



دانشگاه گوار، رزن، استان گیلان

نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی

جلد بیست و سوم، شماره دوم، ۱۳۹۵

<http://jopp.gau.ac.ir>

کمی‌سازی پاسخ رشد رویشی و مؤلفه‌های فلورسانس کلروفیل گیاه دارویی بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) به غلظت کادمیوم در خاک

یاسر یعقوبیان^۱، سید عطاءالله سیادت^۲، محمدرضا مرادی‌تلاوت^۳ و *همت‌اله پیردشتی^۴

^۱ فارغ‌التحصیل دکتری زراعت، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان،
^۲ استاد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان، آستادیار، گروه زراعت و اصلاح
نباتات، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان، دانشیار، گروه زراعت، پژوهشکده ژنتیک و زیست فناوری
کشاورزی طبرستان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۲/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۳/۲۲

چکیده

سابقه و هدف: کادمیم (Cd) یکی از آلاینده‌های متداول خاک و یکی از سمی‌ترین فلزات سنگین در محیط‌زیست می‌باشد که در تولید پایدار محصول اثر منفی داشته و امنیت غذایی را به خطر می‌اندازد. در گیاهان کادمیوم باعث آسیب به فرایندهای فتوسنتزی و کاهش اسیمیلاسیون کربوهیدرات‌ها، آسیب به فتوسیستم I و II و در نتیجه حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm) و افزایش خاموشی غیرفتوشیمیایی می‌شود. از سوی دیگر، با توجه به خطر افزایش عناصر سنگین در خاک‌های کشاورزی، بادرنجبویه نیز مانند سایر گیاهان دارویی در معرض عناصر سنگین قرار دارد. بنابراین، پژوهش حاضر به منظور کمی‌سازی و شبیه‌سازی واکنش رشد رویشی و پارامترهای فلورسانس کلروفیل گیاه دارویی بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) به غلظت کادمیوم در خاک اجرا گردید.

مواد و روش‌ها: پژوهش حاضر در گلخانه تحقیقاتی پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان واقع در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و در تابستان و

*مسئول مکاتبه: h.pirdashti@sanru.ac.ir

پاییز ۱۳۹۳ انجام شد. تیمار آزمایشی شامل ۱۲ غلظت کادمیوم خاک از صفر تا ۳۰۰ میلی گرم در کیلوگرم، از منبع کلرید کادمیوم ($\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) بود که قبل از کاشت با خاک مخلوط شد. بذور بادرنجبویه در گلدان‌های حاوی غلظت‌های مختلف کادمیوم کشت شد و پس از گذشت هشت هفته از کاشت، سبزی‌نگی برگ (عدد SPAD) و متغیرهای فلورسانس کلروفیل شامل فلورسانس حداقل (Fo)، حداکثر (Fm) و متغیر (Fv)، حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm)، کارایی کمپلکس تجزیه‌کننده آب در سمت دهنده فتوسیستم II (Fv/Fo)، فلورسانس حداقل (Fo')، حداکثر (Fm') و فلورسانس پایدار (Ft) در مرحله روشنایی اندازه‌گیری گردید. همچنین، کارایی کوانتومی فتوشیمیایی موثر فتوسیستم II [Y(II)]، کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم شده فتوسیستم II [Y(NPQ)]، کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II [Y(NO)] و خاموشی غیرفتوشیمیایی (NPQ) نیز محاسبه شد. در نهایت بوته‌ها برداشت شده و صفات مورفولوژیک و وزن تر و خشک اندام‌های رویشی گیاه اندازه‌گیری گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که پاسخ صفات رویشی و متغیرهای فلورسانس کلروفیل گیاه بادرنجبویه به غلظت کادمیوم خاک به صورت دو مدل خطی (پنج پارامتر) و دو تکه‌ای (۱۴ پارامتر) توصیف گردید. صفات رویشی، سبزی‌نگی برگ و برخی متغیرهای فلورسانس کلروفیل از جمله Fv/Fm ، Fv/Fo و Y(II) با افزایش غلظت کادمیوم کاهش یافت در حالی که Fo ، Y(NPQ) و Y(NO) افزایش نشان داد. گیاه بادرنجبویه به مقادیر اولیه کادمیوم حساسیت بیشتری نشان داد، به طوری که شیب تغییرات بیشتر متغیرهای مورد مطالعه از جمله وزن تر و خشک اندام‌های رویشی، Fo ، Fv/Fm و Fv/Fo در سطوح پایین کادمیوم (محدوده صفر تا حدود ۷۵ میلی گرم در کیلوگرم خاک) بیشتر بود و پس از آن با شیب کمتری ادامه یافت.

نتیجه‌گیری: در مجموع حداکثر غلظت کادمیوم که گیاه دارویی بادرنجبویه قادر به رشد بود، حدود ۱۷۵ تا ۲۰۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک به دست آمد. با این حال در غلظت‌های بالاتر از حدود ۳۰ میلی گرم، تجمع ماده خشک گیاه بیش از ۵۰ درصد کاهش نشان داد.

واژه‌های کلیدی: برازش منحنی، سبزی‌نگی برگ، سمیت کادمیوم، عملکرد کوانتومی، گیاه دارویی

مقدمه

امروزه آلودگی خاک به انواع فلزات سنگین یکی از مشکلات زیست محیطی عمده در جوامع بشری است که علاوه بر کاهش رشد و عملکرد گیاهان، با ورود به زنجیره غذایی، سلامت انسان و دیگر موجودات زنده را به مخاطره می اندازد (۳۸، ۳۰). این فلزات طیف وسیعی از فعالیت های سلولی گیاه شامل فتوسنتز، تنفس، تغذیه ی معدنی، ساختمان غشای سلولی و بیان ژن ها را تحت تأثیر قرار می دهند (۲۶). در این بین، کادمیوم (Cd) یکی از سمی ترین عناصر است که هیچ گونه نقش زیستی ندارد و عمدتاً از طریق فرایندهای صنعتی، کودهای فسفره و آفت کش ها وارد خاک های کشاورزی می شود (۱۱، ۱۹). سمیت کادمیوم برای گیاه ۲۰-۲ برابر سایر فلزات سنگین است (۳۳)، به طوری که باعث آسیب به دستگاه فتوسنتزی، کاهش فعالیت روبیسکو در چرخه کالوین، کاهش آسیمیلاسیون کربوهیدرات (۳۲، ۱۰)، آسیب به فتوسیستم I و II (۳۲، ۱۰، ۴۰، ۲۴) و در نتیجه کاهش حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II یا Fv/Fm (۱۰) و افزایش خاموشی غیر فتوشیمیایی می گردد (۳۲). همچنین، کادمیوم با محدود ساختن فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی (۸) باعث بروز تنش اکسیداتیو در سلول ها (۳۴) و در نهایت کاهش رشد و عملکرد گیاه می شود.

انرژی نوری جذب شده توسط کلروفیل در برگ گیاه در سه فرآیند که مکمل هم هستند مورد استفاده قرار می گیرد؛ بخشی در فرآیند فتوشیمیایی برای راه اندازی فتوسنتز استفاده می شود و انرژی اضافی یا به صورت گرما هدر می رود و یا به صورت نور قرمز و به عنوان فلورسانس کلروفیل از فتوسیستم II بازتاب داده می شود (۴). بنابراین، با اندازه گیری فلورسانس کلروفیل می توان اطلاعات مفیدی در مورد تغییرات کارایی فتوشیمیایی و هدررفت گرمایی (۲۳) در شرایط مختلف رشدی گیاه، از جمله تحت تنش عناصر سنگین، بدست آورد. پاسخ متغیرهای فلورسانس کلروفیل به غلظت کادمیوم در برنج (۱۷)، گوجه فرنگی (۲۵)، کاهو (۱۰) و گیاه *Elsholtzia argyi* (۲۴) مورد بررسی قرار گرفته است، که در همه موارد، نتایج حاکی از حساسیت بالای متغیرهای فلورسانس کلروفیل نسبت به سمیت کادمیوم بوده است.

