Iranian Plant Protection Research

https://jpp.um.ac.ir

Research Article
Vol. 39, No. 3, 2025, p. 317-330

Effect of Polyethylene Microplastic Abiotic Stress on Seed Germination and Seedling Growth of Wheat (*Triticum aestivum* L.)

J. Karimi*[1], S. Arbabi[1]

1- Department of Biology, College of Science, Shiraz University, Iran
(*- Corresponding author's Email: javadkarimi@shirazu.ac.ir)

Received: 20-03-2025
Revised: 22-06-2025
Accepted: 08-07-2025
Available Online: 10-11-2025

How to cite this article:
Karimi, J., & Arbabi, S. (2025). The effect of polyethylene microplastic on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Iranian Plant Protection Research, 39*(3), 317-330. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jpp.2025.9223.1224

Introduction

Microplastic pollution has become a growing environmental concern, with polyethylene (PE) being one of the most prevalent sources. These plastic particles, originating from industrial activities, plastic degradation, and agricultural applications, persist in ecosystems and pose significant threats to plant growth, soil health, and overall agricultural productivity. Recent studies have highlighted the widespread contamination of microplastics in terrestrial and aquatic environments, raising concerns about their impact on plant physiology and development. Polyethylene microplastics (PE-MPs) are widely used in agricultural plastic mulch, greenhouse films, and packaging materials. Over time, these plastics degrade into micro-sized fragments that infiltrate the soil, potentially altering soil properties, affecting microbial communities, and influencing plant growth. Despite the increasing awareness of microplastic contamination, limited studies have been conducted to elucidate the effects of PE-MPs on economically important crops such as wheat (*Triticum aestivum* L.). Wheat is a staple food crop cultivated worldwide, and factors affecting its growth and productivity could have severe implications for food security. This study aims to investigate the physiological and biochemical effects of PE-MPs on wheat seed germination and seedling development. Key parameters such as germination rate, shoot and root growth, biomass allocation, photosynthetic pigment content, and proline accumulation are examined to provide a comprehensive understanding of the impact of microplastic pollution on crop health. The results of this study will contribute to the ongoing discussion regarding the environmental risks of microplastic pollution and the need for sustainable agricultural practices.

Materials and Methods

This study was conducted under controlled greenhouse conditions using a completely randomized design. The experiment involved four different concentrations of polyethylene microplastics, including 0 mg L^{-1} (control), 1 mg L^{-1}, 10 mg L^{-1}, and 100 mg L^{-1}, with four replications per treatment group. Wheat seeds (*Triticum aestivum* L.) were sterilized with sodium hypochlorite (5%) and washed with distilled water before sowing. The seeds were placed in pots filled with perlite, and Hoagland's nutrient solution was applied regularly to ensure adequate nutrition. After one week of germination, polyethylene microplastics were added into the growth medium. The plants were grown under optimal temperature and light conditions for two additional weeks before harvesting. To assess the impact of PE-MPs on wheat seedlings, several physiological and biochemical parameters were measured, such as germination rate: the percentage of seeds that successfully germinated under different PE-MP concentrations; shoot and root growth: length measurements of shoots and roots were recorded

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

https://doi.org/10.22067/jpp.2025.9223.1224

using a ruler; biomass allocation: fresh and dry weights of shoots and roots were measured to determine any changes in biomass distribution; chlorophyll and carotenoid content: spectrophotometric analysis was performed using the Arnon method to quantify chlorophyll a, chlorophyll b, and total carotenoids; proline content: the acid ninhydrin method was employed to determine the accumulation of proline, an indicator of oxidative stress and plant defense responses.

Results and Discussion

The results demonstrated that polyethylene microplastics had concentration-dependent effects on wheat seed germination and seedling growth. Germination: While the lowest concentration (1 mg L^{-1}) of PE-MPs had no significant impact on germination rate, moderate (10 mg L^{-1}) and high (100 mg L^{-1}) concentrations significantly reduced germination percentages. The inhibitory effect at higher concentrations suggests that microplastic exposure interferes with water uptake and seed metabolism. Root and shoot growth: Root length exhibited a notable increase across all treatment levels, with the highest stimulation observed at 10 mg L^{-1}. In contrast, shoot growth was negatively affected at both moderate and high concentrations, indicating an asymmetric response of different plant organs to PE-MP exposure. Biomass distribution: Root biomass increased significantly at 10 mg L^{-1} and 100 mg L^{-1}, while shoot biomass declined. This suggests that wheat seedlings may redirect energy allocation towards root development to enhance water and nutrient uptake under stress conditions. Photosynthetic pigments: Chlorophyll and carotenoid levels showed a biphasic response. At 1 mg $L^{-1}$and 10 mg L^{-1}, an increase in pigment concentration was observed, possibly due to a hormetic response where low levels of stress stimulate plant defense mechanisms. However, at 100 mg L^{-1}, both chlorophyll and carotenoid contents decreased, indicating oxidative stress and potential chloroplast damage. Proline accumulation: Proline content progressively increased with rising PE-MP concentrations. This suggests that polyethylene microplastics induce osmotic stress, triggering proline biosynthesis as a protective mechanism against oxidative damage.

The observed results indicate that polyethylene microplastics have complex and concentration-dependent effects on wheat growth. Increase in root length and biomass at higher concentrations suggests an adaptive response, where plants prioritize root expansion to improve nutrient acquisition under stress conditions. However, the simultaneous decline in shoot growth, germination rate, and photosynthetic pigments at higher microplastic levels highlights the detrimental consequences of microplastic pollution on crop physiology. The decrease in chlorophyll and carotenoid content at high PE-MP concentrations aligns with previous studies reporting microplastic-induced oxidative stress. Reduced photosynthetic efficiency can directly impact crop productivity and grain yield, raising concerns about the long-term implications of microplastic contamination in agricultural soils. Proline accumulation serves as an important biomarker for plant stress tolerance. The significant increase in proline levels at higher PE-MP concentrations suggests that wheat seedlings perceive microplastics as an abiotic stress factor. Proline plays a crucial role in stabilizing cellular structures, scavenging reactive oxygen species (ROS), and maintaining osmotic balance under stress conditions.

Conclusion

This study highlights the potential risks of polyethylene microplastic pollution on wheat growth and development. While low concentrations of PE-MPs may induce mild stimulatory effects on certain physiological parameters, higher concentrations negatively impact germination, shoot growth, and photosynthetic efficiency, while triggering stress-related responses such as proline accumulation. These findings emphasize the urgent need for policies and practices that mitigate microplastic pollution in agricultural soils. Future research should explore the long-term effects of microplastics on soil health, crop productivity, and food safety to ensure sustainable agricultural production in the face of increasing environmental pollution.

Key words: Abiotic stress, Oxidative stress, Photosynthetic pigments, Proline accumulation, Soil contamination

پژوهش‌های حفاظت گیاهان ایران
https://jpp.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۹ شماره ۳، پاییز ۱۴۰۴، ص. ۳۳۰-۳۱۷

اثر تنش غیر زیستی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن بر جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه گندم (*Triticum aestivum* L.)

جواد کریمی[1*]، سعیده اربابی[1]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷

چکیده

در سال‌های اخیر، آلودگی میکروپلاستیکی به‌ویژه پلی‌اتیلن، به‌عنوان یک تهدید جدی برای بوم‌نظام‌های کشاورزی شناخته شده است. در این پژوهش، اثرات میکروپلاستیک پلی‌اتیلن بر جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه گندم (*Triticum aestivum* L.) بررسی شد. این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار سطح غلظتی (۰، ۱، ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و چهار تکرار انجام گردید. شاخص‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی شامل درصد جوانه‌زنی، رشد ریشه و ساقه، زیست‌توده، رنگدانه‌های فتوسنتزی و محتوای پرولین ارزیابی شد. نتایج نشان داد که غلظت‌های بالا (۱۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) به‌طور معنی‌داری جوانه‌زنی را کاهش دادند، درحالی‌که در غلظت پایین (یک میلی‌گرم بر لیتر) تغییر محسوسی مشاهده نشد. رشد ریشه در تمام غلظت‌ها افزایش یافت، امّا رشد ساقه در غلظت‌های متوسط و بالا کاهش نشان داد. زیست‌توده ریشه افزایش و زیست‌توده ساقه کاهش یافت که نشان‌دهنده پاسخ‌های متفاوت اندام‌های گیاه به میکروپلاستیک‌ها است. میزان کلروفیل در غلظت متوسط، افزایش و در غلظت بالا، کاهش یافت که احتمالاً ناشی از تنش اکسیداتیو است. الگوی تغییرات کاروتنوئید مشابه بود. همچنین پرولین در غلظت‌های بالا افزایش یافت که بیانگر فعال‌سازی سازوکارهای دفاعی گیاه است. این نتایج نشان می‌دهد که آلودگی میکروپلاستیکی می‌تواند اثرات منفی بر رشد و سلامت گیاهان زراعی داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، تجمع پرولین، تنش اکسیداتیو، تنش غیر زیستی، رنگدانه‌های فتوسنتزی

مقدمه

در سال‌های اخیر، آلودگی محیط زیست ناشی از مصرف بی‌رویه پلاستیک‌ها و تجزیه آن‌ها به ذرات کوچک‌تر، یعنی میکروپلاستیک‌ها، به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی جهان تبدیل شده است. میکروپلاستیک‌ها به ذرات پلاستیکی با اندازه کمتر از پنج میلی‌متر اطلاق می‌شوند و به‌دلیل پایداری شیمیایی بالا، قابلیت تجزیه‌ناپذیری و اندازه کوچک، به‌راحتی در آب، خاک و هوا منتشر می‌شوند. این مواد آلاینده نه‌تنها بر کیفیت محیط زیست اثر منفی دارند، بلکه به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر سلامت موجودات زنده از جمله گیاهان، حیوانات و انسان‌ها تأثیرات منفی می‌گذارند (Andrady, 2011; Zhou et al., 2020).

