



Original article

Effect of coronatine on morphological and biochemical traits of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) in arsenic contamination condition

Ali Abdollahi¹, Behrouz Esmailpour^{2*}, Mohsen Barin³, Zahra Aslani⁴, Muosa Torabi Giglou⁵, Ali-Ashraf Soltani⁶, Haniyeh Moradian⁷

1. Ph.D Graduated of Horticultural Science, Department of Horticultural Science, Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2. Professor, Department of Horticultural Science, Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture Science, Urmia University, Urmia, Iran

4. Ph.D Graduated of Horticultural Science, Invited Researcher, Department of Horticultural Science, Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

5. Associate Professor, Department of Horticultural Science, Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

6. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

7. Ph.D Student of Horticultural Science, Department of Horticultural Science, Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received 28 September 2024; Revised 19 November 2024; Accepted 1 December 2024

Extended abstract

Introduction

Basil (*Ocimum basilicum* L.) is one of the most important species belonging to the Lamiaceae family, with diverse applications in food, medicine, and cosmetics. Recently, heavy metal pollution has been considered a major stress factor responsible for reducing plant growth and agricultural productivity worldwide. These pollutants are harmful to the environment and to living organisms, including plants, animals, and microorganisms. The rapid growth of the global population, industrialization, and the expansion of mining and metal ore processing have contributed to the widespread distribution of heavy metal pollution worldwide. Human activities, including mining, agricultural expansion, intensive use of pesticides and herbicides, and irrigation with heavy metal-contaminated water, further exacerbate soil contamination. Among heavy metals, arsenic is particularly concerning due to its high toxicity and destructive effects on the environment and living organisms. Arsenic is a non-essential and highly toxic element for plants. It is readily absorbed by plants, where exposure to arsenate (AsV) inhibits growth, disrupts physiological processes, and may ultimately lead to plant death. Inside plant cells, AsV can enter essential metabolic pathways, such as oxidative phosphorylation and ATP synthesis, by substituting for phosphate groups. One promising strategy to mitigate heavy metal stress is the application of newly identified plant growth regulators such as coronatine. Coronatine, a phytotoxin with broad host specificity, functions as a potent signaling molecule with diverse physiological roles in plants.

Materials and methods

This experiment was conducted as a factorial arrangement in a completely randomized design (CRD) with three replications in 2016. The experimental factors consisted of two soil conditions (non-contaminated and arsenic-contaminated, with 0 and 4576 mg kg⁻¹ arsenic, respectively) and three coronatine foliar-spray concentrations (0, 50, and 100 nmol L⁻¹) applied to basil plants. After seed emergence, the seedlings were thinned in several stages, and ultimately ten uniform plants were retained

* Corresponding author: Behrouz Esmailpour; E-Mail: behsmail@yahoo.com



in each pot, spaced approximately 2–3 cm apart. Coronatine ($C_{18}H_{25}NO_4$; $319.401 \text{ g mol}^{-1}$; Sigma, Japan) was sprayed at concentrations of 0, 50, and 100 nmol L^{-1} at the 4–6 leaf stage until the leaves were fully wetted. To evaluate the effects of arsenic stress, coronatine application, and their interaction on basil, three plants were randomly selected from each experimental unit at the full flowering stage (approximately 80 days after planting), and various morphological, physiological, and biochemical traits were measured.

Results and discussion

The results showed that arsenic contamination significantly decreased morphological traits of sweet basil, including leaf number, leaf area, leaf dry weight, and stem height, compared with the non-contaminated soil. Moreover, coronatine application improved all morphological and biochemical traits of sweet basil under both arsenic-contaminated and non-contaminated soil conditions. Arsenic stress decreased leaf number, leaf area, leaf dry weight, and plant height in plants grown in contaminated soil compared with those grown in non-contaminated soil. Arsenic stress also reduced physiological traits, including chlorophyll content and relative water content (RWC). In contrast, foliar application of coronatine enhanced growth and improved both physiological and biochemical performance under arsenic stress. In particular, application of 100 nmol L^{-1} coronatine increased leaf dry weight, plant height, and RWC by 35%, 32%, and 33%, respectively. Moreover, biochemical traits were affected by both arsenic stress and coronatine foliar application, such that proline, phenol, and flavonoids increased by 91%, 95%, and 94% in arsenic-contaminated soil treated with 100 nmol L^{-1} coronatine compared with the non-contaminated and non-sprayed control. Overall, these findings indicate that coronatine, as an effective plant growth regulator, has substantial potential to mitigate the detrimental effects of arsenic toxicity in plants. Nevertheless, further studies on other plant species and a wider range of coronatine concentrations are recommended.

Conclusion

Coronatine can be proposed as a promising plant growth regulator capable of alleviating the adverse effects of arsenic contamination in sweet basil and potentially other vegetable crops.

Keywords: Antioxidant, Arsenic, Coronatine, Proline, Sweet Basil

تأثیر کروناتین بر خصوصیات ریخت‌شناسی و بیوشیمیایی ریحان (*Ocimum basilicum* L.) در شرایط آلودگی آرسنیک

علی‌عبداللهی^۱، بهروز اسماعیل‌پور^{۲*}، محسن برین^۳، زهرا اصلانی^۴، موسی ترابی گیگلو^۵، علی‌اشرف سلطانی^۶، هانیه مرادیان^۷

۱. دانش‌آموخته دکتری، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۲. استاد، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۳. دانشیار، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه
۴. دانش‌آموخته دکتری گیاهان دارویی، پژوهشگر مدعو گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۵. دانشیار، گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۶. دانشیار، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۷. دانشجوی دکتری، گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی: آنتی‌اکسیدان غیر آنزیمی پرولین تنش آرسنیک ریحان فنول	کروناتین نوعی تنظیم‌کننده رشد گیاهی نوین با شباهت‌هایی در ترکیب و کارکرد با جاسموناتها است که تجمع متابولیت‌های دفاعی را در گیاهان در شرایط تنش می‌سازد و در حال حاضر اطلاعات درباره نحوه اثرگذاری آن در برابر تنش فلزات سنگین ناشناخته است. هدف از انجام این تحقیق، بررسی خاصیت محافظت‌کنندگی کروناتین در برابر سمیت آرسنیک در ریحان (<i>Ocimum basilicum</i> L.) بود. بدین منظور، گیاهان ریحان در شرایط گلخانه‌ای در دو نوع خاک آلوده و غیر آلوده به آرسنیک کشت‌شده و توسط غلظت‌های مختلف کروناتین (۰، ۵۰ و ۱۰۰ نانومول در لیتر) محلول‌پاشی شدند. نتایج نشان داد که تنش آرسنیک خصوصیات ریخت‌شناسی و بیوشیمیایی ریحان را تحت تأثیر قرار داد، به طوری که تنش آرسنیک موجب کاهش تعداد برگ، سطح برگ، وزن خشک برگ و ارتفاع بوته در گیاهان کشت‌شده در خاک آلوده نسبت به گیاهان کشت‌شده در خاک غیر آلوده شد. همچنین تنش آرسنیک سبب کاهش پارامترهای فیزیولوژیکی مانند میزان کلروفیل و محتوای نسبی آب برگ شد. اما محلول‌پاشی با کروناتین موجب بهبود پارامترهای رشدی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در شرایط تنش آرسنیک گردید، به طوری که محلول‌پاشی با غلظت ۱۰۰ نانومول در لیتر کروناتین وزن خشک برگ، ارتفاع بوته و محتوای نسبی آب برگ را به ترتیب به میزان ۳۵، ۳۲ و ۲۳ درصد افزایش داد. علاوه بر پارامترهای بیوشیمیایی نیز تحت تأثیر تنش آرسنیک و محلول‌پاشی با کروناتین قرار گرفتند، به طوری که صفاتی مانند پرولین، فنل و فلاونوئید به میزان ۹۱، ۹۵ و ۹۴ درصد در خاک آلوده به آرسنیک و محلول‌پاشی با غلظت ۱۰۰ نانومول در لیتر کروناتین در مقایسه با تیمار بدون آرسنیک و بدون محلول‌پاشی با کروناتین افزایش یافتند. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان اظهار نمود که کروناتین از طریق فعال کردن سیستم آنتی‌اکسیدانی غیر آنزیمی و تنظیم اسمزی در شرایط تنش‌زا قادر به تعدیل اثرات مخرب آرسنیک گردید.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱ تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۵ ۱۹-۱۱۶ (۱): ۱۹	

مقدمه

ریحان (*Ocimum basilicum* L.) یکی از مهم‌ترین گونه‌های متعلق به خانواده نعناعیان (Lamiaceae) است که کاربردهای غذایی، دارویی و آرایشی مختلفی دارد (Naghbi et al., 2005). آلودگی فلزات سنگین به‌عنوان یک عامل