از سوی دیگر، امروزه گیاهان دارویی از جمله گیاهان مهم اقتصادی هستند و فرآورده های آنها به طور گسترده و فزاینده ای در جهان و ایران مصرف می شوند (۱۴، ۱، ۲۰، ۱۵). ایران یکی از مناطق مستعد تولید گیاهان دارویی می باشد (۷). به گزارش آریادجان و همکاران (۲۰۰۸) در مطالعات اخیر در برخی گیاهان دارویی در برزیل، هلند، آرژانتین و مکزیک غلظت های بالای عناصر سنگین گزارش

شده است که می‌تواند مشکلات سلامتی زیادی را به بار آورد (۲). در ایران نیز برای بیمارانی که از داروهای گیاهی استفاده کرده‌اند، به‌طور مکرر عوارض جانبی جدی گزارش شده است که یکی از این عوارض مربوط به حضور فلزات سنگین در این داروها بوده است (۳). علاوه بر این با توجه به اینکه رویکرد جهانی در تولیدات کشاورزی و به‌ویژه گیاهان دارویی به سمت استفاده از نظام‌های کشاورزی پایدار و به‌کارگیری روش‌های مدیریتی آن‌ها، نظیر کاربرد کودهای زیستی و آلی به‌منظور ارتقای عملکرد کمی و کیفی گیاهان است. در این میان برخی کودهای آلی مانند لجن فاضلاب و کمپوست حاوی مقادیر بالایی از عناصر سنگین هستند که می‌توانند جذب گیاه شده و وارد زنجیره غذایی انسان گردند (۱۸). بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) ازجمله گیاهان دارویی با ارزش است که اهمیت اقتصادی بالایی دارد. بادرنجبویه گیاهی معطر، پایا و علفی از خانواده نعناع (*Labiatae*) است که سرشاخه‌های هوایی آن حدود ۰/۱ تا ۰/۵ درصد اسانس روغنی دارد (۱۲). از مواد مؤثره این گیاه، که مهمترین آن‌ها سیترونلال است، برای درمان ناراحتی‌های اعصاب و مداوای بیماری‌های معده، قلبی و روده‌ای که منشأ عصبی دارند استفاده می‌شود (۶، ۱۲).

با توجه به خطر افزایش عناصر سنگین در خاک‌های کشاورزی، بادرنجبویه نیز مانند سایر گیاهان دارویی در معرض عناصر سنگین قرار دارد. در همین راستا، پیتو و همکاران (۲۰۱۱) در پرتغال طی آزمایشی میزان عناصر سنگین کادمیوم، سرب، روی و مس را در اندام رویشی هفت گیاه دارویی و در پنج سایت مختلف صنعتی و شهرنشینی اندازه‌گیری کردند. نتایج این محققین نشان داد که تمام گیاهان دارویی مورد بررسی ازجمله بادرنجبویه غلظت بالایی از عناصر کادمیوم و مس را دارا بودند (۳۱). همچنین در آزمایشی دیگر دلاور و همکاران (۲۰۱۱) آلودگی عناصر سرب، کادمیوم، آرسنیک و آلومینیوم را روی پنج گیاه دارویی کشت شده در نزدیکی کارخانجات صنعتی اراک، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که بین گیاهان مورد بررسی، بادرنجبویه بیشترین غلظت آرسنیک و پس از آویشن (*Thymus vulgaris*)، بیشترین غلظت سرب را دارا بود (۹).

از سوی دیگر، هرچند اثر سمیت کادمیوم در رشد رویشی و فیزیولوژیکی گیاهان به‌صورت گسترده در گونه‌های مختلف گیاهی مانند نخود (۳۲، ۲۸)، گندم (۳۷)، کاهو (۱۰)، خرفه (۲۹)، سویا (۴۰)، ذرت (۳۹) و *Elsholtzia argyi* (۲۴) مورد مطالعه قرار گرفته است، ولی با این‌حال در هیچ‌کدام از مطالعات مذکور، واکنش شاخص‌های رویشی و فیزیولوژیکی گیاه (به‌ویژه متغیرهای مربوط به فلورسانس کلروفیل) به‌صورت کمی گزارش نشده است. بنابراین با توجه به مطالب بیان

شده، پژوهش حاضر با هدف کمی‌سازی واکنش رشد رویشی و متغیرهای فلورسانس کلروفیل گیاه دارویی بادرنجبویه به غلظت کادمیوم خاک طراحی و اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در تابستان و پاییز ۱۳۹۳ و در گلخانه تحقیقاتی پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان واقع در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام شد. آزمایش در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار و ۱۲ غلظت کادمیوم خاک (صفر تا ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) انجام شد.

خاک مورد استفاده در آزمایش از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری مزرعه پژوهشی دانشگاه برداشت و پس از عبور از الک دو میلی‌متری، به نسبت دو به یک با ماسه مخلوط گردید. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش در جدول ۱ آمده است. خاک مخلوط شده به ۱۲ قسمت مساوی تقسیم و مقادیر مختلف کادمیوم از منبع کلرید کادمیوم ($\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) به آن اضافه گردید تا غلظت آن در خاک آزمایش به مقادیر موردنظر (صفر، ۱۲/۵، ۲۵، ۳۷/۵، ۵۰، ۶۲/۵، ۷۵، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) برسد. مقدار اولیه کادمیوم کل در خاک آزمایش ۱/۰۸ میلی‌گرم در کیلوگرم بود که معادل صفر در نظر گرفته شد. به‌منظور مخلوط کردن کادمیوم با خاک، مقادیر کلرید کادمیوم برای هر نمونه خاک در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل شده و به‌صورت یکنواخت با خاک مخلوط شد. سپس جهت نفوذ بهتر کادمیوم در اجزای خاک، به مدت چهار هفته در دمای اتاق نگهداری گردید. پس از گذشت مدت زمان مذکور خاک تیمار شده با مقادیر مختلف کادمیوم در گلدان‌هایی با گنجایش دو کیلوگرم خاک خشک، ریخته و تا حدود ۸۰ درصد ظرفیت زراعی آبیاری گردید، تا کادمیوم خاک کاملاً یکنواخت شود. بذور بادرنجبویه به‌مدت ۱۵ دقیقه با هیپوکلریت سدیم یک درصد استریل و تعداد ۲۰ عدد بذر در هر گلدان کشت گردید. گیاهچه‌ها در مرحله چهار برگی تنک شده و به پنج بوته در گلدان کاهش یافت. گلدان‌ها در گلخانه با دمای ۲۰/۲۵ (روز/شب) و نور طبیعی قرار گرفته و به‌صورت روزانه آبیاری گردید. در تمام مدت آزمایش برای جلوگیری از شستشو و خروج کادمیوم از خاک، آبیاری گلدان‌ها تا حدود ۸۰ درصد ظرفیت زراعی انجام گردید.

با گذشت هشت هفته از کاشت، متغیرهای فلورسانس کلروفیل با استفاده از دستگاه فلورومتر (PAM-2500, Walz, Germany) به روش جنتی و همکاران (۱۹۸۹) اندازه‌گیری گردید (۱۳). برای این منظور، آخرین برگ گسترش یافته گیاه با استفاده از گیره مخصوص دستگاه (Walz 2030-B) به مدت ۳۰ دقیقه در تاریکی قرار گرفته و فلورسانس حداقل (Fo) و حداکثر (Fm) در برگ‌های سازگار به تاریکی اندازه‌گیری شد. میزان فلورسانس متغیر^۱ (Fv)، حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II^۲ (Fv/Fm)، کارایی کمپلکس تجزیه‌کننده آب در سمت دهنده فتوسیستم II^۳ (Fv/Fo) به ترتیب با استفاده از معادلات ۱ تا ۳ محاسبه گردید (۳۶). سپس فلورسانس حداقل در مرحله روشنایی (Fo')، فلورسانس حداکثر در مرحله روشنایی (Fm') و فلورسانس پایدار (Ft) تحت نور فعال فتوسنتزی و در برگ‌های سازگار به روشنایی اندازه‌گیری شد. با استفاده از متغیرهای تعیین شده در برگ‌های سازگار به تاریکی و روشنایی، کارایی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر فتوسیستم II^۴ [Y(II)]، کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم شده فتوسیستم II^۵ [Y(NPQ)]، کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II^۶ [Y(NO)] و خاموشی غیرفتوشیمیایی^۷ (NPQ)، براساس معادله‌های ۴ تا ۷ محاسبه گردید (۲۱).

$$Fv = Fm - Fo \quad \text{معادله (۱)}$$

$$Fv/Fm = (Fm - Fo)/Fm \quad \text{معادله (۲)}$$

$$Fv/Fo = (Fm - Fo)/Fo \quad \text{معادله (۳)}$$

$$Y(II) = (Fm' - Ft)/Fm' \quad \text{معادله (۴)}$$

$$Y(NPQ) = (Ft/Fm') - (Ft/Fm) \quad \text{معادله (۵)}$$

$$Y(NO) = Ft/Fm \quad \text{معادله (۶)}$$

$$NPQ = Fm - Fm' / Fm' \quad \text{معادله (۷)}$$

1- Variable fluorescence

2- Maximum photochemical quantum yield of photosystem II

3- A value that is proportional to the activity of the water-splitting complex on the donor side of the PSII

4- Effective photochemical quantum yield of PSII

5- Quantum yield of regulated non-photochemical

6- Quantum yield of non-regulated non-photochemical

7- Non-photochemical quenching

همچنین سبزینگی برگ (عدد SPAD) نیز در آخرین برگ گسترش یافته گیاه با استفاده از دستگاه کلروفیل متر (SPAD-502, Minolta, Japan) اندازه گیری شد. در نهایت هر پنج بوته گلدان کف بر شده و صفات مورفولوژیک شامل ارتفاع بوته، قطر ساقه (با کولیس دیجیتالی)، تعداد برگ بوته و سطح برگ بوته (با نرم افزار Digimizer نسخه ۴/۱) و همچنین وزن تر و خشک اندام های رویشی گیاه شامل ساقه، برگ و شاخساره اندازه گیری گردید. جهت تعیین وزن خشک اندام های گیاهی، نمونه ها به مدت ۷۲ ساعت در آون و در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت.