منابع تولید میکروپلاستیک‌ها را می‌توان به دو دسته اولیه و ثانویه تقسیم کرد. میکروپلاستیک‌های اولیه شامل ذرات ریز پلاستیکی هستند که به‌طور عمده در انواع محصولات آرایشی و بهداشتی، شوینده‌ها، صنایع دارویی، پوشاک مصنوعی، کودهای شیمیایی و مواد صنعتی مانند پلت‌های پلاستیکی استفاده می‌شوند (Horton *et al.*, 2017). در مقابل، میکروپلاستیک‌های ثانویه از تجزیه پلاستیک‌های بزرگ‌تر تحت تأثیر نور خورشید، سایش مکانیکی و تخریب شیمیایی ایجاد می‌شوند و از منابعی مانند بقایای مواد پلاستیکی استفاده‌شده در زمین‌های کشاورزی، لاستیک وسایل نقلیه، نخ‌های مصنوعی و زباله‌های پلاستیکی شهری سرچشمه می‌گیرند (Rochman *et al.*, 2019).

یکی از رایج‌ترین انواع میکروپلاستیک‌ها، پلی‌اتیلن است که بیشترین سهم را در تولید جهانی پلاستیک دارد و به‌دلیل ویژگی‌هایی مانند سبکی، انعطاف‌پذیری، پایداری شیمیایی و مقاومت در برابر

۱- بخش زیست شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: javadkarimi@shirazu.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jpp.2025.9223.1224

رطوبت، در طیف وسیعی از محصولات استفاده می‌شود و به‌طور گسترده در تولید انواع بسته‌بندی‌ها، کیسه‌های پلاستیکی و محصولات کشاورزی مانند مالچ پلاستیکی استفاده می‌شود. (Hurley *et al.*,; Geyer *et al.*, 2017Boonsong *et al.*, 2025 ; 2024). مطالعات نشان داده‌اند که پلی‌اتیلن یکی از اصلی‌ترین ترکیبات میکروپلاستیک‌های موجود در محیط‌زیست است که از طریق تخریب مکانیکی و فتواکسیداسیون بسته‌بندی‌ها، کیسه‌های پلاستیکی و فیلم‌های کشاورزی در بوم‌نظام‌های خاکی و آبی آزاد می‌شود (Rillig *et al.*, 2019). به‌ویژه در کشاورزی، مالچ‌های پلاستیکی پلی‌اتیلنی به‌طور گسترده برای افزایش بازده محصول و کاهش تبخیر آب استفاده می‌شوند، امّا تجزیه ناقص آن‌ها موجب ورود مقادیر زیادی میکروپلاستیک به خاک می‌شود که می‌تواند تأثیرات منفی بر خصوصیات فیزیکی خاک و رشد گیاه داشته باشد (Liang *et al.*, 2024).

بااین‌حال، حضور پلی‌اتیلن در محیط زیست، به‌ویژه در خاک‌های کشاورزی، نگرانی‌های جدی در مورد تأثیرات آن بر سلامت خاک و رشد گیاهان ایجاد کرده است. این ذرات پلاستیکی کوچک می‌توانند به‌طور مستقیم با ریشه گیاهان تعامل داشته باشند یا از طریق تغییر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، فرآیندهای حیاتی رشد گیاهان را مختل کند (Tian *et al.*, 2022). تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که میکروپلاستیک‌ها با ایجاد تغییر در تراکم، تخلخل و ساختار خاک، می‌توانند بر حرکت آب و مواد مغذی در خاک تأثیر بگذارند (Li *et al.*, 2024). همچنین میکروپلاستیک‌ها می‌توانند با تجمع در اطراف ریشه‌ها، تبادل گازها و فرآیندهای تنفسی گیاه را مختل کنند (Chen *et al.*, 2024). از سوی دیگر، برخی مطالعات گزارش داده‌اند که میکروپلاستیک‌ها قادرند ترکیبات شیمیایی مضر را آزاد کرده و بر تولید متابولیت‌های ثانویه و اولیه گیاهان اثر منفی بگذارند. این اثرات می‌توانند منجر به کاهش عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی شوند (Jadhav & Medyńska-Juraszek, Iqbal *et al.*, 2024 ; 2024).

گیاهان به‌عنوان پایه‌های زنجیره غذایی، نقش حیاتی و بسیار مهم در بوم‌نظام‌ها و کشاورزی ایفا می‌کنند. گیاهان زراعی به‌ویژه محصولات استراتژیکی نظیر گندم (*Triticum aestivum* L.)، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع غذایی جهان، نقش کلیدی در تأمین امنیت غذایی بشر دارند. گندم با دارا بودن سطح زیرکشت وسیع و نقش اساسی در تغذیه انسان‌ها و دام‌ها، از جمله محصولاتی است که بیشترین تأثیر را از آلودگی‌های زیست‌محیطی به‌ویژه آلودگی میکروپلاستیکی ایفا می‌کند (Yan *et al.*, 2024).

اهمیت گندم به‌عنوان یک محصول استراتژیک در تأمین امنیت غذایی جهانی، جایگاه ویژه‌ای به این گیاه در نظام کشاورزی و تغذیه انسان‌ها بخشیده است. گندم یکی از مهم‌ترین منابع کربوهیدرات در رژیم غذایی میلیاردها نفر در سراسر جهان به شمار می‌آید و نقش حیاتی در ثبات اقتصادی و سیاسی بسیاری از کشورها ایفا می‌کند. با توجه به این اهمیت بنیادین، هرگونه عامل تهدیدکننده سلامت و رشد گندم می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای برای تولید غذا و پایداری کشاورزی داشته باشد (Shiferaw *et al.*, 2013). از جمله این تهدیدات، گسترش آلودگی‌های ناشی از میکروپلاستیک‌ها است که به‌ویژه پلی‌اتیلن به‌عنوان یکی از رایج‌ترین انواع آن‌ها، نگرانی‌های زیست‌محیطی فزآینده‌ای را به وجود آورده است (Yao *et al.*, 2022). میکروپلاستیک‌ها به‌عنوان آلاینده‌های نوظهور، نگرانی‌های فزآینده‌ای را در خصوص تأثیرات بالقوه آن‌ها بر محیط زیست و سلامت موجودات زنده ایجاد کرده‌اند؛ بااین‌حال، شکاف‌های قابل‌توجهی در درک علمی ما از اثرات آن‌ها بر گیاهان زراعی، به‌ویژه محصولات استراتژیکی مانند گندم وجود دارد. بیشتر مطالعات پیشین بر بوم‌نظام‌های آبی متمرکز بوده‌اند و اطلاعات محدودی درباره واکنش‌های فیزیولوژیکی و رشدی گیاهان خاکزی در مواجهه با انواع، اندازه‌ها و غلظت‌های مختلف میکروپلاستیک‌ها در دست است. ازاین‌رو، بررسی دقیق اثرات میکروپلاستیک‌ها بر مراحل حیاتی رشد گیاهان مانند جوانه‌زنی، رشد ریشه و ساقه و تغییرات بیوشیمیایی، گامی ضروری در جهت شناخت بهتر این چالش زیست‌محیطی و تضمین پایداری کشاورزی و امنیت غذایی به شمار می‌رود (De Silva *et al.*, 2021).

در همین راستا، پژوهش حاضر به بررسی اثرات میکروپلاستیک پلی‌اتیلن بر فرآیند جوانه‌زنی و رشد گیاهچه گندم می‌پردازد. در این مطالعه، شاخص‌های مهمی نظیر درصد جوانه‌زنی، رشد ریشه و ساقه، وزن تر و خشک، میزان کلروفیل‌های a و b، کاروتنوئیدها و پرولین برگ، در معرض غلظت‌های مختلف میکروپلاستیک مورد ارزیابی قرار گرفته و با گروه‌های شاهد مقایسه شده‌اند. نتایج این تحقیق می‌تواند به درک دقیق‌تری از تأثیرات منفی میکروپلاستیک‌ها بر محصولات استراتژیک کشاورزی منجر شده و لزوم تدوین راهکارهایی جهت کاهش اثرات آن‌ها بر پایداری تولید و امنیت غذایی را برجسته سازد.

مواد و روش‌ها

کشت بذر

آزمایش به‌شکل فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار سطح صفر، ۱ ، ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن و چهار تکرار انجام شد. بذر گیاه گندم (*Triticum aestivum* L.)، از دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز تهیه گردید. پس از ۲۴ ساعت شناوری در آب مقطر و ۲۴ ساعت رشد درون پارچه تنظیف، درصد جوانه‌زنی محاسبه شد. بذرهای جوانه‌زده درون گلدان‌هایی با قطر ۱۰ سانتی‌متر و حاوی پرلیت کشت گردید (در هر گلدان ۱۰ بذر با اندازه

یکسان). محلول هوگلند (طبق جدول ۱) تهیه و به‌میزان یکسان به همه گلدان‌ها در فواصل زمانی یک روز در میان اضافه شد. آزمایش در اتاقک کشت آزمایشگاه با دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی (با شدتی در حدود ۱۵۰۰۰ لوکس نور) و هشت ساعت تاریکی، دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد انجام شد.

