

Modulatory Effect of *Ulva fasciata* L. Green Algal Extract on Physiological and Biochemical Responses of *Triticum aestivum* under Lead Heavy Metal Stress

Pages
25-43

S. Azadi¹, S. M. Seyyednejad^{2*}, A. Ghafarizadeh³ and A. Gilani⁴

1, 2 & 3) Department of Biology, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Khuzestan, Iran.

4) Seed and Plant Improvement Research Department, Kuzestan Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Ahvaz, Iran.

Corresponding author: sm.seyyednejad@gmail.com

Received date: 2025.10.04

Accepted date: 2026.01.10

Abstract

Soil contamination with heavy metals, particularly lead, represents a significant environmental challenge that reduces plant growth and performance by inducing oxidative stress and disrupting physiological processes. The present study aimed to investigate the effects of different concentrations (0, 2.5, 5, 7.5, and 10% v/v) of the green seaweed *Ulva fasciata* L. extract as a natural biostimulant on selected physiological and biochemical traits of *Triticum aestivum* under lead stress (0, 15, 45, and 75 ppm). The experiment was conducted as a factorial arrangement in a completely randomized design with three replications. The obtained data were subjected to statistical analysis using SAS software, and mean comparisons were performed using Duncan's multiple range test at a significance level of $P < 0.01$. Treatment with lead nitrate resulted in decreased leaf area, photosynthetic pigment content, and total protein, along with increased levels of malondialdehyde (MDA), proline, and soluble carbohydrates, indicating the occurrence of oxidative stress. In contrast, application of the seaweed extract, particularly at 10% concentration, mitigated the adverse effects of lead and enhanced photosynthetic pigments, total protein, and the activities of antioxidant enzymes, including catalase, peroxidase, and ascorbate peroxidase. These findings suggest that the bioactive compounds in the seaweed extract play a crucial role in enhancing plant tolerance to heavy metal stress through stimulation of the antioxidant system and improvement of photosynthetic processes. Accordingly, *U. fasciata* extract can be utilized as an environmentally friendly biostimulant to improve growth and resistance of crop plants in heavy metal-contaminated soils.

Keywords: Antioxidant enzymes, Proline, Malondialdehyde (MDA) and Biostimulant.

اثر تعدیلی عصاره جلبک سبز *Ulva fasciata* L. بر پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گندم در مواجهه با تنش فلز سنگین سرب

شماره صفحات

۲۵-۴۳

سمیرا آزادی^۱، سیدمنصور سیدنژاد^{۲*}، آذین غفاری‌زاده^۳ و عبدالعلی گیلانی^۴

۱، ۲ و ۳) گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، خوزستان، ایران.
۴) بخش اصلاح و تهیه بذر، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.

* نویسنده مسئول: sm.seyyednejad@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲

چکیده

آلودگی خاک با فلزات سنگین، به‌ویژه سرب، از چالش‌های مهم زیست‌محیطی است که با ایجاد تنش اکسیداتیو و اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی، رشد و عملکرد گیاهان را کاهش می‌دهد. پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر غلظت‌های مختلف (صفر، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد حجمی/حجمی) عصاره جلبک سبز *Ulva fasciata* L. به عنوان یک محرک زیستی طبیعی بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه *Triticum aestivum* تحت تنش سرب (صفر، ۱۵، ۴۵ و ۷۵ ppm) انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. داده‌ها با نرم‌افزار SAS تجزیه و تحلیل آماری شدند و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چنددامنه دانکن در سطح احتمال $P < 0.01$ انجام گرفت. تیمار گیاهان با نیترات سرب موجب کاهش سطح برگ، محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و پروتئین کل و افزایش میزان مالون‌دی‌آلدئید (MDA)، پرولین و کربوهیدرات‌های محلول گردید که بیانگر بروز تنش اکسیداتیو بود. در مقابل، کاربرد عصاره جلبک به‌ویژه در غلظت ۱۰ درصد، اثرات منفی سرب را تعدیل نموده و موجب افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی، پروتئین کل و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شامل کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز گردید. به نظر می‌رسد ترکیبات زیست‌فعال عصاره جلبک از طریق تحریک سامانه آنتی‌اکسیدانی و بهبود فرآیندهای فتوسنتزی، نقش مؤثری در افزایش تحمل گیاه به تنش فلزات سنگین دارند. بر این اساس، عصاره جلبک *U. fasciata* می‌تواند به عنوان محرک زیستی سازگار با محیط زیست در بهبود رشد و مقاومت گیاهان زراعی در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی:

واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، پرولین، مالون‌دی‌آلدئید (MDA) و محرک زیستی.

مقدمه

آلودگی خاک‌ها با فلزات سنگین، به ویژه سرب، یکی از مشکلات زیست‌محیطی مهم است که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی و صنعتی می‌باشد (Zwolaket *et al.*, 2019). طبق گزارش آژانس حفاظت محیط زیست، سرب به عنوان یکی از مهم‌ترین فلزات سنگین آلاینده محیط به شمار می‌رود (Wieczoreket *et al.*, 2018). سمیت سرب در گیاهان به صورت زردی و قهوه‌ای شدن برگ‌ها و کاهش رشد ریشه نمود پیدا می‌کند (Hadi and Aziz, 2015; Zulfiqaret *et al.*, 2019). حتی در غلظت‌های پایین، سرب می‌تواند تعادل آب سلول‌های گیاهی را مختل نموده، تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) را افزایش دهد و در نتیجه موجب تنش اکسیداتیو گردد. این تنش به آسیب غشاها و DNA، تغییر در ساختار فیزیولوژیکی سلول، تخریب و مهار فعالیت آنزیم‌ها و نهایتاً مرگ سلولی منجر می‌شود (Kumar and Prasad, 2018; Zulfiqaret *et al.*, 2019; Navabpouret *et al.*, 2020). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که گیاهان در معرض سرب کاهش قابل توجهی در میزان فتوسنتز دارند. این کاهش ناشی از تخریب کلروپلاست‌ها، مهار سنتز کلروفیل، پلاستوکوئینون و کاروتنوئیدها، ممانعت از انتقال الکترون و کاهش فعالیت آنزیم‌های چرخه کالوین است. در واقع، سرب با ایجاد اختلال در جذب فلزات ضروری مانند منیزیم و آهن، سنتز کلروفیل را محدود می‌کند (Zulfiqaret *et al.*, 2019; Aslamet *et al.*, 2021). افزایش تخریب کلروفیل در گیاهان تحت تیمار سرب به دلیل افزایش فعالیت کلروفیل‌از بوده و نشان داده شده است که کلروفیل *b* نسبت به کلروفیل *a* بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Nas and Ali, 2018; Guptaet *et al.*, 2024). همچنین محققان بسیاری گزارش نمودند، سمیت فلز سنگین سرب باعث کاهش درصد جوانه‌زنی، شاخص جوانه‌زنی، شاخص تحمل، طول گیاه و توده خشک گیاه می‌شود (Yanget *et al.*, 2010; Kanwal *et al.*, 2020; Osman and Fadhllallah, 2023). در سال‌های اخیر، استفاده از عصاره جلبک‌های دریایی به دلیل پتانسیل بالای آن‌ها در کشاورزی ارگانیک و پایدار، توجه زیادی را به خود جلب کرده است (Ghafarizadeh *et al.*, 2017; Arioli *et al.*, 2024). این عصاره‌ها حاوی عناصر ماکرو و میکرو، ویتامین‌ها، هورمون‌های رشد و تنظیم‌کننده‌های گیاهی از جمله جیبرلین، سیتوکینین و اکسین (Karkhane *et al.*, 2020)، آمینواسیدها و پلی‌ساکاریدها (Shahzamani *et al.*, 2022) و بتائین‌ها (Margal *et al.*, 2023) هستند. برخلاف کودهای شیمیایی، عصاره جلبک‌های دریایی غیرسمی بوده، منجر به تخریب محیط زیست ایجاد نمی‌شوند و آلودگی خطرناک برای انسان و سایر موجودات به همراه ندارند (Ghafarizadeh *et al.*, 2017). اثرات مثبت عصاره جلبک‌های دریایی بر محصولات کشاورزی در غلظت‌های مختلف به اثبات رسیده است، به طوری که در صورت تأمین مقادیر مناسب مواد مغذی، موجب توسعه سیستم‌های ریشه‌ای و ارتقای مراحل مختلف فاز زایشی گیاه می‌شود (Ghafarizadeh *et al.*, 2015; Mattner *et al.*, 2018). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که محلول‌پاشی عصاره جلبک‌های دریایی، رشد و عملکرد گیاهان مختلف از جمله گندم (*Triticumaestivum*) (Ghafarizadeh *et al.*, 2016)، گوجه فرنگی (*Solanum lycopersicum*) و فلفل شیرین (*Capsicum annuum*) (Ali