در نهایت، داده های هریک از صفات رویشی و پارامترهای فلورسانس کلروفیل، از نرم افزار آماری SAS نسخه ۹/۱ (۳۵) تجزیه و تحلیل شدند. برای توصیف صفات رویشی و پارامترهای فلورسانس کلروفیل از معادلات خطی (معادله ۸) و دو تکه ای (معادله ۹) پیشنهاد شده توسط بخشده و همکاران (۲۰۱۲) استفاده شد (۵).

$$y = b_1x + a \quad \text{معادله (۸)}$$

$$y = b_1x + a \quad \text{if } x \leq x_0 \quad \text{معادله (۹)}$$

$$y = (b_1x_0 + a) + b_2(x - x_0) \quad \text{if } x > x_0$$

که در آن، y مقدار پیش بینی شده برای صفات مورد نظر، a مقدار ثابت در غلظت صفر کادمیوم، x غلظت کادمیوم در خاک، x_0 نقطه چرخش بین دو فاز معادله و b_1 و b_2 شیب تغییرات صفات (کاهشی یا افزایشی) به ترتیب در فاز یک و دو معادله هستند. با توجه به عدم رشد گیاه در سطوح کادمیوم بالاتر از ۱۵۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک، صفات مورفولوژیکی و وزن تر و خشک اندام های گیاهی تا سطح ۲۰۰ میلی گرم و متغیرهای فلورسانس کلروفیل و همچنین سبزینگی برگ تا سطح ۱۵۰ میلی گرم در کیلوگرم برازش داده شدند.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک.

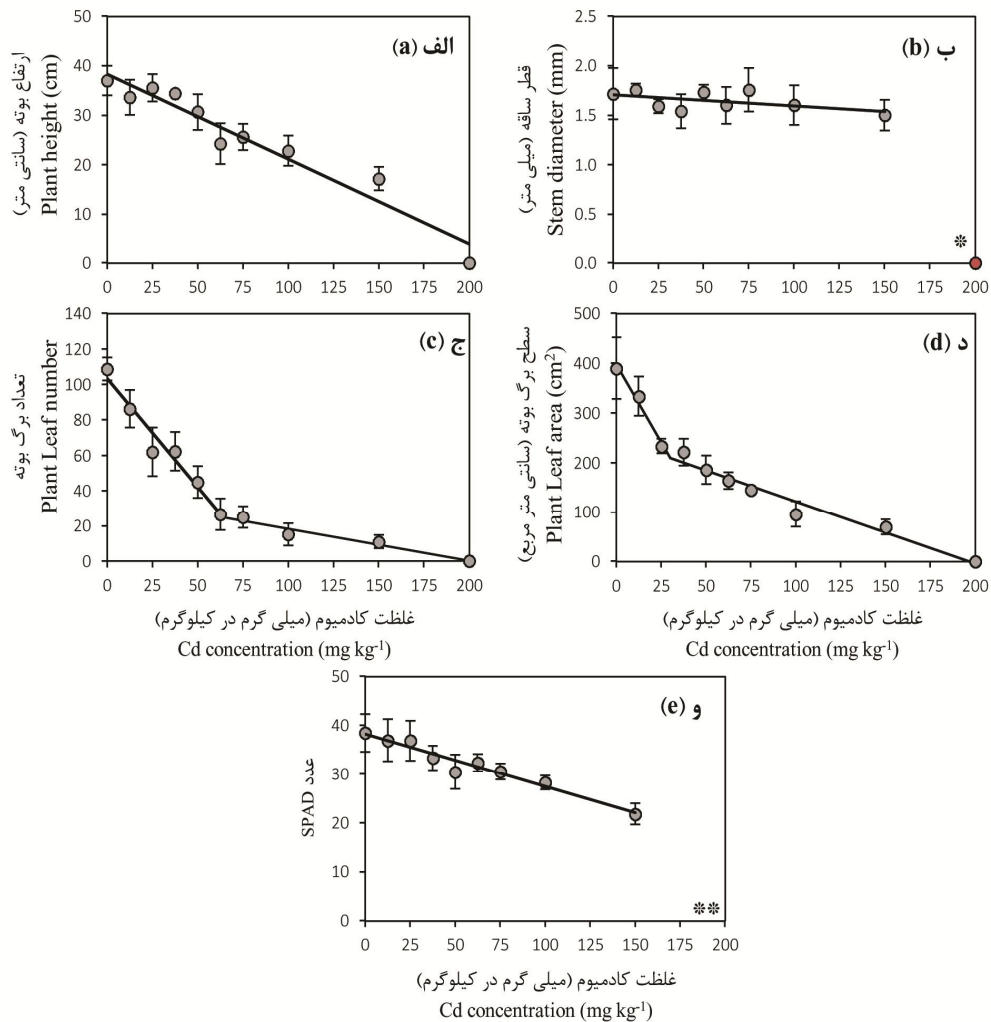
Table 1. Physical and chemical characteristics of the soil

بافت خاک Soil texture	سیلت Silt	رس Clay	شن Sand	نیترژن N	پتاسیم K	فسفر P	کادمیوم کل Total Cd (ppm)	pH	EC (dSm ⁻¹)
	(%)				(ppm)				
رسی - سیلتی Silty-Clay	38.6	32.3	29.1	0.21	251	9.80	1.08	7.4	1.06

نتایج و بحث

نتایج تجزیه رگرسیونی اثر سطوح مختلف کادمیوم خاک بر صفات ریخت‌شناختی و سبزی‌نگی برگ (شکل ۱ و جدول ۲) نشان داد که روند تغییرات ارتفاع بوته، قطر ساقه و سبزی‌نگی برگ در پاسخ به افزایش غلظت کادمیوم از رابطه خطی تبعیت نموده و به ترتیب با شیب $0/1717$ ، $0/011$ و $0/1078$ واحد کاهش نشان دادند. هرچند این کاهش در مورد قطر ساقه معنی‌دار نبود. وانگ و همکاران (۲۰۱۳) نیز در بررسی اثر هشت غلظت کادمیوم (صفر تا 800 میکرومول) در محلول غذایی روی گیاه ذرت کاهش ارتفاع بوته را در اثر سمیت این عنصر گزارش کردند (۳۹). شهابی‌وند و همکاران (۲۰۱۲) نیز روند کاهشی سبزی‌نگی برگ تحت سمیت کادمیوم را در گیاه گندم گزارش نمودند. به‌طوری که با افزایش غلظت کادمیوم خاک به $0/9$ میلی‌مولار (تقریباً معادل 101 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) سبزی‌نگی برگ تا 96 درصد کاهش یافت (۳۷). هی و همکاران (۲۰۰۸) نیز کاهش رشد رویشی و غلظت کلروفیل گیاه برنج را تحت تنش کادمیوم گزارش نمودند (۱۷). در پژوهش حاضر نیز کمترین سبزی‌نگی برگ ($22/06$) در غلظت 150 میلی‌گرم کادمیوم به‌دست آمد که نسبت به سطح صفر آن حدود 42 درصد کاهش نشان داد (شکل ۱- و). مقایسه نتایج این آزمایش با نتایج شهابی‌وند و همکاران (۲۰۱۲) بیانگر حساسیت کمتر سبزی‌نگی برگ در گیاه دارویی بادرنجبویه نسبت به گندم، تحت سمیت کادمیوم می‌باشد (۳۷).