تیماردهی

پس از گذشت یک هفته از زمان کشت بذرها، تیمار دهی اعمال شد. محلول‌های میکروپلاستیک پلی‌اتیلن در چهار غلظت صفر، ۱، ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به گیاهچه‌های کاشته‌شده در محلول آبی یا مخلوط با پرلیت اضافه گردید. میکروپلاستیک‌های پلی‌اتیلن(PE) با شکل نامنظم، که از آسیاب کردن و الک کردن پلی‌اتیلن خالص با چگالی کم (LDPE) مشتق شده‌اند، از دانشگاه تورون لهستان تهیه شدند. قطر ذرات در محدوده بین ۲/۵ تا حدود هشت میکرومتر بود. پس‌از پایان تیماردهی (دو هفته پس از زمان کشت بذرها و یک هفته پس از تیماردهی)، گیاهان برای ارزیابی میزان رشد ریشه و ساقه، وزن تر و خشک ریشه و ساقه، میزان کلروفیل a و b، میزان کاروتنوئید و مقدار پرولین برداشت شدند.

جدول ۱- ترکیبات محیط کشت هوگلند

مواد	غلظت
Substances	**Concentration**
KNO_3	101.10 g L^{-1}
$Ca(NO_3)_2\ 4H_2O$	236.16 g L^{-1}
$NH_4H_2PO_4$	115.08 g L^{-1}
$MgSO_4.7H_2O$	246.48 g L^{-1}
KCL	1.864 g L^{-1}
H_3BO_3	0.773 g L^{-1}
$MnSO_4$-H_2O	0.169 g L^{-1}
$ZnSO_4.7H_2O$	0.288 g L^{-1}
$CuSO_4.SH_2O$	0.962 g L^{-1}
H_2MoO_4(0/85 MoO_3)	0.040 g L^{-1}
NaFe DTPA	30.0 g L^{-1}

روش‌ها

اندازه‌گیری طول ساقه، طول ریشه، وزن خشک و وزن تر: برای اندازه‌گیری طول ساقه و ریشه از هر محیط کشت با غلظت متفاوت از میکروپلاستیک پلی‌اتیلن، طول ساقه و ریشه هر گیاه جداگانه اندازه‌گیری و میانگین آن محاسبه و برحسب سانتی‌متر گزارش گردید. برای اندازه‌گیری وزن تر نیز پس از جدا کردن ریشه از ساقه و خشک کردن رطوبت سطحی با دستمال کاغذی، با استفاده از ترازوی دقیق، وزن تر ریشه و ساقه گیاه اندازه‌گیری شد. سپس ریشه و ساقه هر تیمار به‌مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۴۵ درجه قرار گرفت تا به‌طور کامل خشک گردد و وزن خشک نمونه‌ها اندازه‌گیری و برحسب گرم گزارش شد.

سنجش محتوای کلروفیل a و b و کاروتنوئید: سنجش محتوای کلروفیل a و b و کاروتنوئید برگ گیاه گندم در معرض تیمار غلظت‌های مختلف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن و نمونه شاهد به‌روش آرنون (Arnon, 1949) انجام شد. برای این منظور، ابتدا ۰/۵ گرم از بافت تر گیاه در هاون چینی ریخته شد و با ازت مایع به‌خوبی سائیده و خرد گردید. ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد به نمونه‌ها اضافه و به‌خوبی مخلوط شد. سپس به‌مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفوژ شد. محلول فوقانی برای اندازه‌گیری میزان کلروفیل و کاروتنوئید برداشت شد و مورد استفاده قرار گرفت. میزان جذب این محلول در طول موج ۶۶۳ نانومتر برای کلروفیل a، طول موج ۶۴۵ برای کلروفیل b و طول موج ۴۷۰ نانومتر برای کاروتنوئید اندازه‌گیری شد (دستگاه اسپکتوفتومتر VU-VIS مدل LAMBDA 365 ساخت آمریکا). در نهایت برای سنجش محتوای کلروفیل و کاروتنوئید از معادله‌های ۱ تا ۳ استفاده و مقادیر به‌دست‌آمده برحسب میکروگرم بر گرم وزن تر گزارش شد.

$$Chl.a\ (mg\ g^{-1}\ FW) = 12.25\ A_{663} - 2.79\ A_{646} \quad (۱)$$

$$Chl.b\ (mg\ g^{-1}\ FW) = 21.50\ A646 - 5.10\ A663 \quad (۲)$$

$$Car\ (mg\ g^{-1}\ FW) = (1000\ A470 - 1.8\ Chl\ a - 85.02\ Chl\ b)/198 \quad (۳)$$

اندازه‌گیری پرولین

اندازه‌گیری محتوای پرولین با استفاده از روش نین‌هیدرین: اندازه‌گیری محتوای پرولین با استفاده از اسید نین هیدرین طبق روش بیتس و همکاران (Bates *et al.*, 1973) انجام شد. برای این منظور، ابتدا ۰/۱ گرم بافت برگ گیاه در ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوسالسیلیک سه درصد در هاون چینی به‌خوبی سائیده شد، سپس مخلوط حاصل در درون لوله آزمایش ریخته شده و ۲۰ دقیقه با سرعت ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفوژ گردید. دو میلی‌لیتر از عصاره صاف‌شده برداشته و در یک لوله آزمایش ریخته شد. سپس به هر لوله دو میلی‌لیتر معرف نین‌هیدرین و دو میلی‌لیتر اسید استیک گلایسال خالص اضافه گردید. لوله‌های آزمایش در بن‌ماری با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت یک ساعت قرار گرفت، پس از یک ساعت، لوله‌ها جهت خاتمه واکنش در داخل حمام یخ گذاشته شد. پس از سرد شدن لوله‌ها، به آن‌ها چهار میلی‌لیتر تولوئن افزوده و ۳۰ ثانیه به هم زده شد و پس از تشکیل دو فاز مجزا، قسمت رنگی برداشته و میزان جذب آن ها توسط اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر خوانده شد. غلظت پرولین برحسب میکرومول برگرم وزن تر با استفاده از رابطه ۴ محاسبه و گزارش شد.

$$[(\mu g\ proline.ml^{-1} \times ml\ toluene)/115.5\ \mu g\ \mu mol^{-1}] / [(g\ sample)/ 5 = \mu moles\ proline\ g^{-1}\ of\ fresh\ weight \quad (٤)$$

تجزیه و تحلیل آماری

آنالیز داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS و آزمون ANOVA صورت گرفت. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

در این پژوهش، به‌منظور بررسی اثر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن بر رشد و فیزیولوژی گیاهچه‌های گندم، شاخص‌های مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفت. این شاخص‌ها شامل درصد جوانه‌زنی (جهت بررسی توان زیستی بذرها در آغاز رشد)، میزان رشد ریشه و ساقه (برای سنجش توسعه ساختار گیاهی در مرحله گیاهچه‌ای)، وزن تر و خشک (به‌منظور ارزیابی تجمع زیست‌توده و آب در اندام‌های گیاه)، و نیز میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدها (به‌عنوان شاخص‌های عملکرد فتوسنتزی) بود. همچنین مقدار پرولین نیز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اسیدهای آمینه در پاسخ‌های تنشی گیاهان اندازه‌گیری شد، چرا که افزایش آن معمولاً نشان‌دهنده واکنش گیاه به شرایط تنش‌زا نظیر آلودگی‌های محیطی است. این شاخص‌ها به‌صورت کمّی و در مقایسه با گروه شاهد بررسی شدند و به‌عنوان معیارهای حساس به تنش‌های زیست‌محیطی در مراحل اولیه رشد گیاه در نظر گرفته شدند. تغییرات آن‌ها می‌تواند بازتابی از پاسخ فیزیولوژیکی گیاه به حضور آلاینده‌ها باشد. در ادامه، نتایج هرکدام از موارد مذکور به‌تفکیک با جزئیات بیشتر بیان خواهد شد.

اثر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن بر درصد جوانه‌زنی بذر گیاه گندم

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در غلظت‌های ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، میکروپلاستیک پلی‌اتیلن منجر به کاهش معنی‌دار درصد جوانه‌زنی شد، درحالی‌که در غلظت یک میلی‌گرم بر لیتر، اثر معنی‌داری مشاهده نشد که نشان می‌دهد پاسخ گیاه به میکروپلاستیک‌ها وابسته به غلظت آن است.

