هر عامل (نمک و کادمیوم) میانگین‌های با یک حرف مشترک تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($P \leq 0.05$).

Figure 1. Effect of different levels of NaCl and cadmium on shoot dry weight of purslane. Values of NaCl and cadmium, separately, with one similar letter are not significantly different ($P \leq 0.05$).

کادمیوم بر رشد گیاهان وجود دارد. کادمیوم با ایجاد اختلال در فرایندهای مهم گیاه مانند فتوسنتز، تنفس، متابولیسم نیتروژن، کاهش جذب و انتشار عناصر غذایی ضروری مانند کلسیم، منیزیم، آهن و پتاسیم در نهایت منجر به کاهش رشد و تولید زیست‌توده در گیاه می‌گردد (۴۹). این اثر ممکن است در گیاهان شورپسند کم‌تر از گیاهان شیرین‌پسند باشد (۴۵).

با این حال، ممکن است غلظت‌های پایین کادمیوم تحریک‌کننده رشد باشد بدین‌صورت که غشای یاخته‌ای ریشه را به‌شدت قطعی کرده و منبع انرژی برای جذب کاتیون‌ها باشد. همچنین آماس یاخته‌ای و فعالیت برخی آنزیم‌ها مانند برخی پروتئازها را افزایش داده و افزایش رشد را باعث شود (۱۹). از سوی دیگر، ممکن است به سبب اثر مثبت یون کلر بر حلالیت کادمیوم در خاک، جذب آن توسط ریشه گیاه افزایش یابد (۲۷) از این‌رو انتظار می‌رود بر همکنش مثبت یا منفی از وجود هم‌زمان کادمیوم و کلرید سدیم بر رشد و تجمع ماده خشک در گیاه دیده شود. برای نمونه گزارش شده است افزودن کلرید سدیم به

به‌طورکلی، شوری (به‌ویژه NaCl) از طریق کاهش پتانسیل اسمزی، سمیت یونی و اختلال در مکانیسم‌های جذب گیاه، رشد و عملکرد گیاه را محدود می‌کند. برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که رشد گیاهان هالوفیت به‌طور قابل‌توجهی در شوری‌های پایین‌تر تحریک می‌شود، اما معمولاً در شوری‌های بالاتر متوقف می‌شود (۲۰). در پژوهشی بر روی خرفه با سطوح ۰، ۷۰ و ۱۴۰ میلی‌مولار نمک کلرید سدیم، وزن تر و خشک اندام هوایی ۳۰ روز پس از اعمال ۱۴۰ میلی‌مولار نمک کاهش یافت (۵۰). همچنین در گیاه هالوفیت *Plantago crassifolia* با کاربرد ۰ تا ۵۰۰ میلی‌مولار نمک NaCl وزن خشک اندام هوایی کاهش یافت به‌طوری‌که در شوری‌های ۴۰۰ و ۵۰۰ میلی‌مولار کم‌ترین وزن خشک مشاهده شد (۲۷). از آن‌جا که برهمکنش منفی قابل‌توجهی بین جذب یون کلرید و یون نیترات وجود دارد، ممکن است کاهش جذب نیترات از دلایل کاهش رشد و تجمع ماده خشک در شرایط شور باشد (۴۶). از سوی دیگر، گزارش‌هایی نیز مبنی بر اثر بازدارنده

به‌طورکلی کاهش در محتوای نسبی آب برگ یک پاسخ بسیاری از گیاهان (نه همه آنها) به تنش اسمزی است (۱۸). با افزایش محتوای نمک خاک، برخی گیاهان شورپسند می‌توانند با تجمع مواد محلول اسمزی و احتمالاً تجمع یون سدیم در واکنش و در نتیجه کاهش پتانسیل اسمزی برگ تحمل خود را از طریق افزایش جذب آب و بهبود آماس سلولی افزایش دهند (۹). در همین رابطه، نتیجه پژوهشی بر روی خرفه با کاربرد دو سطح شوری ۷۰ و ۱۴۰ میلی‌مولار کلرید سدیم ۱۸ روز پس از اعمال تنش نشان داد که RWC برگ ۲۶ درصد افزایش یافت (۱۸). در آزمایشی دیگر بر روی دو زیر گونه از آتریپلکس با سطوح شوری ۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۶۰ میلی‌مولار کلرید سدیم مشاهده شد که در زیر گونه *purpurea* محتوای نسبی آب برگ تا ۹۰ میلی‌مولار و در زیر گونه *rubra* تا ۲۶۰ میلی‌مولار کاهش نیافت. بدین ترتیب زیر گونه *rubra* به سبب وضعیت رطوبتی بهتر و کارایی مصرف آب بالاتر تحمل بهتری به شوری از خود نشان داد (۱۷). از سوی دیگر، کادمیوم به‌طورکلی تحمل به تنش آبی گیاهان را با کاهش فشار آماس سلول‌های برگ، کاهش می‌دهد. در پژوهشی بر روی سورگوم، محتوای نسبی آب برگ با افزایش غلظت کادمیوم کاهش یافت که می‌تواند به سبب کاهش جذب آب در نتیجه بازدارندگی رشد ریشه باشد (۲۳)، در حالی که اعمال ۵۰ میکرومولار نترات کادمیوم بر دو رقم سویا نشان داد که بین شاهد و گیاهان تیمار شده در محتوای نسبی آب برگ تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (۲۸). مشابه همین نتیجه در پژوهشی با کاربرد مقدارهای گوناگون کادمیوم بر روی گیاه شورپسند سالیکورنیا (*Salicornia ramosissima*) دیده شد (۳۵).

بستر کشت سبب کاهش آسیب کادمیوم به فتوستنز و تعرق خالص گیاهان می‌شود (۴۳). با این حال نتیجه پژوهشی دیگر نشان داده که افزودن کلرید سدیم به محیط حاوی کادمیوم اثر هم‌افزایی بر تجمع ماده خشک گندم نداشت (۱).

اثر کلرید سدیم و کادمیوم بر محتوای نسبی آب برگ (RWC): تجزیه واریانس داده‌ها در بررسی اثر کلرید سدیم و کادمیوم بر محتوای نسبی آب برگ نشان داد که اثر سطوح مختلف نمک، کادمیوم و برهمکنش این دو بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۱). در شوری‌های صفر (شاهد) و ۲۳/۱ میلی‌مولار کلرید سدیم، بیش‌ترین محتوای نسبی آب برگ در سطح شاهد کادمیوم مشاهده شد و با افزایش غلظت کادمیوم محتوای نسبی آب برگ کاهش یافت هر چند که بین غلظت‌های مختلف کادمیوم (به‌جز شاهد) تفاوت معنی‌داری دیده نشد. اما در ۵۷/۴ میلی‌مولار کلرید سدیم، با افزایش غلظت کادمیوم محتوای نسبی آب برگ تغییر معنی‌داری نداشت و در ۱۰۰/۲ میلی‌مولار تنها در غلظت‌های ۲ و ۴ میلی‌گرم بر لیتر کادمیوم محتوای نسبی آب برگ کاهش یافت (جدول ۲).

