J. Crop Prod. Process. 2026, 16(3), 99-117; DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961

Journal of Crop Production and Processing

Journal homepage: https://jcpp.iut.ac.ir/

Original Article

Effects of Humic Acid and Seaweed Extract on Root Characteristics and Photosynthetic Pigment Content of Sweet Corn Under Lead and Cadmium Stress

Parsa Sekooti [1], Salim Farzaneh[1], Sajjad Moharramnejad[2*], Raouf Seyed Sharifi[1] AND Bahman Khoshru[3]

1. Department of Genetic and Plant Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
2. Crop and Horticultural Science Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Moghan, Iran.
3. Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

Extended Abstract

Introduction: Heavy metal contamination of agricultural soils and water resources has become a major environmental concern worldwide due to rapid industrialization, urbanization, mining activities, and the excessive use of agrochemicals. Among toxic heavy metals, lead (Pb) and cadmium (Cd) are particularly hazardous because of their persistence in the environment, high mobility, and potential accumulation in plant tissues. These metals adversely affect plant growth and development by disrupting nutrient uptake, inducing oxidative stress, damaging cellular structures, and impairing photosynthetic processes. Consequently, heavy metal pollution poses a serious threat to agricultural productivity, food safety, and ecosystem sustainability. In recent years, the adoption of sustainable agricultural practices has stimulated interest in using plant biostimulants as eco-friendly tools to enhance crop resilience to abiotic stress. Humic substances and seaweed extracts are among the most widely used biostimulants due to their ability to improve nutrient availability, stimulate root development, enhance antioxidant defense mechanisms, and promote plant growth. However, information regarding their combined effects on mitigating Pb and Cd toxicity in sweet corn remains limited.

The present study aimed to (i) evaluate the effects of Pb and Cd stress, applied individually and in combination, on photosynthetic pigments and root growth characteristics of sweet corn plants, and (ii) investigate the potential role of humic acid and seaweed extract, applied individually and in combination, in alleviating heavy metal-induced damage and improving plant tolerance.

Materials and Methods: The experiment was conducted under controlled hydroponic conditions using a factorial arrangement based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications. The first factor consisted of four heavy metal treatments: control (without heavy metals), 7.5 mM Pb, 1.31 mM Cd, and a combined treatment of 7.5 mM Pb + 1.31 mM Cd. Lead and cadmium were supplied in the form of lead acetate and cadmium chloride, respectively. The second factor included four biostimulant treatments: control (without biostimulants), 120 mg L^{-1} humic acid, 120 mg L^{-1} seaweed extract, and a combined treatment of 120 mg L^{-1} humic acid + 120 mg L^{-1} seaweed extract. Biostimulants were added directly to the nutrient solution throughout the experimental period. At the end of the treatment period, several physiological and morphological parameters were measured, including chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll, carotenoid content, fresh and dry root biomass, root length, root volume, and stress tolerance indices of roots and shoots. Data were subjected to statistical analysis, and treatment means were compared at the appropriate significance level.

Received: Jun. 10, 2026; Revised: Aug. 24, 2026; Accepted: Aug. 26, 2026; Published Online: Oct. 17, 2026.
* Corresponding Author: s.moharramnejad@areeo.ac.ir

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961]

Journal of Crop Production and Processing

Journal homepage: https://jcpp.iut.ac.ir/

Results and Discussion: Exposure to Pb and Cd significantly reduced the concentration of photosynthetic pigments compared with the control treatment. The reduction in chlorophyll and carotenoid contents indicated that heavy metals negatively affected chloroplast structure and function, thereby impairing photosynthetic efficiency. The combined Pb + Cd treatment generally produced more severe effects than individual metal treatments, suggesting additive or synergistic toxicity. Heavy metal stress also caused substantial reductions in root growth and development. Root length, root volume, and fresh and dry root biomass declined significantly under Pb and Cd exposure. These negative effects can be attributed to disruptions in cell division, membrane integrity, water uptake, and nutrient acquisition. Since roots are the primary sites of heavy metal accumulation, their growth is often among the first plant characteristics adversely affected by metal toxicity. Application of humic acid and seaweed extract significantly improved both physiological and morphological traits under heavy metal stress conditions. Plants receiving biostimulants exhibited higher chlorophyll and carotenoid concentrations than untreated plants exposed to heavy metals. These improvements may be associated with enhanced nutrient uptake, stabilization of cellular membranes, increased chlorophyll biosynthesis, and activation of antioxidant defense systems. Similarly, biostimulant treatments promoted root development by increasing root length, root volume, and biomass accumulation. Enhanced root growth likely improved the plant's ability to absorb water and nutrients while reducing the detrimental effects of heavy metal toxicity. Notably, the combined application of humic acid and seaweed extract generally yielded the greatest improvements across most measured traits, suggesting possible synergistic interactions between the two biostimulants. The calculated stress tolerance indices further confirmed the beneficial effects of biostimulant application. Both root and shoot tolerance indices increased significantly in treated plants compared with untreated stressed plants, demonstrating enhanced adaptation and resilience to heavy metal stress. These findings suggest that humic acid and seaweed extract may partially counteract the physiological and morphological damage caused by Pb and Cd contamination.

Conclusion: The results of this study demonstrate that Pb and Cd toxicity substantially impairs photosynthetic pigment production and root development in sweet corn plants. However, the application of humic acid and seaweed extract, either individually or in combination, effectively mitigates the adverse effects of heavy metal stress by improving photosynthetic performance, stimulating root growth, and enhancing stress tolerance. The combined aplication of these biostimulants showed the greatest capacity for promoting plant resilience under contaminated conditions. Overall, humic acid and seaweed extract represent sustainable, environmentally friendly, and cost-effective management tools for reducing heavy metal stress in crop production systems. Their application may contribute to maintaining crop productivity in contaminated environments and supports the broader goal of sustainable agricultural development. Future studies should investigate the underlying physiological and molecular mechanisms involved in biostimulant-mediated heavy metal tolerance and evaluate their effectiveness under field conditions.

Keywords: Biostimulants, Chlorophyll content, Heavy metal stress, Heavy metal stress tolerance index.

How to Cite: Sekooti P., Salim Farzaneh , Moharramnejad S., Seyed Sharifi R., Khoshru B., Effects of humic acid and seaweed extract on root characteristics and photosynthetic pigment content of sweet corn under lead and cadmium stress. *J. Crop Prod. Process*. 2026, 16(3), 99-117 (*In Persian*). DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961.

Copyright © 2026 Isfahan University of Technology, Published by Isfahan University of Technology press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961]

نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی، ۱۴۰۵، دوره ۱۶، شماره ۳، صص. ۱۱۷-۹۹، DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961

نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی

صفحه خانگی نشریه: https://jcpp.iut.ac.ir/

مقاله پژوهشی

اثر اسیدهیومیک و عصاره جلبک دریایی بر خصوصیات ریشه و محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاه ذرت شیرین تحت تنش سرب و کادمیوم

پارسا سکوتی[۱]، سلیم فرزانه[۱]، سجاد محرم نژاد[۲*]، رئوف سید شریفی[۱] و بهمن خوشرو[۳]

چکیده– آلودگی محیط زیست به ویژه خاک و آب، به فلزات سنگین، یکی از چالش‌های عمده جهان امروز است و از سوی دیگر گذار به سمت کشاورزی پایدار، منجر به افزایش چشمگیر علاقه به استفاده از محرک‌های زیستی شده است. از این رو به‌منظور بررسی اثر تنش فلزات سنگین سرب و کادمیوم و برهم‌کنش آنها با محرک‌های زیستی اسیدهیومیک و عصاره جلبک دریایی بر سیستم فتوسنتزی و خصوصیات ریشه گیاه ذرت شیرین آزمایشی به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در شرایط کشت هیدروپونیک اجرا شد. فاکتورهای آزمایش شامل: فاکتور اول اعمال تنش فلزات سنگین در چهار سطح (تنش صفر (شاهد)، سرب ۷/۵ میلی‌مولار، کادمیوم ۱/۳۱ میلی‌مولار و ترکیب سرب ۷/۵ میلی‌مولار + کادمیوم ۱/۳۱ میلی‌مولار با استفاده از استات سرب و کلرید کادمیوم) و فاکتور دوم شامل کاربرد محرک‌های زیستی همراه با محلول غذایی در چهار سطح (عدم کاربرد محرک زیستی (شاهد)، ۱۲۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدهیومیک، ۱۲۰ میلی‌گرم در لیتر عصاره جلبک دریایی و ترکیب ۱۲۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدهیومیک + ۱۲۰ میلی‌گرم در لیتر عصاره جلبک دریایی) بودند. نتایج نشان داد در شرایط تنش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی (کلروفیل کل، ***a***، ***b*** و کاروتنوئید) و خصوصیات ریشه (زیست توده تازه و خشک ریشه، طول و حجم ریشه) به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند. کاربرد اسید هیومیک و ترکیب اسید هیومیک + عصاره جلبک دریایی، به‌ویژه در شرایط تنش ساده سرب و تنش توأم فلزات سنگین، محتوای کلروفیل ***a***، ***b*** و کاروتنوئیدها را افزایش دادند. همچنین صفات زیست توده تازه ریشه، حجم ریشه و طول ریشه با کاربرد ساده اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی تحت تنش فلزات سنگین عملکرد بهتری داشتند. درنهایت کاربرد محرک‌های زیستی موجب ارتقا شاخص‌های تحمل تنش فلز ریشه و اندام هوایی گیاهان ذرت شیرین شدند. بنابراین کاربرد محرک‌های زیستی می‌تواند یک راهکار مدیریتی و اقتصادی مؤثر در شرایط تنش فلزات سنگین باشد.

واژه‌های کلیدی: تنش فلزات سنگین، شاخص تحمل تنش فلزی، محرک‌های زیستی، محتوای کلروفیل.

دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰، بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴، اولین انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۲۵

۱. گروه ژنتیک و تولیدات گیاهی، دانشکده علوم و فناوری کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲. بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مغان، ایران.