مطابق با یافته‌های گونگ و همکاران (Gong *et al.*, 2021) که روی جوانه‌زنی چندین بذر گیاه (کاهوی ایتالیایی، تربچه، گندم و ذرت) انجام گردید، میکروپلاستیک، شاخص‌های جوانه‌زنی را کاهش داد. جوانه‌زنی بذر، به‌عنوان اولین مرحله در رشد گیاه، به شرایط تنش بسیار حساس است. یکی از انواع تنش‌هایی که می‌تواند بر جوانه‌زنی تأثیر بگذارد، تنش میکروپلاستیک است. این نوع تنش با مسدود کردن منافذ موجود در پوشش بذر، فرآیند جوانه‌زنی را کاهش می‌دهد. در نتیجه، جذب آب و فرآیندهای مربوط به آن نیز کاهش می‌یابد و مانع شکستن خواب بذر می‌شود (Lian *et al.*, 2020). به نظر می‌رسد که میکروپلاستیک پلی‌اتیلن روی سطح بذر تجمع یافته و تبادلات آب، گازها و مواد مغذی را تحت تأثیر قرار داده است. گزارش شده است که میکروپلاستیک از طریق تغییر در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محیط ریشه یا بذر، جذب آب را کاهش دهند. این اثرات منفی به‌طور عمده به‌دلیل ایجاد تنش اکسیداتیو، آسیب به غشاهای سلولی، اختلال در جذب آب، مواد معدنی و کاهش فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی است (Li X *et al.*, 2023).

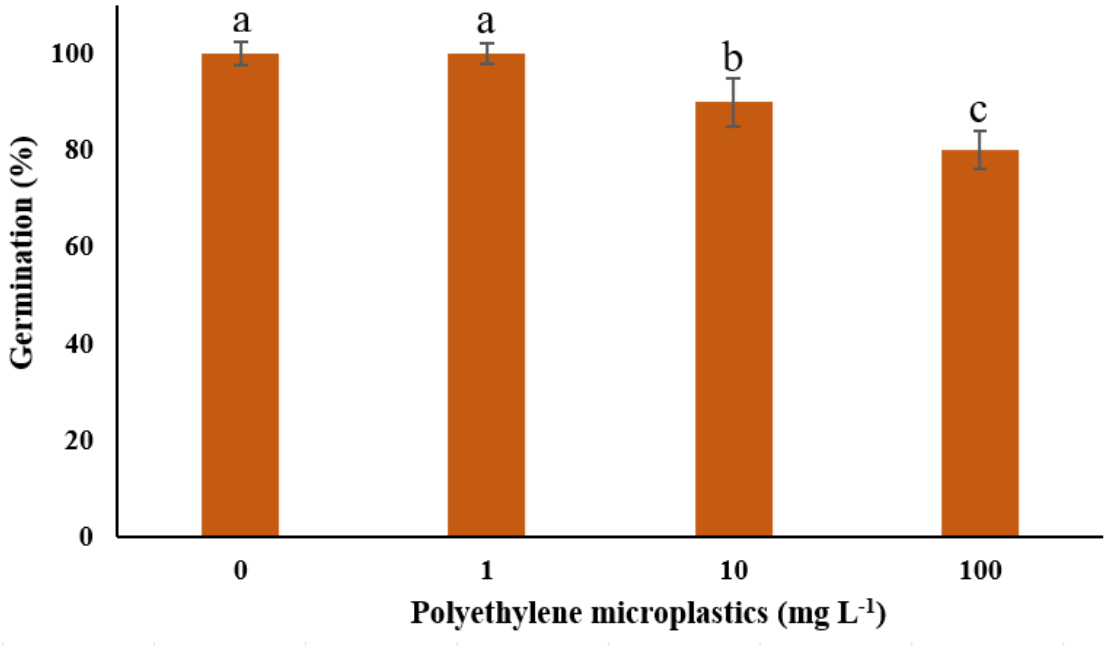
اثر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن بر میزان رشد ریشه و ساقه گیاهچه گندم

نتایج نشان داد که رشد ریشه گیاهچه گندم در هر سه غلظت میکروپلاستیک پلی‌اتیلن افزایش معنی‌دار نسبت به نمونه شاهد داشت. این افزایش به‌ترتیب حدود ۱۹، ۵۲، ۶۸ درصد نسبت به نمونه شاهد در غلظت‌های ۱، ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن بود. در مقابل، رشد ساقه در دو غلظت متوسط (۱۰ میلی‌گرم بر لیتر) و شدید (۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) میکروپلاستیک پلی‌اتیلن به‌ترتیب حدود ۱۵ و ۲۵ درصد کاهش معنی‌دار نسبت به نمونه شاهد داشت و نمونه تیمار ملایم (یک میلی‌گرم بر لیتر) تأثیر معنی‌داری بر رشد ساقه نداشت.

میکروپلاستیک پلی‌اتیلن در غلظت‌های مختلف تأثیر مثبتی بر رشد ریشه گیاهچه‌های گندم داشت. افزایش رشد ریشه ممکن است به‌عنوان یک پاسخ تطبیقی به تنش تلقی شود، به‌طوری‌که گیاه برای بهبود جذب آب و مواد مغذی، انرژی بیشتری به توسعه ریشه اختصاص می‌دهد. افزایش رشد ریشه در حضور میکروپلاستیک‌ها ممکن است نشان‌دهنده یک پاسخ به تنش گیاه باشد. گیاهان ممکن است در مواجهه با تنش‌های محیطی مانند حضور میکروپلاستیک‌ها، مواد مغذی و انرژی بیشتری را به رشد ریشه اختصاص دهند تا بتوانند مواد مغذی و آب بیشتری جذب کنند. این افزایش رشد ممکن است سازوکاری برای مقابله با شرایط نامساعد محیطی از طریق بهبود در جذب مواد مغذی و آب توسط ریشه‌ها باشد (Jia *et al.*, 2023).

در مقابل، کاهش رشد ساقه در غلظت‌های بالاتر می‌تواند به‌دلیل اختلال در هورمون‌های رشد و مسیرهای متابولیکی باشد. کاهش در تخصیص منابع به بخش‌های هوایی به‌نفع توسعه بخش زیرزمینی (ریشه) در شرایط تنش، نشان‌دهنده یک بازآرایی در توزیع منابع در پاسخ به فشار محیطی است که این الگوی رشد می‌تواند به کاهش

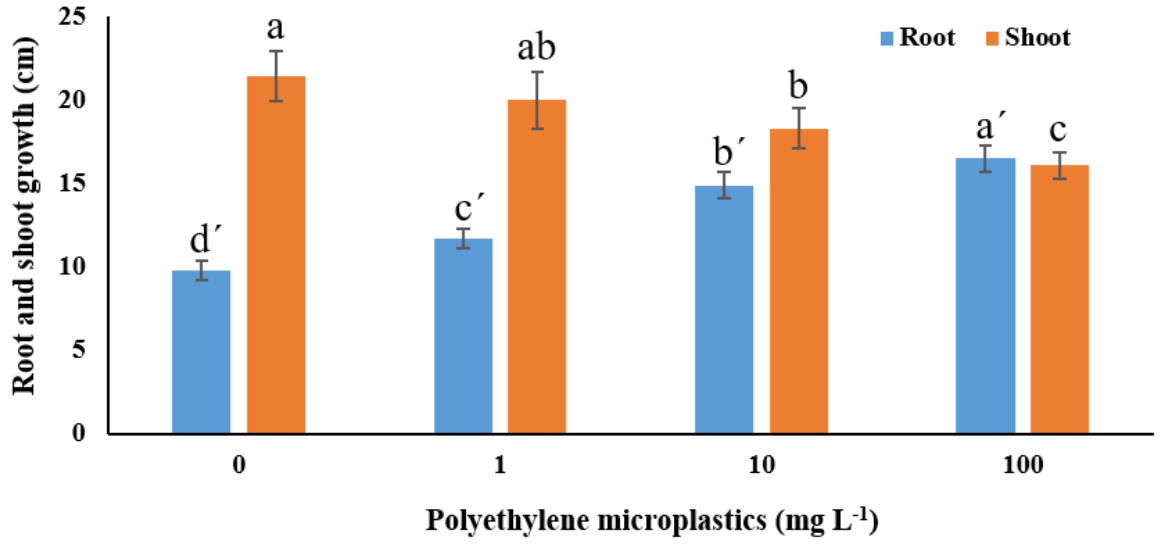
ارتفاع نهایی گیاه و افت عملکرد منجر شود.



شکل ۱- درصد جوانه‌زنی بذر گندم در معرض غلظت‌های مختلف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن

هر سری داده میانگین چهار تکرار است. حروف متفاوت اختلاف معنی‌داری را در سطح p<0.05 نشان می‌دهد. Error bar براساس انحراف معیار (± SD) می‌باشد

Figure 1. Percentage of wheat seed germination under different concentrations of polyethylene microplastics.
Each data series represents the mean of four replicates. Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$. Error bars represent standard deviation (±SD).



شکل ۲- طول ریشه و ساقه گیاهچه گندم در معرض غلظت‌های مختلف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن

هر سری داده میانگین چهار تکرار است. حروف متفاوت اختلاف معنی‌داری را در سطح p<0.05 نشان می‌دهد. Error bar براساس انحراف معیار (± SD) می‌باشد

Figure 2. Root and shoot length of wheat seedlings under different concentrations of polyethylene microplastics.
Each data series represents the mean of four replicates. Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$. Error bars represent standard deviation (±SD).

کاهش رشد ساقه در غلظت‌های بالاتر میکروپلاستیک‌ها ممکن است نشان‌دهنده تأثیر منفی این مواد بر متابولیسم و تقسیم سلولی در بخش‌های هوایی گیاه باشد. این کاهش می‌تواند ناشی از اختلال در جذب مواد مغذی، تولید هورمون‌های رشد یا سمّیت مستقیم میکروپلاستیک‌ها باشد. عدم کاهش معنی‌دار رشد ساقه در تنش ملایم نیز می‌تواند به‌علت پایین بودن سطح تنش در این غلظت باشد، زیرا به نظر می‌رسد که به میزانی نیست که باعث تغییرات شدید در تخصیص منابع یا افزایش تنش اکسیداتیو شود (Kumar *et al.*, 2024).