تنشی عمده مسئول کاهش رشد گیاه و بهره‌وری کشاورزی در سراسر جهان به شمار می‌آید. این آلاینده‌ها برای محیط‌زیست و موجودات زنده مانند گیاهان، حیوانات و میکروارگانیسم‌ها مضر هستند. رشد سریع جمعیت جهان،

غیراختصاصی است که توسط پاتوژن *Pseudomonas syringae* ترشح می‌شود و برای اولین بار از تخمیر آبگوشت باکتری بیماری‌زای *Pseudomonas atropurpurea* var. *syringae* جداسازی شد اما بعداً مشخص شد که توسط تعدادی از اعضای گروه‌های *Pseudomonas syringae* مانند پاتووارهای *P. syringae*, e.g. tomato و *P. syringae*, e.g. *glycinea* (Brooks et al., 2005; Uppalapati, 2005; et al., 2005). کروناتین، از نظر ساختاری و عملکردی شبیه به جاسمونات‌ها است، اما به‌عنوان یک تنظیم‌کننده رشد گیاه بسیار فعال‌تر است (Ceylan, 2023). جاسمونات‌ها فرایندهای بیولوژیکی متنوعی را در گیاهان تنظیم می‌نمایند (Melotto et al., 2008). مطالعات کمی در مورد بررسی تأثیر کاهندگی و تعدیل‌کنندگی کروناتین بر تنش‌های محیطی مانند تنش شوری در کتان (Xie et al., 2008)، گندم (Zhou et al., 2018) و سویا (Hao et al., 2013)، تنش سرمازدگی در خیار (Wang et al., 2009) و تنش آرسنیک در ریحان (Zare Dehabadi et al., 2013) انجام شده است. در شرایط تنش خشکی ناشی از پلی‌اتیلن گلیکول وزن‌تر و خشک گیاهان تنباکو با کاربرد کروناتین بهبود یافتند، همچنین میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپر اکسیداز دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گلوتاتیون رداکتاز افزایش یافت (Xu et al., 2020)؛ بنابراین، پژوهش حاضر برای بررسی تأثیر تنش آرسنیک بر تغییر فاکتورهای رشدی و بیوشیمیایی ریحان و ارزیابی تأثیر کاهندگی و یا تعدیل‌کنندگی کروناتین بر تنش مذکور انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل و بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در سال ۱۳۹۶ برای بررسی اثر محلول‌پاشی کروناتین بر خصوصیات فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی گیاه ریحان در دو نوع خاک آلوده به آرسنیک و خاک فاقد آلودگی به آرسنیک (شاهد) در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه انجام شد. فاکتورهای آزمایشی شامل دو نوع خاک آلوده و غیرآلوده به فلز سنگین آرسنیک (صفر و ۴۵۷۶ میلی‌گرم در کیلوگرم) و محلول‌پاشی کروناتین در سه سطح (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ نانومول در لیتر) بر ریحان بود. هر واحد آزمایشی متشکل از چهار گلدان بود، در مجموع ۷۲ گلدان مورد استفاده قرار گرفت. خاک آلوده به آرسنیک (از عمق صفر

صنعتی شدن، افزایش معدنکاری و فرآوری معادن موجب گسترش آلودگی به فلزات سنگین در سطح جهان شده است. فعالیت‌های انسانی مانند فعالیت‌های مبتنی بر استخراج معادن، گسترش کشاورزی و استفاده از آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌ها در چمن‌زارها و زمین‌های کشاورزی و همچنین آبیاری با آب آلوده به فلزات سنگین موجب افزایش آلودگی زمین‌های کشاورزی به این عناصر می‌شود (Wankhede et al., 2011; Islam et al., 2015; Gupta et al., 2013).

آرسنیک متالوئید غیرضروری است که به‌طور گسترده در خاک و آب‌های زیرزمینی بسیاری از کشورها توزیع شده است. آلودگی آرسنیک نگران‌کننده است، زیرا امنیت غذایی را از نظر بهره‌وری محصول و ایمنی مواد غذایی تهدید می‌کند. این عنصر از طریق فعالیت‌های طبیعی مانند هوازدگی و همچنین فعالیت‌های انسانی که شامل کاربرد آفت‌کش‌های با پایه آرسنیک، حشره‌کش‌ها، کوددهی با زباله‌های جامد شهری و آبیاری با آب‌های زیرزمینی آلوده به آرسنیک وارد اکوسیستم می‌شود (Polya et al., 2019). گیاهان در شرایط سمیت آرسنیک دچار اختلالات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی می‌شوند، گزارش شده است که پرآوری و گسترش ریشه توسط این عنصر مهار می‌شود زیرا ریشه اصلی‌ترین اندامی است که در معرض آرسنیک قرار می‌گیرد (Kumar et al., 2020). آلودگی آرسنیک تشکیل گره در ریشه را کاهش و موجب پژمردگی، پیچ‌خوردگی و نکروز برگ در گیاهان می‌شود. سمیت آرسنیک با کاهش تکثیر سلولی مانع رشد گیاه شده، همچنین با اتصال به آنزیم‌ها و پروتئین‌ها فرایندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز، تنفس و تعرق، ظرفیت تولیدمثل را دچار اختلال و در نتیجه رشد و عملکرد گیاه را کاهش می‌دهد (Garg et al., 2011; Finnegan and Chen, 2012). گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) به‌طور مداوم توسط گیاهان تحت شرایط تنش آرسنیک افزایش می‌یابند و استرس اکسیداتیو ایجاد می‌کنند که بر اجزای مختلف سلول مانند لیپیدها، پروتئین‌ها و DNA تأثیر منفی می‌گذارد (Ali et al., 2019). سمیت آرسنیک با افزایش پراکسیداسیون لیپیدی موجب آسیب به غشای سلولی شده و میزان نشت الکترولیتی را افزایش می‌دهد (Hasanuzzaman et al., 2020).

یکی از راهکارها در جهت کاهش و تعدیل اثرات تنش‌های محیطی، استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد تازه شناخته‌شده مانند کروناتین است. کروناتین، یک فیتوهورمون

مانند بافت خاک به روش هیدرومتری، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع با هدایت‌سنج الکتریکی، فسفر قابل‌استفاده با روش واتناب و اواسون (Watanabe and Olsen, 1965)، واکنش خاک (pH) در خمیر اشباع به‌وسیله الکتروود شیشه‌ای، ماده آلی به روش اکسیداسیون با اسید کرومیک و سپس تیتراژ کردن با فروس آمونیوم سولفات، نیتروژن کل به روش کج‌دال و پتاسیم قابل‌جذب به روش فلیم فتومتری به کمک استات آمونیوم نرمال با واکنش برابر ۷ و میزان آرسنیک نیز به‌وسیله دستگاه جذب اتمی تعیین گردید. خصوصیات خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

تا ۳۰ سانتی‌متری) از کانسار زرشوران، در ۶ کیلومتری شمال شرقی روستای زرشوران از توابع شهرستان تکاب در استان آذربایجان غربی (با مختصات جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۳ دقیقه و ۱۳ ثانیه عرض شمالی و متوسط ارتفاع ۲۴۵۰ متری از سطح دریا) تهیه شد. استقرار معدن و کارخانه استخراج طلا در این مناطق، موجب آلودگی خاک این منطقه به آرسنیک شده بود (Abbasi et al., 2017). برای خاک شاهد نیز نمونه از خاک سطحی و عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری، زمین‌های مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه تهیه گردید. نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده پس از خشک شدن در معرض هوای آزاد، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

Table 1. Physical and chemical properties of soils

خاک	بافت	آرسنیک	پتاسیم	فسفر	نیتروژن کل	کربن آلی	اسیدیته	الکتریکی	رس سیلت	رس کل
Soil	Texture	Arsenic	K	P	N	C	pH	EC	Silt	Clay
		----- mg kg ⁻¹ -----			-----%-----			ds m ⁻¹	-----%-----	
بدون آرسنیک	Silty loam	0	139.75	9.38	0.28	2.49	7.59	1.473	22	16
Without arsenic										
آلوده به آرسنیک		4576	149.73	11.5	0.22	1.09	8.11	1.72	24	14
Contaminated with arsenic										

محلول‌پاشی شدند. سپس مرحله دوم محلول‌پاشی با غلظت - های مختلف کروماتین دو هفته بعد از محلول‌پاشی مرحله اول انجام گردید. به‌منظور بررسی اثرات تنش آرسنیک و محلول - پاشی کروماتین و برهمکنش آن‌ها بر ریحان، در مرحله گلدهی کامل (حدود ۸۰ روز پس از کاشت)، از هر واحد آزمایشی و به‌طور تصادفی سه بوته انتخاب و صفاتی نظیر ارتفاع بوته (توسط خط کش)، وزن تر و خشک برگ و ساقه (به‌وسیله ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم)، سطح برگ (توسط دستگاه اندازه‌ی سطح برگ مدل AM 200، شرکت ADC، آلمان) و تعداد برگ اندازه‌گیری گردید. برای تعیین وزن خشک، قسمت‌های رویشی (به‌طور جداگانه) به مدت ۴۸ ساعت در آون ۷۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. برای اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ^۱ (RWC) از برگ‌های کاملاً توسعه‌یافته دیسک‌هایی به قطر هشت میلی‌متر تهیه شد و پس از توزین با ترازوی دیجیتالی (با دقت ۰/۰۰۱ گرم)