(*et al.*, 2019)، توت فرنگی (*Fragaria × ananassa*) (Alam *et al.*, 2013)، کلزای زمستانه (*Brassica napus*) (Jannin *et al.*, 2013) و کاج (*Pinus contorta*) (MacDonald *et al.*, 2012) را بهبود می‌بخشند. یکی دیگر از مزایای جلبک‌ها تولید زیست‌توده بالا است که می‌تواند به کاهش تنش‌های محیطی، از جمله آلودگی با فلزات سنگین، کمک کند (Amrutha *et al.*, 2025). تحقیقات نشان داده‌اند که عصاره جلبک دریایی به دلیل حضور گلایسین بتائین، تحمل گیاهان نسبت به تنش‌های محیطی را افزایش داده و با حفظ تعادل اسمزی سلول‌های گیاهی و محافظت از غشای ریشه، اثرات مخرب تنش‌ها را کاهش می‌دهد (Kumari *et al.*, 2024). علاوه بر این، پلی‌ساکاریدهای سولفات و الیگوساکاریدهای کم‌وزن مولکولی موجود در جلبک‌های دریایی فعالیت‌های بیولوژیکی متنوعی از جمله فعالیت آنتی‌اکسیدانی دارند و قادرند پاسخ‌های دفاعی گیاه را القا کنند (Ghafari-zadeh and Niroomand, 2021). لامینارین موجود در عصاره جلبک دریایی نیز تولید ترکیبات ضدقارچی (فیتوالکسین) و آنزیم‌های هیدرولیزکننده مانند کیتیناز و گلوکاناز را تحریک می‌کند و به این ترتیب سیستم دفاعی گیاهان را تقویت می‌نماید (Shukla *et al.*, 2021). با وجود مطالعات متعدد در زمینه اثرات عصاره جلبک‌ها و سمیت سرب، اطلاعات محدودی درباره تأثیر عصاره جلبک سبز *Ulva fasciata* بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گندم تحت تنش سرب موجود است. همچنین، اثرات دقیق عصاره جلبک بر شاخص‌های آنتی‌اکسیدانی و مولکول‌های سیگنال‌دهنده استرس در گیاهان تحت این تنش تاکنون به‌طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته است. بر این اساس، هدف از مطالعه حاضر بررسی اثر غلظت‌های مختلف عصاره جلبک سبز *U. fasciata* بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و رشد گندم، شامل میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی، پروتئین و کربوهیدرات محلول کل، مالون‌دی‌آلدئید، پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز تحت تنش فلز سنگین سرب می‌باشد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ در ایستگاه تحقیقات شاور و وابسته به مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان (31° 50' N و 48° 28' E) که در ارتفاع ۳۳ متری از سطح دریا واقع است، اجرا گردید. در این تحقیق از جلبک سبز *Ulva fasciata* L. از شاخه‌ی Chlorophyta، رده‌ی Ulvophyceae، راسته‌ی Ulvales، تیره‌ی Ulvaceae، جمع‌آوری شده از منطقه ساحلی چابهار (25° 17' N و 60° 37' E) استفاده گردید. شناسایی گونه جلبکی توسط مرکز تحقیقات چابهار انجام شد. جلبک مورد استفاده به منظور رفع تمامی ناخالصی‌ها با آب دریا و آب شیرین شست‌وشو داده شد، سپس به مدت ۱۰ روز در هوای آزاد خشک گردید و به شکل پودر یکنواخت در آمد. برای تهیه عصاره جلبکی ۵۰ گرم پودر جلبک با ۵۰۰ میلی لیتر آب مقطر به مدت ۶۰ دقیقه جوشانده شد و پس از عبور از صافی عصاره حاصل به عنوان ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد (Ghafari-zadeh *et al.*, 2017). سطوح عامل اول شامل درصدهای صفر، ۲/۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۵ درصد افزودن آب مقطر تهیه شد. عامل دوم نیترات سرب ۴ سطح شامل صفر، ۱۵، ۴۵ و ۷۵ میلی گرم در لیتر بود. آزمایش با دو

عامل عصاره جلبک دریایی و نیترات سرب به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار انجام شد. واحدهای آزمایش شامل گلدان‌هایی به قطر ۳۰ سانتی‌متر با گنجایش ۲۰ کیلوگرم خاک بودند. در هر گلدان به طور متوسط ۲۵ عدد بذر گندم رقم چمران کاشته شد. گلدان‌ها در محیط باز قرار داشتند، منافذی در کف گلدان‌ها به منظور زهکش خاک تعبیه شد. اطلاعات خاک شامل pH ۷/۱ و EC = ۷/۳ بود. عصاره جلبکی مورد استفاده به صورت افشانه برگی و نیترات سرب به صورت محلول در آب به خاک گلدان‌ها در مرحله پنجه‌زنی اعمال شد. آبیاری برحسب نیاز و طبق عرف منطقه در طول دوره رشد اعمال گردید. نمونه‌گیری در مرحله‌ی گیاهچه ای (در حالت چهار برگگی گیاه) انجام شد. جهت سنجش سطح برگ از دستگاه سطح برگ سنج (Leaf area meter) مدل WinDIAS استفاده گردید و نتایج برحسب میلی‌متر مربع گزارش شد.

سنجش میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی

استخراج رنگدانه‌های کلروفیل a ، کلروفیل b ، کلروفیل کل و کاروتنوئید بر اساس روش (Lichtenthaler 1987) و با استفاده از حلال استون ۸۰ درصد انجام شد. جذب نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفتومتر UV- VIS WPA (biowave) biochrom ساخت انگلستان خوانده شد و نتایج با استفاده از روابط ۱، ۲، ۳ و ۴ محاسبه و بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر بافت گیاهی گزارش گردید.

$$\text{Chl}_a \text{ (mg/g)} = (12.25 A_{663} - 2.79 A_{646}) (v) / 1000 W \quad \text{رابطه ۱:}$$

$$\text{Chl}_b \text{ (mg/g)} = (21.50 A_{646} - 5.10 A_{663}) (v) / 1000 W \quad \text{رابطه ۲:}$$

$$\text{Chl}_{\text{Total}} \text{ (mg/g)} = \text{Chl}_a + \text{Chl}_b \quad \text{رابطه ۳:}$$

$$\text{Car (mg/g)} = ((1000 A_{470} - 1.82 \text{Chl}_a - 85.02 \text{Chl}_b) / 198) (v) / 1000 W \quad \text{رابطه ۴:}$$

سنجش محتوی کربوهیدرات محلول

میزان کربوهیدرات محلول بر اساس فنل-اسیدسولفوریک (DuBois *et al.*, 1956) و با استفاده از حلال اتانول ۸۰ درصد سنجش شد. جذب نمونه‌ها در طول موج ۴۸۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر UV- VIS WPA (biowave) biochrom خوانده شد و از گلوکز خالص جهت رسم منحنی استاندارد استفاده گردید. نتایج برحسب میلی‌گرم در گرم وزن خشک نمونه بافت گیاهی گزارش شد.

سنجش میزان پروتئین‌های کل

میزان پروتئین به روش لوری اصلاح شده (Lowry *et al.*, 1951) و با استفاده از پروتئین آلبومین گاوی (استاندارد) سنجیده و جذب نمونه‌ها در طول موج ۶۶۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر مذکور خوانده شد. نتایج بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر بافت گیاهی گزارش گردید.

سنجش میزان پرولین

پروولین بر اساس روش Bates *et al.*, 1973 و با استفاده از اسید سولفوسالیسیلیک ۳ درصد استخراج و سنجش شد. جذب نمونه‌ها در ۵۲۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر خوانده شد و نتایج بر حسب میلی‌مول بر گرم وزن تر بافت گیاهی گزارش شد.

سنجش میزان مالون دی‌آلدئید (MAD)

میزان مالون‌دی‌آلدئید با استفاده از محلول ۰/۵ درصد تیوباربیتوریک اسید حاوی تری‌کلرواستیک‌اسید ۲۰ درصد سنجش شد. جذب نمونه‌ها در طول موج‌های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. سپس با ضریب خاموشی $1 \text{ cm}^{-1} \text{ mM}^{-1}$ مقدار مالون‌دی‌آلدئید بر حسب میلی‌مول بر گرم وزن تر بافت گیاهی محاسبه و نتایج گزارش گردید (Davey *et al.*, 2005).

سنجش میزان آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

آنزیم کاتالاز بر اساس روش (Aebi, 1984)، آسکوربات‌پراکسیداز (Chen and Asada, 1989)، پراکسیداز (Hoyle, 1972) و سپس فعالیت آنزیم بر حسب تغییرات واحد جذب در دقیقه به ازای هر میلی‌گرم پروتئین محاسبه و به واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین گزارش گردید. نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.2 مورد تجزیه آماری قرار گرفت. میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال $P < 0.01$ محاسبه شد و نمودارها به کمک نرم‌افزار Excel رسم گردید.