براساس یافته‌ها، واکنش تعداد برگ و سطح برگ بوته به تغییرات غلظت کادمیوم خاک به‌صورت معادله دو تکه‌ای بیان شد (شکل ۱- ج و د و جدول ۲)، به‌طوری که تعداد برگ در بوته و سطح برگ بوته به ترتیب تا سطح کادمیوم $64/21$ و $29/95$ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک با شیب $1/2198$ و $6/2636$ واحد و سپس با افزایش بیشتر غلظت کادمیوم به ترتیب با شیب $0/1816$ و $1/2595$ واحد کاهش یافتند. در بین صفات ریخت‌شناختی مورد بررسی، بیشترین حساسیت نسبت به غلظت کادمیوم خاک مربوط به صفات تعداد برگ و سطح برگ بوته بود، به‌طوری که در سطح کادمیوم 200 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، به میزان 100 درصد نسبت به سطح صفر کادمیوم کاهش نشان داده و مقدار آن‌ها به صفر رسید (شکل ۱- ج و د).



شکل ۱- روند تغییرات ارتفاع بوته (الف)، قطر ساقه (ب)، تعداد برگ بوته (ج)، سطح برگ بوته (د) و سبزیگی برگ (و) گیاه دارویی بادرنجبویه در پاسخ به افزایش غلظت کادمیوم خاک با استفاده از مدل خطی (معادله ۸) دوتکه‌ای (معادله ۹).

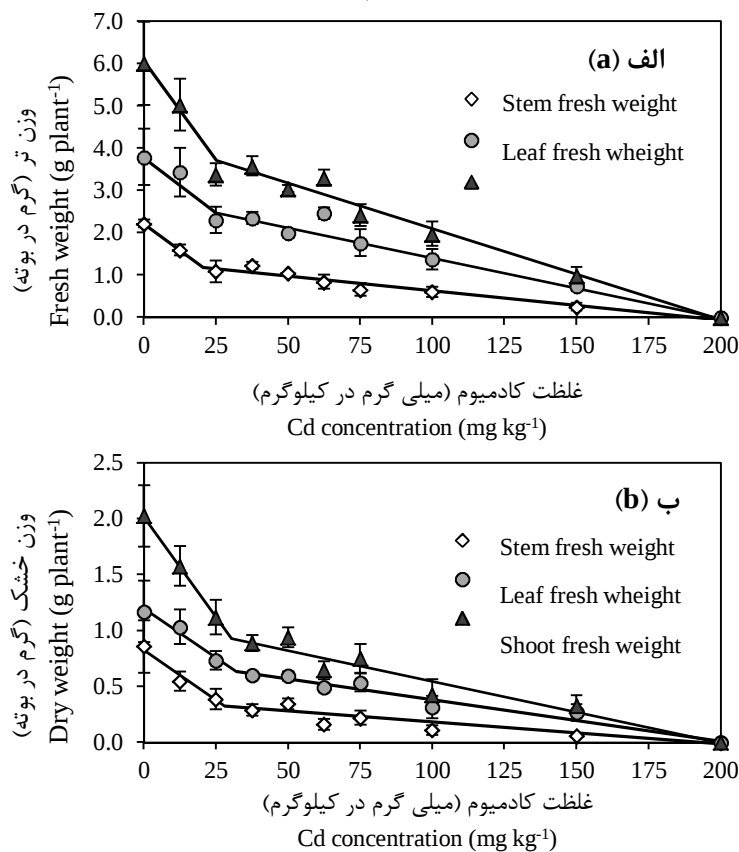
* در برازش منحنی استفاده نشده است. ** اندازه‌گیری نشده است.

Figure 1. The variation trend of plant height (a), stem diameter (b), plant leaf number (c), plant leaf area (d) and SPAD value (e) in lemon balm medicinal plant in response to Cd concentration gradients in the soil using the liner (Eq. 8) and segmented model (Eq. 9).

* not used in curve fitting. ** not measured.

وزن تر و خشک اندام‌های رویشی گیاه بادرنجبویه با افزایش غلظت کادمیوم خاک از صفر تا ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به شدت کاهش نشان داده و در غلظت بالای کادمیوم (۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) به صفر رسید. شیب کاهش این صفات در غلظت‌های متفاوت عنصر سنگین متغیر بود، به‌طوری که جهت توصیف روند تغییرات صفات مذکور در پاسخ به افزایش غلظت کادمیوم خاک از مدل دوتکه‌ای استفاده گردید (شکل ۲- الف و ب و جدول ۲). براساس نتایج، بیشترین حساسیت وزن تر و خشک اندام‌های رویشی گیاه به سمیت کادمیوم در سطوح پایین آن مشاهده شد. وزن تر ساقه، برگ و شاخساره با افزایش غلظت کادمیوم خاک تا ۲۰/۹۱، ۲۵/۰۰ و ۲۵/۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، به‌صورت خطی و با شیب زیاد (به‌ترتیب ۰/۰۴۹۶، ۰/۰۵۲۲ و ۰/۰۹۴۱- واحد) کاهش نشان داده و به‌ترتیب به ۵۳/۰۷، ۶۵/۴۸ و ۶۱/۲۱ درصد تیمار شاهد (سطح صفر کادمیوم) رسید. سپس با افزایش غلظت کادمیوم تا ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، با روند ملایم‌تری (به ترتیب ۰/۰۰۶۹، ۰/۰۱۴۳ و ۰/۰۲۱۵- واحد) کاهش یافت (شکل ۲- الف و جدول ۲). وزن خشک ساقه، برگ و شاخساره نیز در پاسخ به افزایش کادمیوم خاک عکس‌العمل مشابهی نشان داد، با این تفاوت که نقطه چرخش معادلات مربوط به آن‌ها در غلظت بالاتری (به‌ترتیب ۲۸/۰۴، ۳۲/۱۹ و ۳۰/۲۶) نسبت به وزن تر قرار داشته و در این غلظت نیز کاهش کمتری نشان داده و به‌ترتیب به ۳۸/۸۲، ۵۲/۶۶ و ۴۶/۰۷ درصد شاهد رسید (شکل ۲- ب و جدول ۲). در شکل ۳ تغییرات رویشی گیاه دارویی بادرنجبویه در غلظت‌های مختلف کادمیوم نشان داده شده است. در همین زمینه، اثر سمیت کادمیوم در رشد رویشی گیاه به‌صورت گسترده در گونه‌های مختلف گیاهی مانند نخود، گندم، کاهو، خرفه، سویا، ذرت و گیاه *Elsholtzia argyi* مورد بررسی قرار گرفته است (۳۲، ۲۸، ۳۷، ۱۰، ۲۹، ۴۰، ۳۹، ۲۴). نتایج این آزمایش نیز در مطابقت با نتایج سایر محققین بود که به‌عنوان مثال می‌توان به نتایج ناز و همکاران (۲۰۱۳) در خرفه (۲۹)، شهابی‌وند و همکاران (۲۰۱۲) در گندم (۳۷)، هی و همکاران (۲۰۰۸) در برنج (۱۷) و ژوو و همکاران (۲۰۱۳) در سویا (۴۰) اشاره کرد که کاهش وزن اندام‌های رویشی، ارتفاع بوته و قطر ساقه را در اثر افزایش غلظت کادمیوم خاک گزارش کرده بودند. گزارش‌ها نشان می‌دهد، کاهش وزن خشک بوته در کاهو (۱۰)، سویا (۴۰) و گندم (۳۷) وقتی که به‌ترتیب در معرض غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۹۰۰ میکرومولار (تقریباً معادل ۵/۶، ۱۱/۲ و ۱۰۱/۲ میلی‌گرم در لیتر) کادمیوم قرار گرفتند، حدود ۷۳، ۲۹ و ۳۲ درصد بود. حال آنکه در آزمایش حاضر در غلظت‌های ۵/۶، ۱۱/۲ و ۱۰۲/۲ میلی‌گرم کادمیوم در خاک وزن خشک شاخساره به‌ترتیب حدود ۱۰، ۲۰ و ۷۳ درصد کاهش نشان داد (شکل ۲- ب).