در این آزمایش بذر گیاه ریحان (*Ocimum basilicum*. var. *basilicum* L. از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه شد. بذرها با محلول هیپوکلریت سدیم ۵ درصد به مدت ۱۰ دقیقه ضدعفونی سطحی شد. گلدان‌های مورد استفاده از نوع پلاستیکی، با قطر دهانه ۲۳ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر بودند. در هر گلدان ۹ کیلوگرم خاک ریخته شده و در هر گلدان ۳۰ عدد بذر ریحان کشت شد. گلدان‌ها در گلخانه در شرایط دمای روزانه ۲۵ ± ۲ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰-۶۰ درصد نگهداری شدند. پس از سبز شدن بذرها، تنک کردن گیاهچه‌ها در چند مرحله صورت گرفت و در نهایت در داخل هر گلدان ۱۰ بوته (با فاصله تقریبی ۲ الی ۳ سانتی‌متر) نگهداری شدند. بوته‌ها ابتدا در مرحله ۴-۶ برگی با غلظت‌های مختلف صفر، ۵۰ و ۱۰۰ نانومول در لیتر، کروماتین (C18H25NO4، ۳۱۹/۴۰۱ گرم/مول، سیگما، ژاپن)،

1. Relative water content

میزان فنل کل با استفاده از عصاره متانولی و معرف فولین سیوکالتیو به وسیله روش سنگلتون و همکاران (Singleton et al., 1999) بر اساس میلی‌گرم گالیک اسید بر گرم وزن تر گزارش شد. برای اندازه‌گیری میزان فلاونوئید کل از روش رنگ‌سنجی، عصاره متانولی و کلرید آلومینیوم استفاده شد (Chang et al., 2002).

آنالیز آماری داده‌ها

برای تجزیه واریانس داده‌ها از نرم‌افزار SAS 9.1 استفاده شد. مقایسه میانگین ترکیبات تیماری توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

صفات رشدی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثرات آلودگی آرسنیک و تیمار محلول‌پاشی کرونتین بر صفات رشدی در جدول ۲ نشان داده شده است. صفات تعداد برگ، سطح برگ، وزن تر و خشک برگ به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر آلودگی خاک به آرسنیک و تیمار محلول‌پاشی کرونتین و اثر متقابل این دو عامل قرار گرفتند. اما در مورد صفات وزن تر و خشک ساقه اثر آلودگی آرسنیک و محلول‌پاشی کرونتین بر این صفات معنی‌دار بود اما اثر متقابل این دو فاکتور بر صفات مذکور معنی‌دار نبود (جدول ۲).

آزمایش طبق روش تونر (Turner, 1981) انجام شد و از طریق فرمول زیر محاسبه گردید.

$$RWC\% = \frac{\text{وزن خشک دیسک‌های برگی} - \text{وزن تر دیسک‌های برگی}}{\text{وزن خشک دیسک‌های برگی} - \text{وزن آماس دیسک‌های برگی}} \times 100 \quad [1]$$

برای اندازه‌گیری مقادیر کلروفیل a، b و کل، ۰/۵ گرم بافت تازه برگ‌های توزین و آزمایش طبق روش آرنون (Arnon, 1968) با اندکی تغییرات با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج‌های ۶۶۳ نانومتر برای کلروفیل a و ۶۴۵ نانومتر برای کلروفیل b قرائت گردید.

برای اندازه‌گیری نشت یونی، برگ گیاهان تحت تیمارهای مختلف دیسک برگ‌ها به‌طور جداگانه تهیه و با استفاده از روش لاتس و همکاران (Lutts et al., 1995) و با استفاده از فرمول زیر انجام گردید:

$$[2] \quad (\%) \text{ نشت یونی} = (EC1/EC2) \times 100$$

مقادیر پرولین از عصاره الکلی تهیه‌شده از ۰/۵ گرم نمونه‌های بافت برگ سالم و کاملاً توسعه‌یافته با استفاده از روش پاکین و لوساشور (Paquin and Lechasseur's, 1979) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری میزان مالون دی‌آلدئید^۱ (MDA) جذب نمونه‌ها در دو طول موج ۵۳۲ و ۶۰۰ با استفاده از روش هس و پاکر (Heath and Packer, 1968) قرائت گردید.

جدول ۲. تأثیر محلول‌پاشی با کرونتین بر شاخص‌های مورفولوژیکی ریحان تحت تنش آرسنیک

Table 2. Effect of Coronatine on the growth traits of basil plants under arsenic stress

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	وزن تر برگ		وزن خشک برگ		وزن خشک ساقه	
		تعداد برگ Leaf number	سطح برگ Leaf area	وزن خشک برگ Leaf dry weight	وزن تر ساقه Stem fresh weight	وزن خشک ساقه Stem dry weight	
آرسنیک Arsenic(Ar)	1	460.05**	70557**	2.71**	0.25**	2.59*	1.14**
کرونتین Coronatine(C)	2	280.32**	12439**	2.62**	0.76**	1.71 ^{ns}	0.47**
کرونتین×آرسنیک Ar × C	2	11.55*	89518**	0.29 ^{ns}	0.11**	0.004 ^{ns}	0.001 ^{ns}
اشتباه آزمایشی Error	12	2.83	17276	0.06	0.025	0.013	0.019
ضریب تغییرات CV (%)		7.55	7.5	7.1	11.24	4.46	10.7

^{ns}، * و ** به ترتیب عدم تفاوت معنی‌دار و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

NS, * and ** are non-significant, significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$, respectively

خشک برگ (۱۵/۶۶ عدد، ۱۲۶۳۵ سانتی‌متر مربع، ۰/۹۱ گرم در بوته) در گیاهان کشت‌شده در خاک آلوده به آرسنیک مشاهده شد که توسط کرونا تین تیمار نشده بودند و بیشترین میزان تعداد برگ، سطح برگ و وزن خشک برگ (۳۴ عدد، ۱۸۰۷۹ سانتی‌متر مربع، ۱/۴۱ گرم در بوته) نیز در گیاهان کشت‌شده در خاک غیرآلوده و تیمار شده با غلظت بالای کرونا تین (۱۰۰ نانومول بر لیتر) مشاهده شد (جدول ۳).

نتایج مقایسه میانگین تیمارها نشان می‌دهد که تنش آرسنیک موجب کاهش مقدار صفات ریخت‌شناسی تعداد برگ، سطح برگ، وزن خشک برگ و ارتفاع ساقه در ریحان - های کشت‌شده در خاک آلوده به نسبت به ریحان‌های کشت‌شده در خاک غیرآلوده شد و تیمار محلول‌پاشی کرونا تین در خاک آلوده موجب کاهش اثرات منفی تنش آرسنیک و در نتیجه افزایش مقدار صفات مذکور شد. به طوری که کمترین میزان تعداد برگ، سطح برگ و وزن

جدول ۳. تأثیر محلول‌پاشی با کرونا تین بر صفات مورفولوژیکی ریحان تحت تنش آرسنیک

Table 3. Effect of coronatine on the morphological characteristics of basil under arsenic stress

آرسنیک Arsenic	کرونا تین Coronatine nmol L ⁻¹	تعداد برگ Leaf number	سطح برگ Leaf area cm ²	ارتفاع بوته plant height cm	وزن خشک برگ Leaf dry weight gr
خاک آلوده به آرسنیک Soil contaminated with arsenic	0	15.66 ^e	12635 ^d	31 ^d	0.91 ^c
	50	18.66 ^d	14538 ^C	33 ^{cd}	1.13 ^b
	100	22 ^c	16705 ^b	36 ^{bc}	1.41 ^a
خاک بدون آرسنیک Soil without arsenic	0	22.66 ^c	17210 ^b	33 ^{cd}	1.23 ^b
	50	28.33 ^b	17648 ^{ab}	37 ^b	1.40 ^a
	100	34 ^a	18079 ^a	46 ^a	1.41 ^a

حروف مشترک در هر ستون نمایانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن است

The means in each column followed by similar letter (s) are not significantly different using Duncan's test ($p < 0.05$).