به‌نظر می‌رسد در شوری‌های پایین (۱/۳ و ۳ دسی‌زیمنس بر متر برابر ۰ و ۲۳/۱ میلی‌مولار NaCl) حساسیت به کادمیوم در غلظت ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر به‌صورت کاهش قابل‌توجه در محتوای نسبی آب برگ بروز می‌کند اما این حساسیت در شوری‌های ۸ و ۱۳ دسی‌زیمنس بر متر (۵۷/۴ و ۱۰۰/۲ میلی‌مولار NaCl) کم‌تر دیده می‌شود. از سوی دیگر محتوای نسبی آب برگ خرفه تا ۵۷/۴ میلی‌مولار NaCl و در همه سطوح کادمیوم نسبتاً بالاست (برای نمونه در ۵۷/۴ میلی‌مولار NaCl و کادمیوم ۴ میلی‌گرم بر لیتر، محتوای نسبی آب برگ حدود ۷۲ درصد است) که نشان از جذب آب و گوشتی بودن برگ حتی در شوری‌های نسبتاً شدید است.

جدول ۲- مقایسه میانگین شاخص سبزینگی (SPAD)، محتوای نسبی آب برگ (RWC) و نشت یونی (Electrolyte leakage) برگ خرفه در غلظت‌های مختلف کلرید سدیم و کادمیوم بستر کشت.

Table 2. Mean comparison of SPAD value, leaf relative water content (RWC) and electrolyte leakage of purslane leaves under different NaCl and cadmium concentrations in growth medium.

نشت یونی (%) Electrolyte leakage (%)	محتوای نسبی آب برگ (%) RWC (%)	شاخص سبزینگی برگ SPAD value	غلظت کادمیوم (میلی‌گرم بر لیتر) Cd concentration (mg/l)	غلظت کلرید سدیم (میلی‌مولار) NaCl concentration (mM)
54.5 ^{fgh}	82.0 ^{abc}	27.2 ^{abc}	0	
56.2 ^{fgh}	66.1 ^{efg}	27.0 ^{a-d}	0.5	
63.0 ^{d-h}	65.1 ^{fg}	27.0 ^{a-d}	1	0
66.9 ^{c-g}	63.0 ^{fg}	25.42 ^{c-f}	2	
53.0 ^{gh}	60.2 ^{gh}	23.2 ^{d-g}	4	
46.4 ^h	86.6 ^{ab}	29.8 ^a	0	
64.3 ^{d-h}	64.5 ^{fg}	27.8 ^{abc}	0.5	
59.0 ^{fgh}	63.7 ^{fg}	27.3 ^{abc}	1	23.1
62.1 ^{e-h}	64.8 ^{fg}	22.3 ^{fgh}	2	
72.8 ^{b-f}	60.0 ^{gh}	20.2 ^{ghi}	4	
80.7 ^{a-d}	76.8 ^{bcd}	29.4 ^{ab}	0	
85.7 ^{ab}	77.8 ^{bcd}	22.2 ^{fgh}	0.5	
84.5 ^{abc}	77.1 ^{cd}	26.0 ^{b-e}	1	57.4
90.1 ^{ab}	72.8 ^{c-f}	23.6 ^{d-g}	2	
62.7 ^{d-h}	72.0 ^{def}	17.3 ⁱ	4	
94.5 ^a	74.4 ^{b-e}	23.5 ^{d-g}	0	
77.6 ^{a-e}	75.5 ^{cde}	21.9 ^{gh}	0.5	
83.5 ^{abc}	66.8 ^{efg}	21.9 ^{fgh}	1	100.2
72.3 ^{b-f}	49.6 ⁱ	19.3 ^{hi}	2	
74.3 ^{b-f}	52.3 ^{hi}	18.2 ⁱ	4	

در هر ستون، میانگین‌های دارای حرف مشترک تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($P \leq 0.05$).

In each column, means with similar letter(s) are not significantly different ($P \leq 0.05$).

در سطح شاهد نمک با افزایش غلظت کادمیوم تا ۲ میلی‌گرم بر لیتر، شاخص کلروفیل برگ تغییر معنی‌داری نداشت و تنها در سطح ۴ میلی‌گرم بر لیتر نسبت به شاهد کاهش یافت. با افزایش شوری به ۲۳/۱ میلی‌مولار کلرید سدیم کاهش شاخص کلروفیل نسبت به شاهد از سطح ۲ و در شوری‌های ۵۷/۴ و

اثر کلرید سدیم و کادمیوم بر شاخص کلروفیل برگ (SPAD): نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به عدد اسپد نشان داد که کلرید سدیم، کادمیوم و برهمکنش کلرید سدیم و کادمیوم تأثیر معنی‌داری بر این صفت داشتند (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر متقابل کلرید سدیم و کادمیوم (جدول ۲) نشان داد که

اثر کلرید سدیم و کادمیوم بر نشت یونی: تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر کلرید سدیم و اثر متقابل کلرید سدیم و کادمیوم بر نشت یونی معنی‌دار بود اما کادمیوم به‌تنهایی اثری بر این صفت نداشت (جدول ۱). مقایسه میانگین‌ها (جدول ۲) نشان داد که در سطح شاهد نمک (۰ میلی‌مولار کلرید سدیم) با افزایش غلظت کادمیوم از ۰ تا ۴ میلی‌گرم بر لیتر نشت یونی تغییر معنی‌داری نداشت اما در ۲۳/۱ میلی‌مولار کلرید سدیم با افزایش غلظت کادمیوم نشت یونی افزایش پیدا کرد اما تنها در سطح ۴ میلی‌گرم بر لیتر کادمیوم این افزایش معنی‌دار بود. در سطوح ۵۷/۴ و ۱۰۰/۲ میلی‌مولار کلرید سدیم به‌طورکلی مقدارهای نشت یونی بسیار بیش‌تر از سطوح شاهد و ۲۳/۱ میلی‌مولار بود. با این‌حال در هر سطح نمک تغییرات نشت یونی با افزایش کادمیوم از صفر تا ۴ میلی‌گرم بر لیتر در بیش‌تر موارد معنی‌دار نبود. به‌نظر می‌رسد پایداری غشا تا حد ۲۳/۱ میلی‌مولار نمک و ۲ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم حفظ شده است اما با افزایش غلظت نمک به ۵۷/۴ و ۱۰۰/۲ میلی‌مولار کاهش یافته است هر چند که در این دو سطح نمک افزایش سطح کادمیوم اثر کاهنده بیش‌تری بر پایداری غشا نداشته است.