نتایج و بحث

اثر متقابل عصاره جلبک سبز *U. fasciata* و نیترات سرب بر سطح برگ، رنگدانه‌های فتوسنتزی و پروتئین

کل

با توجه به نتایج حاصل از آنالیز واریانس، بین میزان کلروفیل *a* و *b*، کل و کارتنوئید و پروتئین کل در سطوح عصاره جلبک *U. fasciata*، نیترات سرب و اثر متقابل دو عامل در سطح یک درصد تفاوت معنی‌داری مشاهده شد (جدول ۱).

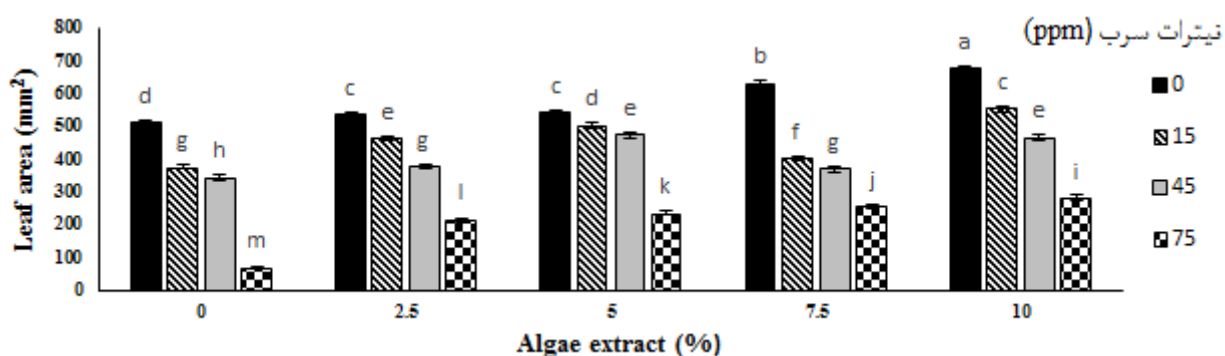
جدول ۱- نتایج آنالیز واریانس مربوط به کلروفیل *a* و *b*، کل و کارتنوئید و پروتئین کل در برگ‌های گیاهچه گندم

Table 1- The analysis of variance for chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, total chlorophyll, carotenoids and total proteins in the leaves of wheat seedlings

میانگین مربعات						درجه آزادی	منابع تغییرات
پروتئین	کارتنوئید	کلروفیل کل	کلروفیل <i>b</i>	کلروفیل <i>a</i>	سطح برگ		
۴۷۸/۰۸۳**	۵/۰۷۹**	۵/۴۹۲**	۲/۷۷۴**	۰/۵۲۴**	۴۵۸۱۶/۷۹۵**	۴	غلظت کود جلبکی (A)
۱۶۵/۳۳۱**	۵/۶۶۲**	۱۳/۱۱۷**	۸/۴۵۵**	۰/۵۲۷**	۳۵۴۷۹۱/۷۴۰**	۳	نیترات سرب (B)
۳/۰۹۹**	۱/۳۹۹**	۰/۲۱۶**	۰/۲۹۵**	۰/۰۱۰**	۵۴۱۰/۶۹۳**	۱۲	اثر متقابل A و B
۰/۹۹۷	۰/۹۹۸	۰/۹۹۳	۰/۹۹۱	۰/۹۹۲	۰/۹۹۶	۴۰	خطا
۳/۰۴۲	۳/۶۲۵	۴/۷۱۶	۶/۹۲۱	۳/۷۲۶	۲/۴۶۰		(C) C.V

** و *** به ترتیب معنی دار در سطح احتمال $P < 0.05$ و $P < 0.01$ و ns به منزله عدم وجود اختلاف معنی دار می‌باشد.

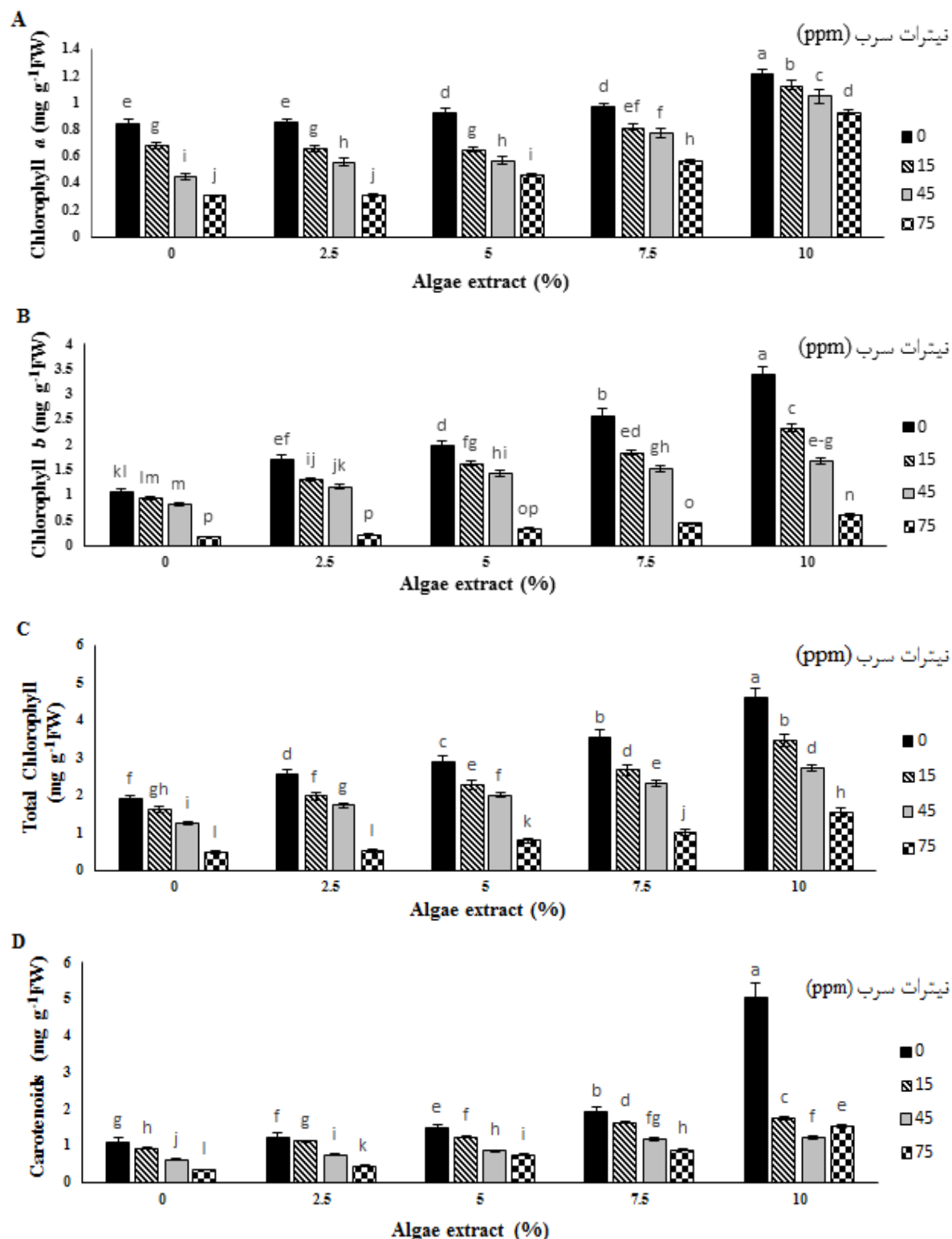
بر اساس مقایسه میانگین‌ها کاربرد عصاره جلبک سبز *U. fasciata* موجب افزایش سطح برگ نسبت به تیمار شاهد (۳۲۶/۴۰ میلی مترمربع) شد، بطوری‌که بیشترین سطح برگ مربوط به تیمار ۱۰ درصد (۴۹۵/۹۵ میلی مترمربع) و کمترین آن مربوط به تیمار ۲/۵ درصد عصاره جلبک سبز (۴۰۰/۳۷ میلی مترمربع) بود. اعمال نیترات سرب منجر به کاهش معنادار میزان سطح برگ در تمامی تیمارها شد. کمترین میزان سطح برگ مربوط به تیمار ۲/۵ درصد عصاره جلبکی به همراه ۷۵ppm نیترات سرب (۲۱۶/۱۹ میلی مترمربع) بود (شکل ۱).



شکل ۱- نمودار مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف عصاره جلبک سبز *U. fasciata* و نیترات سرب روی تغییرات میزان سطح برگ گیاهچه گندم. نمودارهای دارای حروف یکسان اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری ندارند ($P < 0.05$).

Figure 1- Comparison of the mean interaction effects of different levels of *U. fasciata* green algal extract and lead nitrate on leaf area of wheat seedlings. Columns with the same letter do not have a significant difference ($P < 0.05$).