در آزمایش حاضر وزن تر و خشک اندام‌های رویشی در غلظت کادمیوم حدود ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به صفر رسید، حال آن‌که در آزمایش مشابهی این گستره برای گیاه خرفه بین صفر تا حدود ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌دست آمد (داده‌ها نشان داده نشده است). همچنین در غلظت‌های پایین کادمیوم (حدود صفر تا ۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، وزن خشک گیاه در مقایسه با وزن تر آن حساسیت بیشتری نسبت به سمیت کادمیوم نشان داد. به‌طوری‌که وزن تر شاخساره در غلظت حدود ۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به ۵۰ درصد از حداکثر مقدار خود (در شاهد) رسید، در صورتی‌که این غلظت برای وزن خشک شاخساره، حدود ۳۰ میلی‌گرم بود (شکل ۲- الف و ب و جدول ۲).



شکل ۲- روند تغییرات وزن تر (الف) و خشک (ب) ساقه، برگ و شاخساره گیاه دارویی بادرنجبویه در پاسخ به افزایش غلظت کادمیوم خاک با استفاده از مدل دوتکه‌ای (معادله ۹).

Figure 2. The variation trend of stem, leaf and shoot fresh (a) and dry (b) weight of lemon balm medicinal plant in response to Cd concentration gradients in the soil using the segmented model (Eq. 9).

نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی (۲۳)، شماره (۲) ۱۳۹۵

جدول ۲- برآورد مقادیر متغیرهای مربوط به معادلات برازش داده شده (خطی و دوتکه‌ای) بر صفات رویشی گیاه دارویی بادرنجبویه در غلظت‌های مختلف کادمیوم خاک.

Table 2. Estimation the value of fitted equation (liner and segmented) parameters for growth characteristics of lemon balm in different concentrations of Cd in the soil.

Sig	CV	RMSE	R ²	$x_0 \pm SE$	$b_2 \pm SE$	$b_1 \pm SE$	$a \pm SE$	صفات Traits
<0.0001	11.25	2.937	0.939			± 0.0150 -0.1717	± 1.442 38.32	ارتفاع بوته Plant high
0.1391	6.04	0.089	0.284			± 0.0010 -0.0011	± 0.049 1.71	قطر ساقه Stem diameter
<0.0001	11.10	4.909	0.982	± 6.28 64.21	± 0.0596 -0.1816	± 0.1094 -1.2198	± 4.139 103.30	تعداد برگ بوته Plant Leaf number
<0.0001	7.75	14.251	0.987	± 4.26 29.95	± 0.1147 -1.2595	± 0.9370 -6.2636	± 15.12 397.30	سطح برگ بوته Plant leaf area
<0.0001	3.68	1.181	0.954			± 0.0093 -0.1078	± 0.643 38.23	عدد اسپد SPAD value
<0.0001	9.54	0.091	0.982	± 4.66 20.91	± 0.00066 -0.0069	± 0.0120 -0.0496	± 0.106 2.21	وزن تر ساقه Stem fresh weight
<0.0001	10.37	0.212	0.967	± 15.42 25.00	± 0.00160 -0.0143	± 0.0288 -0.0522	± 0.254 3.78	وزن تر برگ Leaf fresh weight
<0.0001	7.32	0.219	0.986	± 8.11 25.00	± 0.00161 -0.0215	± 0.0290 -0.0941	± 0.226 6.06	وزن تر شاخساره Shoot fresh weight
<0.0001	16.54	0.049	0.966	± 4.12 28.04	± 0.00039 -0.0019	± 0.0032 -0.0180	± 0.052 0.082	وزن خشک ساقه Stem dry weight
<0.0001	8.52	0.048	0.982	± 5.62 32.19	± 0.00039 -0.0037	± 0.0032 -0.0176	± 0.052 1.20	وزن خشک برگ Leaf dry weight
<0.0001	8.81	0.076	0.985	± 3.79 30.26	± 0.00061 -0.0055	± 0.0050 -0.0360	± 0.081 2.02	وزن خشک شاخساره Shoot dry weight

a: عرض از مبدأ در سطح بدون تنش (غلظت صفر کادمیوم). b_1 و b_2 : شیب تغییرات صفت به ترتیب در مرحله ۱ و ۲. x_0 : نقطه چرخش بین دو مرحله. R^2 : ضریب تبیین. RMSE: جذر میانگین مربعات خطا. CV: ضریب تغییرات. Sig: معنی‌داری مدل. SE: خطای استاندارد.

a: constant value in the non-stress levels (zero concentration of Cd). b_1 and b_2 : slop of traits variation in phase 1 and 2, respectively. x_0 : turning point between the two phases. R^2 : coefficient of determination. RMSE: root mean square error. CV: coefficient of variation. Sig: significance of model. SE: standard error.



شکل ۳- روند تغییرات رشد رویشی گیاه دارویی بادرنجبویه در پاسخ به افزایش غلظت کادمیوم خاک (میلی گرم در کیلوگرم)، هشت هفته پس از کاشت.

Figure 3. The variation trend of lemon balm growth in response to Cd concentration gradients in the soil (mg kg^{-1}) in the soil 8 weeks after sowing.

به منظور توصیف رابطه بین فلورسانس حداقل (F_0)، حداکثر کارایی کوانتومی سامانه نوری II (F_v/F_m) و کارایی کمپلکس تجزیه کننده آب در سمت دهنده سامانه نوری II (F_v/F_0) با غلظت کادمیوم خاک، مدل دو تکه ای و برای فلورسانس حداکثر (F_m) مدل خطی برازش داده شد. منحنی های برازش شده و پارامترهای برآورد شده به ترتیب در شکل ۴ و جدول ۳ نشان داده شده است. براساس یافته ها، با افزایش غلظت کادمیوم خاک از صفر تا حدود ۷۵ میلی گرم در کیلوگرم، F_0 به صورت خطی با شیب ۰/۰۰۱۱ واحد افزایش و F_v/F_m و F_v/F_0 به ترتیب با شیب ۰/۰۰۰۱- و ۰/۰۰۳۲- واحد کاهش نشان داد، ولی در ادامه و در غلظت های بالای کادمیوم (حدود ۷۵ تا ۱۵۰ میلی گرم در کیلوگرم) شیب تغییرات هر سه متغیر کاهش یافت (شکل ۴- الف، ج و د و جدول ۳). با این وجود، افزایش غلظت کادمیوم خاک اثر معنی داری بر F_m نداشت (شکل ۴- ب و جدول ۳). F_0 و F_m مقادیری از فلورسانس را نشان می دهند که در طی آن، Q_A به ترتیب در حداکثر اکسیداسیون (مراکز واکنشی فتوسیستم II باز) و حداکثر احیاء (مراکز واکنشی سامانه نوری II بسته) خود قرار دارد (۲۷، ۴). افزایش F_0 نشان از آسیب به زنجیره انتقال الکترون سامانه نوری در اثر کاهش ظرفیت کوئینون آ (Q_A) و عدم اکسیداسیون کامل آن به دلیل جریان کند الکترون در طول مسیر سامانه نوری II و در مجموع غیرفعال شدن سامانه نوری II دارد (۴۱). F_v/F_m حداکثر کارایی کوانتومی سامانه نوری