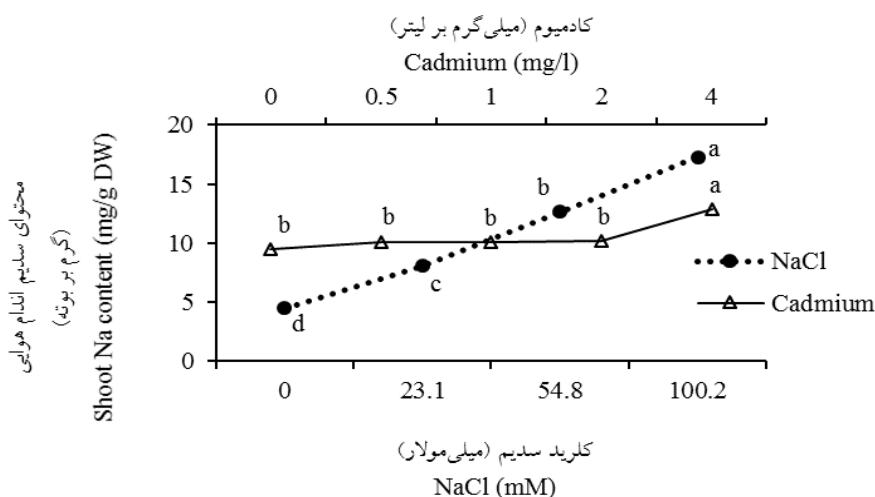
در شرایط تنش شوری (به‌ویژه کلرید سدیم) با افزایش گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر، پراکسیداسیون اسیدهای چرب افزایش می‌یابد و با از دست رفتن خاصیت انتخابی غشای سلول محتویات آن به بیرون نشت می‌کند. پیری برگ نیز یکی از عواملی است که در شرایط تنش شوری به گیاه تحمیل می‌شود. یکی از علل پیری برگ افزایش تراوایی و قابلیت نفوذپذیری غشا در غلظت‌های بالای نمک می‌باشد (۴۰). در گونه هالوفیت کالارگراس (*Leptochloa fusca* L.) در سطوح مختلف شوری (۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر) به‌علت تجمع اسمولیت‌ها و املاح در

۱۰۰/۲ میلی‌مولار از سطح ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر کادمیوم شروع شد. در سطح ۱۰۰/۲ میلی‌مولار کلرید سدیم، شاخص کلروفیل برگ به‌طورکلی بسیار پایین‌تر از شاهد بود. ممکن است شوری سبب کاهش غلظت منیزیم در برگ شده و از آن‌جا که منیزیم یک عنصر ضروری برای ساخت کلروفیل است، محتوای کلروفیل برگ کاهش یابد (۷). با این‌حال در پژوهشی با سطوح شوری ۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ میلی‌مولار کلرید سدیم بر روی خرفه مشاهده شد که با افزایش غلظت نمک، شاخص سبزی‌نگی برگ خرفه به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت (۱۸). نتایج برخی پژوهش‌ها نشان داده است با افزایش سطح کادمیوم بستر، جذب عناصر غذایی به‌کار رفته در ساختمان کلروفیل کاهش یافته و آثار زردی و خشکیدگی در گیاه پدیدار می‌گردد. در پژوهشی بر روی گوجه‌فرنگی کاربرد غلظت‌های متفاوت کادمیوم در دامنه ۸۰-۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک سبب کاهش معنی‌دار شاخص کلروفیل برگ شد (۳۳). همچنین ولی‌زاده فرد و همکاران (۴۸) بیان داشتند که کادمیوم باعث کاهش و توقف رشد ریشه، اختلال در جذب عناصر غذایی، کاهش میزان کلروفیل و اختلال در فعالیت آنزیم‌های درگیر در فتوسنتز می‌شود. در پژوهشی دیگر اعمال کادمیوم، کلرید سدیم و کادمیوم همراه با کلرید سدیم منجر به کاهش شاخص کلروفیل برگ در ژنوتیپ‌های جو شد اما تفاوتی بین سطوح تیمارهای کادمیوم و شوری مشاهده نشد اگرچه در گیاهان مقاوم به تنش مقدار اسپد بیش‌تر بود (۱۴). با این‌حال در برخی موارد برهمکنش مثبتی از شوری و کادمیوم بر محتوای کلروفیل برگ گزارش شده است. برای نمونه محتوای کلروفیل هالوفیت *Sesuvium portulacastrum* در معرض تیمار کلرید کادمیوم به‌تنهایی نسبت به شاهد کاهش یافت اما کلرید سدیم به‌طور قابل‌توجهی این اثر را کاهش داد (۱۲).

برهمکنش مشخصی از کلرید سدیم و کادمیوم بر پایداری غشا و نشت یونی در گیاه لوبیا مشاهده نشد و هر یک به تنهایی یا با هم اثر یکسانی بر آسیب به غشا داشتند (۳۷).

اثر کلرید سدیم و کادمیوم بر محتوای سدیم اندام هوایی و ریشه: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر کلرید سدیم و کادمیوم بر محتوای سدیم اندام هوایی معنی دار بود در حالی که برهمکنش آن با کادمیوم بر این صفت معنی دار نبود با این وجود محتوای سدیم ریشه تحت تأثیر غلظت کلرید سدیم، کادمیوم و برهمکنش آن‌ها قرار گرفت (جدول ۱). مقایسه میانگین سطوح مختلف کلرید سدیم (شکل ۲) نشان داد که محتوای سدیم اندام هوایی با افزایش غلظت کلرید سدیم بستر کشت به صورت خطی افزایش یافت به طوری که بیشترین محتوای سدیم در سطح ۱۰۰/۲ میلی مولار مشاهده شد. اما با افزایش غلظت کادمیوم از ۰ تا ۲ میلی گرم بر لیتر تغییری در محتوای سدیم اندام هوایی مشاهده نشد و تنها ۴ میلی گرم بر لیتر کادمیوم آن را به طور معنی داری افزایش داد (شکل ۲).