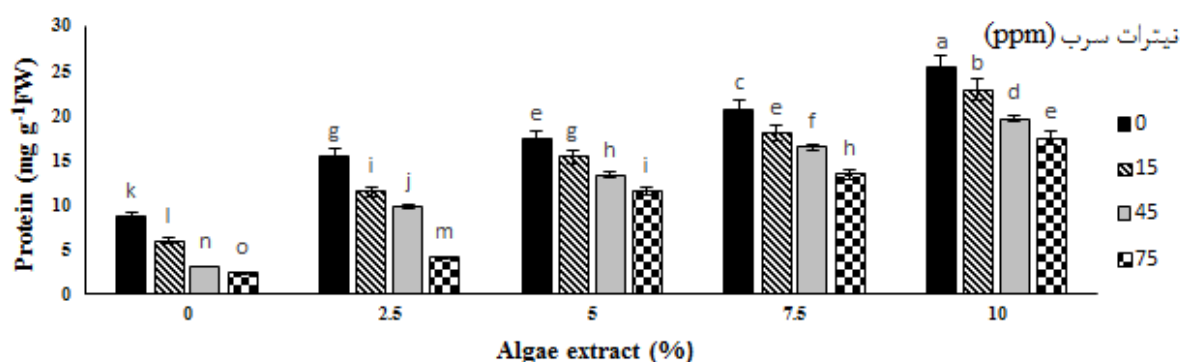
با توجه به شکل ۲، کاربرد عصاره جلبک سبز *U. fasciata* موجب افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی نسبت به تیمار شاهد گردید. بیشترین محتوای کلروفیل *a* (۱/۰۸۱ میلی گرم بر گرم وزن تر بافت گیاهی)، کلروفیل *b* (۲/۰۰۷ میلی گرم بر گرم وزن تر بافت گیاهی)، کلروفیل کل (۳/۰۸۹ میلی گرم بر گرم وزن تر بافت گیاهی) و کاروتنوئید (۲/۳۸۳ میلی گرم بر گرم وزن تر بافت گیاهی) در تیمار ۱۰ درصد مشاهده شد. بر اساس مقایسه میانگین سطوح مختلف عصاره جلبکی و نیترات سرب کمترین میزان کلروفیل *a* (۰/۳۱۱ میلی گرم بر گرم وزن تر بافت گیاهی)، کلروفیل *b* (۰/۲۱۹ میلی گرم بر گرم وزن تر بافت گیاهی)، کلروفیل کل (۰/۵۳۰ میلی گرم بر گرم وزن تر بافت گیاهی) و کاروتنوئید (۰/۴۴۹ میلی گرم بر گرم وزن تر بافت گیاهی) مربوط به تیمار ۲/۵ درصد عصاره جلبکی به همراه ۷۵ppm نیترات سرب بود. در مجموع، نتایج نشان داد که کاربرد عصاره جلبکی به صورت محلول پاشی موجب کاهش شدت اثرات بازدارنده نیترات سرب بر سنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی گردید، به گونه‌ای که مقادیر حاصل در تیمارهای حاوی عصاره جلبکی نسبت به نمونه‌های تحت تنش فلز سنگین سرب، در سطح بالاتری حفظ شدند (شکل ۲A-D).



شکل ۲- نمودار مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف عصاره جلبک سبز *U. fasciata* و نیترات سرب روی تغییرات میزان کلروفیل *a* (A)، کلروفیل *b* (B)، کلروفیل کل (C) و کاروتنوئید (D) برگ‌های گیاهچه‌گندم. نمودارهای دارای حروف یکسان اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری ندارند ($P < 0.05$).

Figure 2- Comparison of the mean interaction effects of different levels of *U. fasciata* green algal extract and lead nitrate on chlorophyll *a* (A), chlorophyll *b* (B), Total chlorophyll (C) and carotenoids (D) content in the leaves of wheat seedlings. Columns with the same letter do not have a significant difference ($P < 0.05$).

با توجه به شکل ۳، استفاده از عصاره جلبک سبز *U. fasciata* به صورت افشانه برگی موجب افزایش محتوای پروتئین کل نسبت به تیمار شاهد (۵/۱۰۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بافت گیاهی) گردید. بیشترین محتوای پروتئین کل (۲۵/۵۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بافت گیاهی) در تیمار ۱۰ درصد مشاهده شد. اعمال نیترات سرب منجر به کاهش معنادار میزان پروتئین کل در تمامی نمونه‌ها نسبت به تیمار شاهد شد. بر اساس مقایسه میانگین سطوح مختلف عصاره جلبکی و نیترات سرب کمترین میزان پروتئین کل (۴/۱۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بافت گیاهی) مربوط به تیمار ۲/۵ درصد عصاره جلبکی به همراه ۷۵ppm نیترات سرب بود. نتایج نشان دهنده اثرات تعدیل کننده عصاره جلبکی در تنش فلز سنگین سرب بر سنتز پروتئین بود (شکل ۳).



شکل ۳- نمودار مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف عصاره جلبک سبز *U. fasciata* و نیترات سرب روی تغییرات میزان پروتئین برگ‌های گیاهچه گندم. نمودارهای دارای حروف یکسان اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری ندارند ($P < 0.05$).

Figure 3- Comparison of the mean interaction effects of different levels of *U. fasciata* green algal extract and lead nitrate on protein content in the leaves of wheat seedlings. Columns with the same letter do not have a significant difference ($P < 0.05$).

اثر متقابل عصاره جلبک سبز *U. fasciata* و نیترات سرب بر کربوهیدرات محلول کل، پرولین، مالون‌دی‌آلدئید

و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

با توجه به نتایج حاصل از آنالیز واریانس، بین میزان کربوهیدرات محلول کل، پرولین، مالون‌دی‌آلدئید و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در سطوح عصاره جلبک *U. fasciata*، و نیترات سرب و اثر متقابل دو عامل در سطح یک درصد تفاوت معنی‌داری مشاهده شد (جدول ۲). کاربرد عصاره جلبک سبز *U. fasciata* موجب کاهش میزان کربوهیدرات محلول کل، پرولین و مالون‌دی‌آلدئید نسبت به تیمار شاهد (به ترتیب ۵۵/۸۴ میلی‌گرم بر وزن خشک بافت گیاهی، ۳۰/۲۱ میلی‌مول بر گرم وزن تر بافت گیاهی و ۱۴/۱۵ میلی‌مول بر گرم وزن تر بافت گیاهی) گردید، به طوری که کمترین میزان کربوهیدرات محلول کل (۳۴/۴۶ میلی‌گرم بر وزن خشک بافت گیاهی)، پرولین (۱۰/۶۵ میلی‌مول بر گرم وزن تر بافت گیاهی) و مالون‌دی‌آلدئید (۸/۰۴ میلی‌مول بر گرم وزن تر بافت گیاهی) در تیمار ۱۰ درصد عصاره جلبکی بدست آمد. تنش فلز سنگین سرب در غلظت ۷۵ppm بیشترین میزان کربوهیدرات محلول کل (۵۵/۹۷ میلی‌گرم بر وزن خشک بافت گیاهی)، پرولین (۳۳/۸۲

میلی‌مول بر گرم وزن تر بافت گیاهی) و مالون‌دی‌آلدئید (۲۰/۳۹ میلی‌مول بر گرم وزن تر بافت گیاهی) را نسبت به شاهد نشان داد.

جدول ۲- نتایج آنالیز واریانس مربوط به کربوهیدرات محلول کل، پرولین، مالون‌دی‌آلدئید، آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات- پراکسیداز در برگ‌های گیاهچه گندم

Table 2: The analysis of variance for total soluble carbohydrates, proline, malondialdehyde, catalase, peroxidase and ascorbate peroxidase enzymes in the leaves of wheat seedlings

میانگین مربعات						درجه آزادی	منابع تغییرات
آسکوربات پراکسیداز	پراکسیداز	کاتالاز	مالون‌دی‌آلدئید	پرولین	کربوهیدرات		
۰/۱۲۲*	۲۲/۶۸۵**	۰/۳۹۶**	۱۰۱/۳۴۲**	۶۹۴/۶۳۷**	۹۰۳/۸۱۱**	۴	غلظت کود جلبکی (A)
۰/۳۳۲**	۷۶/۸۹۷**	۰/۳۱۲**	۱۵۷/۲۱۴**	۲۵۲۶/۲۰۰**	۱۸۵۲/۴۳۷**	۳	نیترات سرب (B)
۰/۰۰۱**	۰/۸۱۳**	۰/۰۶۳**	۳/۶۰۵**	۱۴۰/۸۳۴**	۲۱/۹۶۵**	۱۲	اثر متقابل A و B
۰/۹۸۱	۰/۹۷۷	۰/۹۹۲	۰/۹۸۴	۰/۹۹۸	۰/۹۹۲	۴۰	خطا
۴/۴۸۱	۷/۲۲۳	۸/۳۷۲	۴/۸۲۶	۳/۲۹۰	۲/۸۸۰		c.v (٪)

* و ** به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱ P <

NS به منزله عدم وجود اختلاف معنی دار می‌باشد.