این نتایج نشان می‌دهد که میکروپلاستیک‌های پلی‌اتیلن می‌توانند تأثیرات متفاوتی بر رشد گیاهچه گندم داشته باشند. افزایش رشد ریشه در غلظت‌های بالا می‌تواند به‌عنوان یک سازوکار جبرانی در برابر تنش تلقی شود، امّا این افزایش با کاهش رشد ساقه همراه است که می‌تواند نشان‌دهنده تأثیرات منفی بر رشد کلی گیاه باشد.

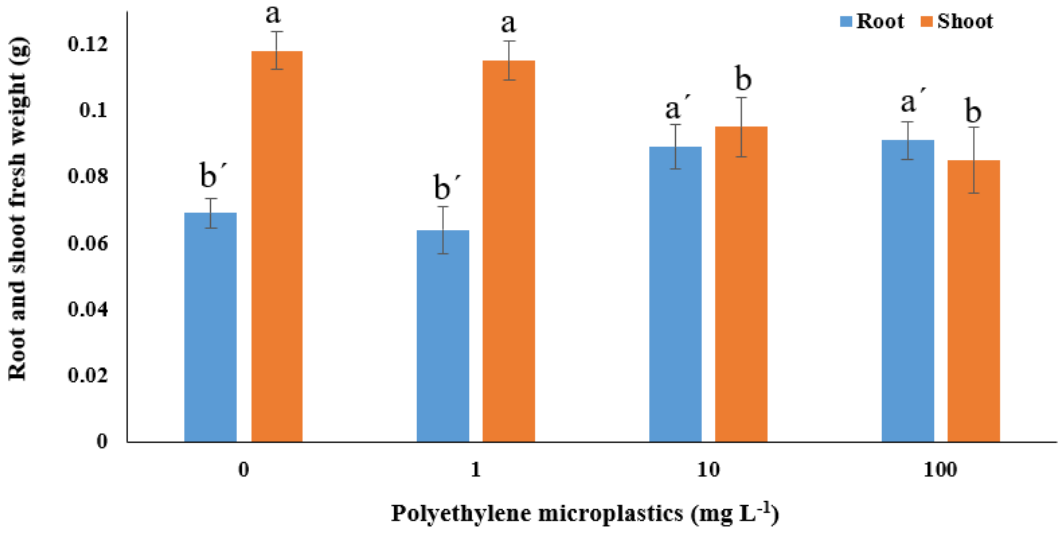
اثر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن بر وزن تر و خشک ریشه و ساقه گیاهچه گندم

نتایج این مطالعه نشان داد که وزن تر ریشه در غلظت‌های ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن نسبت به نمونه شاهد به‌ترتیب ۲۸ درصد و ۳۱ درصد افزایش معنی‌داری داشت، امّا در غلظت یک میلی‌گرم در لیتر تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد مشاهده نشد (شکل ۳). در مورد وزن تر ساقه نیز در غلظت یک میلی‌گرم در لیتر تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد مشاهده نشد، امّا در دو غلظت ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن نسبت به نمونه شاهد به‌ترتیب ۲۰ درصد و ۲۸ درصد کاهش معنی‌داری دیده شد (شکل ۳). در مورد وزن خشک ریشه و ساقه نیز مشابه وزن تر، الگوی افزایش و کاهش یکسان بود. وزن خشک ریشه گیاهچه گندم در دو غلظت ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن نسبت به نمونه شاهد به‌ترتیب ۳۹ درصد و ۶۹ درصد افزایش معنی‌داری داشت (شکل ۴). همچنین در وزن خشک ساقه گیاهچه گندم در دو غلظت ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن نسبت به نمونه شاهد به‌ترتیب ۲۶ درصد و ۴۰ درصد کاهش معنی‌داری مشاهده شد (شکل ۴).

به‌طور کلی، وزن تر و خشک ریشه در غلظت‌های بالاتر افزایش یافت، درحالی‌که همین شاخص‌ها برای ساقه کاهش نشان دادند. این تفاوت، به تغییرات در تخصیص منابع در پاسخ به تنش اشاره دارد. افزایش وزن ریشه ممکن است به‌دلیل افزایش تعداد یا ضخامت ریشه‌ها در پاسخ به کاهش دسترسی به آب یا مواد معدنی باشد. از سوی دیگر، کاهش وزن ساقه ممکن است نتیجه کاهش فتوسنتز، اختلال در انتقال مواد فتوسنتزی یا تأثیر منفی بر رشد مریستم‌های ناحیه هوایی باشد. در تنش کم، میزان میکروپلاستیک‌ها ممکن است به اندازه‌ای نباشد که اثرات منفی قابل توجهی بر گیاه بگذارد. در این حالت، گیاه ممکن است قادر به سازگاری با مقدار کمی میکروپلاستیک باشد و هیچ تأثیر معنی‌داری بر رشد ساقه مشاهده نشود. همچنین ممکن است در تنش‌های کم، این اثرات به‌طور فوری قابل مشاهده نباشند. بنابراین، در مدت زمان کوتاه تأثیرات تنش کم ممکن است بدون تغییر محسوس در وزن تر و خشک ساقه باقی بماند و در صورت تداوم بیشتر تنش، روند کاهشی مشخص شود. در شرایط تنش متوسط و بالای میکروپلاستیک، ممکن است گیاه تحت تأثیر تنش اکسیداتیو قرار گیرد که منجر به آسیب به ساختارهای سلولی، کاهش فتوسنتز و در نهایت کاهش رشد ساقه و کاهش وزن تر و خشک آن شود. در مورد ریشه گیاهچه گندم ممکن است تنش میکروپلاستیک، رشد ریشه را به‌عنوان یک سازوکار دفاعی افزایش دهد تا از خود در برابر اثرات منفی میکروپلاستیک‌ها محافظت کنند و به این دلیل وزن تر و خشک آن افزایش یابد. گائو و همکاران (Gao *et al.*, 2024) نیز گزارش کردند که میکروپلاستیک‌ها می‌توانند موجب کاهش رشد بخش‌های هوایی در گیاه شوند.

اثر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن بر کلروفیل a و b برگ گیاهچه گندم

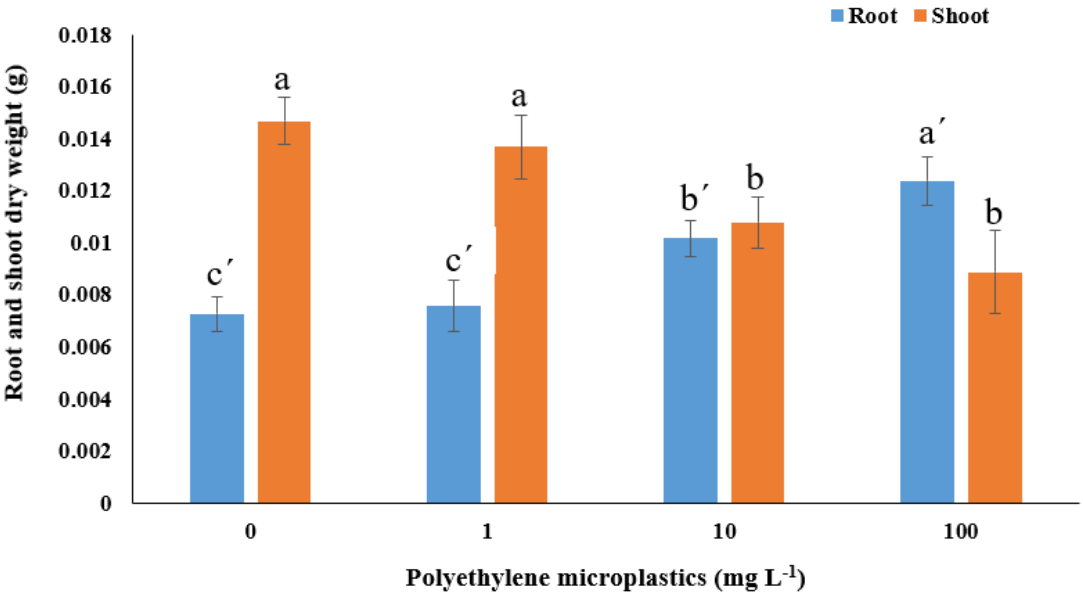
همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، میزان کلروفیل a در تنش ملایم (غلظت یک میلی‌گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن) تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد ندارد، امّا در مواجهه با تنش متوسط (غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن) افزایش معنی‌داری به‌میزان ۲۲ درصد در مقایسه با نمونه شاهد مشاهده شد. در مقابل، در شرایط تنش شدید (غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن) کاهش معنی‌داری در مقایسه با نمونه شاهد به‌میزان ۱۶ درصد نشان داد. در شرایط تنش، گیاه ممکن است تلاش کند تا کارآیی جذب نور را افزایش دهد.کلروفیل، به‌عنوان مولکولی کلیدی در جذب نور و انتقال انرژی در فتوسنتز، نقش مهمی در انطباق گیاه با شرایط نامساعد دارد. افزایش کلروفیل باعث بهبود جذب نور و در نتیجه افزایش نرخ فتوسنتز می‌شود. این سازوکار به گیاه کمک می‌کند تا انرژی بیشتری برای مقابله با تنش تولید کند. به عبارت دیگر تحت تنش متوسط، گیاه ممکن است فعالیت آنزیم‌های کلیدی در مسیر سنتز کلروفیل (مانند کلروفیل سنتاز) را افزایش دهد. این افزایش فعالیت آنزیمی می‌تواند منجر به تجمع بیشتر کلروفیل در برگ‌ها شود.