سلول‌های گیاهی به خوبی پتانسیل اسمزی و در نتیجه پایداری غشایی حفظ شد و بنابراین تنش شوری در هیچ یک از سطوح باعث افزایش نشت الکترولیتی از سلول‌ها نگردید (۱۱). در آزمایشی دیگر اعمال سطوح مختلف نمک (۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی مولار کلرید سدیم) اثر متفاوتی بر پایداری غشا دو رقم ارزن علوفه‌ای به نام‌های نوتریفید (مقاوم به شوری) و باستان (حساس به شوری) داشت. بدین ترتیب که در نوتریفید بین سطوح شاهد، ۵۰ و ۱۰۰ میلی مولار تفاوت معنی داری وجود نداشت ولی در رقم باستان کاهش معنی دار از سطح ۵۰ میلی مولار شروع شد (۳۴). از سوی دیگر کادمیوم همانند فلزات سنگین دیگر با اثر بر روی پیوندهای محتوی نیتروژن و گوگرد پروتئین‌ها موجب تخریب کانال‌های غشایی و نشت یون‌ها می‌شود. نتایج پژوهشی بر روی گیاه ذرت در کشت هیدروپونیک با سطوح کلرید کادمیوم (۰، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار) نشان داد که با افزایش میزان کلرید کادمیوم میزان نشت یونی افزایش پیدا کرد ولی تنها در سطح ۱۰۰ میکرومولار، افزایش معنی دار بود. بنا بر نتایج پژوهش رادی (۲۰۱۱)،



شکل ۲- تأثیر سطوح مختلف کلرید سدیم و کادمیوم بر محتوای سدیم اندام هوایی خرفه. در هر عامل (نمک و کادمیوم) میانگین‌های با یک حرف مشترک تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارند ($P \leq 0.05$).

Figure 2. Effect of NaCl and cadmium on sodium content of purslane shoot. In each factor (NaCl, cadmium), values with one similar letter are not significantly different ($P \leq 0.05$).

به غلظت ۶۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم تعلق داشت (۴۲). اشرف و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند اعمال ۱۵۰ میلی‌مولار شوری غلظت سدیم ریشه کلزا را نسبت به شاهد افزایش داد اما غلظت سدیم ریشه نسبت به اندام هوایی کم‌تر بود (۲). برهمکنش کلرید سدیم و کادمیوم نیز در برخی موارد بر جذب و تجمع سدیم مؤثر است. در پژوهشی بر روی ژنوتیپ‌های حساس و مقاوم جو مشخص شد که کاربرد کلرید کادمیوم به‌تنهایی اثری بر محتوای سدیم اندام هوایی نداشت اما ترکیب کلرید سدیم + کلرید کادمیوم سبب افزایش معنی‌دار محتوای سدیم نسبت به دیگر تیمارها شد. همچنین غلظت سدیم در ژنوتیپ‌های متحمل به شوری کم‌تر از ژنوتیپ‌های حساس بود (۱۴). در پژوهشی دیگر بر روی آتریپلکس با اعمال ۵۰ میلی‌مولار نمک‌های کلرید سدیم، نترات سدیم و کلرید پتاسیم و کلرید کادمیوم نتیجه گرفته شد که زمانی که ۵۰ میکرومولار کلرید کادمیوم به محیط کشت اضافه شد محتوای سدیم ریشه و اندام هوایی نسبت به شاهد افزایش یافت. بیش‌ترین محتوای سدیم برگ در تیمار کلرید سدیم همراه با کادمیوم نسبت به شاهد و کاربرد نترات سدیم به‌تنهایی مشاهده شد (۲۴).

اثر کلرید سدیم و کادمیوم بر محتوای کادمیوم ریشه و اندام هوایی: نتایج نشان داد اثر سطوح مختلف کلرید سدیم، کادمیوم و برهمکنش کلرید سدیم و کادمیوم بر محتوای کادمیوم ریشه و اندام هوایی خرفه معنی‌دار بود (جدول ۱). محتوای کادمیوم ریشه و اندام هوایی خرفه (جدول ۳) همراه با افزایش غلظت کادمیوم به‌کار رفته در محلول غذایی به‌صورت خطی افزایش یافت و بیش‌ترین محتوای کادمیوم در هر دو اندام در غلظت ۱۰۰/۲ میلی‌مولار نمک کلرید سدیم مشاهده شد. با این‌حال، به‌طور کلی محتوای کادمیوم ریشه بسیار بیش‌تر از اندام هوایی بود. بنا بر

از سوی دیگر، نتایج مقایسه میانگین (جدول ۳) نشان داد که در شوری شاهد (۰ میلی‌مولار NaCl) با افزایش غلظت کادمیوم محتوای سدیم ریشه افزایش یافت اما تنها تفاوت معنی‌دار بین سطح ۴ میلی‌گرم بر لیتر کادمیوم و شاهد بود. در سطوح ۲۳/۱ و ۵۷/۴ میلی‌مولار کلرید سدیم با افزایش غلظت کادمیوم از ۰ تا ۴ میلی‌گرم بر لیتر با این‌که محتوای سدیم ریشه افزایش یافت اما تفاوت معنی‌داری بین غلظت‌های مختلف کادمیوم مشاهده نشد. با افزایش نمک به ۱۰۰/۲ میلی‌مولار و با افزایش غلظت کادمیوم، محتوای سدیم ریشه افزایش یافت. در غلظت ۲ و ۴ میلی‌گرم بر لیتر در این سطح نمک به‌سبب کم بودن ماده خشک، محتوای سدیم ریشه قابل اندازه‌گیری نبود. با مقایسه سطوح مختلف کلرید سدیم در هر سطح کادمیوم نیز می‌توان دریافت که با افزایش نمک تا ۱۰۰/۲ میلی‌مولار محتوای سدیم ریشه افزایش یافت با این حال افزایش معنی‌دار بیش‌تر در همین سطح مشاهده شد.