۳. موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

*: نویسنده مسئول، رایانامه: s.moharramnejad@areeo.ac.ir

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۵ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961]

مقدمه

یکی از چالش‌های اصلی در راه رسیدن به تولید پایدار محصولات کشاورزی تنش‌های زیست محیطی است . آلودگی محیط زیست به‌ویژه خاک و آب، به فلزات سنگین، یکی از چالش‌های عمده جهان امروز است که پیامدهای زیست محیطی، اقتصادی و بهداشتی گسترده‌ای به‌همراه دارد (۲۱ و ۳۷). و رشد گیاهان و بهره‌وری کشاورزی را در سراسر جهان با تهدیدی جدی مواجه ساخته است (۳۶) که در این میان، کادمیوم (Cd) و سرب (Pb) از رایج‌ترین و خطرناک‌ترین آلاینده‌ها محسوب می‌شوند و در سیستم‌های بیولوژیکی رفتارهای متفاوتی را نشان می‌دهند (۷). قرارگیری در معرض تنش کادمیوم منجر به تجمع این فلز در بخش‌های مختلف گیاه شده (۵۳ و ۵۶) و با آسیب به غشاهای تیلاکوئیدی، ساختار کلروفیل را مختل می‌کند (۵۴). علاوه بر این، کادمیوم در روند تقسیم سلولی مداخله کرده (۴۱) و مانع از تجمع زیست‌توده می‌شود (۵۵). این عنصر به‌دلیل تحرک بالا و حلالیت در آب، حتی در غلظت‌های نسبتاً پایین، تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) را تسریع می‌کند (۲۴). کادمیوم با اتصال به گروه‌های سولفیدریل آزاد (SH)، هموستاز سلولی را مختل کرده و موجب جایگزینی عناصر ضروری نظیر روی (Zn)، آهن (Fe) و کلسیم (Ca) در پروتئین‌ها می‌شود. این جایگزینی می‌تواند متعاقباً آسیب‌های اکسیداتیو را تحریک کرده و در نهایت رشد و نمو گیاه را مهار نماید (۱۶). سرب (Pb) فلز سنگینی با سمیت بالقوه است و سمیت سرب در گیاهان موجب توقف رشد ریشه، آسیب به مولکلول‌های زیستی، تغییر در نفوذ پذیری غشا، وضعیت آبی و سطح هورمونی، بازدارندگی فعالیت تعدادی از آنزیم‌ها، اختلال در تغذیه عناصر، کاهش فتوسنتز و افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) می‌شود (۱، ۱۸، ۳۲ و ۴۹). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که قرارگیری گیاه ذرت در معرض تنش سرب منجر به تجمع این فلز، مهار رشد، تخریب رنگدانه‌های فتوسنتزی، تولید ROS، پراکسیداسیون لیپیدی، تنش آبی، عدم تعادل در تغذیه معدنی و تغییر در آناتومی ریشه شده است (۵۲). همچنین، تالها و همکاران (۴۷) دریافتند که آلودگی سرب در محیط کشت ذرت، رشد گیاهچه را مختل کرده، جذب مواد مغذی ضروری را کاهش داده و بر هیدرولیز پروتئین‌ها به اسیدهای آمینه و نشاسته به قندها اثر منفی می‌گذارد.

در راستای دستیابی به کشاورزی پایدار، استفاده از محرک‌های زیستی به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود رشد و تحمل به تنش در گیاهان مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته است (۵ و ۱۸). این ترکیبات با بهبود جذب مواد مغذی و تحریک سیستم دفاعی گیاه، نقش مهمی در افزایش بهره‌وری و کاهش اثرات تنش‌های غیرزیستی ایفا می‌کنند (۲۰ و ۲۸). در این میان، عصاره جلبک دریایی و اسید هیومیک به‌دلیل خواص منحصربه‌فرد خود، به عنوان دو محرک زیستی پرکاربرد شناخته می‌شوند (۸، ۱۰ و ۱۷).

عصاره جلبک دریایی یکی از شناخته‌شده‌ترین محرک‌های زیستی است که به‌طور مستقیم فرآیندهای رشدی را تنظیم کرده و با افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه، مقاومت آن را در برابر تنش‌های اکسیداتیو افزایش می‌دهند. یافته‌های مطالعات پیشین نشان می‌دهد که کاربرد عصاره جلبک با افزایش محتوای کلروفیل و کاروتنوئیدها و بهبود کارایی فتوسیستم II (Fv/Fm)، به حفظ و ارتقای فرآیند فتوسنتز در ذرت کمک می‌کند که این اثرات مثبت به‌دلیل وجود ترکیبات زیست‌فعال متنوعی مانند سیتوکینین و وجود منیزیم و نیتروژن در عصاره جلبک است که در سنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی و جلوگیری از تخریب آنها در شرایط تنش نقش دارند. همچنین این ترکیب زیستی با تحریک رشد ریشه، افزایش طول، سطح، تعداد ریشه‌های جانبی و بهبود معماری ریشه در ذرت، جذب آب و عناصر غذایی را به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد (۳، ۲۰، ۲۸ و ۳۳).

اسید هیومیک از اجزای اصلی ترکیبات هیومیکی با ماهیت آلی است (۵۲) گیاهچه‌های پیش‌تیمار شده با اسیدهای هیومیک، مقاومت خود را در برابر تنش‌های غیرزیستی از جمله شوری، خشکی و فلزات سنگین بهبود می‌بخشند (۱۳). این ترکیب عمدتاً با تشکیل کمپلکس‌های پایدار بین گروه‌های عاملی خود و فلزات سنگین (مانند سرب و کادمیوم)، تحرک و زیست‌فراهمی این

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961]

عناصر را در خاک کاهش داده و تجمع آنها را در بافت‌های گیاهی به‌طور معنی‌داری پایین می‌آورد (۱۵ و ۲۵). در گیاه ذرت، نشان داده شده است که اسید هیومیک با افزایش ترشحات ریشه، افزایش فعالیت آنزیم‌های ریشه، افزایش فتوسنتز و بهبود جذب فسفر، رشد را افزایش می‌دهد (۴۰). از جمله کاهش نشت الکترولیت و تخریب کلروفیل در بوته‌های ذرت تحت تنش سرب و کادمیوم با کاربرد اسیدهیومیک گزارش شده است (۳۱، ۳۸، ۴۵ و ۵۱) و افزایش زیست توده ریشه و اندام هوایی و محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی در بوته‌های ذرت تیمار شده با اسیدهیومیک تحت تنش کادمیوم گزارش شده است (۴۶).

با وجود شواهد فراوان در مورد اثرات مفید اسیدهیومیک و عصاره جلبک دریایی، اغلب مطالعات پیشین به بررسی تأثیر جداگانه و تکی فلزات سنگین و محرک‌های زیستی در سایر گیاهان پرداخته‌اند و مطالعات اندکی در ارتباط با تأثیر فلزات سنگین بر گیاه ذرت شیرین انجام شده است، حال آنکه در شرایط طبیعی، گیاهان معمولاً در معرض ترکیبی از آلاینده‌ها قرار می‌گیرند و اثرات سینرژیستی (هم‌افزایی) آنها می‌تواند بسیار مخرب‌تر از اثرات منفرد باشد. از طرفی، اثر ترکیبی و هم‌افزایی احتمالی اسیدهیومیک و عصاره جلبک دریایی به‌عنوان یک راهکار مدیریتی برای افزایش تحمل به تنش‌های توأم فلزات سنگین، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، هدف اصلی از این پژوهش، بررسی اثرات ساده و توأم تنش فلزات سنگین سرب و کادمیوم و همچنین مطالعه اثر کاربرد ساده و توأم اسیدهیومیک و عصاره جلبک دریایی بر خصوصیات ریشه و رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاه ذرت شیرین می‌باشد تا بتوان با ارائه راهکاری مؤثر، خسارات ناشی از آلودگی‌های ترکیبی ناشی از فلزات سنگین را در ذرت شیرین کاهش داد.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار به‌صورت هیدروپونیک در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۲ اجرا شد. فاکتورهای آزمایش شامل اعمال تنش فلزات سنگین با آبیاری (عدم اعمال تنش به‌عنوان شاهد، تنش سرب ۷/۵ میلی‌مولار (۴۵)، تنش کادمیوم ۱/۳۱ میلی‌مولار (۳۹) و تنش ترکیب سرب ۷/۵ میلی‌مولار + کادمیوم ۱/۳۱ میلی‌مولار) با استفاده از استات سرب ($Pb(CH_3COO)_2$) و کلرید کادمیوم ($CdCl_2$) بود و فاکتور دوم آزمایش شامل عدم کاربرد محرک‌های زیستی به‌عنوان شاهد، کاربرد ۱۲۰ میلی گرم برلیتر هیومیک اسید، ۱۲۰ میلی گرم بر لیتر عصاره جلبک دریایی و ترکیب ۱۲۰ میلی گرم بر لیتر هیومیک اسید + ۱۲۰ میلی گرم بر لیتر عصاره جلبک دریایی با آبیاری بودند. باتوجه به این که هدف طراحی آزمایشی بود که در آن دو عامل آب و مواد غذایی کم‌ترین تأثیر را بر رشد داشته باشند کشت هیدروپونیک انتخاب بهتری بود (۲۵). همچنین باتوجه به این که سیستم‌های هیدروپونیک بر مبنای ریشه‌های معلق در آب یا در برخی از محیط‌های کشت جامد مانند شن و دیگر محیط‌های نسبتا بی اثری که به‌طور مداوم با محلول غذایی پر می‌شوند استوار است (۱۵). بدین منظور جهت اجرای آزمایش ظرف‌های ۳ لیتری با ترکیب ۳ به ۱ پرلیت به ماسه پر شدند و بذرهای ذرت شیرین رقم SU۴۰۳ در عمق ۵ سانتی‌متری کشت شدند. محیط‌های کشت به‌صورت روزانه با محلول نیم هوگند که ترکیب عناصر غذایی آن به شرح نیترات پتاسیم (KNO_3) ۵ میلی‌مولار، نیترات کلسیم ($Ca(NO_3)_2.4H_2O$) ۵ میلی‌مولار، کلات آهن (Fe(Na)EDTA) ۰/۰۶ میلی‌مولار، سولفات منیزیم ($MgSO_4.7H_2O$) ۲ میلی‌مولار، نیترات آمونیوم (NH_4NO_3) ۱ میلی‌مولار، فسفات مونوپتاسیم (KH_2PO_4) ۰/۵ میلی‌مولار، اسید بریک (H_3BO_3) ۴۶ میکرومولار، کلرید منگنز ($MnCl_2.4H_2O$) ۹ میکرومولار، سولفات روی ($ZnSO_4.7H_2O$) ۰/۷۶ میلی‌مولار، سولفات مس ($CuSO_4.5H_2O$) ۰/۲۰۴ میلی‌مولار و سدیم مولیبدات ($Na_2MoO_4.2H_2O$) ۰/۴۵ میکرومولار بود (۲۶) آبیاری شدند. بعد از گذشت دو هفته و در مرحله دو برگی بوته‌های ذرت شیرین اعمال تیمارهای فلزات سنگین و محرک‌های زیستی شروع شد. ۱۴ روز بعد از اعمال تیمارها نمونه‌برداری از بخش‌های هوایی و ریشه گیاهان انجام شد و با آب دیونیزه شست و شو و با حوله کاغذی خشک شدند.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961]

نمونه‌های برگ جدا شده اندام هوایی برای بررسی محتوای کلروفیل برگ با روش (۳۵) استفاده شدند. برطبق این روش ۰/۲۵ گرم برگ گیاه مورد نظر در هاون چینی حاوی ۵ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد کاملا هموژنیزه می‌شود. سپس محلول مورد نظر داخل کووت ریخته می‌شود و طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت می‌شود. با استفاده از روابط ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به‌ترتیب محتوای کلروفیل a، b، کل، کاروتنوئیدها و نسبت کلروفیل a به b اندازه‌گیری می‌شود. شاخص تحمل اندام هوایی با استفاده از رابطه پیشنهادی (۶) محاسبه شد (رابطه ۶).