شکل ۳- وزن تر ریشه و ساقه گیاهچه گندم در معرض غلظت‌های مختلف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن

هر سری داده میانگین چهار تکرار است. حروف متفاوت اختلاف معنی‌داری را در سطح p<0.05 نشان می‌دهد. Error bar براساس انحراف معیار (± SD) می‌باشد

Figure 3. Fresh weight of root and shoot of wheat seedlings under different concentrations of polyethylene microplastics. Each data series represents the mean of four replicates. Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$. Error bars represent standard deviation (±SD).



شکل ٤- وزن خشک ریشه و ساقه گیاهچه گندم در معرض غلظت‌های مختلف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن

هر سری داده میانگین چهار تکرار است. حروف متفاوت اختلاف معنی‌داری را در سطح p<0.05 نشان می‌دهد. Error bar براساس انحراف معیار (± SD) می‌باشد

Figure 4. Dry weight of root and shoot of wheat seedlings under different concentrations of polyethylene microplastics. Each data series represents the mean of four replicates. Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$. Error bars represent standard deviation (±SD).

در تنش شدید و غلظت‌های بالای میکروپلاستیک، گونه‌های فعال اکسیژن (ROS[1]) مانند سوپراکسید، پراکسید هیدروژن و رادیکال‌های هیدروکسیل می‌توانند باعث ایجاد اکسیداتیو در گیاهان شوند و به غشاهای سلولی، پروتئین‌ها و DNA آسیب برساند و همچنین باعث تخریب کلروفیل شود.

در مورد کلروفیل b، گیاهچه گندمِ در معرض تنش کم و متوسط (غلظت ۱ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن) تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد نداشت، ولی در معرض تنش شدید (غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن) کاهش معنی‌داری در مقایسه با نمونه شاهد به‌میزان ۲۰ درصد مشاهده شد (شکل ۵). این نتایج را می‌توان به این صورت تحلیل کرد که کلروفیل b عمدتاً در جذب نور آبی و انتقال آن به مرکز واکنش نقش دارد و کاهش آن می تواند بیانگر آسیب ساختاری به کمپلکس‌های آنتن نوری باشد. در شرایط تنش کم و متوسط، گیاه گندم ممکن است بتواند با فعال‌سازی سازوکارهای تطبیقی مانند افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها یا تنظیم هورمونی، سطح کلروفیل b را حفظ کند و ازاین‌رو تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد مشاهده نمی‌شود. امّا در شرایط تنش شدید، افزایش قابل توجه تنش اکسیداتیو و تجمع گونه‌های فعال اکسیژن و آسیب به ساختار کلروپلاست‌ها، همراه با اختلال در سنتز رنگدانه‌ها به‌ویژه کلروفیل و کاهش جذب مواد مغذی منجر به تخریب مولکول‌های کلروفیل b و کاهش ۲۰ درصدی آن نسبت به نمونه شاهد می‌شود. این کاهش نشان‌دهنده محدودیت توانایی گیاه در تحمل تنش‌های شدید است. مشابه نتایج این پژوهش، لی و همکاران (Li *et al.*, 2023) نشان دادند که تیمار با غلظت بالای میکروپلاستیک به‌طور قابل توجهی محتوای رنگدانه‌های گیاهی (کلروفیل a، b، و کلروفیل کل) را کاهش می‌دهد.

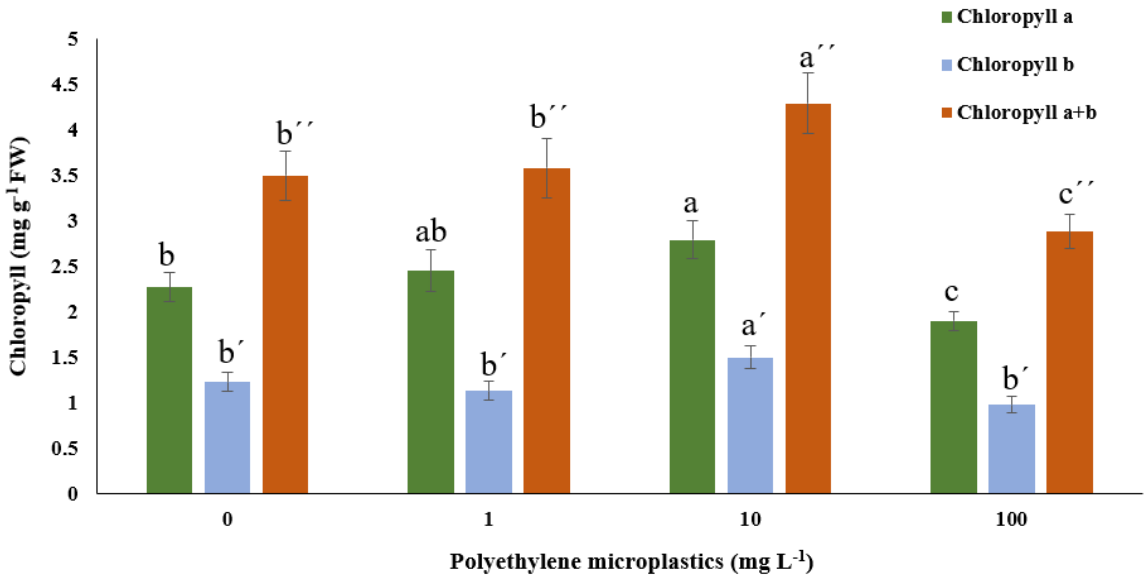
اثر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن بر کاروتنوئید گیاهچه گندم

همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، میزان کاروتنوئید در غلظت یک میلی‌گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد نداشت، درحالی‌که در غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن افزایش معنی‌دار به‌میزان ۲۱ درصد در مقایسه با نمونه شاهد مشاهده شد، امّا در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن کاهش معنی‌داری در مقایسه با نمونه شاهد به‌میزان ۲۱ درصد از خود نشان داد. این پدیده را می‌توان با توجه به پاسخ گیاه به سطوح مختلف تنش ناشی از میکروپلاستیک‌های پلی‌اتیلن توضیح داد. این روند بیانگر پاسخ دوگانه و وابسته به غلظت میکروپلاستیک و میزان تنش است. در غلظت کم، میکروپلاستیک‌ها تأثیر قابل توجهی بر محتوای کاروتنوئیدها ندارند، زیرا گیاه قادر به تحمل این سطح از تنش بدون تغییرات عمده در متابولیسم خود است. در غلظت متوسط، گیاه ممکن است با افزایش سنتز کاروتنوئیدها به‌عنوان یک سازوکار دفاعی در برابر تنش اکسیداتیو پاسخ دهد، زیرا کاروتنوئیدها نقش آنتی‌اکسیدانی داشته و از سلول‌ها در برابر آسیب‌های ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن محافظت می‌کنند. بااین‌حال، در غلظت‌های بسیار بالا، تنش ناشی از میکروپلاستیک‌ها به‌حدی شدید می‌شود که باعث آسیب به ساختارها و عملکرد سلولی، کاهش سنتز کاروتنوئیدها و افزایش تخریب آن‌ها می‌گردد که منجر به کاهش محتوای کاروتنوئیدها می‌شود. این تغییرات نشان‌دهنده پاسخ غیرخطی گیاه به سطوح مختلف تنش است. در آزمایش مشابهی مشخص شد که در پاسخ به تنش میکروپلاستیک، میزان کاروتنوئید، مشابه کلروفیل افزایش می‌یابد (Pignattelli *et al.*, 2020).

اثر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن بر محتوای پرولین برگ گیاهچه گندم

نتایج این مطالعه نشان داد که محتوای پرولین برگ گیاهچه گندم در غلظت‌های ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن نسبت به نمونه شاهد به‌ترتیب ۷۵ درصد و ۱۲۰ درصد افزایش معنی‌داری دارد، امّا در غلظت یک میلی‌گرم در لیتر تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد مشاهده نشد (شکل ۷). افزایش محتوای پرولین در برگ‌های جوانه‌های گندم در مواجهه با غلظت‌های ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن نشان‌دهنده پاسخ دفاعی گیاه به تنش ناشی از میکروپلاستیک‌ها است. پرولین یکی از مهم‌ترین اسمولیت‌های سازگارکننده در پاسخ به تنش‌های زیستی و غیرزیستی است و در شرایط تنش، از سلول‌ها در برابر آسیب‌های ناشی از تنش اکسیداتیو محافظت می‌کند. در غلظت‌های بالاتر میکروپلاستیک، تنش واردشده به گیاه شدیدتر است و در نتیجه گیاه با افزایش سنتز پرولین سعی در حفظ تعادل و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو دارد. در غلظت پایین‌تر (یک میلی‌گرم بر لیتر)، تنش ممکن است به اندازه‌ای نباشد که باعث القاء پاسخ دفاعی قابل توجهی شود، بنابراین تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد مشاهده نمی‌شود. یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج چن و همکاران (Chen *et al.*, 2023) که نشان دادند که القاء تنش میکروپلاستیک در گیاه ماش (*Vigna radiata* L.) منجر به افزایش پرولین می‌شود، مطابقت داشت. پرولین به‌عنوان یک اسیدآمینه شبه‌غیرضروری، در شرایط تنش اکسیداتیو نقش حفاظتی چندگانه‌ای در سلول‌های گیاهی ایفا می‌کند.