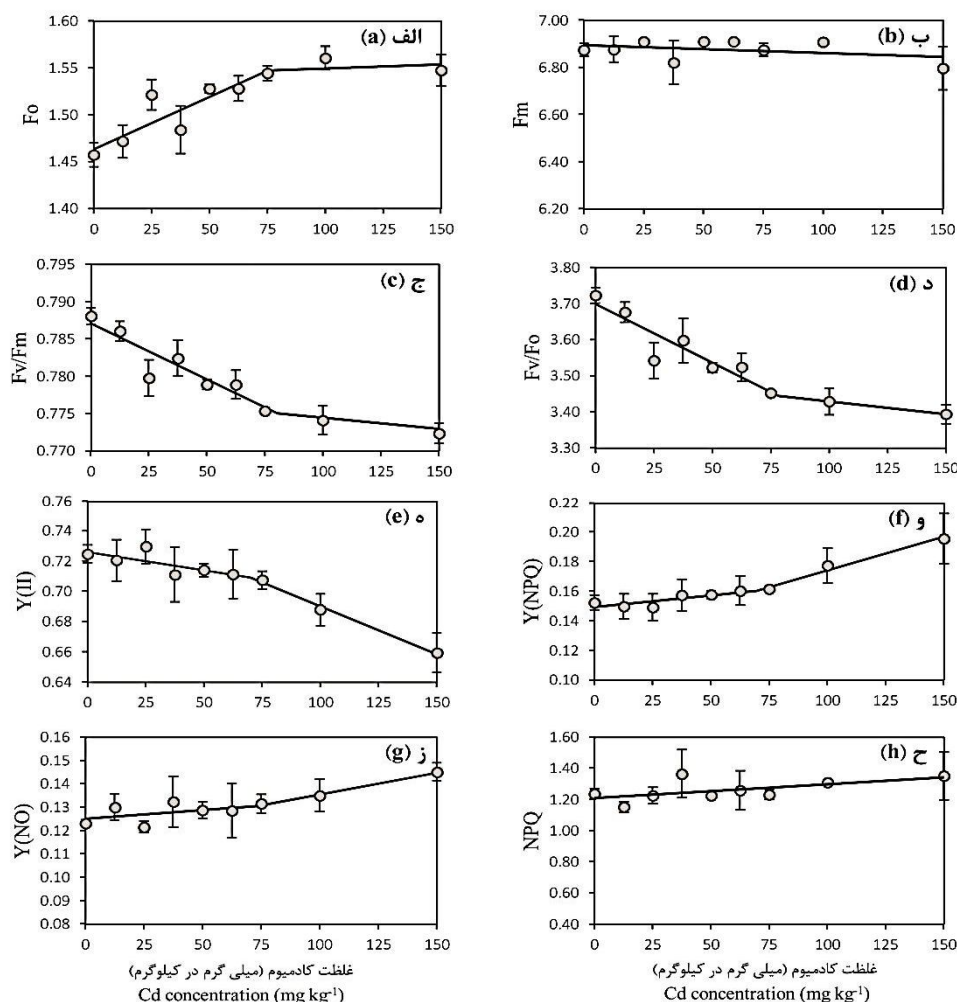
II است که طی آن نور جذبی برای احیای Q_A مصرف می‌شود و به‌عنوان شاخصی برای کارایی فتوسنتزی گیاه به‌کار می‌رود (۲۷، ۴). ماکسول و جانسون (۲۰۰۰) بیان داشتند که مقدار بهینه F_v/F_m برای گیاه حدود ۰/۸۳ است (۲۷)، حال آن‌که در این آزمایش، مقدار بهینه F_v/F_m برای گیاه بادرنجبویه، حدود ۰/۷۹ به‌دست آمد (شکل ۴-ج). محققین دیگری از جمله هی و همکاران (۲۰۰۸)، لوپز-میلان و همکاران (۲۰۰۹)، دیاز و همکاران (۲۰۱۳) و لی و همکاران (۲۰۱۵) نیز مقادیر کمتر از ۰/۸۳ را در شرایط بهینه رشدی برای گیاهانی چون برنج، گوجه فرنگی، کاهو و *Elsholtzia argyi* گزارش کرده بودند (۱۷، ۲۵، ۱۰، ۲۴). کاهش F_v/F_m بیانگر اثر اکسیداتیو یا بازدارندگی نوری عوامل تنش‌زای محیطی از قبیل عناصر سنگین، روی فتوسیستم II می‌باشد (۲۷، ۲۴). در آزمایش حاضر افزایش F_o و کاهش F_v/F_m و F_v/F_o در پاسخ به افزایش کادمیوم خاک با گزارش‌های سایر محققین در گیاهانی چون برنج (۱۷)، گوجه فرنگی (۲۵) گندم (۳۷)، کاهو (۱۰) و *Elsholtzia argyi* (۲۴) مطابقت داشت.

نتایج نشان داد، روند تغییرات کارایی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر سامانه نوری II $[Y(II)]$ ، کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم شده فتوسیستم II $[Y(NPQ)]$ و کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II $[Y(NO)]$ در پاسخ به افزایش غلظت کادمیوم خاک، به‌صورت معادله دوتکه‌ای بود (شکل ۴-ه، ز، شکل ۵ و جدول ۳). با افزایش غلظت کادمیوم خاک از صفر تا حدود ۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم، $Y(II)$ به‌صورت خطی و با شیب ۰/۰۰۰۲- کاهش یافته و از ۰/۷۲۶ به ۰/۷۰۹ (۲/۳۱) درصد کاهش نسبت به سطح صفر کادمیوم) رسید، ولی با افزایش بیشتر غلظت کادمیوم، شیب تغییرات آن افزایش یافت (۰/۰۰۰۶- واحد)، به‌طوری که در غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم کادمیوم، نسبت به غلظت ۷۵، ۶/۹۶ درصد کاهش نشان داد (شکل ۴-ه، شکل ۵ و جدول ۳). برخلاف $Y(II)$ ، روند تغییرات $Y(NPQ)$ و $Y(NO)$ در قبال افزایش غلظت کادمیوم به‌صورت افزایشی بوده و در غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم نسبت به غلظت صفر آن به‌ترتیب حدود ۳۲ و ۱۶ درصد افزایش یافت. بیشترین شیب تغییرات پارامترهای مذکور نیز در سطوح بالای کادمیوم خاک (غلظت حدود ۷۵ تا ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) مشاهده گردید که به‌ترتیب ۰/۰۰۰۵ و ۰/۰۰۰۲ واحد بود (شکل ۴-و و ز، شکل ۵ و جدول ۳).

از آنجایی که $Y(II)$ عملکرد فتوشیمیایی بوده و به‌طور مستقیم با سرعت اسیمیلایون CO_2 مرتبط است (۲۲، ۲۳)، بنابراین، کاهش $Y(II)$ در این آزمایش نشان دهنده کاهش سرعت فرایند

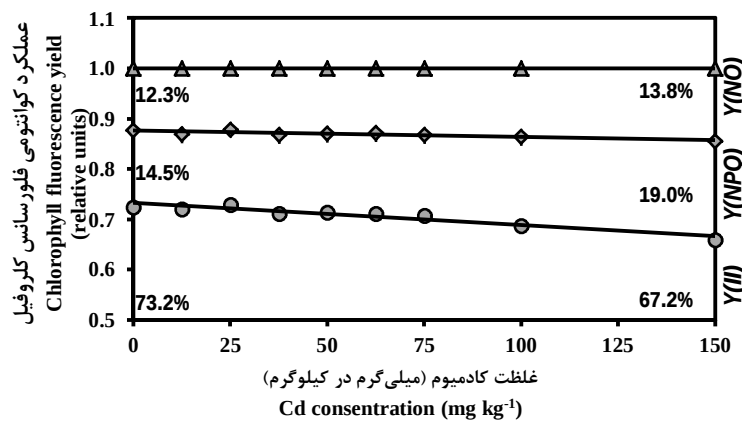
فتوستتزی و محدودیت اسیمیلایسیون CO_2 در اثر سمیت کادمیوم است. $Y(NPQ)$ عملکرد هدر رفت گرمایی تنظیم شده و $Y(NO)$ عملکرد هدر رفت گرمایی تنظیم نشده است که بازتاب فرایند خاموشی غیر فتوشیمیایی می باشد (۲۲). هدر رفت گرمایی تنظیم شده یک فرایند اتلافی مربوط به سیستم حفاظت نوری و برای حفاظت فتوسیستم II محسوب می شود، ولی هدر رفت گرمایی تنظیم نشده فرایندی اتلافی است که مربوط به سایر اجزای غیر مرتبط با حفاظت نوری است و موجب غیر فعال شدن سامانه نوری II می گردد (۲۲). $Y(NO)$ ، $Y(NPQ)$ ، $Y(II)$ که به عنوان عملکردهای کوانتومی شناخته می شوند، مکمل یکدیگر بوده و جمع آنها برابر با یک است (۲۲، ۲۳). کاهش پارامتر $Y(II)$ و افزایش $Y(NPQ)$ و $Y(NO)$ در شرایط تنش سرما در گیاه برنج (۱۶) و در تنش خشکی در گیاهچه های خیار (۲۳) گزارش شده است که با نتایج این آزمایش مطابقت دارد.

خاموشی غیر فتوشیمیایی (NPQ) با افزایش سمیت کادمیوم به صورت خطی و با شیب $0/0009$ واحد افزایش نشان داد ولی براساس نتایج حاصل از تجزیه رگرسیونی داده های آزمایش، تغییرات این پارامتر در قبال افزایش غلظت کادمیوم خاک، معنی دار نبود (شکل ۴- ح و جدول ۳). افزایش NPQ حاکی از ظرفیت بالای چرخه گزانتوفیل و توانایی گیاه در دفع تنش از طریق هدر دادن انرژی به صورت گرما و عمدتاً به وسیله چرخه گزانتوفیل می باشد (۲۷). لی و همکاران (۲۰۱۵) در گیاه *Elsholtzia argyi* (۲۴) و لوپز- میلان و همکاران (۲۰۰۹) در گیاه گوجه فرنگی (۲۵) افزایش NPQ را تحت تنش کادمیوم گزارش نمودند. همچنین، لی و همکاران (۲۰۱۵) بیان داشتند که افزایش غلظت کادمیوم خاک می تواند F_m ، F_o را افزایش و F_v/F_m ، F_v/F_o و $Y(II)$ را کاهش داده و در نتیجه باعث محدودیت اسیمیلایسیون دی اکسید کربن در گیاهان شود (۲۴). در پژوهش حاضر، بیشترین تغییرات در بین پارامترهای فلورسانس کلروفیل در $Y(NPQ)$ مشاهده شد، به طوری که در غلظت کادمیوم حدود ۷۰ و ۱۵۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک به ترتیب حدود ۷ و ۳۲ درصد نسبت به غلظت صفر کادمیوم افزایش نشان داد (شکل ۴- ه و جدول ۳).