جدول ۴. تأثیر محلول‌پاشی با کرونا تین بر صفات مورفولوژیکی ریحان تحت تنش آرسنیک

Table 4. Effect of coronatine on the morphological characteristics of basil under arsenic stress

تیمارها Treatments	وزن تر ساقه Stem fresh weight	وزن خشک ساقه Stem dry weight	وزن تر برگ Leaf fresh weight
خاک آلوده به آرسنیک Soil contaminated with arsenic آرسنیک Arsenic	1.77 ^b	0.79 ^b	2.96 ^b
	خاک بدون آرسنیک Soil without arsenic	2.68 ^a	1.14 ^a
کرونا تین Coronatine (nmol L ⁻¹)		0	50
	1.81 ^b	0.75 ^b	2.92 ^c
	2.3 ^{ab}	1 ^a	3.3 ^b
	2.56 ^a	1.14 ^a	3.6 ^a

حروف مشترک در هر ستون نمایانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن است

The means in each column followed by similar letter (s) are not significantly different using Duncan's test ($p < 0.05$).

نتایج این تحقیق نشان داد که مقادیر صفات رشدی وزن تر برگ، وزن تر ساقه و وزن خشک ساقه در گیاهان کشت‌شده در خاک آلوده کمتر از گیاهان کشت‌شده در خاک غیرآلوده به آرسنیک بود و از طرف دیگر تیمار کرونا تین موجب افزایش صفات مذکور در ریحان شده و با افزایش غلظت کرونا تین مقدار این صفات نیز افزایش یافت (جدول ۴). نتایج تحقیق حاضر با یافته‌های زراع ده آبادی و همکاران (Zare

Dehabadi et al., 2014) هماهنگی داشت که بیان نمودند آلودگی آرسنیک موجب کاهش ارتفاع ساقه، وزن تر و خشک ریشه، ساقه و کاهش تولید زیست‌توده ریحان گردید، تیمار کرونا تین نیز موجب کاهش اثرات منفی آرسنیک بر صفات مذکور در ریحان شد. در تحقیقی کاربرد کرونا تین و متیل جاسمونات وزن خشک و رشد گل کلم را در شرایط تنش خشکی بهبود بخشیدند (Wu et al., 2012). علاوه بر

در سنتز پروتئین‌ها و نیز کاهش فعالیت فتوسنتزی در گیاه می‌شود (Li et al., 2010). نتایج تحقیق حاضر با یافته‌های فهمیده و همکاران (Fahmideh et al., 2020) مطابقت دارد که بیان کردند آرسنیک سبب کاهش ۲۴، ۳۰ و ۱۸ درصدی وزن تر، خشک برگ و سطح برگ در گیاه ریحان تحت تنش آرسنیک در مقایسه با گیاهان شاهد گردید.

صفات فیزیولوژیکی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثرات آلودگی آرسنیک و تیمار محلول‌پاشی کروناتین بر صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در جدول ۵ نشان داده است که صفات فنل، فلاونوئید، پرولین، مالون دی‌آلدئید، محتوی نسبی آب برگ و نشت یونی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تنش آرسنیک و تیمار محلول-پاشی کروناتین و اثر متقابل این دو قرار گرفتند. اما در مورد صفات رنگیزه‌های فتوسنتزی کلروفیل b و کلروفیل کل اثر آلودگی آرسنیک و محلول‌پاشی کروناتین بر این صفات معنی‌دار بود اما اثر متقابل این دو فاکتور بر صفات مذکور معنی‌دار نبود (جدول ۵).

آرسنیک، کاهش پارامترهای رشدی مانند رشد طولی ریشه و ساقه، وزن تر و خشک ساقه، سطح برگ و تولید زیست‌توده در گیاه ریحان با استفاده از فلزات کادمیوم و سرب نیز گزارش شده است (Fattahi et al., 2019; Poursaeid et al., 2020; Yousef, 2020). سمیت آرسنیک در گیاهان به‌صورت برخی علائم مورفولوژیکی مانند پژمردگی برگ‌ها، بازداری از طول ریشه و ساقه، نکرور برگ‌ها، بنفش‌رنگ شدن برگ‌ها، کاهش و یا از دست رفتن تارهای کشنده، آسیب سلول‌های اپیدرمی و کورتکس، شکستگی غشاء تایلاکوئیدی و مرگ سلول‌ها می‌شود (Bhat et al., 2020; Gill, 2014). کاهش ارتفاع گیاه در شرایط تنش فلزات سنگین ممکن است به دلیل کاهش فشار تورژانس سلولی، کاهش فعالیت تقسیم میتوزی، کاهش رشد و طول شدن سلولی و کند شدن رشد طولی ریشه و در نتیجه کاهش انتقال آب و مواد غذایی به اندام‌های هوایی گیاه باشد (Shanker et al., 2005; Hassan et al., 2006). کاهش وزن خشک اندام‌های هوایی گیاه نیز می‌تواند به دلیل تجمع زیاد یون‌های فلزی در محیط ریشه و اختلال در جذب و انتقال آن‌ها به اندام‌های هوایی باشد که موجب کاهش وزن خشک و تولید زیست‌توده در گیاه می‌شود. همچنین فلزات سنگین سبب کاهش و اختلال

جدول ۵. تأثیر محلول‌پاشی با کروناتین بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی ریحان تحت تنش آرسنیک

Table 5. Effect of coronatine on the physiological and biochemical characteristics of basil under arsenic stress

S.O.V	منابع تغییرات	درجه		محتوی نسبی			نشت یونی Electrolyte leakage
		آزادی df	کلروفیل a Chl a	کلروفیل b Chl b	کلروفیل کل Chl total	آب برگ RWC	
Arsenic (Ar)	آرسنیک	1	2.47**	0.32**	4.41*	943.08**	1067.14**
Coronatine (Cor)	کروناتین	2	2.09**	0.42**	2.15*	367.9**	873.35**
Ar × Cor	کروناتین × آرسنیک	2	0.09 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.02 ^{ns}	60.92**	264.48**
Error	اشتباه آزمایشی	12	0.05	0.01	0.3	14.55	5.72
CV (%)	ضریب تغییرات		9.5	28.02	16	4.61	5.23

Table 5. Continued

جدول ۵. ادامه

S.O.V	منابع تغییرات	درجه		پرولین Proline	فنل Total phenolic content	فلاونوئید Total flavonoid content
		آزادی df	مالون دی‌آلدئید Malondialdehyde			
Arsenic (Ar)	آرسنیک	1	4.74**	36.4**	199.53**	90.49**
Coronatine (Cor)	کروناتین	2	4.55**	1.98**	17.5**	22.01**
Ar × Cor	کروناتین × آرسنیک	2	0.52*	7.54**	3.5**	1.31**
Error	اشتباه آزمایشی	12	0.12	0.09	0.28	0.15
CV (%)	ضریب تغییرات		9	10	7.43	8.39

^{ns}، * و ** به ترتیب عدم تفاوت معنی‌دار و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

NS, * and ** are non-significant, significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$, respectively

به دلیل بازدارندگی مراحل مختلف بیوسنتز رنگیزه‌ها توسط آرسنیک باشد (Arabi et al., 2017). کاهش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی تحت تنش آرسنیک با نتایج سیل و همکاران (Sil et al., 2019) که بیان نمودند آرسنیک موجب کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کارتنوئید) به ترتیب در ریحان، نعنا سبز و گندم می‌شود، همسو است. همچنین تنش سرب (Gheysari et al., 2016)، نیکل (Davoudi et al., 2017) و کادمیوم (Poursaeid et al., 2020) موجب کاهش کلروفیل a و b، کلروفیل کل و کارتنوئید در ریحان شد. بین کاهش در محتوای کلروفیل و کارتنوئید و افزایش میزان رادیکال‌های آزاد در شرایط تنشی ارتباط منفی وجود دارد. همچنین آرسنیک از طریق بازدارندگی فعالیت آنزیم‌های گاما آمینو لوالونیک اسید دهیدروژناز و پروتوکلروفیلید رداکتاز موجب مداخله در متابولیسم رنگ‌دانه‌ها می‌شود (Sil et al., 2019). برهمکنش متقابل فلزات سنگین با گروه سولفیدریل آنزیم‌ها مهم‌ترین مکانیسم این مهارها عنوان شده است (Soltani et al., 2006).