در پژوهشی بر روی خرفه با سطوح شوری ۰، ۶۶، ۱۳۲ و ۲۶۴ میلی‌مولار کلرید سدیم نشان داده شد که محتوای سدیم اندام هوایی با افزایش شوری افزایش یافت با این‌حال در شوری ۲۶۴ میلی‌مولار محتوای سدیم تنها ۴۵ درصد بیش از شاهد بود. این میزان در گیاهانی که به‌مدت ۲۰ روز در معرض تنش قرار داشتند بیش‌تر بود. همچنین افزایش جذب سدیم منجر به کاهش تجمع کلسیم در اندام هوایی گیاه شد (۴۷). در آزمایشی دیگر بر روی خرفه با سطوح شوری ۰، ۳/۵، ۵ و ۶/۵ دسی‌زیمنس بر متر نتیجه گرفته شد که با افزایش شوری، درصد سدیم اندام هوایی افزایش یافت. همچنین محتوای کلر و سدیم بافت‌ها همبستگی بسیار بالایی داشتند (۲۲). نتیجه پژوهشی بر روی گیاه *Atriplex nummularia* با سطوح شوری ۰، ۷۵، ۱۵۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ میلی‌مولار نشان داد بیش‌ترین تجمع سدیم در ریشه

ناشی از آنیون کلرید از تجمع کادمیوم در گیاه هالوفیت آتریپلکس جلوگیری می‌کند (۲۴). همچنین وجود نمک کلرید سدیم از جذب کادمیوم توسط بقایای ساقه انگور به شدت جلوگیری می‌کند. ممکن است سازوکارهای دیگری به جز ایجاد کمپلکس‌های سطحی و تبادل بارهای الکتریکی مؤثر باشد (۲۵). همچنین تجمع کادمیوم در میوه طالبی تحت تأثیر محتوای کلرید سدیم خاک تغییر نکرد (۶).

برخی گزارش‌ها افزایش غلظت کادمیوم با افزایش سطح کلرید سدیم، ممکن است به دلیل تشکیل کمپلکس‌های محلول کادمیوم- کلر مانند $CdCl^+$ و $CdCl_2$ باشد که باعث افزایش حلالیت کادمیوم و افزایش جذب آن توسط گیاه می‌شود (۲۱ و ۲۶). همچنین این موضوع ممکن است به دلیل کاهش زیست‌توده گیاه در شوری‌های زیاد باشد. با این حال نتیجه یک پژوهش دیگر نشان داده است که شوری

جدول ۳- مقایسه میانگین محتوای سدیم ریشه و محتوای کادمیوم ریشه و اندام هوایی (درصد) خرفه در سطوح مختلف کلرید سدیم و کادمیوم بستر کشت.

Table 3. Mean comparison of root sodium content and root and shoot cadmium content (%) of purslane leaves under different NaCl and cadmium levels in growth medium.

محتوای کادمیوم (%)		محتوای سدیم ریشه (%) Root sodium content (%)	غلظت کادمیوم (میلی‌گرم بر لیتر) Cadmium (mg/l)	غلظت کلرید سدیم (میلی‌مولار) NaCl concentration (mM)
Cadmium content (%)	ریشه Shoot			
0.0027 ^g	0.017 ⁱ	51.1 ^g	0	
0.0174 ^g	0.123 ^{fgh}	71.5 ^{fg}	0.5	
0.0238 ^{ef}	0.130 ^{efg}	83.3 ^{fg}	1	0
0.0399 ^{cde}	0.225 ^{cd}	93.9 ^{fg}	2	
0.0548 ^c	0.227 ^{cd}	223.1 ^{c-f}	4	
0.0042 ^g	0.045 ^{hi}	76.2 ^{fg}	0	
0.0178 ^{fg}	0.070 ^{ghi}	93.3 ^{fg}	0.5	
0.0391 ^{cde}	0.115 ^{fgh}	105.6 ^{efg}	1	23.1
0.0542 ^c	0.203 ^{cde}	134.2 ^{d-g}	2	
0.0488 ^{cd}	0.223 ^{cd}	143.3 ^{c-g}	4	
0.0046 ^g	0.015 ⁱ	177.4 ^{c-g}	0	
0.0265 ^g	0.140 ^{efg}	175.0 ^{c-g}	0.5	
0.0341 ^{de}	0.180 ^{def}	175.2 ^{c-g}	1	57.4
0.0532 ^c	0.220 ^{cd}	212.1 ^{c-f}	2	
0.0947 ^a	0.240 ^{cd}	260.6 ^{cd}	4	
0.0029 ^g	0.073 ^{ghi}	253.9 ^{cde}	0	
0.0429 ^{cd}	0.230 ^{cd}	289.3 ^{bc}	0.5	
0.0544 ^c	0.267 ^c	419.9 ^a	1	100.2
0.0788 ^b	0.367 ^b	-	2	
0.1071 ^a	0.450 ^a	-	4	

در هر ستون، میانگین‌های دارای یک حرف مشترک تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($P \leq 0.05$).

In each column, means with similar letter(s) are not significantly different ($P \leq 0.05$).

غلظت کادمیوم ریشه در تیمار کادمیوم به‌تنهایی از کلرید سدیم و کلرید پتاسیم همراه با کادمیوم بیش‌تر بود. به‌طور کلی تجمع کادمیوم در ریشه نسبت به برگ بیش‌تر بود (۲۴). از سوی دیگر در برخی شرایط افزودن کلرید سدیم به محیط رشد علاوه بر کاهش اثرات کادمیوم در رشد گیاه موجب جذب و انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی می‌شود. در همین رابطه، افزودن کلرید سدیم به محیط رشد باعث کاهش بسیاری از نشانه‌های مسمومیت کادمیوم مانند مهار رشد، آسیب‌های غشایی و کلروز و نکروز در اندام هوایی *Sesuvium portulacastrum* می‌شود (۵). در مدلی که برای برهمکنش جذب کادمیوم و سدیم در خاک با توجه به بافت خاک معرفی شده است، روشن شده است که اگرچه افزایش کادمیوم و سدیم سبب افزایش جذب هر یک در گیاه (ریشه و اندام هوایی) می‌شود اما این اثر در خاک‌های با بافت سنگین مشخص‌تر بود (۲۳).

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش کاهش معنی‌دار وزن خشک توده محلی خرفه مورد استفاده در این پژوهش از سطح ۲۳/۱ میلی‌مولار کلرید سدیم و کادمیوم ۲ میلی‌گرم بر لیتر شروع شد. همچنین شاخص سبزی‌نگی برگ با افزایش محتوای کادمیوم کاهش یافت اما این اثر در محتوای کادمیوم بیش از ۲ میلی‌گرم بر لیتر و کلرید سدیم بیش از ۲۳/۱ میلی‌مولار مشخص‌تر بود. در مقابل، محتوای نسبی آب برگ اگرچه در هر سطح نمک با افزایش محتوای کادمیوم به‌طور نسبی کاهش یافت اما بدون کاربرد کادمیوم تغییر معنی‌داری در آن دیده نشد. به‌گونه‌ای که حتی در ۵۷/۴ و ۱۰۰/۲ میلی‌مولار کلرید سدیم نیز محتوای آب برگ خرفه کم‌تر از شاهد نبود. از سوی دیگر، محتوای سدیم اندام هوایی و ریشه خرفه در واکنش به افزایش سطح نمک و کادمیوم افزایش یافت اما در مجموع محتوای