رابطه (۱): $\text{Chlorophyll a} = \left(12.25 \times \text{A663} - 2.79 \times \text{A646}\right)$

رابطه (۲): $\text{Chlorophyll b} = \left(21.21 \times \text{A646} - 5.1 \times \text{A663}\right)$

رابطه (۳): $\text{Total Chlorophyll} = \text{Chlorophyll a} + \text{Chlorophyll b}$

رابطه (۴):

$$\text{Carotenoid} = \left(\frac{1000 \times \text{A470} - 1.8 \times \text{Chlorophyll a} - 85.02 \times \text{Chlorophyll b}}{198}\right)$$

رابطه (۵):

$$\text{Chlorophyll } \frac{\text{a}}{\text{b}} \text{ Ratio} = \frac{\text{Chlorophyll a}}{\text{Chlorophyll b}}$$

رابطه (۶):

$$\text{شاخص تحمل تنش فلزات سنگین در اندام هوایی} = \left(\frac{\text{وزن خشک تیمار تحت تنش}}{\text{وزن خشک تیمار شاهد}}\right) \times ۱۰۰$$

وزن تازه ریشه و اندام هوایی با استفاده از ۳ گیاه در هر تکرار و برحسب گرم در بوته با ترازوی با دقت ۰/۰۰۱ اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌های ریشه و اندام هوایی در آون با دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت خشک شدند تا وزن خشک آنها اندازه‌گیری شود (۱۹). طول ریشه بر حسب سانتی‌متر و با میانگین سه ریشه بلند در گیاه اندازه‌گیری شد (۴۴). حجم ریشه‌ها پس از خارج سازی از بستر کشت با استفاده از حجم مشخصی از آب در استوانه مدرج اندازه‌گیری شد، طوری که اختلاف حجم ایجاد شده پس از ورود ریشه‌ها در آب استوانه مدرج به‌عنوان حجم ریشه منظور شد (۴۳). شاخص تحمل ریشه به تنش فلزات سنگین با استفاده از رابطه ویلکینس (۵۰) محاسبه شد (رابطه ۷).

$$\text{شاخص تحمل تنش فلزات سنگین ریشه} = \left(\frac{\text{میانگین طول ریشه تیمار تحت تنش}}{\text{میانگین طول تیماریشه شاهد}}\right) \times ۱۰۰$$

برای تجزیه داده‌ها از نرم افزار SAS (نسخه ۹/۳) استفاده شد. میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد مقایسه شدند. برای رسم نمودارها و جدول‌ها از نرم افزار Excel استفاده شد. برای محتوای کلروفیل b، نسبت کلروفیل a به b، شاخص تحمل تنش فلز اندام هوایی و وزن تازه و خشک ریشه از روش تبدیل جذری برای همسان سازی داده ها استفاده شد.

نتایج و بحث

اثر ساده فلزات سنگین و اثر متقابل فلزات سنگین و محرک‌های رشد بر محتوای کلروفیل کل معنی‌دار بود (جدول۱). اثر ساده سرب و کادمیوم و اثر توأم سرب + کادمیوم به‌ترتیب موجب کاهش ۲۶/۱، ۴۸/۵ و ۷/۹۶ درصدی محتوای کلروفیل کل نسبت به تیمار شاهد شدند. در شرایط بدون تنش کاربرد محرک‌های رشد محتوای کلروفیل کل را نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند. در شرایط تنش ساده سرب کاربرد اسید هیومیک محتوای کلروفیل کل را نسبت به تیمار اعمال منفرد سرب افزایش داد، اما در شرایط تنش ساده کادمیوم و تنش توأم سرب + کادمیوم تأثیری بر محتوای کلروفیل کل نداشت (شکل ۱).

اثر ساده فلزات سنگین و اثر متقابل فلزات سنگین و محرک‌های رشد بر محتوای کلروفیل a معنی‌دار بود (جدول ۱). اثر تنش ساده سرب و کادمیوم و تنش توأم سرب + کادمیوم به‌ترتیب موجب کاهش ۳۲/۱، ۴۶/۶ و ۸/۵۶ درصدی محتوای کلروفیل a نسبت به تیمار شاهد شدند. در شرایط بدون تنش کاربرد ساده و توأم محرک‌های رشد محتوای کلروفیل a را نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند. در شرایط تنش ساده سرب و تنش ساده کادمیوم به‌ترتیب کاربرد اسید هیومیک و ترکیب اسید هیومیک + عصاره جلبک دریایی محتوای کلروفیل a را نسبت به تیمارهای اعمال منفرد سرب و کادمیوم افزایش دادند. در شرایط

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961]

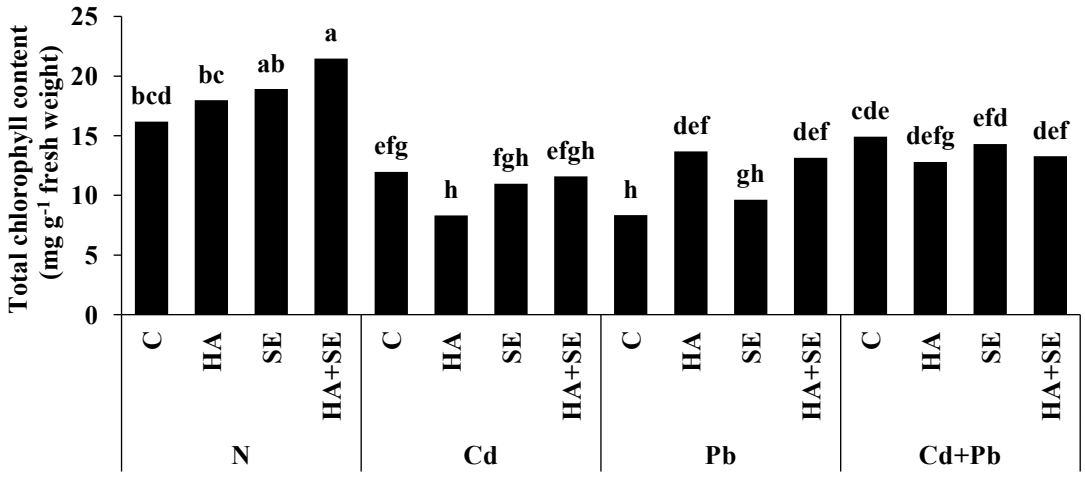
جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر اسیدهیومیک و عصاره جلبک دریایی بر محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و شاخص تحمل تنش اندام هوایی ذرت شیرین تحت تنش کادمیوم و یا سرب

Table 1. The results of analysis of variance (mean squares) of the effect humic acid and seaweed extract on photosynthetic pigments and heavy metal tolerance index of sweat corn plants under cadmium and/or lead stress

Shoot Metal Tolerance Index (%)	Chlorophyll a to b ratio	Carotenoid (µg g^{-1} fresh weight)	Chlorophyll b (mg g^{-1} fresh weight)	Chlorophyll a (mg g^{-1} fresh weight)	Total Chlorophyll (mg g^{-1} fresh weight)	(df)	(S.O.V)
30.4	0.44	3.98	0.80	50.5	103	2	Replication
16.8^{**}	0.36^{ns}	4.22^{**}	0.68^{**}	93.3^{**}	157^{**}	3	Heavy metals (H)
2.67^{*}	0.05^{ns}	0.29^{ns}	0.04^{ns}	5.38^{ns}	9.40^{ns}	3	Biostimulants (B)
0.50^{ns}	0.18^{ns}	0.62^{**}	0.07^{*}	7.57^{*}	12.15^{*}	9	B×H
0.73	0.17	0.11	0.03	3.17	4.18	30	Error
10.3	20.0	12.0	9.87	16.7	15.0		C.V (%)

معنی‌داری در سطوح احتمال ۵ درصد ، ۱ درصد و غیرمعنی‌دار. به‌ترتیبns^{*}، ** و

*, ** and ns: Significance at 5% and 1% of probability levels and non-significant, respectively.



شکل ۱. تأثیر کاربرد اسیدهیومیک و عصاره جلبک دریایی بر محتوای کلروفیل کل گیاهان ذرت شیرین تحت تنش کادمیوم و یا سرب. عامل اول شامل N: کنترل، Cd: کادمیوم، Pb: سرب و Cd+Pb: ترکیب کادمیوم و سرب، عامل دوم شامل C: شاهد، HA: اسید هیومیک، SE: عصاره جلبک دریایی، HA+SE ترکیب اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصدآزمون LSD هستند.

Figure 1. Effect of humic acid and seaweed extract application on total chlorophyll content of sweet corn plants under cadmium and/or Lead stress. The first factor included N: Control (No heavy metal), Cd: Cadmium, Pb: Lead, and Cd+Pb: Combination of Cadmium and Lead; the second factor included C: Control, HA: Humic Acid, SE: Seaweed Extract, and HA+SE: Humic Acid + Seaweed Extract. Means with common letters have no significance at the 5% probability level of the LSD test.

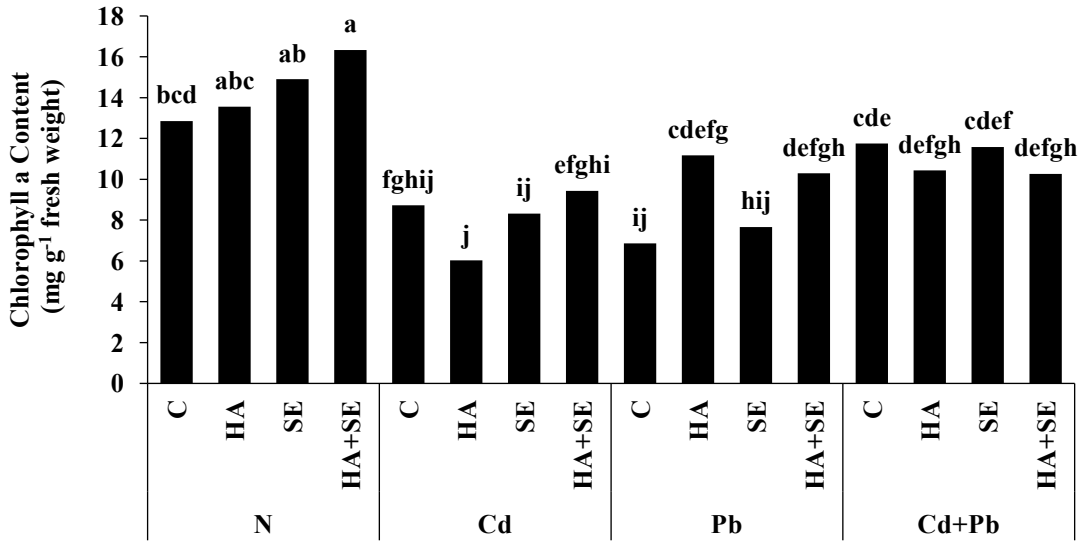
تنش توأم سرب + کادمیوم کاربرد محرک‌های رشد تأثیری بر محتوای کلروفیل a نداشت (شکل ۲).

اثر ساده فلزات سنگین و اثر متقابل فلزات سنگین و محرک‌های رشد بر محتوای کلروفیل b معنی‌دار بود (جدول ۱).

در شرایط تنش ساده کادمیوم و سرب و تنش توأم سرب + کادمیوم، محتوای کلروفیل b به‌ترتیب ۳/۰۰، ۵۵/۸ و ۵/۷۰ درصد کاهش یافت. کاربرد محرک‌های رشد در شرایط بدون تنش محتوای کلروفیل b را نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند. در

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961]



شکل ۲. تأثیر کاربرد اسیدهیومیک و عصاره جلبک دریایی بر محتوای کلروفیل a گیاهان ذرت شیرین تحت تنش کادمیوم و یا سرب. عامل اول شامل N: کنترل، Cd: کادمیوم، Pb: سرب و Cd+Pb: ترکیب کادمیوم و سرب، عامل دوم شامل C: شاهد، HA: اسید هیومیک، SE: عصاره جلبک دریایی، HA+SE ترکیب اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصدآزمون LSD هستند.