رنگیزه‌های فتوسنتزی

نتایج این آزمایش نشان داد که تنها اثرات ساده هر دو فاکتور تنش آرسنیک و تیمار کروناتین بر محتوای کلروفیل a و کلروفیل b و کلروفیل کل معنی‌دار بوده و اثرات متقابل آن‌ها معنی‌دار نبود (جدول ۵). همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، تنش آرسنیک سبب کاهش مقدار کلروفیل a، b و کلروفیل کل در ریحان‌های کشت‌شده در خاک آلوده به آرسنیک نسبت به ریحان‌های کشت‌شده در خاک فاقد تنش آرسنیک گردیده است. استفاده از تیمار محلول‌پاشی کروناتین موجب افزایش میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل گردید و با افزایش غلظت کروناتین تیماری محتوای این رنگیزه‌های فتوسنتزی نیز افزایش یافت (جدول ۶ و ۷). و بیشترین میزان کلروفیل a و کلروفیل b و کلروفیل کل در محلول‌پاشی با غلظت ۱۰۰ نانو مول در لیتر کروناتین دیده شد. (جدول ۷).
کاهش چشمگیر میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل) در گیاهان تحت تنش آرسنیک بیانگر وسعت آسیب‌های اکسیداتیو است. این کاهش می‌تواند

جدول ۶. تأثیر محلول‌پاشی با کروناتین بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی ریحان تحت تنش آرسنیک

Table 6. Effect of coronatine on the physiological and biochemical characteristics of basil under arsenic stress

Arsenic	کروناتین Coronatine	محتوای نسبی آب		مالون دی‌آلدئید Malondialdehyde	پرولین Proline	فنل Total phenolic content	فلاونوئید Total flavonoid content
		برگ RWC	نشست یونی Electrolyte leakage				
	nmol L ⁻¹	-----%-----		Nmol.g ⁻¹ fw	mmol.g ⁻¹ fw	mg GAE.g ⁻¹ fw	
خاک آلوده به آرسنیک	0	63.78 ^d	37.5 ^a	3.71 ^a	2.31 ^c	5.41 ^c	4.62 ^c
	50	76.97 ^c	25.46 ^b	2.63 ^b	3.71 ^b	8.44 ^b	6.86 ^b
Soil contaminated with arsenic	100	85.63 ^b	16.26 ^c	1.28 ^c	5.6 ^a	10.22 ^a	9.37 ^a
خاک بدون آرسنیک	0	85.23 ^b	14 ^c	2.15 ^b	0.52 ^e	0.51 ^f	0.5 ^f
Soil without arsenic	50	90 ^a	10.66 ^c	1.5 ^c	1.02 ^e	1.04 ^e	1.13 ^e
	100	94.58 ^a	8.33 ^d	0.99 ^c	1.61 ^d	2.54 ^d	2.25 ^d

حروف مشترک در هر ستون نمایانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن است

The means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different using Duncan's test ($p < 0.05$).

بسته شدن روزنه‌ها ایجاد می‌شود که همه این موارد به کاهش رشد و توسعه گیاه می‌انجامد (Sil et al., 2019). همچنین این عناصر سنگین موجب ایجاد نابسامانی در تیلوکوئیدها و تخریب مسیرهای متابولیکی در کلروپلاست‌ها می‌شود. در طول این فرایند در منطقه دیواره سلولی و همچنین در داخل سلول ترکیبات حد واسط سمی تولید می‌شوند. این حالت بر

فلزات سنگین با اتصال به پروتئین‌های مسیر سنتز کلروفیل توانایی تخریب و غیرفعال کردن آن‌ها را دارند (Helmy, 2010). فلزات سنگین با اختلال در ساختار کلروپلاست، ممانعت از ساخت کلروفیل، پلاستوکوئینون و کارتنوئیدها، جلوگیری از انتقال الکترون، جلوگیری از فعالیت آنزیم‌های چرخه کلون و کمبود دی‌اکسیدکربن به دلیل

تنش‌های محیطی می‌شود (Xie et al., 2015). تیمار کروناتین موجب حفظ و کاهش تخریب کلروفیل در شرایط تنش گرمایی می‌شود، کروناتین موجب تثبیت پروتئین‌ها و افزایش تحکیم کلروپلاست شده و در نتیجه موجب تثبیت فتوسنتز در شرایط تنشی و کاهش و اثرات مخرب تنشی بر فتوسنتز می‌گردد (Zhou et al., 2015). در سطح بیوشیمیایی، یکی از مهم‌ترین اثرات آرسنیک تولید مازاد ROS است که منجر به آسیب اکسیداتیو مانند پراکسیداسیون چربی‌ها، کربونیل‌اسیون پروتئین و آسیب به DNA می‌شود که اثرات مخربی بر مسیرهای متابولیکی و ساختار سلول‌ها دارد (Bhat et al., 2020).

فعالیت فتوسنتزی تأثیر گذاشته و موجب زردی و نکروز برگ می‌گردد (Gupta et al., 2011). طبق نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق، محلول‌پاشی کروناتین هم در خاک آلوده به آرسنیک و هم در خاک غیرآلوده سبب افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی شد که با نتایج زراع ده آبادی و همکاران (Zare Dehabadi et al., 2013) هم‌راستا است که بیان نمودند تیمار کروناتین موجب حفظ محتوای کلروفیل و کارتنوئید در ریحان در شرایط تنش آرسنیک شد. تیمار کروناتین هم در شرایط وجود و عدم وجود تنش خشکی موجب بهبود وضعیت کلروفیل و فتوسنتز در گیاهان کلزا (Wu et al., 2012) و ذرت (Wang et al., 2008) شد. افزایش غلظت کلروفیل منتج به افزایش تحمل در گیاهان به

جدول ۷. تأثیر محلول‌پاشی با کروناتین بر میزان کلروفیل ریحان تحت تنش آرسنیک

Table 7. Effect of coronatine on chlorophyll content of basil under arsenic stress

تیمارها Treatments	کلروفیل a Chl a	کلروفیل b Chl b	کلروفیل کل Total Chl
	-----mg.g ⁻¹ fw-----		
خاک آلوده به آرسنیک Soil contaminated with arsenic	2.60 ^b	0.51 ^b	3.11 ^b
خاک بدون آرسنیک Soil without arsenic	3.95 ^a	0.72 ^a	4.67 ^a
کروناتین Coronatine (nmol L ⁻¹)	0	2.18 ^c	2.58 ^c
	50	3.28 ^b	3.9 ^{ab}
	100	4.41 ^a	5.22 ^a

حروف مشترک در هر ستون نمایانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن است

The means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different using Duncan's test ($p < 0.05$)

می‌یابد، به طوری که کمترین میزان RWC (۶۳/۷۸ درصد) در ریحان‌های کشت‌شده در خاک آلوده به آرسنیک و تیمار نشده توسط کروناتین دیده می‌شود و بیشترین محتوای RWC (۹۴/۵۸ درصد) در گیاهان کشت‌شده در خاک فاقد آرسنیک و تیمار شده با بالاترین غلظت کروناتین (۱۰۰ نانومول در لیتر) مشاهده شد (جدول ۶). همچنین نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که تنش آرسنیک موجب افزایش میزان نشت یونی در گیاهان کشت‌شده در خاک آلوده به آرسنیک نسبت به خاک شاهد گردید؛ که بیانگر تأثیر تنش بر میزان نشت یونی است. از طرف دیگر، تیمار کروناتین بر گیاهان کشت‌شده در هر دو نوع خاک آلوده و غیرآلوده مؤثر بوده و موجب کاهش میزان نشت یونی گردید. کمترین میزان نشت یونی (۴/۳۳ درصد) در گیاهان کشت‌شده در خاک فاقد

محتوی نسبی آب (RWC) و نشت یونی

با توجه به نتیجه تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۵) اثرات ساده تنش آرسنیک و تیمار کروناتین هر دو بر محتوای RWC و نشت یونی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بوده و همچنین اثرات متقابل این دو فاکتور نیز بر محتوای RWC (در سطح احتمال ۵ درصد) و نشت یونی (در سطح احتمال ۱ درصد) معنی‌دار بودند. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان می‌دهد که تنش آرسنیک موجب کاهش RWC گیاهان ریحان نسبت به گیاهان شاهد کشت‌شده در خاک غیرآلوده به آرسنیک گردید. همچنین مشخص شد که تیمار کروناتین در هر دو نوع خاک آلوده و غیرآلوده به آرسنیک موجب بهبود و افزایش میزان RWC شده و حتی با افزایش غلظت کروناتین به کار برده شده محتوای RWC گیاهان افزایش

یک مولکول مهم با اثرات چندگانه است که به‌عنوان پاک‌کننده و خنثی‌کننده رادیکال‌های آزاد اکسیژن، حفاظت آنزیم‌ها در برابر دناتوره شدن و تثبیت سنتز پروتئین، تنظیم‌کننده ردوکس، کلاته‌کننده فلزات، بافر اسیدیته سیتوزولی، مولکول همراه و مولکول سیگنالی در شرایط تنشی، اعم از تنش‌های زیستی و غیرزیستی عمل می‌نماید و در سیتوپلاسم سلولی تجمع می‌یابد و باعث کاهش آسیب دیواره سلولی می‌شود. تجمع پرولین از طریق تنظیم وضعیت ردوکس سلولی و اسیدیته سیتوزولی، تثبیت ساختار ماکرومولکول‌ها و غشاء سلولی، کاهش جذب فلزات سنگین و کلاته کردن یون‌های فلزی و تنظیم تعادل آبی نقش محافظتی در سلول‌های گیاهی برای محافظت از سلول‌ها در برابر سمیت فلزات سنگین بر عهده دارد (Mishra and Dubey, 2006; Szabados and Saviour'e, 2010; Hayat et al., 2012; Sil et al., 2019). نتایج مطالعات نشان داده است در شرایط تنش فلزات سنگین گلوتامات که پیش ماده تولید کلروفیل است، به سمت تولید پرولین می‌رود (Prasad et al., 1999) که در این آزمایش و در گیاه ریحان نیز به‌وضوح شاهد کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی بودیم که مؤید این مسئله است. کروناتین که شباهت ساختاری و کارکردی بسیاری با متیل جاسمونات دارد موجب افزایش تجمع پرولین و در نتیجه افزایش میزان مقاومت گیاهان در برابر تنش گشت (Saydpour and Sayyari, 2016).