گیاهان دارای برخی سازوکارهای فیزیولوژیک هستند که از تجمع کادمیوم در قسمت هوایی جلوگیری می‌کنند. به‌طور مثال با تشکیل کمپلکس بین کادمیوم و پپتیدهای موجود در غشای ریشه از انتقال این عنصر به اندام هوایی ممانعت می‌شود. همچنین، قابلیت ریشه در تجمع کادمیوم جذب‌شده را می‌توان از طریق مکانیسم‌های متعددی از جمله غیرمتحرک شدن کادمیوم در داخل سلول به‌واسطه تشکیل کمپلکس با اسیدهای آلی مانند مالات و اگزالات، پروتئین‌های ناقل به‌نام *Metallothioneins*، تجمع در داخل واکوئل و مسدود شدن به‌وسیله سلول‌های اپیدرمی تشریح کرد (۴). در آزمایشی بر روی دو گونه هالوفیت *Sesuvium portulacastrum* و *Mesembryanthemum crystallinum* با غلظت‌های متفاوت کادمیوم (۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میکرومولار) مشاهده شد که تجمع کادمیوم در اندام هوایی و ریشه هر دو گونه با افزایش غلظت کادمیوم افزایش یافت به‌طوری‌که بیش‌ترین تجمع کادمیوم اندام هوایی و ریشه به غلظت ۳۰۰ میکرومولار تعلق داشت، البته میزان تجمع کادمیوم در ریشه نسبت به اندام هوایی بیش‌تر بود (۷). در آزمایشی دیگر با اعمال ۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار کلرید کادمیوم بر روی هالوفیت *Cakile maritima* و گلکوفیت *Brassica juncea* مشاهده گردید که با افزایش غلظت کادمیوم از ۰ به ۱۰۰ میکرومولار تغییری در محتوای کادمیوم اندام هوایی *Brassica juncea* مشاهده نشد اما در گونه هالوفیت در غلظت ۱۰۰ میکرومولار بیش‌ترین محتوای کادمیوم اندام هوایی مشاهده شد (۴۴). در پژوهشی دیگر بر روی آتریپلکس با اعمال ۵۰ میلی‌مولار کلرید کادمیوم همراه با ۵۰ میلی‌مولار نمک‌های کلرید سدیم، نترات سدیم و کلرید پتاسیم نتیجه گرفته شد که غلظت کادمیوم ریشه در تیمار کادمیوم + نترات سدیم نسبت به اعمال کادمیوم به‌تنهایی بیش‌تر بود. با این حال

نهایت این که افزایش معنی دار محتوای سدیم اندام هوایی در واکنش به افزایش کادمیوم محیط از سطح ۴ میلی گرم بر لیتر کادمیوم شروع شد و از این رو غلظت های کم کادمیوم در خاک اثر افزایش دهنده ای بر جذب سدیم ندارد. با توجه به تجمع اندک سدیم و کادمیوم در اندام هوایی این گیاه، به نظر می رسد کیفیت علوفه ای آن حتی در خاک های آلوده به کادمیوم و شور قابل توجه باشد. با این حال ارزیابی های بیش تر مزرعه ای با تعداد بیش تری توده محلی که احتمالاً از دیدگاه تحمل به شوری یا آلودگی با هم متفاوتند، ضروری به نظر می رسد.

سدیم ریشه بسیار بیش تر از اندام هوایی بود. به نظر می رسد گیاه خرفه با انباشتنی مقادیر کمی نسبتاً زیاد سدیم در ریشه از تجمع آن در بافت های حساس اندام هوایی مانند برگ ها جلوگیری می کند. به همین ترتیب، محتوای کادمیوم ریشه و اندام هوایی نیز در واکنش به افزایش شوری و کادمیوم افزایش یافتند با این حال شیب افزایش در مورد ریشه بیش تر بود و به طور کلی محتوای کادمیوم ریشه نیز بسیار بیش تر از محتوای کادمیوم اندام هوایی بود. از این رو تجمع کم کادمیوم در اندام هوایی حتی در شرایط آلودگی خاک سبب حفظ کیفیت علوفه ای این گیاه می شود. در

منابع

1. Abo Kassem, E., Sharaf El Din, A., Rozema, J., and Foda, E.A. 1995. Synergistic effects of cadmium and NaCl on the growth, photosynthesis and ion content in wheat plants. *Biologia Plantarum*. 37: 241-249.
2. Ashraf, M., and Ali, Q. 2008. Relative membrane permeability and activities of some antioxidant enzymes as the key determinants of salt tolerance in canola (*Brassica napus* L.). *Environmental and Experimental Botany*. 63: 266-273.
3. Black, C.A., Evans, D., and Dinauer, R. 1965. *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy Madison, WI.
4. Barcelo, J., Vazquez, M., and Poschenrieder, C. 1988. Structural and ultrastructural disorders in cadmium treated bush bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.). *New Phytologist*. 108: 37-49.
5. Chai, M.W., Li, R.L., Shi, F.C., Liu, F.C., Pan, X., Cao, D., and Wen, X. 2014. Effects of cadmium stress on growth, metal accumulation and organic acids of *Spartina alterniflora* Loisel. *Afric. J. Biotechnol.* 11: 6091-6099.
6. Gabrijel, O., Davor, R., Zed, R., Marija, R., and Monika, Z. 2009. Cadmium accumulation by muskmelon under salt stress in contaminated organic soil. *Science of the Total Environment*. 407: 2175-2182.
7. Ghnaya, T., Nouairi, I., Slama, I., Messedi, D., Grignon, C., Abdelly, C., and Ghorbel, M.H. 2005. Cadmium effects on growth and mineral nutrition of two halophytes: *Sesuvium portulacastrum* and *Mesembryanthemum crystallinum*. *J. Plant Physiol.* 162: 1133-1140.
8. Ghnaya, T., Slama, I., Messedi, D., Grignon, C., Ghorbel, M.H., and Abdelly, C. 2007. Cd-induced growth reduction in the halophyte *Sesuvium portulacastrum* is significantly improved by NaCl. *J. Plant Res.* 120: 309-316.
9. Glenn, E.P., Brown, J., and Khan, M.J. 1997. Mechanisms of salt tolerance in higher plants. P 83-110, In: A.S. Basra and R.K. Basra (eds.), *Mechanisms of Environmental Stress Resistance in Plants*. Harwood Academics Press, Amsterdam.
10. Grieve, C., and Suarez, D. 1997. Purslane (*Portulaca oleracea* L.): a halophytic crop for drainage water reuse systems. *Plant and Soil*. 192: 277-283.
11. Haj Mohammadnia Ghalibaf, K., and Selahvarzi, Y. 2012. Effects of drought and salinity stresses on morpho-physiological characteristics of kalargras (*Leptochloa fusca* L.) under controlled conditions. *Iran. J. Field Crop Res.* 10: 179-188. (In Persian)