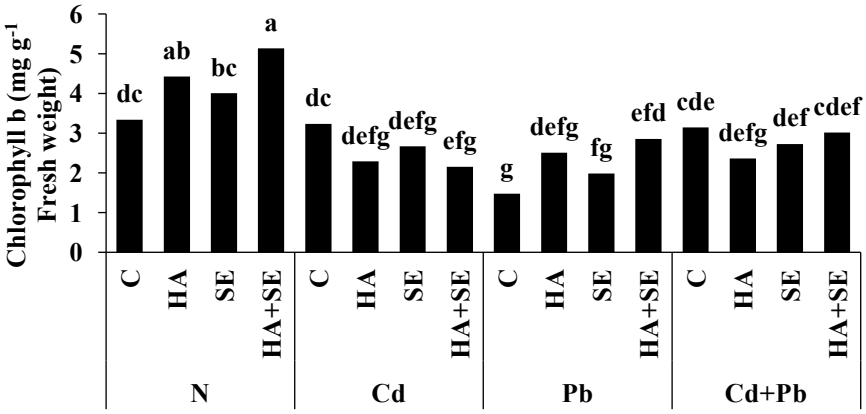
Figure 2. Effect of humic acid and seaweed extract application on chlorophyll a content of sweet corn plants under cadmium and/or Lead stress. The first factor included N: Control (No heavy metal), Cd: Cadmium, Pb: Lead, and Cd+Pb: Combination of Cadmium and Lead; the second factor included C: Control, HA: Humic Acid, SE: Seaweed Extract, and HA+SE: Humic Acid + Seaweed Extract. Means with common letters have no significance at the 5% probability level of the LSD test.

شرایط تنش ساده سرب کاربرد ترکیب اسید هیومیک + عصاره جلبک دریایی محتوای کلروفیل b را نسبت به تیمار اعمال منفرد سرب افزایش داد، اما در شرایط تنش ساده کادمیوم و تنش توأم سرب + کادمیوم کاربرد محرک‌های رشد تأثیری بر محتوای کلروفیل b نداشت (شکل ۳).

اثر ساده فلزات سنگین و اثر متقابل فلزات سنگین و محرک‌های رشد بر محتوای کاروتنوئید معنی‌دار بود (جدول ۱). در شرایط تنش ساده کادمیوم و سرب و تنش توأم سرب + کادمیوم محتوای کاروتنوئید کاهش یافت. با کاربرد محرک‌های رشد در شرایط بدون تنش و تنش فلزات سنگین محتوای کاروتنوئید را افزایش یافت. در شرایط تنش ساده کادمیوم و سرب به‌ترتیب با کاربرد اسید هیومیک و ترکیب اسید هیومیک + عصاره جلبک دریایی و در شرایط تنش توأم سرب + کادمیوم با کاربرد عصاره جلبک دریایی محتوای کاروتنوئید گیاهان ذرت شیرین را به‌ترتیب نسبت به تیمارهای اعمال منفرد کادمیوم، سرب و ترکیب سرب + کادمیوم افزایش دادند (شکل ۴). همچنین با توجه به نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) تیمارهای فلزات سنگین و محرک‌های رشد بر نسبت کلروفیل a به b تأثیر معنی‌داری نداشتند.

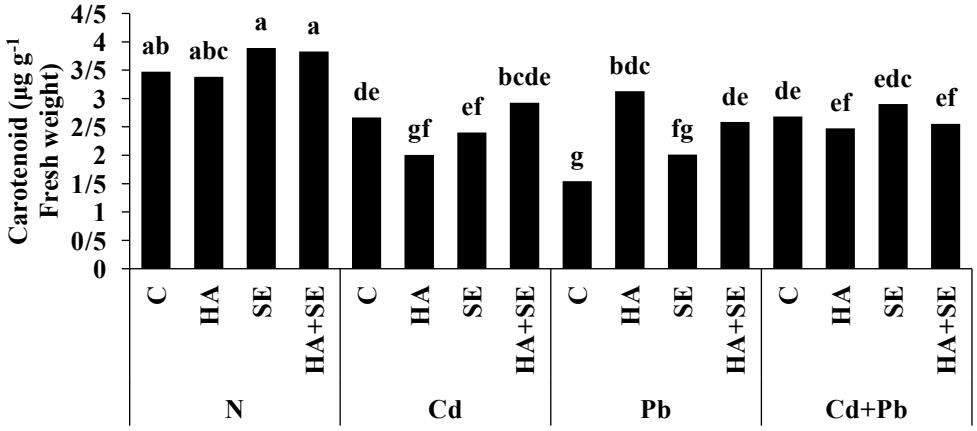
اثر ساده فلزات سنگین و محرک‌های رشد بر شاخص تحمل تنش فلزات سنگین اندام هوایی معنی‌دار بود (جدول ۱). تنش ساده سرب و کادمیوم و تنش توأم سرب + کادمیوم موجب کاهش ۴۸/۸، ۳۷/۱ و ۶۷/۴ درصدی شاخص تحمل تنش فلزات سنگین اندام هوایی نسبت به تیمار شاهد شدند. در شرایط تنش

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961]



شکل ۳. تأثیر کاربرد اسیدهیومیک و عصاره جلبک دریایی بر محتوای کلروفیل b گیاهان ذرت شیرین تحت تنش کادمیوم و یا سرب. عامل اول شامل N: کنترل، Cd: کادمیوم، Pb: سرب و Cd+Pb: ترکیب کادمیوم و سرب، عامل دوم شامل C: شاهد، HA: اسید هیومیک، SE: عصاره جلبک دریایی، HA+SE ترکیب اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصدآزمون LSD هستند.

Figure 3. Effect of humic acid and seaweed extract application on chlorophyll b content of sweet corn plants under cadmium and/or Lead stress. The first factor included N: Control (No heavy metal), Cd: Cadmium, Pb: Lead, and Cd+Pb: Combination of Cadmium and Lead; the second factor included C: Control, HA: Humic Acid, SE: Seaweed Extract, and HA+SE: Humic Acid + Seaweed Extract. Means with common letters have no significance at the 5% probability level of the LSD test.

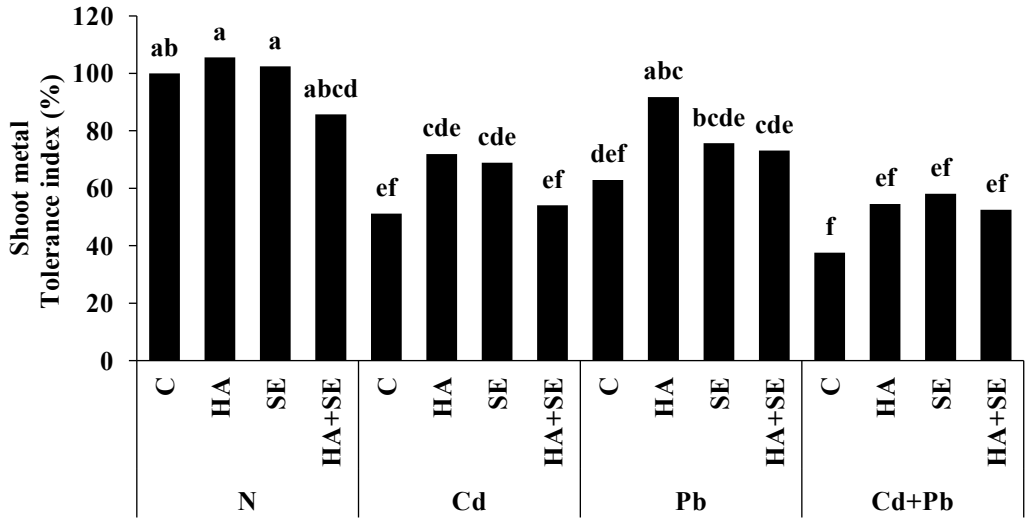


شکل ۴. تأثیر کاربرد اسیدهیومیک و عصاره جلبک دریایی بر محتوای کاروتنوئید گیاهان ذرت شیرین تحت تنش کادمیوم و یا سرب. عامل اول شامل N: کنترل، Cd: کادمیوم، Pb: سرب و Cd+Pb: ترکیب کادمیوم و سرب، عامل دوم شامل C: شاهد، HA: اسید هیومیک، SE: عصاره جلبک دریایی، HA+SE ترکیب اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد تفاوت معنی دار در سطح احتمال پنج درصدآزمون LSD هستند.

Figure 4. Effect of humic acid and seaweed extract application on carotenoid content of sweet corn plants under cadmium and/or Lead stress. The first factor included N: Control (No heavy metal), Cd: Cadmium, Pb: Lead, and Cd+Pb: Combination of Cadmium and Lead; the second factor included C: Control, HA: Humic Acid, SE: Seaweed Extract, and HA+SE: Humic Acid + Seaweed Extract. Means with common letters have no significance at the 5% probability level of the LSD test.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961]



شکل ۵. تأثیر کاربرد اسیدهیومیک و عصاره جلبک دریایی بر شاخص تحمل تنش فلز اندام هوایی گیاهان ذرت شیرین تحت تنش کادمیوم و یا سرب. عامل اول شامل N: کنترل، Cd: کادمیوم، Pb: سرب و Cd+Pb: ترکیب کادمیوم و سرب، عامل دوم شامل C: شاهد، HA: اسید هیومیک، SE: عصاره جلبک دریایی، HA+SE ترکیب اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصدآزمون LSD هستند.

Figure 5. Effect of humic acid and seaweed extract application on shoot metal tolerance index of sweet corn plants under cadmium and/or Lead stress. The first factor included N: Control (No heavy metal), Cd: Cadmium, Pb: Lead, and Cd+Pb: Combination of Cadmium and Lead; the second factor included: C: Control, HA: Humic Acid, SE: Seaweed Extract, HA+SE: Humic Acid + Seaweed Extract. Means with common letters have no significance at the 5% probability level of the LSD test.