مالون‌دی‌آلدئید به‌عنوان یک ترکیب سیتوتوکسیک محصول جانبی پراکسیداسیون لیپیدها بوده و به‌عنوان یک نشانگر تولید رادیکال‌های آزاد و آسیب سلولی در گیاهان و حیوانات شناخته می‌شود. هم‌راستا با این پژوهش تنش آرسنیک (Kanwar et al., 2015) و سرب (Fatemi et al., 2020) موجب افزایش میزان تولید MDA به ترتیب در خردل هندی (*Brassica juncea* L.) و گشنیز شدند. همچنین در موافقت با این پژوهش زراع ده آبدی و همکاران (Zare Dehabadi et al., 2013) بیان نمودند که تنش آرسنیک موجب افزایش تولید MDA و محلول‌پاشی کروناتین موجب کاهش تجمع MDA در ریحان گردید. از طرف دیگر، در شرایط تنش خشکی تیمار کروناتین موجب کاهش تجمع MDA در برگ‌های ذرت (Wang et al., 2008)، گندم (Li et al., 2010) و برنج (Ai et al., 2008) شده است. طی این مطالعات مشخص شده است که کروناتین شاید از طریق نقش مهمی در حفاظت غشاء لیپیدی سلولی

آرسنیک و محلول‌پاشی شده با بالاترین غلظت کروناتین (۱۰۰ نانومول در لیتر) مشاهده شد و بیشترین مقدار نشت یونی (۳۷/۵ درصد) نیز در گیاهان کشت‌شده در خاک آلوده به آرسنیک و عدم محلول‌پاشی کروناتین مشاهده شد. شاخص پایداری غشاء به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی تحمل گونه‌های مختلف گیاهی که در معرض تنش قرار دارند به کار می‌رود و برآوردی از نشت الکترولیت است. حفظ میزان RWC در برگ‌های گیاهان مختلف مانند کلزا (Wu et al., 2012)، ذرت (Wang et al., 2008) و بادام‌زمینی (Pan and Gu, 1995) با تیمار جاسمونات‌ها و کروناتین گزارش شده است. اعتقاد بر این است که تیمار جاسمونات‌ها موجب تجمع ABA در سلول‌ها شده و ABA نیز در سیستم پیام‌رسانی به‌ویژه در شرایط تنش خشکی مداخله می‌نماید (Wu et al., 2012).

صفات بیوشیمیایی

پرولین و مالون دی‌آلدئید

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات ساده تنش آرسنیک و محلول‌پاشی با کروناتین بر میزان تجمع پرولین و MDA در ریحان در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، اما اثرات متقابل آن‌ها در مورد پرولین در سطح احتمال یک درصد و در مورد MDA در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بودند (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که محتوای پرولین و MDA در خاک آلوده به آرسنیک بسیار بیشتر از خاک فاقد آرسنیک است و تیمار کروناتین موجب کاهش مقدار این ترکیبات بیوشیمیایی در ریحان در هر دو نوع خاک غیرآلوده و آلوده به آرسنیک می‌شود. به‌طوری‌که کمترین میزان پرولین (۰/۵۲ میکرومول بر گرم وزن خشک) و MDA (۰/۹۹ نانومول بر گرم وزن تر) در گیاهان پرورش‌یافته در خاک غیرآلوده به آرسنیک و محلول‌پاشی شده با بالاترین غلظت کروناتین (۱۰۰ نانومول در لیتر) و بیشترین میزان پرولین (۵/۶۷ میکرومول بر گرم وزن خشک) و MDA (۳/۷۱ نانومول بر گرم وزن تر) در خاک آلوده به آرسنیک و محلول‌پاشی نشده با کروناتین مشاهده شد (جدول ۶).

هم‌راستا با این پژوهش افزایش محتوای پرولین در گیاهان شنبلیله (Turkezban, 2017)، گشنیز (Asadi Karam et al., 2016) و برنج (Mishra and Dubey, 2006) تحت شرایط تنش آرسنیک گزارش شده است. اسیدآمینو پرولین

در برابر آسیب‌های اکسیداتیو در برگ‌ها و ریشه‌ها داشته باشد (Wang et al., 2009).

برخی از محققین بر این باورند که ترکیب کروماتین به دلیل شباهت ساختاری و کارکردی بالا با جاسمونات‌ها نه تنها عملکردهای جاسمونات‌ها را تقلید می‌نماید بلکه چندین برابر بیشتر از آن‌ها فعال است (Zare Dehabadi et al., 2013).

این ترکیب از طریق تعدیل پراکسیداسیون لیپیدها موجب کاهش آسیب کادمیوم در فلفل (*Capsicum frutescens*) می‌گردد (Yan et al., 2013). تنش فلزات سنگین، از جمله آرسنیک منجر به تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن (ROS) در گیاهان مختلفی مانند برنج و ذرت شده‌اند. رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌توانند موجب تخریب پروتئین‌ها، اسیدهای آمینه، نوکلئوتیدها و اسیدهای نوکلئیک شده و موجب پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء و در نتیجه موجب مرگ سلول می‌شوند. سیستم‌های دفاعی گیاهان در پاسخ به تنش اکسیداتیو ناشی از عناصر سنگین از جمله آرسنیک، موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند کاتالاز، سوپر اکسید دیسموتاز (SOD) و پراکسیداز می‌گردد (Wankhede et al., 2013).

فنل و فلاونوئید

بررسی نتایج تجزیه واریانس اثر تنش آرسنیک و محلول پاشی با کروماتین بر خصوصیات فیزیولوژیکی ریحان نشان داد که اثرات ساده و متقابل تنش آرسنیک و کروماتین در سطح احتمال یک درصد بر میزان فنل و فلاونوئید معنی‌دار بوده‌اند (جدول ۵). بررسی اثرات متقابل تنش آرسنیک و محلول پاشی کروماتین در ریحان نشان داد که در گیاهان کشت شده در خاک آلوده به آرسنیک میزان فنل و فلاونوئید بیشتر از گیاهان شاهد کشت شده در خاک غیرآلوده است. تیمار کروماتین در هر دو نوع خاک غیرآلوده و آلوده به آرسنیک موجب افزایش مقدار فنل و فلاونوئید شده و حتی با افزایش غلظت کروماتین اثر افزایش آن‌ها بیشتر می‌شود. به طوری که کمترین میزان فنل و فلاونوئید (به ترتیب ۲/۱۳ و ۰/۵۱ میکرومول بر گرم وزن خشک) در گیاهان پرورش یافته در خاک غیرآلوده به آرسنیک و بدون محلول-پاشی کروماتین و بیشترین میزان فنل و فلاونوئید (به ترتیب،

۱۰۰ نانومول در لیتر) دیده شد (جدول ۶).

هم‌راستا با پژوهش حاضر، افزایش میزان آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی مانند فنل و فلاونوئید در پاسخ به تنش‌های آلومینیوم و کادمیوم در گیاه ریحان گزارش شده است (Đogić et al., 2017). تنش کادمیوم از طریق افزایش میزان ترکیبات فنلی مانند رزمارینیک اسید، چیکوریک اسید و کافنیک اسید در اندام‌های هوایی ریحان، موجب افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی در گیاهان تحت تنش شد (Gheshlaghpour et al., 2021). ترکیبات آنتی‌اکسیدان غیرآنزیمی مانند فنل و فلاونوئید به‌عنوان متابولیت‌های ثانویه گیاهی با وزن مولکولی کم یا زیاد طبقه‌بندی می‌شوند که نقش تنظیم‌کنندگی و تحریک‌کنندگی رشد در برابر تنش‌ها دارند. برخی از محققین معتقدند فلاونوئیدهای موجود در گیاهان به‌عنوان بزرگ‌ترین گروه ترکیبات فنلی موجود در گیاه هم به‌عنوان عامل آنتی‌اکسیدان و هم کلاته‌کننده فلزات سنگین در گیاهان عمل می‌نمایند (Matsouka et al., 2011). کاربرد خارجی برخی از تنظیم‌کننده‌های رشد مانند براسینواستروئیدها و کروماتین موجب افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه و سرانجام افزایش مقاومت گیاه و تعدیل اثرات مخرب تنش‌های محیطی می‌گردد (Zhao et al., 2018).