12. Helal, H.M., Upenov, A., and Issa, G.J. 1999. Growth and uptake of Cd and Zn by *Leucaena leucocephala* in reclaimed soils as affected by NaCl salinity. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 162: 589-592.
13. Howladar, S.M. 2014. A novel *Moringa oleifera* leaf extract can mitigate the stress effects of salinity and cadmium in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety.* 100: 69-75.
14. Huang, Y.Z., Wei, K., Yang, J., Dai, F., and Zhang, G.P. 2007. Interaction of salinity and cadmium stresses on mineral nutrients, sodium and cadmium accumulation in four barley genotypes. *J. Zhejiang Univ. Sci.* 8: 476-485.
15. Inanloofar, M., Omid, H., and Pazoki, A.R. 2014. Morphological, agronomical and oil content changes in purslane (*Portulaca oleracea* L.) under drought stress and biological - chemical nitrogen fertilization. *J. Med. Plant.* 12: 170-184. (In Persian)
16. Jambunathan, N. 2010. Determination and detection of reactive oxygen species (ROS), lipid peroxidation and electrolyte leakage in plants. *Plant stress tolerance: methods and protocols.* Pp: 291-297.
17. Kachout, S.S., Mansoura, A.B., Hamza, K.J., Leclerc, J., Rejeb, M., and Ouerghi, Z. 2011. Leaf-water relations and ion concentrations of the halophyte *Atriplex hortensis* in response to salinity and water stress. *Acta Physiologiae Plantarum.* 33: 335-342.
18. Kafi, M., and Rahimi, Z. 2011. Effect of salinity and silicon on root characteristics, growth, water status, proline content and ion accumulation of purslane (*Portulaca oleracea* L.). *Soil Science and Plant Nutrition.* 57: 341-347. (In Persian)
19. Karimi, G., and Nojavan, M. 2006. Investigation on cadmium chloride on growth parameters and proline, soluble sugars and proteins content in lens (*Lens culinaris* Medic) seedlings. *Pazhuhesh va Sazandegi.* 76: 53-45. (In Persian)
20. Khan, M.A., Ungar, I.A., and Showalter, A.M. 2000. Effects of salinity on growth, water relations and ion accumulation of the subtropical perennial halophyte, *Atriplex griffithii* var. stocksii. *Annals of Botany.* 85: 225-232.
21. Khoshgoftarmanesh, A.H., Shariatmadari, H., and Karimian, N. 2004. Effects of saline irrigation water and Zn application on soil Cd solubility and Cd concentration in wheat. *J. Water Soil Sci.* 7: 53-60. (In Persian)
22. Kilic, C.C., Kukul, Y.S., and Anac, D. 2008. Performance of purslane (*Portulaca oleracea* L.) as a salt-removing crop. *Agricultural Water Management.* 95: 854-858.
23. Kuriakose, S.V., and Prasad, M. 2008. Cadmium stress affects seed germination and seedling growth in *Sorghum bicolor* (L.) Moench by changing the activities of hydrolyzing enzymes. *Plant Growth Regulation.* 54: 143-156.
24. Lefevre, I., Marchal, G., Meerts, P., Correal, E., and Lutts, S. 2009. Chloride salinity reduces cadmium accumulation by the mediterranean halophyte species *Atriplex halimus* L. *Environmental and Experimental Botany.* 65: 142-152.
25. Martnez, M., Miralles, N., Hidalgo, S., Fiol, N., Villaescusa, I., and Poch, J. 2006. Removal of lead (II) and cadmium(II) from aqueous solutions using grape stalk waste. *J. Hazard. Mater.* 133: 203-211.
26. McLaughlin, M.J., Tiller, K.G., and Smart, M.K. 1997. Speciation of cadmium in soil solutions of saline/sodic soils and relationship with cadmium concentrations in potato tubers (*Solanum tuberosum* L.). *Austr. J. Soil Res.* 35: 183-198.
27. Manousaki, E., and Kalogerakis, N. 2011. Halophytes an emerging trend in phytoremediation. *Inter. J. Phytoremediation.* 13: 959-969.
28. Marchiol, L., Leita, L., Martin, M., Peressotti, A., and Zerbi, G. 1996. Physiological responses of two soybean cultivars to cadmium. *J. Environ. Qual.* 25: 562-566.
29. Mir Mohammadi Maibodi, S.A.M., and Ghareyazie, B. 2003. Physiological aspects and breeding for salinity stress in plants. *Isfahan University of Technology Press,* 288p. (In Persian)