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر اسیدهیومیک و عصاره جلبک دریایی بر خصوصیات ریشه و شاخص تحمل تنش فلزات سنگین ریشه گیاهان ذرت شیرین تحت تنش کادمیوم و یا سرب

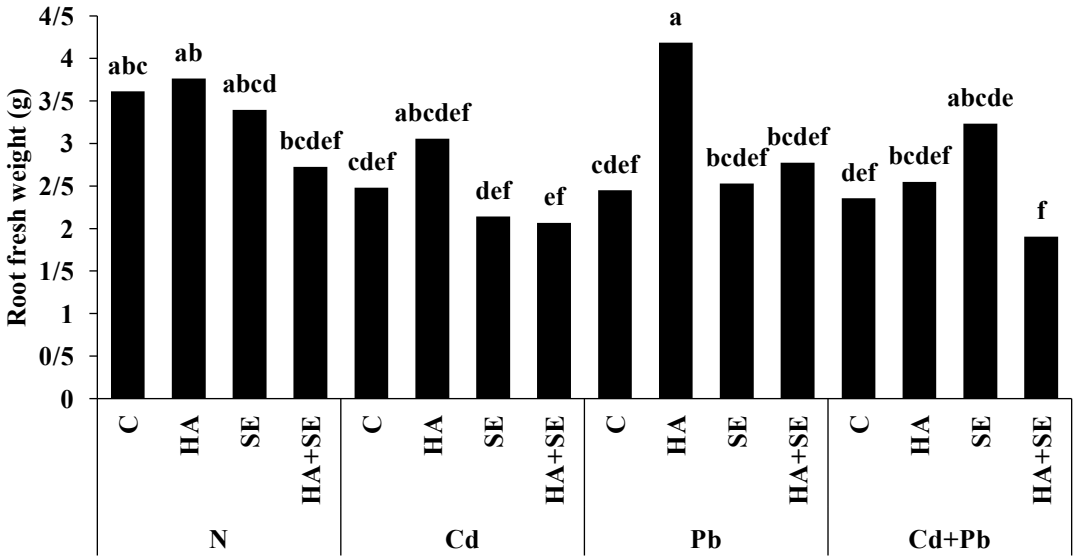
Table 2. The results of analysis of variance (mean squares) of the effect humic acid and seaweed extract on root characteristics of sweat corn plants under cadmium and/or lead stress

Root Fresh Weight (g)	Root Legnth (cm)	Root Volume (cm^3)	Root Dry Weight (g)	Root Fresh Weight (g)	(df)	(S.O.V)
2976	1.26	0.06	0.04	0.02	2	Replication
2357^{**}	242^{**}	3.39^{**}	0.07^{ns}	0.22^{*}	3	Heavy metals (H)
1335^{**}	123^{**}	2.68^{**}	0.01^{ns}	0.17^{*}	3	Biostimulants (B)
717^{**}	62.6^{**}	1.81^{**}	0.03^{ns}	0.06^{ns}	9	H×B
145	13.1	0.33	0.03	0.05	30	Error
15.5	15.2	19.7	22.8	13.6		C.V (%)

ساده کادمیوم و سرب کاربرد اسید هیومیک شاخص تحمل تنش فلزات سنگین اندام هوایی گیاهان ذرت شیرین را نسبت به تیمارهای اعمال منفرد کادمیوم و سرب افزایش دادند. در شرایط تنش توأم سرب + کادمیوم کاربرد عصاره جلبک دریایی شاخص تحمل تنش فلزات سنگین اندام هوایی گیاهان ذرت شیرین را نسبت به تیمار اعمال منفرد ترکیب سرب + کادمیوم افزایش داد (شکل ۵).

با توجه به جدول ۲ اثر ساده فلزات سنگین و محرک‌های رشد بر وزن تازه ریشه گیاهان ذرت شیرین معنی‌دار بود. تنش ساده کادمیوم و سرب و تنش توأم سرب + کادمیوم به‌ترتیب

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961]



شکل ۶. تأثیر کاربرد اسیدهیومیک و عصاره جلبک دریایی بر وزن تازه ریشه گیاهان ذرت شیرین تحت تنش کادمیوم و یا سرب. عامل اول شامل N: کنترل، Cd: کادمیوم، Pb: سرب و Cd+Pb: ترکیب کادمیوم و سرب، عامل دوم شامل C: شاهد، HA: اسید هیومیک، SE: عصاره جلبک دریایی، HA+SE ترکیب اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصدآزمون LSD هستند.

Figure 6. Effect of humic acid and seaweed extract application on root fresh weight of sweet corn plants under cadmium and/or Lead stress. The first factor included N: Control (No heavy metal), Cd: Cadmium, Pb: Lead, and Cd+Pb: Combination of Cadmium and Lead; the second factor included C: Control, HA: Humic Acid, SE: Seaweed Extract, HA+SE: Humic Acid + Seaweed Extract. Means with common letters have no significance at the 5% probability level of the LSD test.

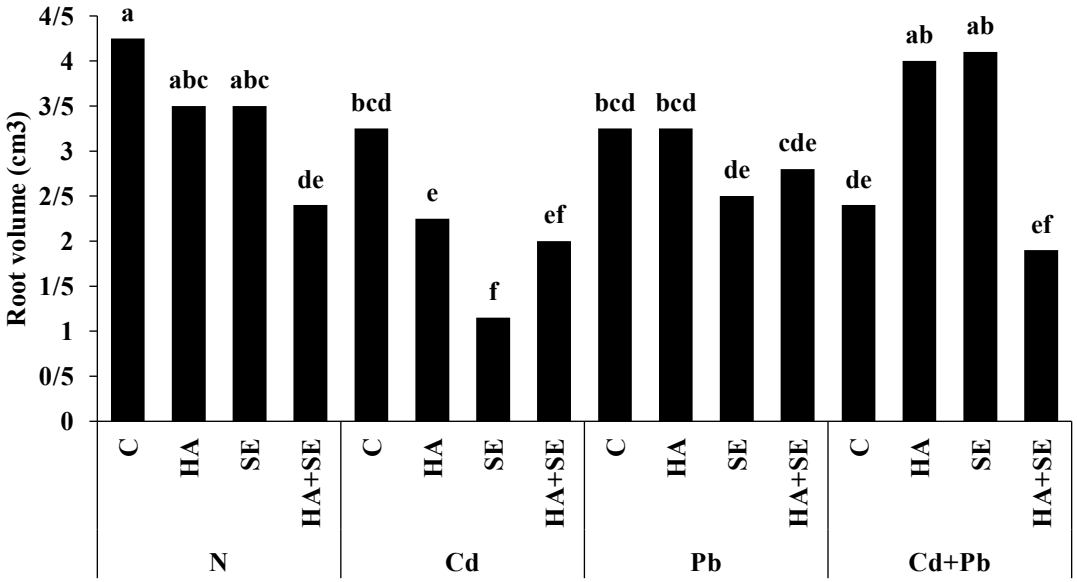
موجب کاهش ۳۱/۳، ۳۲/۱ و ۳۴/۹ درصدی وزن تازه ریشه گیاهان ذرت شیرین نسبت به تیمار شاهد شدند. در شرایط تنش ساده کادمیوم و سرب کاربرد اسید هیومیک وزن تازه ریشه را نسبت به تیمارهای اعمال منفرد کادمیوم و سرب افزایش دادند. در شرایط تنش توأم سرب + کادمیوم کاربرد عصاره جلبک دریایی موجب افزایش وزن تازه ریشه نسبت به تیمار اعمال منفرد ترکیب سرب + کادمیوم شد درحالی‌که فلزات سنگین و محرک‌های رشد بر وزن خشک ریشه گیاهان ذرت شیرین تأثیر معنی‌داری نداشتند (شکل ۶).

اثرساده و توأم فلزات سنگین و محرک‌های رشد بر حجم ریشه گیاهان ذرت شیرین معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد تنش ساده کادمیوم و سرب و تنش توأم سرب + کادمیوم موجب کاهش حجم ریشه گیاهان ذرت شیرین شدند. در شرایط تنش ساده سرب کاربرد اسید هیومیک حجم ریشه گیاهان ذرت شیرین را نسبت به اعمال منفرد سرب افزایش داد اما کابرد محرک‌های رشد در شرایط تنش ساده کادمیوم تأثیری بر حجم ریشه نداشت. در شرایط تنش توأم سرب + کادمیوم کاربرد عصاره جلبک دریایی حجم ریشه را نسبت به تیمار اعمال منفرد ترکیب سرب + کادمیوم افزایش دادند (شکل ۷).

باتوجه به نتایج تجزیه واریانس اثر ساده و توأم فلزات سنگین و محرک‌های رشد بر طول ریشه معنی‌دار بود (جدول ۲). در شرایط تنش ساده سرب و کادمیوم و تنش توأم سرب + کادمیوم طول ریشه گیاهان ذرت شیرین کاهش یافت. در شرایط بدون تنش با کاربرد عصاره جلبک دریایی طول ریشه گیاهان ذرت شیرین نسبت به افزایش یافت. کاربرد اسید هیومیک در شرایط

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961]



شکل ۷. تأثیر کاربرد اسیدهیومیک و عصاره جلبک دریایی بر حجم ریشه گیاهان ذرت شیرین تحت تنش کادمیوم و یا سرب. عامل اول شامل N: کنترل، Cd: کادمیوم، Pb: سرب و Cd+Pb: ترکیب کادمیوم و سرب، عامل دوم شامل C: شاهد، HA: اسید هیومیک، SE: عصاره جلبک دریایی، HA+SE ترکیب اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصدآزمون LSD هستند.

Figure 7. Effect of humic acid and seaweed extract application on root volume of sweet corn plants under cadmium and/or Lead stress. The first factor included N: Control (No heavy metal), Cd: Cadmium, Pb: Lead and Cd+Pb: Combination of Cadmium and Lead; the second factor included C: Control, HA: Humic Acid, SE: Seaweed Extract, and HA+SE: Humic Acid + Seaweed Extract. Means with common letters have no significance at the 5% probability level of the LSD test.

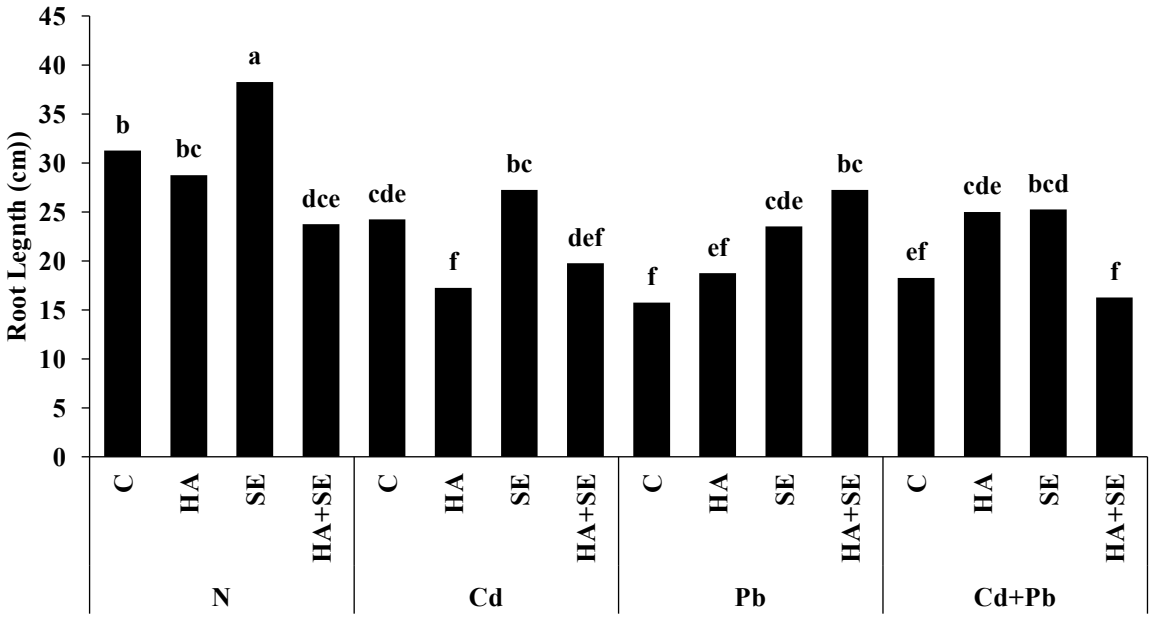
تنش ساده کادمیوم و تنش توأم سرب + کادمیوم طول ریشه را نسبت به تیمارهای اعمال منفرد کادمیوم و ترکیب سرب + کادمیوم افزایش داد. در شرایط تنش ساده سرب کاربرد توأم اسید هیومیک + عصاره جلبک دریایی طول ریشه را نسبت به تیمار اعمال منفرد سرب افزایش داد (شکل ۸).