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که سمیت آرسنیک در خاک می‌تواند موجب کاهش در همه جنبه‌های صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه ریحان شود. در عین حال، استفاده از تیمار کروماتین قادر به کاهش اثرات مخرب آرسنیک و بهبود شاخص‌های رشدی و فیزیولوژیکی در ریحان است؛ بنابراین، نتایج حاصل از این پژوهش مؤید این نکته است که کروماتین به‌عنوان یک تنظیم‌کننده رشد واجد پتانسیل لازم برای تعدیل اثرات مخرب تنش فلز سنگین آرسنیک در گیاهان است. باین‌حال، پیشنهاد می‌شود که این اثر کروماتین بر سایر گیاهان و در غلظت‌های دیگری نیز بررسی شود.

منابع

- Abbasi, B., Maleki, R., Pirkharrati, H., 2017. Study effects of mining and gold extraction on amount of water contamination to As and Hg in Zarshouran area of Takab. *Journal of Environmental Geology*. 11, 39-48.
- Ali, M.A., Fahad, S., Haider, I., Ahmed, N., Ahmad, S., Hussain, S., Arshad, M., 2019. Oxidative stress and antioxidant defense in plants exposed to metal/metalloid toxicity. pp. 353-370. In: Hasanuzzaman, M., Fotopoulos, V., Nahar, K., Fujita, M. (eds.), *Reactive Oxygen, Nitrogen and Sulfur Species in Plants*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119468677.ch15>
- Ai, L., Li, Z. H., Xie, Z.X., Tian, X.L., Eneji, A. E., Duan, L.S., 2008. Coronatine alleviates polyethylene glycol-induced water stress in two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 194, 360-368. <https://doi.org/10.1111/j.1439037X.2008.00325.x>
- Asadi Karam, E., Keramat, B., Asrar, Z., Mozafari, H., 2016. Triacantanol-induced changes in growth, oxidative defense system in coriander (*Coriandrum sativum*) under arsenic toxicity. *Indian Journal of Plant Physiology*. 21, 137-142. <https://doi.org/10.1007/s40502-016-0213-8>
- Arnon, A. N., 1967. Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*. 23, 112-121. <https://doi.org/10.1139/b79-163>
- Arabi, Z., Zahedi, Z., 2017. Investigating the effect of industrial pollution on arsenic accumulation in soil and some physiological and biochemical reactions of the medicinal plant *Malva neglecta* L. *Ecophytochemistry Journal of Medicinal Plants*. 24, 69-84. [In Persian].
- Bhat, J. A., Ahmad, P., Corpas, F. J., 2020. Main nitric oxide (NO) hallmarks to relieve arsenic stress in higher plants. *Journal of Hazardous Materials*. 406, 124289. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124289>
- Brooks, D.M., Bender, C.L., Kunek, B.N., 2005. The *Pseudomonas syringae* phytotoxin coronatine promotes virulence by overcoming salicylic acid-dependent defences in *Arabidopsis thaliana*. *Molecular Plant Pathology*. 6, 629-639. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2005.00311.x>
- Chang, C.C., Yang, M.H., Wen, H.M., Chern, J.C., 2002. Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*. 10(3), 178-182. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748>
- Ceylan, H. A., 2023. Coronatine: A potential phytotoxin for increasing the tolerance of plants to drought stress. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi-C Yaşam Bilimleri Ve Biyoteknoloji*. 12, 85-93. <https://doi.org/10.18036/estubtdc.1167061>
- Davoudi, M., Ismailpour, B., Fatemi, H., Maleki Lejair, H., 2017. The effect of silicon fertilization on reducing the harmful effects of nickel stress in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Plant Process and Function*. 7, 25-38. [In Persian].
- Đogić, S., Džubur, N., Karalija, E., Parić, A., 2017. Biochemical responses of basil to aluminium and cadmium stresses. *Acta Agriculturae Serbica*. 43, 57-65. <https://doi.org/10.5937/AASer1743057D>
- Fatemi, H., Esmail Pour, B., Rizwan, M., 2020. Isolation and characterization of lead (Pb) resistant microbes and their combined use with silicon nanoparticles improved the growth, photosynthesis and antioxidant capacity of coriander (*Coriandrum sativum* L.) under Pb stress. *Environmental Pollution*. 266, 114982. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114982>
- Fattahi, B., Arzani, K., Souri, M. K., Barzegar, M., 2019. Effects of cadmium and lead on seed germination, morphological traits, and essential oil composition of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Industrial Crops and Products*. 138, 111584. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111584>
- Fahmideh, L., Qadri, A.A., Mozheri, A., Rajabi, A., 2020. The effect of salicylic acid on some morphological characteristics, photosynthetic pigments and antioxidant activity of basil plant (*Ocimum basilicum* L.) under arsenic toxicity. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 13, 297-312. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/escs.2019.1841.1435>
- Finnegan, P. M., Chen, W., 2012. Arsenic toxicity: the effects on plant metabolism. *Frontiers in Physiology*. 3, 182. <https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00182>

- Garg, N., Singla, P., 2011. Arsenic toxicity in crop plants: physiological effects and tolerance mechanisms. *Environmental Chemistry Letters*. 9, 303-321. <https://doi.org/10.1007/s10311-011-0313-7>
- Gheshlaghpour, J., Asghari, B., Khademian, R., Sedaghati, B., 2021. Silicon alleviates cadmium stress in basil (*Ocimum basilicum* L.) through alteration of phytochemical and physiological characteristics. *Industrial Crops & Products*. 163, 113338. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113338>
- Gheysari, S., Nematpour, S., Safipour Afshar, A., 2016. The effect of salicylic acid and ascorbic acid on the content of photosynthetic pigments and the activity of some antioxidant enzymes in basil plant (*Ocimum basilicum* L.) under lead stress. *Journal of Plant Research*. 28(4), 814-825. [In Persian]. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23832592.1394.28.4.13.4>
- Gill, M., 2014. Heavy metal stress in plants: a review. *International Journal of Advanced Research*. 2, 1043-1055.
- Gupta, D.K., Srivastava, S., Huang, H.G., Romero-Puertas, M.C., Sandalio, L.M., 2011. Arsenic tolerance and detoxification mechanisms in plants. In: Sherameti, I., Varma, A. (eds), *Detoxification of Heavy Metals*. Soil Biology, vol 30. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21408-0_9
- Hao, K., Wang, Y., Zhang, J., Xie, Y., Zhang, M., Duan, L., Li, Z., 2013. Coronatine enhances drought tolerance via improving antioxidative capacity to maintaining higher photosynthetic performance in soybean. *Plant Science*. 210, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2013.05.006>
- Hassan, M. J., Zhu, Z., Ahmad, B., Mahmood, Q., 2006. Influence of cadmium toxicity on rice genotypes as affected by zinc, sulfur and nitrogen fertilizers. *Caspian Journal of Environmental Science*. 4, 1-8.
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. B., Zulfiqar, F., Raza, A., Mohsin, S. M., Mahmud, J. A., Fotopoulos, V., 2020. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*. 9, 681. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>.
- Hayat, S., Hayat, Q., Alyemeni, M. N., Wani, A. S., Pichtel, J., Ahmad, A., 2012. Role of proline under changing environments: a review. *Plant Signaling and Behavior*. 7, 1456-1466.
- Heath, R. L., Packer, L., 1968. Phytoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 125, 180-198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)
- Helmy, L., 2010. The influence of nickel sulphate on some physiological aspects of two cultivars of *Raphanus Sativus* L. *Archives Biology Science Belgrade*. 62, 683-691. <https://doi.org/10.2298/ABS1003683L>
- Islam, E., Tahir Khan, M., Irem, S., 2015. Biochemical mechanisms of signaling: perspectives in plants under arsenic stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 114, 126-133. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.01.017>
- Kanwar, M. K., Poonam., and Bhardwaj, R., 2015. Arsenic induced modulation of antioxidative defense system and brassinosteroids in *Brassica juncea* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 115, 119-125. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.02.016>
- Kumar, V., Vogelsang, L., Schmidt, R. R., Sharma, S. S., Seidel, T., Dietz, K.J., 2020. Remodeling of root growth under combined arsenic and hypoxia stress is linked to nutrient deprivation. *Frontiers in Plant Science*. 11, 569687. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.569687>
- Li, X., Shen, X., Li, J., Eneji, E., Li, Z., Tian, X., Duan, L., 2010. Coronatine alleviates water deficiency stress on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Journal of Integrative Plant Biology*. 52, 616-625. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2010.00958.x>
- Lutts, S., Kinet, J. M., Bouharmont, J., 1995. NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Annals of Botany*. 78, 389-398. <https://doi.org/10.1006/anbo.1996.0134>
- Matsouka, I., Beri, D., Chinou, I., Haralampidis, K. G., Spyropoulos, C., 2011. Metals and selenium induce medicarpin accumulation and excretion from the roots of fenugreek seedlings: a potential detoxification mechanism. *Plant and Soil*. 343, 235-245. <https://doi.org/10.1006/anbo.1996.0134>