شکل ۴- روند تغییرات حداقل (F_o) (الف) و حداکثر (F_m) (ب) فلورسانس، حداکثر کارایی کوانتومی سامانه نوری II (Fv/Fm) (ج)، کارایی کمپلکس تجزیه‌کننده آب در سمت‌دهنده سامانه نوری II (Fv/Fo) (د)، کارایی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر سامانه نوری II [Y(II)] (ه)، کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم شده سامانه نوری II [Y(NPQ)] (و)، کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده سامانه نوری II [Y(NO)] (ز) و خاموشی غیر فتوشیمیایی (NPQ) (ح) در پاسخ به افزایش غلظت کادمیوم خاک با استفاده از مدل خطی (معادله ۸) و دوتکه‌ای (معادله ۹).

Figure 4. The variation trend of minimum (F_o) (a) and maximum (F_m) (b) fluorescence intensity, maximum photochemical quantum yield of PSII (Fv/Fm) (c), water-splitting complex yield on the donor side of the PSII (Fv/Fo) (d), effective photochemical quantum yield of PSII [Y(II)] (e), quantum yield of regulated energy dissipation [Y(NPQ)] (f), quantum yield of non-regulated energy dissipation [Y(NO)] (g) and non-photochemical quenching (NPQ) (h) to Cd concentrations gradients in the soil using the linear (Eq. 8) and segmented (Eq. 9) models.



شکل ۵- تغییرات مکمل کارایی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر سامانه نوری II [Y(II)], کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم شده فتوسیتسم II [Y(NPQ)] و کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده سامانه نوری II [Y(NO)] در پاسخ به افزایش غلظت کادمیوم خاک.

Figure 5. Complementary changes of effective photochemical quantum yield of PSII [Y(II)], quantum yield of regulated energy dissipation [Y(NPQ)] and quantum yield of non-regulated energy dissipation [Y(NO)] in response to Cd concentration gradients in the soil.

جدول ۳- برآورد مقادیر پارامترهای مربوط به معادلات برازش یافته (خطی و دو تکه‌ای) بر مؤلفه‌های فلورسانس کلروفیل برگ گیاه دارویی بادرنجبویه در غلظت‌های مختلف کادمیوم خاک.

Table 3. Estimation the value of fitted equation (liner and segmented) parameters for chlorophyll fluorescence parameters of lemon balm leaf in different concentrations of Cd in the soil.

Sig	CV	RMSE	R ²	x ₀ ± SE	b ₂ ± SE	b ₁ ± SE	a ± SE	پارامترها Variables
0.0007	0.97	0.015	0.827	±23.26 74.82	±0.00035 0.0001	±0.004 0.0011	±0.014 1.46	Fo
0.3381	0.65	0.045	0.149			±0.0010 -0.003	±0.022 6.89	Fm
<0.0001	0.19	0.002	0.923	±25.29 80.56	±0.0000 -0.00001	±0.0000 -0.0001	±0.001 0.79	Fv/Fm
<0.0001	0.91	0.032	0.919	±25.92 78.58	±0.00113 -0.0007	±0.0006 -0.0032	±0.027 3.69	Fv/Fo
<0.0001	0.60	0.004	0.964	±16.49 69.81	±0.00009 -0.0006	±0.0001 -0.0002	±0.004 0.73	Y(II)
<0.0001	1.51	0.002	0.977	±12.30 68.96	±0.00005 0.0005	±0.0001 0.0002	±0.002 0.15	Y(NPQ)
0.0007	2.12	0.003	0.824	±39.12 75.00	±0.00007 0.0002	±0.0001 0.0001	±0.002 0.12	Y(NO)
0.0841	4.35	0.055	0.367			±0.0003 0.0009	±0.031 1.21	NPQ

a: عرض از مبدأ در سطح بدون تنش (غلظت صفر کادمیوم). b₂ و b₁: شیب تغییرات مؤلفه به ترتیب در مرحله ۱ و ۲. x₀: نقطه چرخش بین دو مرحله. R²: ضریب تبیین. RMSE: جذر میانگین مربعات خطا. CV: ضریب تغییرات. Sig: معنی داری مدل. SE: خطای استاندارد.

a: constant value in the non-stress levels (zero concentration of Cd). b₁ and b₂: slop of parameters variation in phase 1 and 2, respectively. x₀: turning point between the two phases. R²: coefficient of determination. RMSE: root mean square error. CV: coefficient of variation. Sig: significance of model. SE: standard error.

نتیجه‌گیری کلی

در این آزمایش پاسخ صفات رویشی و متغیرهای فلورسانس کلروفیل گیاه دارویی بادرنجبویه به غلظت کادمیوم خاک به صورت دو مدل دو تکه‌ای (۱۴ پارامتر) و خطی (پنج پارامتر) توصیف گردید. صفات رویشی، سبزی‌نگی برگ و برخی متغیرهای فلورسانس کلروفیل از جمله Fv/Fo , Fv/Fm و $Y(II)$ با افزایش غلظت کادمیوم کاهش یافت در حالی که Fo , $Y(NPQ)$ و $Y(NO)$ افزایش نشان داد. قطر ساقه، Fm و NPQ تحت تأثیر غلظت کادمیوم قرار نگرفت. بیشترین تغییرات در پارامترهای مورد مطالعه (به جز $Y(II)$, $Y(NPQ)$ و $Y(NO)$) در سطوح پایین کادمیوم (بین صفر تا ۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) مشاهده شد، و پس از آن با شیب کمتری ادامه یافت. در مجموع حداکثر غلظت کادمیوم که گیاه دارویی بادرنجبویه قادر به رشد بود، ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک به دست آمد، با این حال در غلظت‌های بالاتر از حدود ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم آن، تجمع ماده خشک گیاه بیش از ۵۰ درصد کاهش نشان داد. همچنین حساسیت پارامترهای فلورسانس کلروفیل نسبت به غلظت کادمیوم خاک کمتر از صفات رویشی بود.

سیاسگذاری

بدین وسیله از دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان، پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان و دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به‌خاطر حمایت‌های مالی جهت انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

1. Amin Ghafori, A., Rezvani Moghaddam, P., Nassiri Mahallati, M., and Khorramdel, S. 2014. Effect of cover crops on weeds, seed and oil yield of castor bean (*Ricinus communis* L.). J. Plant Prod. Res. 21(4): 21-41. (In Persian)
2. Arpadjan, S., Çelik, G., Taskesen, S., and Güçer, S. 2008. Arsenic, cadmium and lead in medicinal herbs and their fractionation. Food Chem. Toxicol. 46: 2871-2875.
3. Asghari, Gh.R., Palizban, A.A., Toloue Ghamari, Z., and Adeli, F. 2008. Contamination of cadmium, lead and mercury. Iran. Herb. Med. 14(1): 1-8. (In Persian)
4. Baker, N.R. 2008. Chlorophyll Fluorescence: A Probe of Photosynthesis In Vivo. Annu. Rev. Plant Biol. 59: 89-113.