اثر ساده و توأم فلزات سنگین و محرک‌های رشد بر شاخص تحمل تنش فلزات سنگین ریشه گیاهان ذرت شیرین معنی‌دار بود. باتوجه به نتایج مقایسه میانگین تنش ساده کادمیوم و سرب و تنش توأم سرب + کادمیوم موجب کاهش ۲۳/۳، ۴۹/۱ و ۳۹/۳ درصدی شاخص تحمل تنش فلزات سنگین ریشه گیاهان ذرت شیرین نسبت به تیمار شاهد شدند. در شرایط تنش ساده کادمیوم و سرب به‌ترتیب کاربرد عصاره جلبک دریایی و کاربرد توأم اسید هیومیک + عصاره جلبک دریایی شاخص تحمل تنش فلزات سنگین ریشه را نسبت به تیمارهای اعمال منفرد کادمیوم و سرب افزایش دادند. در شرایط تنش توأم سرب + کادمیوم کاربرد اسید هیومیک شاخص تحمل تنش فلزات سنگین ریشه را نسبت به تیمار اعمال منفرد ترکیب سرب + کادمیوم افزایش داد (شکل ۹).

بحث

قرارگیری گیاهان در معرض فلزات سرب و کادمیوم، اختلالات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی شدیدی در ریشه گیاه ذرت شرین ایجاد می‌کند (شکل ۱۰). از مهم‌ترین این اختلالات می‌توان به مهار رشد ریشه و اندام هوایی، کاهش محتوای کلروفیل و کارایی دستگاه فتوسنتز II، افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و درنتیجه، بروز تنش اکسیداتیو

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961]



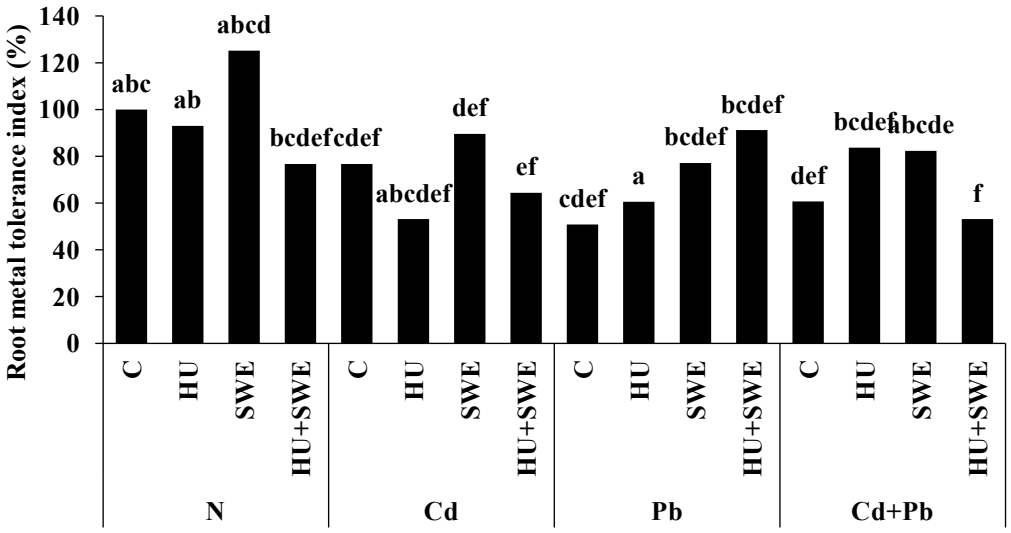
شکل ۸. تأثیر کاربرد اسیدهیومیک و عصاره جلبک دریایی بر طول ریشه گیاهان ذرت شیرین تحت تنش کادمیوم و یا سرب. عامل اول شامل N: کنترل، Cd: کادمیوم، Pb: سرب و Cd+Pb: ترکیب کادمیوم و سرب، عامل دوم شامل C: شاهد، HA: اسید هیومیک، SE: عصاره جلبک دریایی، HA+SE ترکیب اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصدآزمون LSD هستند.

Figure 8. Effect of humic acid and seaweed extract application on root length of sweet corn plants under cadmium and/or Lead stress. The first factor included N: Control (No heavy metal), Cd: Cadmium, Pb: Lead, and Cd+Pb: Combination of Cadmium and Lead; the second factor included C: Control, HA: Humic Acid, SE: Seaweed Extract, and HA+SE: Humic Acid + Seaweed Extract. Means with common letters have no significance at the 5% probability level of the LSD test.

و پراکسیداسیون لیپیدی اشاره کرد (۳۰ و ۳۴). باتوجه به نتایج حاصل از این پژوهش تنش ناشی از فلزات سنگین سرب و کادمیوم به‌طور معنی‌داری محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاه ذرت شیرین از جمله محتوای کلروفیل کل، کلروفیل a، کلروفیلb، کاروتنوئید و شاخص تحمل تنش فلزات سنگین اندام هوایی را کاهش دادند. درحالی‌که کاربرد ساده و توأم اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی به‌عنوان محرک‌های رشد گیاهی با تقلیل خسارت فلزات سنگین بر ساختار فتوسنتزی گیاهان ذرت شیرین محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و شاخص تحمل تنش فلزات سنگین اندام هوایی گیاهان ذرت شیرین را در شرایط تنش بهبود بخشیدند. به‌نظر می‌رسد مولکول‌های فعال زیستی موجود در این ترکیبات می‌توانند با تأثیر بر مسیرهای خاص، متابولیسم گیاه را تحت تأثیر قرار دهند و در شرایط تنش، مسیرهای متابولیکی فعال شده توسط محرک‌های زیستی می‌توانند تقویت شوند و به گیاهان کمک کنند تا خود را تطبیق دهند و سپس از لحظات بحرانی عبور کنند یا آنها را به تأخیر بیندازند (۴۸). عصاره‌های جلبک دریایی به‌عنوان محرک‌های زیستی، منبع غنی از مواد تقویت کننده رشد، لیپیدها، اسیدهای آمینه و مواد معدنی هستند که غلظت کمی برای القای پاسخ مثبت در رشد گیاه و افزایش تحمل گیاهان به عوامل استرس‌زای مختلف مورد نیاز است (۹). در گیاه لوبیا طی کاربرد عصاره جلبک اسپیرولینا در شرایط خاک شور و آلوده به فلزات سنگین

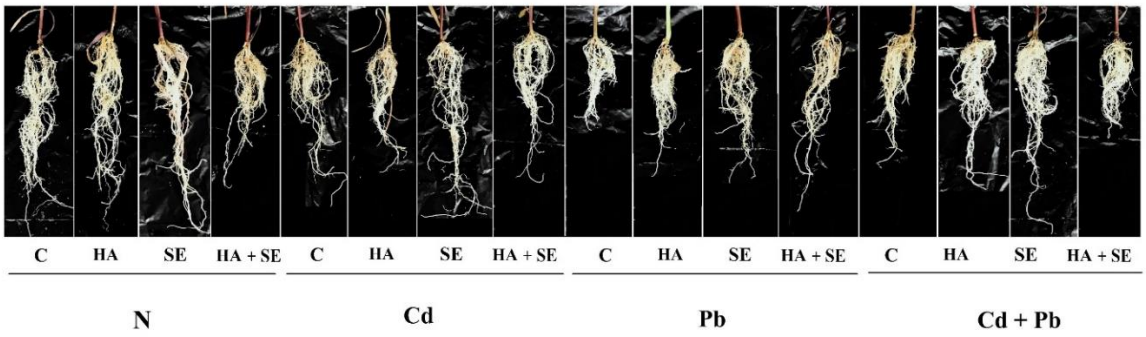
[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961]



شکل ۹. تأثیر کاربرد اسیدهیومیک و عصاره جلبک دریایی بر شاخص تحمل تنش فلزات سنگین در ریشه گیاهان ذرت شیرین تحت تنش کادمیوم و یا سرب. عامل اول شامل N: کنترل، Cd: کادمیوم، Pb: سرب و Cd+Pb: ترکیب کادمیوم و سرب، عامل دوم شامل C: شاهد، HA: اسید هیومیک، SE: عصاره جلبک دریایی، HA+SE: ترکیب اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصدآزمون LSD هستند.

Figure 9. Effect of humic acid and seaweed extract application on root metal tolerance index of sweet corn plants under cadmium and/or Lead stress. The first factor included N: Control (No heavy metal), Cd: Cadmium, Pb: Lead, and Cd+Pb: Combination of Cadmium and Lead; the second factor included C: Control, HA: Humic Acid, SE: Seaweed Extract, and HA+SE: Humic Acid + Seaweed Extract. Means with common letters have no significance at the 5% probability level of the LSD test.



شکل ۱۰. تأثیر اسیدهیومیک و عصاره جلبک دریایی بر رشد، تولید زیست توده و طول و حجم ریشه گیاهان ذرت شیرین تحت تنش کادمیوم و یا سرب. عامل اول شامل N: کنترل، Cd: کادمیوم، Pb: سرب و Cd+Pb: ترکیب کادمیوم و سرب، عامل دوم شامل C: شاهد، HA: اسید هیومیک، SE: عصاره جلبک دریایی، HA+SE: ترکیب اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی.

Figure 10. Effect of humic acid and seaweed extract on growth, biomass production, and root length and volume of sweet corn plants under cadmium and/or lead stress. The first factor included N: Control (No heavy metal), Cd: Cadmium, Pb: Lead, and Cd+Pb: Combination of Cadmium and Lead; the second factor included C: Control, HA: Humic Acid, SE: Seaweed Extract, and HA+SE: Humic Acid + Seaweed Extract. Means with common letters have no significance at the 5% probability level of the LSD test.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961]

(سرب، کادمیوم و نیکل) موجب بهبود سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی، کاهش جذب فلزات سنگین، کاهش تنش اکسیداتیو، بهبود وضعیت آبی گیاه و افزایش جذب عناصر غذایی (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) و افزایش محتوای کلروفیل (a، b و کاروتنوئید) و نرخ فتوسنتزی و افزایش معنی‌دار مقاومت گیاهان شد (۴۲). همچنین اسید هیومیک به‌عنوان محرک رشد گیاهی می‌تواند با مکانیسم‌های متعدد از سیستم فتوسنتزی در برابر سمیت فلزات سنگین محافظت کند. مطالعات نشان می‌دهند اسیدهیومیک با تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی آنزیمی (مانند کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز) و غیرآنزیمی، پراکسیداسیون لیپیدی را کاهش داده و از تخریب غشاهای سلولی و کلروپلاستی جلوگیری می‌کند (۳۸ و ۴۶) درنتیجه، محتوای کلروفیل a ، b، کل و کاروتنوئیدها نه تنها در شرایط تنش حفظ، بلکه در برخی موارد حتی نسبت به گیاهان شاهد نیز افزایش می‌یابد. این حفاظت از دستگاه فتوسنتز، افزایش معناداری در بیوماس گیاه ذرت (۳۱–۲۵ درصد) تحت تنش کادمیوم را به دنبال داشته است (۴۶) همچنین، در گیاه آبزی *Vallisneria natans* تحت تنش سرب و کادمیوم، اسیدهیومیک با کاهش آسیب به دستگاه فتوسنتزی موجب افزایش وزن تر و محتوای کلروفیل شده است (۲۷) بهبود عملکرد فتوسنتزی و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو تحت تأثیر اسیدهیومیک منجر به افزایش شاخص تحمل ساقه در گیاه کلزا می‌شود (۱۱) این افزایش نشان‌دهنده بهبود توانایی گیاه در تحمل و رشد در شرایط تنش است. بنابراین، هیومیک اسید با حفظ یکپارچگی و کارایی سیستم فتوسنتزی، نقش کلیدی در افزایش تحمل اندام هوایی به تنش فلزات سنگین ایفا می‌کند.