1- Reactive oxygen species

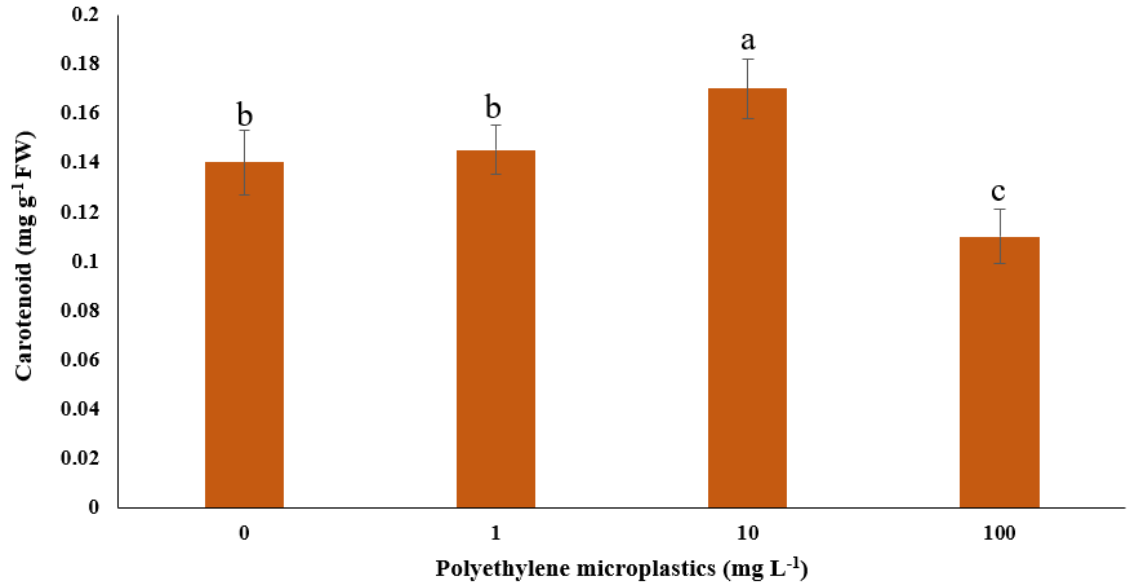


شکل ۵- کلروفیل a، b و مجموع a و b برگ گیاهچه گندم در معرض غلظت‌های مختلف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن

هر سری داده میانگین چهار تکرار است. حروف متفاوت اختلاف معنی‌داری را در سطح p<0.05 نشان می‌دهد. Error bar براساس انحراف معیار (± SD) می‌باشد

Figure 5. Chlorophyll a, b, and total (a + b) content in leaves of wheat seedlings under different concentrations of polyethylene microplastics.

Each data series represents the mean of four replicates. Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$. Error bars represent standard deviation (±SD).



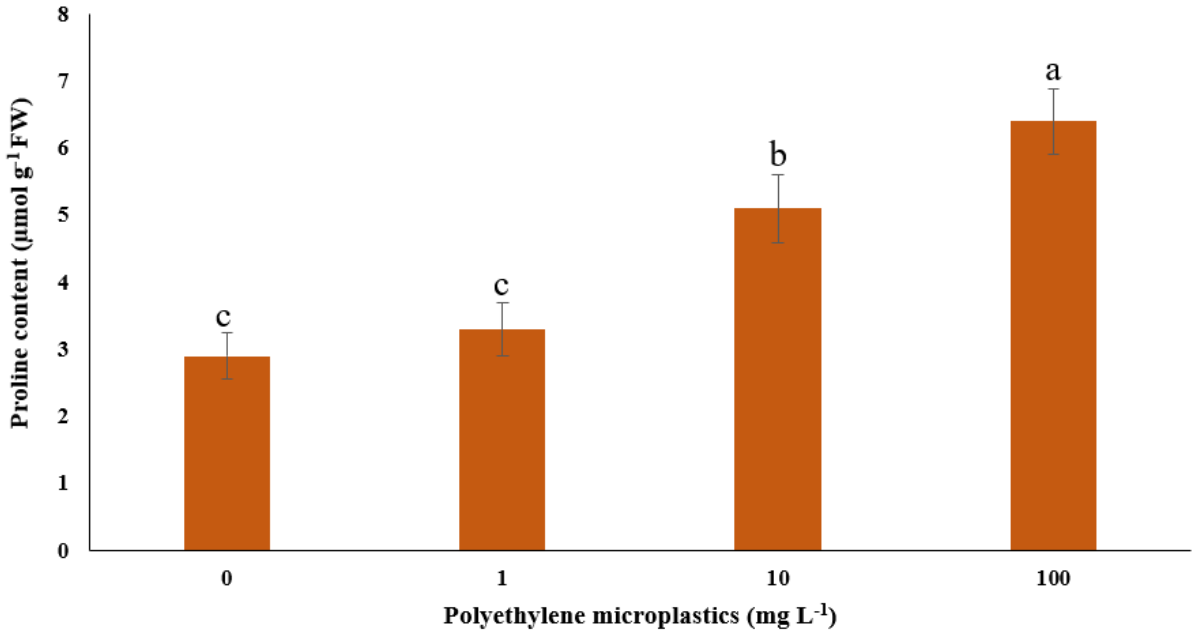
شکل ٦- کاروتنوئید برگ گیاهچه گندم در معرض غلظت‌های مختلف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن

هر سری داده میانگین چهار تکرار است. حروف متفاوت اختلاف معنی‌داری را در سطح p<0.05 نشان می‌دهد. Error bar براساس انحراف معیار (± SD) می‌باشد.

Figure 6. Leaf carotenoid content of wheat seedlings under different concentrations of polyethylene microplastics.

Each data series represents the mean of four replicates. Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$. Error bars represent standard deviation (±SD).

یکی از مهم‌ترین عملکردهای آن، مهار مستقیم گونه‌های فعال اکسیژن از طریق عمل به‌عنوان پایدارکننده ردوکس است؛ پرولین می تواند به‌عنوان دهنده الکترون با گونه‌های فعال اکسیژن واکنش دهد و از آسیب به ساختارهای حیاتی سلولی جلوگیری کند. همچنین این ترکیب در پایداری ساختار پروتئین‌ها و غشاهای زیستی مؤثر است، به‌گونه‌ای‌که از دناتوراسیون پروتئین‌ها و پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی که از پیامدهای مستقیم گونه‌های فعال اکسیژن هستند، جلوگیری می‌کند. افزون بر این، پرولین نقش تنظیم فشار اسمزی را نیز دارد و با جذب آب در سلول، مانع از دهیدراسیون و ایجاد آسیب‌های ثانویه ناشی از تنش می‌شود. پرولین همچنین می‌تواند با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز، به‌صورت غیرمستقیم نیز در کاهش تنش اکسیداتیو ایفای نقش کند. در مجموع، پرولین با مشارکت در سازوکارهای مستقیم و غیرمستقیم، به‌عنوان یک مولکول کلیدی در کاهش آسیب‌های ناشی از تنش اکسیداتیو عمل می‌کند (Szabados & Savoure, 2010).



شکل ۷- محتوای پرولین برگ گیاهچه گندم در معرض غلظت‌های مختلف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن

هر سری داده میانگین چهار تکرار است. حروف متفاوت اختلاف معنی‌داری را در سطح $p<0.05$ نشان می‌دهد. Error bar براساس انحراف معیار (± SD) می‌باشد

Figure 7. Leaf proline content of wheat seedlings under different concentrations of polyethylene microplastics.
Each data series represents the mean of four replicates. Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$. Error bars represent standard deviation (±SD).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن بر ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیکی گیاهچه گندم در سه غلظت مختلف (۱، ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) بررسی شد. نتایج نشان داد که میکروپلاستیک پلی‌اتیلن در غلظت‌های بالا (۱۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) تأثیر منفی معنی‌داری بر جوانه‌زنی بذر دارد، امّا در غلظت پایین (یک میلی‌گرم بر لیتر) تأثیر قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد. همچنین رشد ریشه در تمام غلظت‌ها افزایش یافت که ممکن است به‌عنوان یک سازوکار دفاعی برای بهبود جذب آب و مواد مغذی عمل کرده باشد. در مقابل، رشد ساقه در غلظت‌های متوسط و بالا کاهش یافت که نشان‌دهنده تأثیر منفی میکروپلاستیک بر بخش‌های هوایی گیاه است. وزن تر و خشک ریشه در غلظت‌های بالا افزایش یافت، امّا وزن تر و خشک ساقه کاهش یافت. میزان کلروفیل a و b در غلظت متوسط افزایش پیدا کرد، امّا در غلظت بالا کاهش یافت که نشان‌دهنده ایجاد تنش اکسیداتیو در تنش‌های شدید است. کاروتنوئید نیز در غلظت متوسط افزایش یافت، امّا در غلظت بالا کاهش یافت که نشان از نقش آن در مقابله با تنش اکسیداتیو دارد. در نهایت، محتوای پرولین در غلظت‌های بالا به‌طور قابل توجهی افزایش یافت و نشان‌دهنده فعال‌سازی سازوکارهای دفاعی گیاه در برابر تنش ناشی از میکروپلاستیک است. به‌طور کلی، میکروپلاستیک پلی‌اتیلن تأثیرات