30. Mohamed, A.I., and Hussein, A.S. 1994. Chemical composition of purslane (*Portulaca oleracea*). *Plant Foods for Human Nutrition*. 45: 1-9.
31. Moradi, V., and Ehsanzadeh, P. 2014. Effects of cadmium on some physiological parameters in different safflower genotypes under hydroponic conditions. *Science and Technology of Greenhouse Culture*. 5: 155-165. (In Persian)
32. Moteszarezaideh, B., Navabzadeh, M., and Liyaghat, A. 2016. Modeling phytoremediation of cadmium contaminated soil with sunflower (*Helianthus annus*) under salinity stress. *Inter. J. Environ. Res*. 10: 109-118.
33. Nemati, A., Gholchin, A., and Besharati, H. 2015. Effects of organic fertilizers on yield of tomato plant in a soil contaminated with cadmium. *J. Soil Res. (Soil and Water Sciences)*. 29: 23-36. (In Persian)
34. Noroozi, H., Roshanfekar, H.A., Hasibi, P., and Mesgarbashi, M. 2014. Evaluation of some photosynthetic characteristics of two forage millet cultivars under salinity stress. *J. Plant Physiol*. 2: 75-85. (In Persian)
35. Perez-Romero, J.A., Redondo-Gomez, S., and Mateos-Naranjo, E. 2016. Growth and photosynthetic limitation analysis of the Cd-accumulator *Salicornia ramosissima* under excessive cadmium concentrations and optimum salinity conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*. 109 (Supplement C): 103-113.
36. Poorakbar, L. 2011. Effect of cadmium on some biochemical parameters and nitrate reductase activity of nitrate reductase of maize (*Zea mays*). *Science J. Teacher Train. Univ*. 10: 976-959. (In Persian)
37. Rady, M.M. 2011. Effect of 24-epibrassinolide on growth, yield, antioxidant system and cadmium content of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants under salinity and cadmium stress. *Scientia Horticulturae*. 129: 232-237.
38. Rahimi, Z., Kafi, M., Nezami, A., and Khazaei, A. 2011. Effect of salinity and Si on some morpho-physiological properties of purslane. *Iran. J. Med. Arom. Plant*. 27: 359-374. (In Persian)
39. Ritchie, S.W., Nguyen, H.T., and Holaday, A.S. 1990. Leaf water content and gas-exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop Science*. 30: 105-111.
40. Safari, R., Maqsoody Mood, A.A., and Safari, A.R. 2013. Effects of salinity on chlorophyll fluorescence and grain yield of some sunflower (*Helianthus annus* L.) cultivars. *Seed Plant Prod. J*. 2: 109-130. (In Persian)
41. Salimi, M., Amin, M.M., Ebrahimi, A., Ghazi fard, A., Najafi, P., Amini, H., Razmjoo, P., and Vahid dasjerdi, M. 2000. The effect of salinity on phytoremediation potential of cadmium in contaminated soils. *J. Health Syst. Res*. 7: 6. 1130-1137. (In Persian)
42. Silveira, J.A.G., Araujo, S.A.M., Lima, J.P.M.S., and Viegas, R.A. 2009. Roots and leaves display contrasting osmotic adjustment mechanisms in response to NaCl-salinity in *Atriplex nummularia*. *Environmental and Experimental Botany*. 66: 1-8.
43. Smykalova, I., and Zamecnikova, B. 2003. The relationship between salinity and cadmium stress in barley. *Biologia Plantarum*. 46: 269-273.
44. Soltani, F., Ghorbanly, M., and Manoochehri Kalantary, Kh. 2006. The effect of cadmium on photosynthetic pigments, sugars and MDA content in rape (*Brassica napus*). *Iran. J. Biol*. 19: 2. 136-145. (In Persian)
45. Taamalli, M., Ghabriche, R., Amari, T., Mnasri, M., Zolla, L., Lutts, S., Abdely, C., and Ghnaya, T. 2014. Comparative study of Cd tolerance and accumulation potential between *Cakile maritima* L. (halophyte) and *Brassica juncea* L. *Ecological Engineering*. 71: 623-627.
46. Teixeira, M., and Carvalho, I.S.D. 2009. Effects of salt stress on purslane (*Portulaca oleracea*) nutrition. *Annals of Applied Biology*. 154: 77-86.
47. Uddin, M.K., Juraimi, A.S., Anwar, F., Hossain, M.A., and Alam, M.A. 2012. Effect of salinity on proximate mineral composition of purslane (*Portulaca oleracea* L.). *Austr. J. Crop Sci*. 6: 1732-1736.

48. Valyzadefard, F., Rihani Tabar, A., Najafi, N.A., and Avesta, S. 2013. Effects of cadmium and zinc application on the growth characteristics of rice and soil zinc, cadmium, iron and manganese concentrations under normal and waterlogged conditions. *Iran. J. Soil Water Res.* 3: 205-195. (In Persian)
49. Wang, X., Liu, Y., Zeng, G., Chai, L., Song, X., Min, Z., and Xiao, X. 2008. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Bechmeria nivea* (L.) Gaud. *Environmental and Experimental Botany.* 62: 389-395.
50. Yazici, I., Turkan, I., Sekmen, A.H., and Demiral, T. 2007. Salinity tolerance of purslane (*Portulaca oleracea* L.) is achieved by enhanced antioxidative system, lower level of lipid peroxidation and proline accumulation. *Environmental and Experimental Botany.* 61: 49-57.



Investigation on interaction of sodium chloride and cadmium on some physiological characteristics and Na and Cd uptake in roots and shoots of purslane (*Portulaca oleraceae* L.)

M. Rafiee¹, *Sh. Maddah Hosseini², M. Hamidpour³ and A.A. Mohammadi Mirik⁴

¹M.Sc. Graduate, Dept. of Agronomy, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, ²Associate Prof., Dept. of Agronomy, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, ³Associate Prof., Dept. of Soil Science, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, ⁴Assistant Prof., Dept. of Agronomy, Vali-e-Asr University of Rafsanjan

Received: 01.02.2017; Accepted: 08.13.2018

Abstract

Background and Objectives: Salinity, especially NaCl, is one of the most important abiotic stresses which limits crop productivity in dry regions like Iran. Also, soil and water heavy metal pollution is increasing in developing countries, which may suppress crop yield. The adverse effect of salinity on crop growth may be affected by soil cadmium content and vice versa. Purslane is one of the oldest and the most salt tolerant plant species having medicinal and edible uses in arid climates. Little is known about growth response of purslane to combined effect of NaCl and cadmium in soils. The aim of this study is to investigate the interaction of NaCl and cadmium on vegetative and physiological characteristics, sodium (Na) and cadmium (Cd) uptake and accumulation in roots and shoots of purslane.

Materials and Methods: This experiment was arranged as factorial based on complete randomized design with four replications and conducted in growth chamber with 25/18 °C temperatures. Factors included growth medium NaCl concentration at four levels (0, 23.1, 57.4 and 100.2 mM) and cadmium at five levels (0, 0.5, 1, 2 and 4 mg/l). Seeds of purslane (local ecotype of Jiroft) were sown in 1-litre plastic pots filled with coco peat-perlite (2:1) and were watered until full emergence and establishment. Then, seedlings were treated with Hoagland solution containing calculated amounts of NaCl and cadmium until 87 days afterward.

Results: Significant decrease in shoot biomass started from 23.1 mM NaCl and 2 mg/l cadmium. Also, leaf greenness index (SPAD value) decreased with increase in salinity in each cadmium level; however, when no cadmium was applied, SPAD did not significantly decrease up to 57.4 mM NaCl. Similarly, salinity had no significant effect on leaf relative water content (RWC), but in each salinity level, RWC decreased with increased cadmium level. On the other hand, tissue electrolyte leakage significantly increased with NaCl concentration, however, increase in Cd concentration had no substantial effect on it. Shoot and root Na content linearly increased with salinity, but in each salinity and Cd level, contents of Na in roots were significantly higher than those of shoot. Same results were observed for shoot and root Cd content. Shoot Na content was not significantly affected by Cd concentration in growth medium until 2 mg/l Cd and only 4 mg/l Cd significantly increased it.

Conclusion: Although sodium chloride and Cd contamination decreased purslane growth, but our results suggest that considerable accumulation of Na and Cd in roots of purslane inhibits excess translocation of Na and Cd to shoot tissues and further growth inhibition.

Keywords: Biomass, Cadmium, Purslane, RWC, Sodium chloride

* Corresponding Author; Email: shahab.mhoseini@vru.ac.ir