5. Bakhshandeh, E., Soltani, A., Zeinali, E., and Kallate-Arabi, M. 2012. Prediction of plant height by allometric relationships in field-grown wheat. *Cereal Res. Commun.* 40: 487-496.
6. Blumenthal, M., Goldberg, A., and Brinckmann, J. 2000. *Herbal Medicine*. First ed. American Botanical council. USA. Pp: 230-31.
7. Bolouri Moghaddam, E., Hemmati, Kh., Bashiri Sadr, Z., and Mashayekhi K. 2009. Effect of harvest time and root diameter on Glycyrrhizin content in *Glycyrrhiza glabra*. *J. Plant Prod. Res.* 16(2): 29-45. (In Persian)
8. Correa, A.D.R., Rorig, L.R., Verdinelli, M.A., Cotellet, S., Ferard, J.F., and Radetski, C.M. 2006. Cadmium phytotoxicity: Quantitative sensitivity relationships between classical endpoints and antioxidative enzyme biomarkers. *Sci. Total Environ.* 357: 120-127.
9. Delavar, M., Asghari, Gh.R., Amiri, F., and Abdollahi, M. 2011. The study of toxic metals contamination (Pb, Cd, As, Al) on medicinal plants cultivated near arak industrial manufactures. *Iran. J. Toxicol.* 5(14): 482-487.
10. Dias, C.M., Monteiro, C., Moutinho-Pereira, J., Correia, C., Goncalves, B., and Santos, C. 2013. Cadmium toxicity affects photosynthesis and plant growth at different levels. *Acta Physiol. Plant.* 35: 1281-1289.
11. Dong, J., Wu, F.B., and Zhang, G.P. 2005. Effect of cadmium on growth and photosynthesis of tomato seedlings. *J. Zhejiang Univ. Sci.* 6(10): 974-980.
12. Evans, W.Ch. 2002. *Trease and Evans' pharmacognosy*. 15th ed. Saunders. UK. Pp: 221-253.
13. Genty, B., Briantais, J.M., and Baker, N.R. 1989. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and photochemical quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochim. Biophys. Acta*, 990: 87-92.
14. Ghaderi-Far, F., Akbarpour, W., Khavari, F., and Ehteshamnia, A. 2012. Determination of salinity tolerance threshold in six medicinal plants. *J. Plant Prod. Res.* 18(4): 15-24. (In Persian)
15. Ghasemi, K., Fallah, S., Raeisi, F., and Heidari, M. 2014. The effect urea and biological fertilizers on quantitative and qualitative yield of isabgol (*Plantago ovata* Frosk.) medicinal plant. *J. Plant Prod. Res.* 20(4): 101-116. (In Persian)
16. Hasani, Z., Pirdashti, H., Yaghoobian, Y., and Zaman Nouri, M. 2014. Application of chlorophyll fluorescence technique to evaluate the tolerance of rice (*Oryza sativa* L.) genotypes to cold temperature and water stresses. *J. Cell Tissue.* 5(2): 195-206. (In Persian)
17. He, J.Y., Ren, Y.F., Zhu, C., Yan, Y.P., and Jiang, D.A. 2008. Effect of Cd on growth, photosynthetic gas exchange, and chlorophyll fluorescence of wild and Cd-sensitive mutant rice. *Photosynthetica.* 46: 466-470.
18. Hyun, H., Chang, A.C., Parker, D.R., and Page, A.L. 1998. Cadmium solubility and phytoavailability in sludge treated soils: effect of soil organic carbon. *J. Environ. Qual.* 27: 329-334.

19. Jain, M., Pal, M., Gupta P., and Gadre, R. 2007. Effect of cadmium on chlorophyll biosynthesis and enzymes of nitrogen assimilation in greening maize leaf segments: Role of 2- oxoglutarate. *Ind. J. Exp. Biol.* 45: 385-389.
20. Kiani, Z., Esmaeilpour, B., Hadian, J., Soltani Toolarood, A.A., and Fathololumi, S. 2014. Effect of organic fertilizers on growth properties nutrient absorption and essential oil yield of medicinal plant of spearmint (*Mentha spicata* L). *J. Plant Prod. Res.* 21(4): 63-80. (In Persian)
21. Klughammer, Ch., and Schreiber, U. 2008. Complementary PSII quantum yields calculated from simple fluorescence parameters measured by PAM fluorometry and the saturation pulse method. *PAM Application Notes.* 1: 27-35.
22. Kramer, D.M., Johnson, G., Kiirats, O., and Edwards, G.E. 2004. New fluorescence parameters for the determination of Q_A redox state and excitation energy fluxes. *Photosynth. Res.* 79: 209-218.
23. Li, Q.M., Liu, B.B., Wu, Y., Zou, Zh.R. 2008. Interactive effects of drought stresses and elevated CO_2 concentration on photochemistry efficiency of cucumber Seedlings. *J. Integr. Plant Biol.* 50(10): 1307-1317.
24. Li, S., Yang, W., Yang, T., Chen, W., and Ni, Y. 2015. Effects of cadmium stress on leaf chlorophyll fluorescence and photosynthesis of *Elsholtzia argyi*—A cadmium accumulating plant, *Int. J. Phytoremediat.* 17(1): 85-92. doi: 10.1080/15226514.2013.828020
25. Lopez-Millan, A.F., Sagardoy, R., Solanas, M., Abadia, A., and Abadia, J. 2009. Cadmium toxicity in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants grown in hydroponics. *Environ. Exp. Bot.* 65: 376-385.
26. Maksymiec, W. 1997. Effect of copper on cellular processes in higher plants. *Photosynthetica.* 34: 321-342.
27. Maxwell, K., and Johnson, G.N. 2000. Chlorophyll fluorescence-a practical guide. *J. Exp. Bot.* 51(345): 659-668.
28. Metwally, A., Safronova, V.I., Belimov, A.A., and Dietz, K.J. 2005. Genotypic variation of the response to cadmium toxicity in *Pisum sativum* L.J. *Exp. Bot.* 56: 167-178.
29. Naz, A., Khan, S., Qasim, M., Khalid, S., Muhammad, S., and Tariq, M. 2013. Metals toxicity and its bioaccumulation in purslane seedlings grown in controlled environment. *Nat. Sci.* 5(5): 573-579.
30. Nikolic, N., Kogic, D., Pilipovic, A., Pajivic, S., Krstic, B., Borisev, M., and Orlovic, S. 2008. Responses of hybrid poplar to cadmium stress photosynthetic characteristics, cadmium and proline accumulation and antioxidant enzyme activity. *Acta Biol. Cracov. Ser. Bot.* 50(2): 95-103.
31. Pinto, D., Fernandes, A., Fernandes, R., Mendes, I., Pereira, S., Vinha, A., Herdeiro, T., Santos, E., and Machado, M. 2011. Determination of heavy metals and other indicators in waters, soils and medicinal plants from Ave Valley, in Portugal, and its correlation to urban and industrial pollution. *Science against*

- microbial pathogens. In: A. Méndez-Vilas (ed.), communicating current research and technological advances. Spain. 303-309.
32. Rivera-Becerril, F., Calantzis, C., Turnau, K., Caussanel, J.P., Belimov, A.A., Gianinazzi, S., Strasser, R.J., and Gianinazzi-Pearson, V. 2002. Cadmium accumulation and buffering of cadmium-induced stress by arbuscular mycorrhiza in three *Pisum sativum* L. genotypes. J. Exp. Bot. 53(371): 1177-85.
33. Saberi, M., Tavili, A., Jafari, M., and Heydari, M. 2010. The effect of different levels of heavy metals on germination and seedlings growth of *Atriplex lentiformis*. J. Rangeland. 4(1): 112-120. (In Persian)
34. Sandalio, L.M., Dalurzo, H.C., Gomez, M., Romero-Puertas, M.C., and del Rio, L.A. 2001. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. J. Exp. Bot. 52: 2115-2126.
35. SAS Institute SAS/STAT user's guide. SAS Institute, Cary. 2004.
36. Schreiber, U., Schliwa, U., and Bilger, W. 1986. Continuous recording of photochemical and non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer. Photosynth. Res. 10: 51-62.
37. Shahabivand, S., Zare Maivan, H., Mohammadi Goltapeh, E., Sharifi, M., and Aliloo, A.A. 2012. The effects of root endophyte and arbuscular mycorrhizal fungi on growth and cadmium accumulation in wheat under cadmium toxicity. Plant Physiol. Biochem. 60: 53-58.
38. Sharma, P., and Dubey, R.S. 2005. Lead toxicity in plants. Plant physiol. 17: 35-52.
39. Wang, C.X., Tao, L., and Ren, J. 2013. The response of maize seedlings to cadmium stress under hydroponic conditions. Russian J. Plant Physiol. 60(2): 295-299.
40. Xue, Z.C., Gao, H.Y., and Zhang, L.T. 2013. Effects of cadmium on growth, photosynthetic rate, and chlorophyll content in leaves of soybean seedlings. Biol. plant. 57(3): 587-590.
41. Zlatev, Z., and Yordanov, T. 2004. Effect of soil drought on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in bean plants. Bulg. J. Plant Physiol. 30(3-4): 3-18.