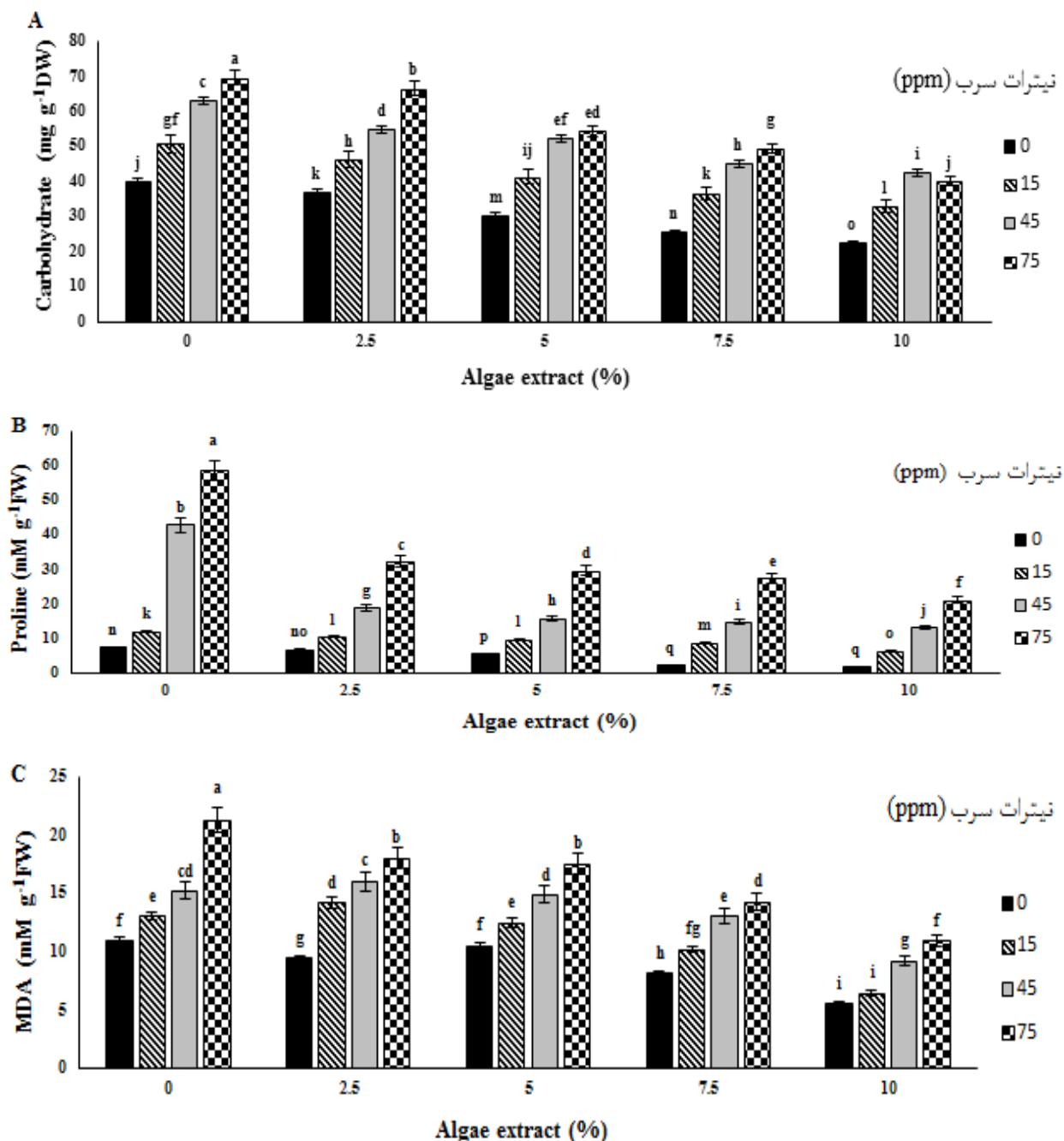
مقایسه میانگین سطوح مختلف عصاره جلبکی و نیترات سرب بیشترین میزان کربوهیدرات محلول کل (۳۴/۴۶ میلی‌گرم بر وزن خشک بافت گیاهی)، پرولین (۱۰/۶۵ میلی‌مول بر گرم وزن تر بافت گیاهی) و مالون‌دی‌آلدئید (۸/۰۴ میلی‌مول بر گرم وزن تر بافت گیاهی) را در تیمار ۲/۵ درصد عصاره جلبکی به همراه ۷۵ppm نیترات سرب نشان داد (شکل ۴A-C).

باتوجه به شکل ۵، کاربرد عصاره جلبک سبز *U. fasciata* روند متفاوتی در میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نسبت به تیمار شاهد نشان داد. با افزایش غلظت فلز سنگین سرب، فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز در تمامی تیمارها افزایش یافت. بر اساس مقایسه میانگین سطوح مختلف عصاره جلبکی و نیترات سرب بیشترین میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز (۰/۷۳۳) واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین، پراکسیداز (۱۰/۲۴) واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین و آسکوربات پراکسیداز (۰/۷۷۵) واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در تیمار ۵ درصد عصاره جلبکی به همراه ۷۵ppm نیترات سرب مشاهده شد (شکل ۴A-C).

بر اساس نتایج به دست آمده، با افزایش غلظت نیترات سرب، سطح برگ‌ها در مقایسه با تیمار شاهد به طور معنی‌داری کاهش یافت. مطالعات پیشین نشان داده‌اند، فلزات سنگین به ویژه سرب با مهار تقسیم سلولی و کاهش گسترش سلول‌ها، رشد گیاهان را به طور قابل توجهی محدود می‌کنند. این اثر منفی منجر به کاهش سطح برگ، کاهش ظرفیت تفرق و محدودیت در انتقال ترکیبات ضروری به اندام‌های هوایی شده و در نتیجه رشد بخش‌های هوایی گیاه را کند می‌کند. تنش سرب با ایجاد اختلال در تنظیم ژن‌های مرتبط با هورمون‌های رشد و پروتئین‌های ساختاری، مستقیماً بر تشکیل سلول و گسترش سطح برگ

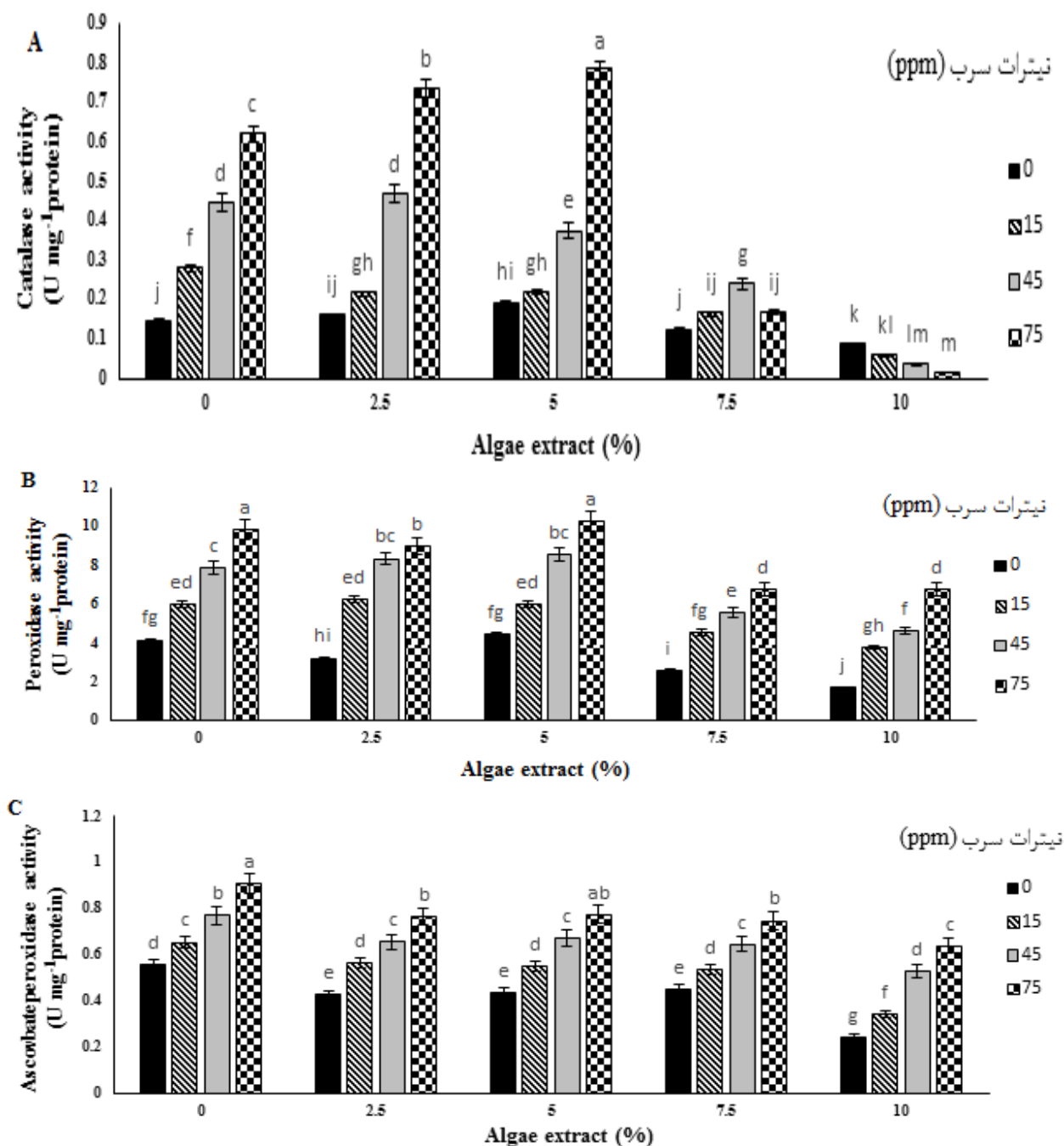
تأثیرگذار است (Zulfiqaret et al., 2019; Aslamet al., 2021; El Khattabi et al., 2025).