- Melotto, M., Mecey, C., Niu, Y., Chung, H.S., Katsir, L., Yao, J., Zeng, W., Thines, B., Staswick, P., Browse, J., Howe, G. A., He, S.Y., 2008. A critical role of two positively charged amino acids in the Jas motif of Arabidopsis JAZ proteins in mediating coronatine- and jasmonoyl isoleucine-dependent interactions with the COI1 F-box protein. *The Plant Journal*. 55, 979–988. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03566.x>
- Mishra, S., Dubey, R.S., 2006. Inhibition of ribonuclease and protease activities in arsenic exposed rice seedlings: Role of proline as enzyme protectant. *Journal of Plant Physiology*. 163, 927-936. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.08.003>
- Naghibi, F., Mosaddegh, M., Motamed, S. M., Ghorbani, A., 2005. Labiataefamily in folk medicine in Iran: fro, enthobotany to pharmacology. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*. 2, 63-79. <https://doi.org/10.22037/ijpr.2010.619>
- Pan, R. C., Gu, H., 1995. Effect of methyl jasmonate in the growth and drought resistance in peanut seedlings. *Acta Phytophysiological Sinica*. 21, 215–220. <https://doi.org/10.1002/jpln.201700373>
- Paquin, R., Lechasseur, P., 1979. Observations sur une methode de dosage de la proline libre dans les extraits de plantes. *Canadian Journal of Botany*. 57, 1851–1854. <https://doi.org/10.1139/b79-233>
- Polya, D. A., Sparrenbom, C., Datta, S., Guo, H., 2019. Groundwater arsenic biogeochemistry– Key questions and use of tracers to understand arsenic-prone groundwater systems. *Geoscience Frontiers*. 10, 1635-1641. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.05.004>
- Poursaeid, M., Iranbakhsh, A., Ebadi, M., Fotokian, M.H., 2020. Morpho-physiological and phytochemical responses of basil (*Ocimum basilicum* L.) to toxic heavy metal cadmium. *Botanicae Horti Agrobotanici*. 49, 11902. <https://doi.org/10.15835/nbha49411902>
- Prasad, K., Saradhi, P. P., Sharmila, P., 1999. Concerted action of antioxidant enzymes and curtailed growth under zinc toxicity in Brassica juncea. *Environmental and experimental Botany*. 42, 1-10. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(99\)00013-1](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(99)00013-1)
- Saydpour, F., Sayyari, M., 2016. Impact of methyl jasmonate on enhancing chilling tolerance of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings. *Journal of Crop Production and Processing*. 6, 47-59. [In Persian]. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.6.21.47>
- Shanker, K. A., Cervantes, C., Loza-Taversa, H., Avudainayagam, S., 2005. Chromium toxicity in plants. *Environment International*. 31, 739-753. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.02.003>
- Sil, P., Das, P., Biswas, S., Mazumdar, A., Biswas, A.K., 2019. Modulation of photosynthetic parameters, sugar metabolism, polyamine and ion contents by silicon amendments in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings exposed to arsenic. *Environmental Science and Pollution Research*. 26(13), 13630-13648. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04896-7>
- Singleton, V.L., Orthofer, R., Lamuela-Raventós, R.M., 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152-178. [http://dx.doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Soltani, F., Ghorbani, M., Manouchehrikalantari, K., 2006. Effect of cadmium on photosynthetic pigments, sugars and malonaldehyde content in *Brassica napus*. *Journal of Biology*. 2, 136- 145. [In Persian].
- Szabados, L., Saviour'e, A., 2010. Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science*. 15, 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.11.009>
- Turner, N.C., 1981. Techniues and experimental approaches for measurement of plant water status. *International Journal of Plant-Soil Relationships*. 58, 339-366. <https://doi.org/10.1007/BF02180062>
- Turkezban, A., 2017. Effect of foliar spraying of nitric oxide and feeding with selenium on growth, physiology, biochemical indicators and secondary metabolites of fenugreek plant (*Trigonella foenum-graecum* L.) under heavy arsenic stress conditions. Master's thesis, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran. [In Persian].
- Uppalapati, S. R., Ayoubi, P., Weng, H., Palmer, D. A., Mitchell, R. E., Jones, W., Bender, C.L., 2005. The phytotoxin coronatine and methyl jasmonate impact multiple phytohormone

- pathways in tomato. *The Plant Journal*. 42, 201–217. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2005.02366.x>
- Wankhede, D. P., Gupta, M., Singh, A.K. 2013. Arsenic toxicity in crop plants: approaches for stress resistance. In: Tuteja, N., Gill, S.S., (eds.) *Crop Improvement Under Adverse Conditions* Pp. 347-360. Springer Science+Business Media New York.
- Wang, B., Li, Z., Egrinya Eneji, A., Tian, X., Zhai, Z., Li, J., Duan, L., 2008. Effects of coronatine on growth, gas exchange traits, chlorophyll content, antioxidant enzymes and lipid peroxidation in maize (*Zea mays* L.) seedlings under simulated drought stress. *Plant Production Science*. 11, 283–290. <https://doi.org/10.1626/pps.11.283>
- Wang, L., Chen, W. J., Wang, Q., Eneji, A. E., Li Z. H., Duan, L.S., 2009. Coronatine enhances chilling tolerance in cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings by improving the antioxidative defence system. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 195, 377–383. <https://doi.org/10.1111/j.14>
- Watanabe, F. S., Olsen, S.R., 1965. Test of an ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO₃ extracts from the soil. *Soil Science Society America Journal*. 29, 677-678. <https://doi.org/10.2136/sssaj1965.03615995002900060025x>
- Wu, H., Wu, X., Li, Z., Duan, L. Zhang, M., 2012. Physiological evaluation of drought stress tolerance and recovery in cauliflower (*Brassica oleracea* L.) seedlings treated with methyl jasmonate and coronatine. *Journal of Plant Growth Regulation*. 31, 113–123.
- Xie, Z.X., Duan, L.S., Tian, X.L., Wang, B.Q., Eneji, A.E., Li, Z.H., 2008. Coronatine alleviates salinity stress in cotton by improving the antioxidative defense system and radical-scavenging activity. *Journal of Plant Physiology*. 165, 375–384. <https://doi.org/10.1007/s00344-011-9224-x>.
- Xie, Z.X., Duan, L.S., Li, H., Wang, X.D., Liu, X., 2015. Dose-dependent effects of coronatine on cotton seedling growth under salt stress. *Plant Growth Regulation*. 34, 651-664. <https://doi.org/10.1007/s00344-015-9501-1>.
- Xu, J., Zhou, Y., Xu, Z., Chen, Z., Duan, L., 2020. Physiological and transcriptome profiling analyses reveal important roles of coronatine in improving drought tolerance of tobacco. *Journal of Plant Growth Regulation*. 39, 1346-1358. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10074-8>
- Yan, Z., Chen, J., Li, X. 2013. Methyl jasmonate as modulator of Cd toxicity in *Capsicum frutescens* var. *fasciculatum* seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 98, 203–209. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.08.019>
- Youssef, N. A., 2020. Changes in the morphological traits and the essential oil content of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) as induced by cadmium and lead treatments. *International Journal of Phytoremediation*. 23, 291-299. <https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1812508>
- Zare Dehabadi, S., Shoushtari, A., Asrar, Z., 2013. Modulation of arsenic toxicity-induced oxidative damage by coronatine pretreatment in sweet basil (*Ocimum basilicum*) seedlings. *Botany* 91, 442–448. <https://doi.org/10.1139/cjb-2012-0296>
- Zare Dehabadi, S., Asrar, Z., Shoushtari, A., 2014. Investigation of synergistic action between coronatine and nitric oxide in alleviating arsenic-induced toxicity in sweet basil seedlings. *Plant Growth Regulation*. 74, 119-130. <https://doi.org/10.1007/s10725-014-9903-2>
- Zhang, J., Kirkham, M.B., 1992. Drought-stress-induced changes in activities of superoxide dismutase, catalase, and peroxidase in wheat species. *Plant and Cell Physiology*. 35, 785-791. <https://doi.org/10.1093/OXFORDJOURNALS.PCP.A078658>
- Zhou, Y., Liu, Y., Peng, C., Li, X., Zhang, M., Tian, X., Duan, L., 2018. Coronatine enhances drought tolerance in winter wheat by maintaining high photosynthetic performance. *Journal of plant physiology*. 228, 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.05.009>
- Zhou, Y., Zhang, M., Li, J., Li, Z., Tian, X., Duan, L., 2015. Phytotoxin coronatine enhances heat tolerance via maintaining photosynthetic performance in wheat based on electrophoresis and TOF-MS analysis. *Scientific Reports*. 5, 1-13. <https://doi.org/10.1038/srep13870>