پیچیده‌ای بر رشد و فیزیولوژی گیاه گندم دارد و نشان می‌دهد که غلظت‌های مختلف میکروپلاستیک‌ها می‌توانند اثرات متفاوتی بر رشد گیاه داشته باشند که به‌نوعی تعادل بین سازگاری و آسیب را نشان می‌دهد. با توجه به یافته‌های حاصل، می‌توان نتیجه گرفت که حضور میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های کشت می‌تواند رشد و عملکرد گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار دهد. کاهش درصد جوانه‌زنی و اختلال در رشد ساقه می‌تواند به کاهش تراکم و کیفیت محصولات در مزارع منجر شود و بهره‌وری تولید را کاهش داده و هزینه‌های اقتصادی کشاورزان را افزایش دهد. چنین شرایطی، در مقیاس گسترده، ممکن است امنیت غذایی را در مناطق وابسته به محصولات غلات مانند گندم تهدید کند، به‌ویژه در مناطقی که منابع خاک و آب محدود هستند و آلودگی‌های پلاستیکی رو به افزایش هستند. بنابراین، استفاده از مالچ‌های زیست‌تخریب‌پذیر به‌جای مواد پلاستیکی سنتی در کشاورزی می‌تواند یکی از راهکارهای عملی برای کاهش اثرات منفی میکروپلاستیک‌ها باشد. همچنین برای درک بهتر تأثیرات بلندمدت و تجمعی میکروپلاستیک‌ها، انجام مطالعات میدانی در مقیاس‌های بزرگ‌تر و در شرایط طبیعی خاک پیشنهاد می‌شود. بررسی عملکرد گیاه در دوره رشد کامل، تحلیل ترکیب خاک و مطالعه برهم‌کنش میکروپلاستیک‌ها با میکروبیوم خاک از دیگر محورهای مهمی هستند که باید در پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار گیرند.

References

1. Andrady, A.L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin, 62*(8), 1596-1605. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030
2. Arnon, D.I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplast polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology, 24*, 1-15. https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1
3. Boonsong, P., Ussawarujikulchai, A., Prapagdee, B., & Pansak, W. (2025). Contamination of microplastics in greenhouse soil subjected to plastic mulching. *Environmental Technology & Innovation, 37*, 103991. https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103991
4. Chen, F., Aqeel, M., Khalid, N., Nazir, A., Irshad, M.K., Akbar, M.U., Alzuaibr, F.M., Ma, & JNoman, A. (2023). Interactive effects of polystyrene microplastics and Pb on growth and phytochemicals in mung bean (*Vigna radiata* L.). *Journal of Hazardous Materials, 449*, 130966. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130966
5. Chen Y, Li, Y, Liang, X, Lu, S, Ren, J, Zhang, Y, Han, Z, Gao, BSun, K. (2024). Effects of microplastics on soil carbon pool and terrestrial plant performance. *Carbon Research, 3*(1), 1-23. https://doi.org/10.1007/s44246-024-00124-1
6. De Silva YSK, Rajagopalan, UM, Kadono, H. (2021). Microplastics on the growth of plants and seed germination in aquatic and terrestrial ecosystems. G*lobal Journal of Environmental Science & Management (GJESM)*, 1, 7(3).
7. Gao W, Wu, D, Zhang, D, Geng, Z, Tong, M, Duan, Y, Xia, W, Chu, JYao, X. (2024). Comparative analysis of the effects of microplastics and nitrogen on maize and wheat: Growth, redox homeostasis, photosynthesis, and AsA-GSH cycle. *Science of The Total Environment, 932*, 172555. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172555
8. Geyer R, Jambeck, JRLaw, KL. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances, 3*(7), e1700782. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782
9. Gong W, Zhang, W, Jiang, M, Li, S, Liang, G, Bu, Q, Xu, L, Zhu, HLu, A. (2021). Species-dependent response of food crops to polystyrene nanoplastics and microplastics. *Science of the Total Environment, 796*, 148750. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148750
10. Horton AA, Walton, A, Spurgeon, DJ, Lahive, ESvendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of the Total Environment, 586*, 127-141. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190
11. Hurley R, Binda, G, Briassoulis, D, Carroccio, SC, Cerruti, P, Convertino, F, Dvořáková, D, Kernchen, S, Laforsch, CLöder, MG. (2024). Production and characterisation of environmentally relevant microplastic test materials derived from agricultural plastics. *Science of the Total Environment, 946*, 174325. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174325
12. Iqbal B, Zhao, X, Khan, KY, Javed, Q, Nazar, M, Khan, I, Zhao, X, Li, GDu, D. (2024). Microplastics meet invasive plants: Unraveling the ecological hazards to agroecosystems. *Science of the Total Environment, 906*, 167756. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167756
13. Jadhav B Medyńska-Juraszek, A. (2024). Microplastic and Nanoplastic in Crops: Possible Adverse Effects to Crop Production and Contaminant Transfer in the Food Chain. *Plants, 13*(17), 2526. https://doi.org/10.3390/plants13172526
14. Jia L, Liu, L, Zhang, Y, Fu, W, Liu, X, Wang, Q, Tanveer, MHuang, L. (2023). Microplastic stress in plants: effects on plant growth and their remediations. *Frontiers in plant science, 14*, 1226484. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1226484
15. Kumar D, Biswas, JK, Mulla, SI, Singh, R, Shukla, R, Ahanger, MA, Shekhawat, GS, Verma, KK, Siddiqui, MWSeth, CS. (2024). Micro and nanoplastics pollution: Sources, distribution, uptake in plants, toxicological effects,

and innovative remediation strategies for environmental sustainability. *Plant Physiology and Biochemistry*, 108795. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108795
16. Li F, Huang, D, Wang, G, Cheng, M, Chen, H, Zhou, W, Xiao, R, Li, R, Du, LXu, W. (2024). Microplastics/nanoplastics in porous media: Key factors controlling their transport and retention behaviors. *Science of The Total Environment*, 20;926:171658. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171658
17. Li R, Tu, C, Li, L, Wang, X, Yang, J, Feng, Y, Zhu, X, Fan, QLuo, Y. (2023). Visual tracking of label-free microplastics in wheat seedlings and their effects on crop growth and physiology. *Journal of Hazardous Materials, 456*, 131675. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131675
18. Li X, Wang, R, Dai, W, Luan, YLi, J. (2023). Impacts of micro (nano) plastics on terrestrial plants: germination, growth, and litter. *Plants*, *12*(20), 3554. https://doi.org/10.3390/plants12203554
19. Lian J, Wu, J, Xiong, H, Zeb, A, Yang, T, Su, X, Su, LLiu, W. (2020). Impact of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of hazardous materials*, *385*, 121620. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121620
20. Liang R, Zhang, C, Zhang, R, Li, Q, Liu, HWang, X-X. (2024). Effects of microplastics derived from biodegradable mulch film on different plant species growth and soil properties. *Science of The Total Environment, 948*, 174899. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174899
21. Pignattelli S, Broccoli, ARenzi, M. (2020). Physiological responses of garden cress (*L. sativum*) to different types of microplastics. *Science of The Total Environment, 727*, 138609. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138609
22. Rillig MC, Lehmann, A, de Souza Machado, AAYang, G. (2019). Microplastic effects on plants. *New phytologist*, *223*(3), 1066-1070. https://doi.org/10.1111/nph.15794
23. Rochman CM, Brookson, C, Bikker, J, Djuric, N, Earn, A, Bucci, K, Athey, S, Huntington, A, McIlwraith, HMunno, K. (2019). Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite. *Environmental toxicology and chemistry*, *38*(4), 703-711. https://doi.org/10.1002/etc.4371
24. Shiferaw B, Smale, M, Braun, HJ, Duveiller, E, Reynolds, M, Muricho, G. (2013). Crops that feed the world 10. Past successes and future challenges to the role played by wheat in global food security. *Food security*, *5*, 291-317. https://doi.org/10.1007/s12571-013-0263-y
25. Szabados L, Savoure, A. (2010). Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in plant science*, *15*(2), 89-97. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.11.009
26. Tian L, Jinjin, C, Ji, R, Ma, YYu, X. (2022). Microplastics in agricultural soils: sources, effects, and their fate. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, *25*, 100311. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100311
27. Yan Y, Yang, H, Du, Y, Li, XLi, X. (2024). Effects and molecular mechanisms of polyethylene microplastic oxidation on wheat grain quality. *Journal of Hazardous Materials*, 5;474:134816. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134816
28. Yao Z, Seong, H.J, Jang, Y.S. (2022). Environmental toxicity and decomposition of polyethylene. Ecotoxicology and *Environmental Safety*, *242*, 113933. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113933
29. Zhou Y, Wang, J, Zou, M, Jia, Z, Zhou, SLi, Y. (2020). Microplastics in soils: A review of methods, occurrence, fate, transport, ecological and environmental risks. *Science of the Total Environment*, *748*, 141368. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141368