مطالعات متعددی گزارش کرده‌اند که قرار گرفتن گیاهان در معرض غلظت‌های بالای فلزات سنگین، موجب کاهش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی می‌شود (Dalyanet *et al.*, 2019; Kumaret *et al.*, 2024)، یافته‌ای که با نتایج مطالعه حاضر هم‌راستا است.



شکل ۴- نمودار مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف عصاره جلبک سبز *U. fasciata* و نیترات سرب روی تغییرات میزان کربوهیدرات (A)، پرولین (B) و مالون‌دی‌آلدئید (C) برگ‌های گیاهچه گندم. نمودارهای دارای حروف یکسان اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری ندارند ($P < 0.05$).

Figure 4- Comparison of the mean interaction effects of different levels of *U. fasciata* green algal extract and lead nitrate on carbohydrate (A), proline (B), and malondialdehyde (MDA)(C) contents in the leaves of wheat seedlings. Columns with the same letter do not have a significant difference ($P < 0.05$).



شکل ۵- نمودار مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف عصاره جلبک سبز *U. fasciata* و نیترات سرب روی تغییرات فعالیت آنزیم‌های کاتالاز (A)، پراکسیداز (B) و آسکوربات پراکسیداز (C) برگ‌های گیاهچه گندم. نمودارهای دارای حروف یکسان اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری ندارند ($P < 0.05$).

Figure 5- Comparison of the mean interaction effects of different levels of *U. fasciata* green algal extract and lead nitrate on activity of catalase (A), peroxidase (B) and ascorbate peroxidase (C) enzymes in the leaves of wheat seedlings. Columns with the same letter do not have a significant difference ($P < 0.05$).

مه‌ار فرایند فتوسنتز یکی از شناخته‌شده‌ترین علائم سمیت ناشی از سرب محسوب می‌شود، از منظر بیوشیمیایی، این پدیده عمدتاً ناشی از افزایش فعالیت آنزیم کلروفیل‌از و تشدید پراکسیداسیون لیپیدهاست (Aslamet *et al.*, 2021). همچنین، سرب

با اتصال به گروه‌های تیولی (SH-) و لیگندهای نیتروژنی و گوگردی در پروتئین‌ها، فعالیت آنزیم‌هایی نظیر فردوکسین +NADP+ ردوکتاز، γ -آمینولولولینیک اسید دهیدراتاز و پروتوکلروفیلیدردوکتاز را مهار کرده، در نتیجه محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی را کاهش می‌دهد و علاوه بر این، جانشینی فلزات سنگین به جای منیزیم مرکزی در ساختار کلروفیل از دیگر مکانیسم‌های کاهش جذب نور و افت بازده فتوسنتزی است (Zulfiqaret al., 2019; Aslamet al., 2021; El (Khattabi et al., 2025).

جلبک‌های دریایی از منابع ارزشمند زیستی در اکوسیستم‌های دریایی به شمار می‌روند. عصاره‌های استخراج‌شده از جلبک‌ها به دلیل دارا بودن ترکیبات محرک رشد مانند اکسین، جیبرلین و سیتوکینین و همچنین حضور عناصر ماکرو از قبیل K، Ca، P و میکرومغذی‌هایی مانند Fe، Mo، B، Co، Mn، Cu و Zn به عنوان کودهای مایع و محرک‌های زیستی مؤثر در کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Ghafarizadeh et al., 2018a). نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که استفاده از عصاره جلبکی به صورت محلول پاشی برگی، اثرات منفی تنش فلز سنگین سرب را کاهش داده و موجب افزایش سطح برگ و محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی گردید. این نتایج با یافته‌های پیشین مبنی بر اثر مثبت عصاره‌های جلبک بر سنتز کلروفیل و افزایش بیان ژن‌های مرتبط با هورمون‌های رشد هم‌خوانی دارد (Amrutha et al., 2025).

مکانیسم حفاظتی عصاره جلبک احتمالاً ناشی از افزایش سطح سیتوکینین‌ها و تنظیم تعادل هورمون‌های گیاهی است، سیتوکینین‌ها با تسریع توسعه کلروپلاست و افزایش تعداد و اندازه گرانها، موجب بهبود کارایی فتوسنتزی و تأخیر در پیری سلول‌ها می‌شوند. افزون بر این، حضور عناصر معدنی مانند منیزیم و آهن در عصاره جلبک می‌تواند سنتز کلروفیل را تحریک کرده و از آسیب‌های ناشی از جانشینی فلزات سنگین در ساختار آن جلوگیری کند (Ali et al., 2021).

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که در گیاه گندم تحت تیمار نترات سرب، میزان مالون دی‌آلدئید (MDA) به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش یافت. تنش فلز سرب با تأثیر بر فرایندهای انتقال الکترون در کلروپلاست، موجب افزایش تولید گونه‌های اکسیژن فعال‌شده و در نتیجه باعث آسیب غشاهای سلولی و تشدید پراکسیداسیون لیپیدها می‌گردد. افزایش MDA شاخصی از آسیب اکسیداتیو و افزایش تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن در بافت گیاه است که به اختلال در ساختار غشا و عملکرد آنزیم‌ها منجر می‌شود (Kaur et al., 2012; Rizvi et al., 2020; Navabpour et al., 2020). شدت سمیت فلزی در گیاهان به نوع گونه گیاهی، عنصر خاص، غلظت فلز، pH و ترکیب خاک بستگی دارد (Sperdouli et al., 2022).

گیاهان برای مقابله با تنش‌های محیطی، از مکانیسم‌های مختلفی از جمله تجمع مواد محلول سازگار استفاده می‌کنند. در پژوهش حاضر نیز مشاهده شد که گیاه گندم، همانند سایر گیاهان، برای مقابله با تنش ناشی از سرب، میزان پرولین آزاد و کربوهیدرات‌های محلول خود را افزایش داد. پرولین در گیاهان نقش چندگانه‌ای ایفا می‌کند؛ این اسید آمینه موجب حفظ ساختار طبیعی پروتئین‌ها، جلوگیری از دناتوراسیون آنزیم‌ها و حفظ تعادل اسمزی و pH سلولی می‌شود. همچنین، به عنوان

تنظیم‌کننده واکنش‌های اکسیداسیون-احیا و منبع کربن و نیتروژن در زمان تنش عمل می‌کند. پس از رفع تنش، پرولین به سرعت تجزیه شده و می‌تواند انرژی لازم برای فرایندهای ترمیمی سلولی را فراهم کند. طبق گزارش‌ها، پرولین بیش از آن‌که شاخصی از سازگاری به تنش باشد، به عنوان نشانگر وقوع تنش عمل می‌کند (Ghafarizadeh *et al.*, 2018b).

علاوه بر این، افزایش تجمع کربوهیدرات‌های محلول به گیاه کمک می‌کند تا ذخایر کربوهیدراتی لازم برای حفظ متابولیسم پایه و تنظیم پتانسیل آب سلولی را در شرایط تنش فلزی حفظ نماید (Yang *et al.*, 2024). متابولیت‌های قندی با تبدیل پلی‌ساکاریدها و الیگوساکاریدها به یکدیگر، تعادل اسمزی سلول را کنترل کرده و از تخریب پروتئین‌ها و آنزیم‌ها در اثر تنش اکسیداتیو جلوگیری می‌کنند. به عبارتی، افزایش قندهای محلول در شرایط تنش‌زا به عنوان یکی از مکانیسم‌های مهم تحمل تنش شناخته می‌شود (Riyazuddin *et al.*, 2021; Saddhe *et al.*, 2021). در عین حال، محتوای پروتئین کل در گیاهان تحت تنش معمولاً کاهش می‌یابد، زیرا تنش سبب تخریب ساختارهای پروتئینی و اختلال در فرایندهای بیوشیمیایی می‌شود (Hasan *et al.*, 2017).