یافته‌های حاصل از این پژوهش بیانگر تأثیر معنی‌دار اثر ساده و توأم فلزات سنگین و محرک‌های رشد بر خصوصیات ریشه گیاهان ذرت شیرین بود. در شرایط تنش فلزات سنگین سرب و کادمیوم وزن تازه ریشه، طول ریشه، حجم ریشه و شاخص تحمل تنش فلزات سنگین ریشه گیاهان ذرت شیرین کاهش یافت. درحالی‌که کاربرد اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی با بهبود خصوصیات ریشه در شرایط تنش فلزات سنگین، شاخص تحمل تنش فلزات سنگین ریشه گیاهان ذرت شیرین را افزایش دادند. ریشه‌ها نخستین اندامی هستند که با فلزات سنگین موجود در خاک تماس پیدا می‌کنند و نقش کلیدی در جذب عناصر غذایی، تحمل تنش و تولید زیست‌توده کل گیاه دارند (۲۳) تنش فلزات سنگین موجب اختلال در رشد و توسعه ریشه، کاهش ظرفیت جذب آب و مواد معدنی و محدودیت تولید زیست‌توده می‌شود. عصاره‌های جلبک دریایی و هیومیک اسید به عنوان محرک‌های زیستی بالقوه می‌توانند این اثرات منفی را تعدیل کنند، اما مکانیسم‌های دقیق اثر آن‌ها بر شاخص تحمل ریشه و رشد زیست‌توده در خاک‌های آلوده چندفلزی هنوز به‌طور کامل مشخص نیست (۲، ۱۱، ۲۰ و ۲۹). عصاره جلبک دریایی ممکن است با تنظیم بیان ژن‌های مرتبط با جذب عناصر غذایی، متابولیسم نیتروژن و هورمون‌های رشد، تقسیم سلولی، طول سلول و تشکیل ریشه‌های جانبی را افزایش دهد (۴، ۱۴ و ۲۳) همچنین، عصاره جلبک دریایی سنتز اسمولیت‌های محافظ را القا می‌کند و ممکن است تجمع فلزات سنگین در ریشه و ساقه را کاهش دهد (۲ و ۲۲) از سوی دیگر، اسیدهیومیک می‌تواند با تشکیل کمپلکس‌های پایدار با فلزات و تحریک رشد ریشه از طریق بهبود تقسیم و طول سلول و افزایش جذب عناصر غذایی، شاخص تحمل ریشه را افزایش دهد و استرس اکسیداتیو را کاهش دهد (۱۱ و ۱۲) ترکیب این اثرات نشان می‌دهد که عصاره جلبک دریایی و اسیدهیومیک می‌توانند عملکرد ریشه و تولید زیست‌توده گیاهان را در خاک‌های آلوده چند فلزی را بهبود دهند و نتایج حاصل از مطالعه نشان دادند، در شرایط تنش فلزات سنگین استفاده از محرک‌های زیستی به‌صورت آبیاری می‌تواند خصوصیات ریشه گیاهان ذرت شیرین را بهبود بخشد و شاخص تحمل تنش فلز ریشه را در این گیاهان افزایش دهد.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت تنش ساده و توأم فلزات سنگین سرب و کادمیوم اثر منفی بر خصوصیات ریشه و رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاه ذرت شیرین داشت و شاخص تحمل تنش فلز ریشه و اندام هوایی این گیاه در شرایط تنش فلزات سنگین کاهش

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961]

یافت. از طرف دیگر کاربرد ساده و توأم اسیدهیومیک و عصاره جلبک دریایی به‌عنوان محرک‌های زیستی، عملکرد مثبتی در تقلیل خسارت فلزات سنگین بر ریشه گیاهان ذرت شیرین را نشان داد و موجب بهبود شاخص تحمل تنش فلزات سنگین ریشه شد و در ادامه محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و شاخص تحمل تنش فلز اندام هوایی یک پاسخ دفاعی قوی و هم‌افزایی را نشان دادند. بنابراین کاربرد ساده و توأم اسیدهیومیک و عصاره جلبک دریایی را می‌توان به‌عنوان یک راهکار مدیریتی مؤثر و اقتصادی در شرایط تنش فلزات سنگین پیشنهاد نمود.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش فلزات سنگین، به‌ویژه کادمیوم و تنش توأم کادمیوم و سرب، با کاهش معنی‌دار رنگدانه‌های فتوسنتزی، شاخص‌های تحمل تنش و ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه، موجب اختلال در عملکرد فیزیولوژیک و رشد گیاه ذرت شیرین شد. کاهش محتوای کلروفیل و کاروتنوئیدها بیانگر آسیب به دستگاه فتوسنتزی و افزایش تنش اکسیداتیو ناشی از حضور فلزات سنگین است، درحالی‌که افت شاخص‌های رشد ریشه نشان‌دهنده محدود شدن توان گیاه در جذب آب و عناصر غذایی تحت شرایط تنش می‌باشد. کاربرد اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی توانست بخش قابل‌توجهی از آثار نامطلوب فلزات سنگین را تعدیل کند. بهبود محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی، افزایش شاخص‌های تحمل تنش و ارتقای ویژگی‌های رشد ریشه در تیمارهای حاوی محرک‌های رشد نشان می‌دهد که این ترکیبات از طریق حفظ ساختار و عملکرد دستگاه فتوسنتزی، بهبود رشد و توسعه ریشه، افزایش کارایی جذب عناصر غذایی و تقویت سازوکارهای دفاعی گیاه در برابر تنش، نقش مؤثری در افزایش تحمل ذرت شیرین به آلودگی فلزات سنگین ایفا می‌کنند. همچنین پاسخ مثبت برخی صفات به کاربرد توأم اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی بیانگر وجود اثرات هم‌افزا میان این دو محرک زیستی در کاهش خسارت ناشی از تنش فلزات سنگین است. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از محرک‌های زیستی نظیر اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی با افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و بهبود ساختار ریشه می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر، کم‌هزینه و سازگار با محیط زیست برای کاهش اثرات منفی آلودگی خاک به فلزات سنگین و حفظ رشد و عملکرد گیاه ذرت شیرین مورد استفاده قرار گیرد. از این رو، بهره‌گیری از این ترکیبات در برنامه‌های مدیریت تغذیه و کشاورزی پایدار، به‌ویژه در اراضی در معرض آلودگی به سرب و کادمیوم، می‌تواند ضمن افزایش تاب‌آوری گیاهان، به حفظ حاصلخیزی خاک، کاهش مخاطرات زیست‌محیطی و پایداری تولید دیگر محصولات کشاورزی کمک کند. با این حال، انجام مطالعات تکمیلی در شرایط مزرعه و بررسی اثر این محرک‌ها بر جذب، انتقال و تجمع فلزات سنگین در اندام‌های مختلف گیاه برای ارائه توصیه‌های مدیریتی دقیق‌تر ضروری است.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از همکاری گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشگاه محقق اردبیلی و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان) صمیمانه تقدیر و تشکر می‌شود.

منابع

1.Adhikari, S., S. Ghosh, I. Azahar, A. Adhikari, A. Shaw, S. Konar and Z. Hossain. 2018. Sulfate improves cadmium tolerance by limiting cadmium accumulation, modulation of sulfur metabolism and antioxidant defense system in maize. *Environmental and Experimental Botany* 153: 143-162.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961]

2.Ahmed, D. A. E., S. F. Gheda and G. A. Ismail. 2021. Efficacy of two seaweeds dry mass in bioremediation of heavy metal polluted soil and growth of radish (*Raphanus sativus* L.) plant. *Environmental Science and Pollution Research* 28(10): 12831-12846.
3.Alasvandyari, F. and B. Mahdavi. 2024. Application of sargassum boveanum extract under water deficit conditions to investigate its effects on the relative water content, photosynthetic pigments and mineral elements of corn (*Zea mays*). *Russian Journal of Plant Physiology* 71(6): 1-11.
4.Ali, O., A. Ramsubhag and J. Jayaraman. 2019. Biostimulatory activities of ascophyllum nodosum extract in tomato and sweet pepper crops in a tropical environment. *Plos One* 14(5): 216710.
5.Azarmehr, A. R., M. Baghi and M. Ziyaei Nasab. 2017. Effect of seaweed extract and sulfur-sulfated fertilizer on yield and some yield components of autumn canola (*Brassica napus* L.) cv. Natalie. *Journal of Crop Research in Semi-arid Regions*, 14: 155-165. (In Farsi).
6.Bálint, A. F., G. Kovács and J. Sutka. 2002. Copper tolerance of Aegilops, Triticum, Secale and triticale seedlings and copper and iron contents in their shoots. *Acta Biologica Szegediensis* 46(3-4): 77-78.
7.Bi, X. Y., X. B. Feng, Y. G. Yang, X. D. Li, G. P. Y. Shin, F. L. Li, G. L. Qiu, G. H. Li, T. Z. Liu and Z. Y. Fu. 2009. Allocation and source attribution of lead and cadmium in maize (*Zea mays* L.) impacted by smelting emissions. *Environmental Pollution* 157(3): 834-839.
8.BPIA, and TFI. 2022. United States biostimulant industry recommendations to assess the efficacy, composition, and safety of plant biostimulant products. *Journal of Regulatory Science* 10(1):1-29.
9.Bulgari, R., G. Cocetta, A. Trivellini, P. Vernieri and A. Ferrante. 2015. Biostimulants and crop responses: A review. *Biological Agriculture & Horticulture* 31(1): 1-17.
10.Calvo, P., L. Nelson and J. W. Kloepper. 2014. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil* 383(1-2): 3-41.
11.Canal, S. B., M. A. Bozkurt and H. Yilmaz. 2022. Effects of humic acid and EDTA on phytoremediation, growth and antioxidant activity in rapeseed (*Brassica napus* L.) grown under heavy metal stress. *Polish Journal of Environmental Studies* 31(5): 4051-4060.
12.Canal, S. B., M. A. Bozkurt and H. Yılmaz. 2023. Humic acid ameliorates phytoremediation, plant growth and antioxidative enzymes in forage turnip (*Brassica rapa* L.). *Plant, Soil and Environment* 69(12): 567-576.
13Canellas, L. P., N. O. A. Canellas, L. E. S. Irineu, F. L. Olivares and A. Piccolo. 2020. Plant chemical priming by humic acids. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 7(12): 1-17.
14.Chouliaras, V., M. Tasioula, C. Chatzissavvidis, I. Therios and E. Tsabolatidou. 2009. The effects of a seaweed extract in addition to nitrogen and boron fertilization on productivity, fruit maturation, leaf nutritional status and oil quality of the olive (*Olea europaea* L.) cultivar Koroneiki. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 89(6): 984-988.
15.Cooper, A. J. 1979. The ABC of NFT: Nutrient Film Technique: The World's First Method of Crop Production Without a Solid Rooting Medium. Grower Books, London.
16.DalCorso, G., S. Farinati, S. Maistri and A. Furini. 2008. How plants cope with cadmium: Staking all on metabolism and gene expression. *Journal of Integrative Plant Biology* 50(10): 1268-1280.
17.du Jardin, P. 2015. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae* 196: 3-14.
18.Dubey, R. S. 2010. Metal toxicity, oxidative stress and antioxidative defense system in plants. pp. 177-203, In S. D. Gupta (Ed.), Reactive Oxygen Species and Antioxidants in Higher Plants. CRC Press, Boca Raton.
19.El Khattabi, O., S. El Hasnaoui, M. Toura, F. Henkrar, B. Collin, C. Levard, F. Colin, N. Merghoub, A. Smouni and M. Fahr. 2023. Seaweed extracts as promising biostimulants for enhancing lead tolerance and accumulation in tomato (*Solanum lycopersicum*). *Journal of Applied Phycology* 35: 459-469.
20.Ertani, A., O. Francioso, A. Tinti, M. Schiavon, D. Pizzeghello and S. Nardi. 2018. Evaluation of seaweed extracts from *Laminaria* and *Ascophyllum nodosum* spp. as biostimulants in *Zea mays* L. using a combination of chemical, biochemical and morphological approaches. *Frontiers in Plant Science* 9: 428.
21.Estakhr, A., S. A. M. Modarres-Sanavy, M. AghaAlikhani, A. Heidarzadeh and A. M. Abedi. 2025. Investigating yield, yield components, morphological characteristics and proline of different Hybrids of sweet corn (*Zea mays* var. Saccharata) in different irrigation regimes. *Iranian Journal of Field Crops Research* 23(3): 359-374. (In Farsi).
22.Fan, D., D. M. Hodges, A. T. Critchley and B. Prithiviraj. 2013. A commercial extract of Brown Macroalga (*Ascophyllum nodosum*) affects yield and the nutritional quality of Spinach in vitro. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 44: 1873-1884.
23.Franzoni, G., G. Cocetta, B. Prinsi, A. Ferrante and L. Espen. 2022. Biostimulants on crops: Their impact under abiotic stress conditions. *Horticulturae* 8(3): 189.
24.Gao, M., J. Zhou, H. Liu, W. Zhang, Y. Hu and J. Liang. 2018. Foliar spraying with silicon and selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice. *Science of the Total Environment*, 631(632): 1100-1108.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961]