در پژوهش حاضر، کاربرد عصاره جلبک توانست اثرات منفی ناشی از تنش فلز سنگین را تعدیل کند، به گونه‌ای که غلظت ۱۰ درصد عصاره بیشترین افزایش در میزان پروتئین سلولی و بیشترین کاهش در MDA و پرولین را نشان داد. در غلظت‌های پایین‌تر عصاره، تجمع پرولین، قند محلول و MDA بیشتر بود. این یافته‌ها با تحقیقات قبلی هم‌خوانی دارد (Riyazuddin *et al.*, 2024; Rani *et al.*, 2024). در مطالعه ای، Nessim & El-Shenody, 2018 نیز گزارش کردند که عصاره جلبک‌های دریایی با افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی سلول، مقاومت گیاه در برابر تنش فلزی را بهبود می‌بخشد و پراکسیداسیون لیپیدها و آسیب DNA ناشی از فلزات سنگین را کاهش می‌دهد.

تنش سرب با افزایش غلظت کلسیم سیتوزولی، موجب فعال‌سازی آنزیم NADPH اکسیداز غشای پلاسمایی می‌شود که خود باعث القای تنش اکسیداتیو و افزایش تولید گونه‌های اکسیژن فعال می‌گردد. در پی این افزایش، پاسخ آنتی‌اکسیدانی گیاه از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌هایی مانند کاتالاز تحریک می‌شود (Dalyan *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2018). کاتالاز از جمله آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کلیدی است که با تجزیه H_2O_2 به آب و اکسیژن، از تجمع ROS جلوگیری می‌کند و در تنظیم تعادل اکسیداتیو سلول نقش دارد (Ghafarizadeh *et al.*, 2018a). در مطالعه حاضر نیز، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) نسبت به شاهد افزایش یافت. افزایش تولید ROS همچنین موجب آسیب به مولکول‌های DNA از جمله بازهای پورینی و پیریمیدینی، دئوکسی‌ریبوز و اکسایش بازها می‌شود. در نتیجه، سرب باعث مهار فعالیت‌های متابولیکی، کاهش رشد سلولی و افت نسبت DNA به RNA می‌گردد (Dutta *et al.*, 2018). در مطالعات مختلف، افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز در پاسخ به آسیب‌های سلولی گزارش شده است. این افزایش احتمالاً بخشی از یک واکنش حفاظتی برای تأخیر در فرآیند پیری سلولی است. بنابراین، افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز در ایجاد مقاومت گیاه در

برابر آسیب‌های اکسیداتیو القاشده توسط فلزات سنگین نقش مؤثری دارد (Mohamed *et al.*, 2025; Venkatachalam *et al.*, 2025). آنزیم پراکسیداز با استفاده از ترکیبات فنولیک به عنوان دهنده الکترون، موجب تجزیه پراکسید هیدروژن می‌شود (Ghafarizadeh *et al.*, 2018a).

از میان آنزیم‌های پراکسیداز، آنزیم آسکوربات پراکسیداز از مهم‌ترین آنزیم‌های درگیر در سم‌زدایی H_2O_2 به شمار می‌رود. این آنزیم در چرخه گلوکوتاتیون-آسکوربات در کلروپلاست، با استفاده از آسکوربات به عنوان دهنده الکترون، موجب تجزیه پراکسید هیدروژن می‌شود. آسکوربات پراکسیداز در غلظت‌های پایین‌تر H_2O_2 فعال شده و نقش تنظیمی مهمی در تعادل گونه‌های اکسیژن فعال و پیام‌رسانی سلولی ایفا می‌کند (Ghafarizadeh *et al.*, 2018a).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که تنش ناشی از فلز سنگین سرب تأثیر منفی قابل توجهی بر رشد، فیزیولوژی و مکانیسم‌های دفاعی گیاه گندم دارد. افزایش غلظت نیترات سرب موجب کاهش سطح برگ، افت میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی، افزایش پراکسیداسیون لیپیدها و در نتیجه اختلال در فرآیندهای فتوسنتزی شد. همچنین افزایش قابل ملاحظه در محتوای مالون‌دی‌آلدئید، پرولین و کربوهیدرات‌های محلول بیانگر بروز تنش اکسیداتیو و فعال شدن مکانیسم‌های دفاعی گیاه بود. در مقابل، کاربرد عصاره جلبک دریایی *U. Fasciata* به ویژه در غلظت ۱۰ درصد توانست اثرات زیان‌بار تنش سرب را به‌طور مؤثری تعدیل نموده و با بهبود رشد رویشی و کاهش شاخص‌های تنش اکسیداتیو، تحمل گیاه را ارتقا دهد. به نظر می‌رسد ترکیبات زیست‌فعال موجود در عصاره جلبک از طریق بهبود تعادل اکسیداتیو و تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیکی، در افزایش تحمل گندم به تنش فلزات سنگین نقش دارند. در مجموع، این نتایج نشان می‌دهد که عصاره *U. fasciata* می‌تواند به‌عنوان یک محرک زیستی سازگار با محیط زیست برای کاهش آثار منفی آلودگی فلزات سنگین در گیاهان زراعی مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*, 105 (1): 121-126.
- Alam, M. Z., Braun, G., Norrie, J., & Hodges, D. M. (2013). Effect of Ascophyllum extract application on plant growth, fruit yield and soil microbial communities of strawberry. *Canadian Journal of Plant Science*, 93(1): 23-36.
- Ali, O., Ramsubhag, A., & Jayaraman, J. (2021). Biostimulant properties of seaweed extracts in plants: Implications towards sustainable crop production. *Plants*, 10 (3): 531.
- Ali, O., Ramsubhag, A., & Jayaraman, J. (2019). Biostimulatory activities of *Ascophyllum nodosum* extract in tomato and sweet pepper crops in a tropical environment. *PLoS One*, 14 (5): e0216710.
- Amrutha, T. G., Devi, U., Babybai, H. V., & Shilpa, H. D. (2025). Seaweed Extract as a Potential Stimulant in Mitigating Abiotic Stress: A Comprehensive Review. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 28 (9): 990-1001.

Arioli, T., Mattner, S. W., Islam, M. T., Tran, T. L. C., Weisser, M., Winberg, P., & Cahill, D. M. (2024). Applications of seaweed extracts in agriculture: An Australian perspective. *Journal of Applied Phycology*, 36 (2): 713-726.

Aslam, M., Aslam, A., Sheraz, M., Ali, B., Ulhassan, Z., Najeeb, U., ... & Gill, R. A. (2021). Lead toxicity in cereals: mechanistic insight into toxicity, mode of action, and management. *Frontiers in plant science*, 11 (1): 587785.

Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and soil*, 39 (1): 205-207.

Chen, G.N. & Asada, K. (1989). Ascorbate peroxidase in tea Leaves: occurrence of two isozymes and differences in their enzymatic and molecular properties. *Plant and Cell Physiology*, 30 (1): 987-998.

Dalyan, E., Yüzbaşıoğlu, E., & Akpınar, I. (2019). Physiological and biochemical changes in plant growth and different plant enzymes in response to lead stress. *Lead in plants and the environment*, 129-147.

Davey, M.W., Stals, E., Panis, B., Keulemans, J. & Swennen, R.L. (2005). High throughput of malondialdehyde in plant tissue. *Analytical Biochemistry*, 347 (1): 201-207.

DuBois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical chemistry*, 28 (3): 350-356.

Dutta, S., Mitra, M., Agarwal, P., Mahapatra, K., De, S., Sett, U., & Roy, S. (2018). Oxidative and genotoxic damages in plants in response to heavy metal stress and maintenance of genome stability. *Plant signaling & behavior*, 13 (8): e1460048.

El Khattabi, O., Lamwati, Y., Henkrar, F., Collin, B., Levard, C., Colin, F., ... & Fahr, M. (2025). Lead-induced changes in plant cell ultrastructure: an overview. *Biometals*, 38 (1): 1-19.

Ghfarizadeh, A., & Niroomand, A. (2021). Marine Algae as a New Source of Bioactive Compositions. *Alkhas*, 3 (4): 1-5.

Ghfarizadeh, A., Seyyed Nejad, S. M., & Gilani, A. (2018a). Studies on the effect of seaweed liquid fertilizer (*Nizamuddinina zanardinii*) in different levels of urea on some growth parameters and antioxidant activity of seedlings *Triticum aestivum* cv.'Chamran2'. *Applied Biology*, 31 (1): 207-227.

Ghfarizadeh, A., SEYYED, N. S. M., Vafaei, M., Gilani, A., & Saboora, A. (2018b). A study on the allelopathic effect of olive fruit pomace (*Olea europaea* L.) on some physiological parameters and yield of three wheat cultivars in climatic conditions of Khuzestan. *Journal of Plant Environmental Physiology*, 13 (1): 31-50.