25.Gorbe, E. and Á. Calatayud. 2010. Optimization of nutrition in soilless systems: A Review. pp. 193-245, In J.-C. Kader and M. Delseny (Eds.), Advances in Botanical Research. Academic Press, Olathe, Kansas.
26.Hoagland, D. R. and D. I. Arnon. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. *Circular. California Agricultural Experiment Station* 347: 1-32.
27.Huang, S., Z. Wang, Q. Song, J. Hong, T. Jin, H. Huang and Z. Zheng. 2023. Potential mechanism of humic acid attenuating toxicity of Pb2+ and Cd2+ in *Vallisneria natans*. *Science of the Total Environment* 864: 160974.
28.Hussein, M. H., E. Eltanahy, A. F. Al Bakry, N. Elsafty and M. M. Elshamy. 2021. Seaweed extracts as prospective plant growth bio-stimulant and salinity stress alleviator for *Vigna sinensis* and *Zea mays*. *Journal of Applied Phycology* 33(2): 1273-1291.
29.Jannin, L., M. Arkoun, P. Etienne, P. Laine, D. Goux, M. Garnica, M. Fuentes, S. San Francisco, R. Baigorri, F. Cruz, F. Houdusse, J. Garcia-Mina, J. Yvin and A. Ourry. 2013. Brassica napus growth is promoted by *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jol. seaweed extract: microarray analysis and physiological characterization of N, C, and S metabolisms. *Journal of Plant Growth Regulation* 32: 31-52.
30.Kaya, C., N. A. Akram, A. Sürücü and M. Ashraf. 2019. Alleviating effect of nitric oxide on oxidative stress and antioxidant defence system in pepper (*Capsicum annuum* L.) plants exposed to cadmium and lead toxicity applied separately or in combination. *Scientia Horticulturae* 255: 52-60.
31.Kruatrachue, M., W. Jarupan, Y. P. Chitramvong, P. Pokethitiyook, E. S. Upatham and K. Parkpoomkamol. 2002. Combined effects of lead and humic acid on growth and lead uptake of duckweed, *Lemna minor*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 69: 655-661.
32.Kumar, A., M. N. V. Prasad and O. Sytar. 2012. Lead toxicity, defense strategies and associated indicative biomarkers in *Talinum triangulare* grown hydroponically. *Chemosphere* 89(9): 1056-1065.
33.Kumar, R., K. Trivedi, K. G. V. Anand and A. Ghosh. 2020. Science behind biostimulant action of seaweed extract on growth and crop yield: insights into transcriptional changes in roots of maize treated with *Kappaphycus alvarezii* seaweed extract under soil moisture stressed conditions. *Journal of Applied Phycology* 32(1): 599-613.
34.Kurtyka, R., Z. Burdach, A. Siemieniuk and W. Karcz. 2018. Single and combined effects of Cd and Pb on the growth, medium pH, membrane potential and metal contents in maize (*Zea mays* L.) coleoptile segments. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 161: 8-16.
35.Lichtenthaler, H. K., and A. R. Wellburn. 1983. Determination of total carotenoids and chlorophyll a and chlorophyll b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions* 11: 591-592.
36.Ma, Y., M. Rajkumar, C. Zhang and H. Freitas. 2016. Beneficial role of bacterial endophytes in heavy metal phytoremediation. *Journal of Environmental Management* 174: 14-25.
37.Motesharezadeh, B. and G. R. Savaghebi. 2015. Phytoremediation or Green Remediation. University of Tehran Press, Tehran.
38.Ozfidankonakci, C., E. Yildiztugay, M. Bahtiyar and M. Kucukoduk. 2018. The humic acid-induced changes in the water status, chlorophyll fluorescence and antioxidant defense systems of wheat leaves with cadmium stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 155: 66-75.
39.Piršelová, B. and E. Ondrušková. 2021. Effect of cadmium chloride and cadmium nitrate on growth and mineral nutrient content in the root of fava bean (*Vicia faba* L.). *Plants* 10: 1007.
40.Purwanto, B. H., P. Wulandari, E. Sulistyaningsih, S. N. H. Utami and S. Handayani. 2021. Improved corn yields when humic acid extracted from composted manure is applied to acid soils with phosphorus fertilizer. *Applied and Environmental Soil Science* 2021: 8838420.
41.Qin, S., H. Liu, Z. Nie, Z. Rengel, W. Gao, C. Li and P. Zhao. 2020. Toxicity of cadmium and its competition with mineral nutrients for uptake by plants: a review. *Pedosphere* 30(2): 168-180.
42.Rady, M. M., A. S. Elrys, E. Selem, A. A. A. Mohsen, S. M. A. I. Arnaout, A. H. El-Sappah, K. A. El-Tarabily and E. S. M. Desoky. 2023. Spirulina platensis extract improves the production and defenses of the common bean grown in a heavy metals-contaminated saline soil. *Journal of Environmental Sciences* 129: 240-257.
43.Seyed Sharifi, R. and H. Narimani. 2023. Effect of nano silicon and plant growth-promoting rhizobacteria on biomass, nodulation and some physiological traits of grasspea (*Lathyrus sativus* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research* 20(4): 435-449. (In Farsi).
44.Shu, X., L. Yin, Q. Zhang and W. Wang. 2012. Effect of Pb toxicity on leaf growth, antioxidant enzyme activities, and photosynthesis in cuttings and seedlings of *Jatropha curcas* L. *Environmental Science and Pollution Research* 19: 893-902.
45.Sofy, M. R., M. F. Seleiman, B. A. Alhammad, B. M. Alharbi and H. I. Mohamed. 2020. Minimizing adverse effects of Pb on maize plants by combined treatment with jasmonic, salicylic acids and proline. *Agronomy* 10(5): 699.
46.Song, J., B. Pi, J. Dai, Z. Nie, G. Yu and W. Du. 2025. Effects of humic acid on the growth and cadmium accumulation of maize (*Zea mays* L.) seedlings. *International Journal of Phytoremediation* 27(7): 888-895.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961]

47.Talha, M., M. Y. Shani, M. Y. Ashraf, F. De Mastro, G. Brunetti, M. K. R. Khan, S. W. U. H. S. Gillani, A. Khan, S. Abbas and C. Cocozza. 2023. Lead toxicity-mediated growth and metabolic alterations at early seedling stages of maize (*Zea mays* L.). *Plants* 12(18): 3335.
48.Van Oosten, M. J., O. Pepe, S. De Pascale, S. Silletti and A. Maggio. 2017. The role of biostimulants and bioeffectors as alleviators of abiotic stress in crop plants. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 4: 5.
49.Verma, S. and R. S. Dubey. 2003. Influence of lead toxicity on photosynthetic pigments, lipid peroxidation and activities of antioxidant enzymes in rice plants. *Indian Journal of Agricultural Biochemistry* 16: 17-22.
50.Wilkins, D. 1957. A technique for the measurement of Pb tolerance in plants. *Nature* 180: 37-38.
51.Wu, Y., Z. Liu, G. X. Yang, P. Yang, Y. P. Peng, C. Chen, F. Xue, T. Liu, H. L. Liu and S. Q. Liu. 2022. Combined effect of humic acid and vetiver grass on remediation of cadmium-polluted water. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 244: 114026.
52.Yildirim, E. 2007. Foliar and soil fertilization of humic acid affect productivity and quality of tomato. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science* 57(2): 182-186.
53.Zanganeh, R., R. Jamei and F. Rahmani. 2021. Response of maize plant to sodium hydrosulfide pretreatment under lead stress conditions at early stages of growth. *Cereal Research Communications* 49: 267-276.
54.Zeshan, A., M. Abdullah, M. F. Adil, D. Wei, M. Noman, T. Ahmed, S. Sehar, Y. Ouyang and I. H. Shamsi. 2021. Improvement of morpho-physiological, ultrastructural and nutritional profiles in wheat seedlings through astaxanthin nanoparticles alleviating the cadmium toxicity. *Journal of Hazardous Materials* 424: 126511.
55.Zhang, C., Q. He, M. Wang, X. Gao, J. Chen and C. Shen. 2020. Exogenous indole acetic acid alleviates Cd toxicity in tea (*Camellia sinensis*). *Ecotoxicology and Environmental Safety* 190: 110090.
56. Zhang, K., G. Wang, M. Bao, L. Wang and X. Xie. 2019. Exogenous application of ascorbic acid mitigates cadmium toxicity and uptake in Maize (*Zea mays* L.). *Environmental Science and Pollution Research* 26: 19261-19271.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOI: 10.47176/jcpp.16.3.38961]