Ghfarizadeh, A., Seyyed Nejad, S. M., & Gilani, A. (2017). Synergistic effect of seaweed extract and urea fertilizer on growth and biochemical parameters of *Triticum aestivum* at vegetative stage. *European online journal of natural and social sciences*, 6(4): pp-545.

Ghfarizadeh, A., Seyyed Nejad, S. M., & Abdolali Gilani, A. (2016). The effect of foliar spray of brown seaweed water extract and different levels of nitrogen on some physiological, biochemical, parameters and yield of wheat. *Journal of Plant Environmental Physiology*, 41 (1): 13-25.

Ghfarizadeh, A., Seyyed Nejad, S. M., & Gilani, M. (2015). Investigation the effect of different levels of urea fertilizer and brown seaweed extract on the physiological traits and grain yield. *crop physiology journal*, 7 (27): 69-83.

Gupta, M., Dwivedi, V., Kumar, S., Patel, A., Niazi, P., & Yadav, V. K. (2024). Lead toxicity in plants: mechanistic insights into toxicity, physiological responses of plants and mitigation strategies. *Plant Signaling & Behavior*, 19 (1): 2365576.

Hadi, F., & Aziz, T. (2015). A mini review on lead (Pb) toxicity in plants. *Journal of Biology and Life Science*, 6(2): 91-101.

Hasan, M. K., Cheng, Y., Kanwar, M. K., Chu, X. Y., Ahammed, G. J., & Qi, Z. Y. (2017). Responses of plant proteins to heavy metal stress—a review. *Frontiers in plant science*, 8 (1): 1492.

Hoyle, M.C. (1972). Indoleacetic acid oxidase: A dual catalytic enzyme. *Plant Physiology*, 50(1), 15-18.

Jannin, L., Arkoun, M., Etienne, P., Laine, P., Goux, D., Garnica, M., ... & Ourry, A. (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 (1): 31-52.

- Kanwal, A., Farhan, M., Sharif, F., Hayyat, M. U., Shahzad, L., & Ghafoor, G. Z. (2020).** Effect of industrial wastewater on wheat germination, growth, yield, nutrients and bioaccumulation of lead. *Scientific reports*, 10 (1): 11361.
- Karkhane, M., Lashgarian, H. E., Mirzaei, S. Z., Ghaffarizadeh, A., Sepahvand, A., & Marzban, A. (2020).** Antifungal, antioxidant and photocatalytic activities of zinc nanoparticles synthesized by *Sargassum vulgare* extract. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 29 (1): 101791.
- Kaur, G., Singh, H. P., Batish, D. R., & Kumar, R. K. (2012).** Growth, photosynthetic activity and oxidative stress in wheat (*Triticum aestivum*) after exposure of lead to soil. *Journal of environmental biology*, 33 (2): 265.
- Nessim, A., & El-Shenody, R. (2018).** Mitigation of lead stress in *Triticum aestivum* by seed priming in aqueous extracts of the macroalgae *Halimeda opuntia* and *Codium fragile*. *Egyptian Journal of Botany*, 58 (2): 263-274.
- Kumar, G., Nanda, S., Singh, S. K., Kumar, S., Singh, D., Singh, B. N., & Mukherjee, A. (2024).** Seaweed extracts: enhancing plant resilience to biotic and abiotic stresses. *Frontiers in Marine Science*, 11 (1): 1457500.
- Kumar, A., & Prasad, M. N. V. (2018).** Plant-lead interactions: transport, toxicity, tolerance, and detoxification mechanisms. *Ecotoxicology and environmental safety*, 166 (1): 401-418.
- Lichtenthaler, H. K. (1987).** Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In *Methods in enzymology*. 148 (2): 350-382.
- Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L., & Randall, R. J. (1951).** Protein measurement with the Folin phenol reagent. *Journal of biological chemistry*, 193 (1): 265-275.
- MacDonald, J. E., Hacking, J., Weng, Y., & Norrie, J. (2012).** Root growth of containerized lodgepole pine seedlings in response to *Ascophyllum nodosum* extract application during nursery culture. *Canadian Journal of Plant Science*, 92 (6): 1207-1212.
- Margal, P. B., Thakare, R. S., Kamble, B. M., Patil, V. S., Patil, K. B., & Titirmare, N. S. (2023).** Effect of seaweed extracts on crop growth and soil: a review. *Journal of Experimental Agriculture International*, 45 (9): 9-19.
- Mattner, S. W., Milinkovic, M., & Arioli, T. (2018).** Increased growth response of strawberry roots to a commercial extract from *Durvillaea potatorum* and *Ascophyllum nodosum*. *Journal of applied phycology*, 30(5): 2943-2951.
- Mohamed, H. I., Ullah, I., Toor, M. D., Tanveer, N. A., Din, M. M. U., Basit, A., ... & Rehman, M. U. (2025).** Heavy metals toxicity in plants: understanding mechanisms and developing coping strategies for remediation: a review. *Bioresources and Bioprocessing*, 12 (1): 95.
- Nas, F. S., & Ali, M. (2018).** The effect of lead on plants in terms of growing and biochemical parameters: a review. *MOJ Ecology & Environmental Sciences (MOJES)*, 3 (4), 265-268.
- Navabpour, S., Yamchi, A., Bagherikia, S., & Kafi, H. (2020).** Lead-induced oxidative stress and role of antioxidant defense in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Physiology and molecular biology of plants*, 26 (4): 793-802.
- Osman, H. E., & Fadhlallah, R. S. (2023).** Impact of lead on seed germination, seedling growth, chemical composition, and forage quality of different varieties of Sorghum. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 9 (1): 77-86.
- Rani, M., Vikas, Kumar, R., Lathwal, M., & Kamboj, A. (2024).** Effect and responses of lead toxicity in plants. In *Lead toxicity mitigation: sustainable Nexus approaches* (pp. 211-241). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Riyazuddin, R., Nisha, N., Ejaz, B., Khan, M. I. R., Kumar, M., Ramteke, P. W., & Gupta, R. (2021).** A comprehensive review on the heavy metal toxicity and sequestration in plants. *Biomolecules*, 12 (1): 43.
- Rizvi, A., Zaidi, A., Ameen, F., Ahmed, B., AlKahtani, M. D., & Khan, M. S. (2020).** Heavy metal induced stress on wheat: phytotoxicity and microbiological management. *RSC advances*, 10 (63): 38379-38403.
- Saddhe, A. A., Manuka, R., & Penna, S. (2021).** Plant sugars: Homeostasis and transport under abiotic stress in plants. *Physiologia plantarum*, 171 (4): 739-755.

Shahzamani, K., Lashgarian, H. E., Karkhane, M., Ghaffarizadeh, A., Ghotekar, S., & Marzban, A. (2022). Bioactivity assessments of phyco-assisted synthesized selenium nanoparticles by aqueous extract of green seaweed, *Ulva fasciata*. *Emergent Materials*, 5(6): 1689-1698.

Shukla, P. S., Borza, T., Critchley, A. T., & Prithviraj, B. (2021). Seaweed-based compounds and products for sustainable protection against plant pathogens. *Marine drugs*, 19 (2): 59.

Sperdouli, I. (2022). Heavy metal toxicity effects on plants. *Toxics*, 10 (12): 715.

Venkatachalam, J., Mohan, H., & Seralathan, K. K. (2025). Role of plant growth promoting bacteria in alleviating heavy metals induced oxidative stress in plant systems: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-20.

Wieczorek, J., Baran, A., Urbański, K., Mazurek, R., & Klimowicz-Pawlas, A. (2018). Assessment of the pollution and ecological risk of lead and cadmium in soils. *Environmental geochemistry and health*, 40 (6): 2325-2342.

Yang, Y., Wang, S., Zhao, C., Jiang, X., & Gao, D. (2024). Responses of non-structural carbohydrates and biomass in plant to heavy metal treatment. *Science of the Total Environment*, 909: 168559.

Yang, Y., Wei, X., Lu, J., You, J., Wang, W., & Shi, R. (2010). Lead-induced phytotoxicity mechanism involved in seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Ecotoxicology and environmental safety*, 73 (8): 1982-1987.

Zhang, Y., Deng, B., & Li, Z. (2018). Inhibition of NADPH oxidase increases defense enzyme activities and improves maize seed germination under Pb stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 158: 187-192.

Zulfiqar, U., Farooq, M., Hussain, S., Maqsood, M., Hussain, M., Ishfaq, M., ... & Anjum, M. Z. (2019). Lead toxicity in plants: Impacts and remediation. *Journal of environmental management*, 250: 109557.

Zwolak, A., Sarzyńska, M., Szpyrka, E., & Stawarczyk, K. (2019). Sources of soil pollution by heavy metals and their accumulation in vegetables: A review. *Water, air, & soil pollution*, 230 (7): 164.