

# The effect of Polyethylene microplastic on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.)

Javad Karimi\*, Saeideh Arbabi

Department of Biology, College of Science, Shiraz University, Iran

Corresponding Author Email : javadkarimi@shirazu.ac.ir

<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 any factor 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: 0 mg/L (control), 1 mg/L, 10 mg/L, and 100 mg/L, 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 introduced 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: 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 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

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) of PE-MPs had no significant impact on germination rate, moderate (10 mg/L) and high (100 mg/L) 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. 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 and 100 mg/L, 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 and 10 mg/L, 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, 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.

## Discussion

The observed results indicate that polyethylene microplastics have complex and concentration-dependent effects on wheat growth. The 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:** Polyethylene microplastics, growth, seed, wheat seedling.

اثر میکروپلاستیک پلی اتیلن بر جوانه زنی بذر و رشد گیاهچه گندم  
(*Triticum aestivum* L.)

جواد کریمی\* و سعیده اربابی

بخش زیست شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

\*نویسنده مسئول: javadkarimi@shirazu.ac.ir

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

## چکیده

در سال‌های اخیر، آلودگی میکروپلاستیک‌ها به ویژه پلی‌اتیلن، به عنوان یک تهدید جدی برای اکوسیستم‌های کشاورزی شناخته شده است. در این پژوهش اثرات میکروپلاستیک پلی‌اتیلن را بر جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه گندم (*Triticum aestivum* L.) بررسی شد. آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار سطح غلظتی (۰، ۱، ۱۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر) و چهار تکرار انجام شد. شاخص‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی شامل درصد جوانه‌زنی، رشد ریشه و ساقه، زیست‌توده، رنگدانه‌های فتوسنتزی و محتوای پروتئین ارزیابی شد. نتایج نشان داد که غلظت‌های بالا (۱۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر) به طور معناداری جوانه‌زنی را کاهش دادند، در حالی که در غلظت پایین (۱ میلی گرم بر لیتر) تغییر محسوسی مشاهده نشد. رشد ریشه در تمام غلظت‌ها افزایش یافت، اما 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 استرس اکسیداتیو است. الگوی تغییرات کارتنوئید مشابه بود. همچنین، پروتئین در غلظت‌های بالا افزایش یافت که بیانگر فعال‌سازی مکانیسم‌های دفاعی گیاه است. این نتایج نشان می‌دهد که آلودگی میکروپلاستیک می‌تواند اثرات منفی بر رشد و سلامت گیاهان زراعی داشته باشد.

**کلمات کلیدی:** بذر، پلی‌اتیلن، رشد، فیزیولوژی، گیاهچه گندم، میکروپلاستیک

## 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 ۵ میلی‌متر اطلاق می‌شوند و به دلیل پایداری شیمیایی بالا، قابلیت تجزیه‌ناپذیری و اندازه کوچک، به راحتی در آب، خاک و هوا منتشر می‌شوند. این مواد آلاینده نه تنها بر کیفیت محیط زیست اثر منفی دارند، بلکه به طور 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 به طور عمد 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 استفاده شده 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 به دلیل ویژگی‌هایی مانند سبکی، انعطاف‌پذیری، پایداری شیمیایی و مقاومت در برابر رطوبت، در طیف وسیعی از محصولات استفاده می‌شود و به طور گسترده در تولید انواع بسته‌بندی‌ها، کیسه‌های پلاستیکی و محصولات کشاورزی مانند مالچ پلاستیکی استفاده می‌شود. (Boonsong et al., 2024; Geyer et al., 2017; Hurley et al., 2024). مطالعات نشان داده‌اند که پلی‌اتیلن یکی از اصلی‌ترین ترکیبات میکروپلاستیک‌های موجود در محیط زیست است که از طریق تخریب مکانیکی و فتواکسیداسیون بسته‌بندی‌ها، کیسه‌های پلاستیکی و فیلم‌های کشاورزی در اکوسیستم‌های خاکی و آبی آزاد می‌شود (Rillig et al., 2019). به‌ویژه در کشاورزی، مالچ‌های پلاستیکی پلی‌اتیلنی به طور گسترده برای افزایش بازده محصول و کاهش تبخیر آب استفاده می‌شوند، اما 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).

با این حال، حضور پلی اتیلن در محیط زیست، به ویژه در خاک های کشاورزی، نگرانی های جدی در مورد تأثیرات آن بر سلامت خاک و رشد گیاهان ایجاد کرده است. این ذرات پلاستیکی کوچک می توانند به طور 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 داده اند که میکروپلاستیک ها با ایجاد تغییر در تراکم، تخلخل و ساختار خاک، می توانند بر حرکت آب و مواد مغذی در خاک تأثیر بگذارند (Li et al., 2024). همچنین، میکروپلاستیک ها می توانند با تجمع در اطراف ریشه ها، تبادل گازها و فرآیندهای تنفسی گیاه را مختل کنند (Chen et al., 2024). از سوی دیگر، برخی مطالعات گزارش داده اند که میکروپلاستیک ها قادرند ترکیبات شیمیایی مضر را آزاد کرده و بر تولید متابولیت های ثانویه و اولیه گیاهان اثر منفی بگذارند. این اثرات می توانند منجر به کاهش عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی شوند (Iqbal et al., 2024; Jadhav and Medyńska-Juraszek, 2024).

گیاهان به عنوان پایه های زنجیره غذایی، نقش حیاتی و بسیار مهم در اکوسیستم ها و کشاورزی ایفا می کنند. گیاهان زراعی، به ویژه محصولات استراتژیکی نظیر گندم (*Triticum aestivum* L.)، به عنوان یکی از مهم ترین منابع غذایی جهان، نقش کلیدی در تأمین امنیت غذایی بشر دارند. گندم با دارا بودن سطح زیر کشت وسیع و نقش اساسی در تغذیه انسان ها و دام ها، از جمله محصولاتی است که بیشترین تأثیر را از آلودگی های زیست محیطی، به ویژه آلودگی میکروپلاستیکی می پذیرد (Yan et al., 2024).

اهمیت گندم به عنوان یک محصول استراتژیک در تأمین امنیت غذایی جهانی، جایگاه ویژه ای به این گیاه در نظام کشاورزی و تغذیه انسان ها بخشیده است. گندم یکی از مهم ترین منابع کربوهیدرات در رژیم غذایی میلیاردها نفر در سراسر جهان به شمار می آید و نقش حیاتی در ثبات اقتصادی و سیاسی بسیاری از کشورها ایفا می کند. با توجه به این اهمیت بنیادین، هرگونه عامل تهدیدکننده سلامت و رشد گندم می تواند پیامدهای گسترده ای برای تولید غذا و پایداری کشاورزی داشته باشد (Shiferaw et al., 2013). از جمله این تهدیدات، گسترش آلودگی های ناشی از میکروپلاستیک ها است که به ویژه پلی اتیلن به عنوان یکی از رایج ترین انواع آن ها، نگرانی های زیست محیطی فزاینده ای را به وجود آورده است (Yao et al., 2022). میکروپلاستیک ها به عنوان آلاینده های نوظهور، نگرانی های فزاینده ای را درباره تأثیرات بالقوه شان بر محیط زیست و سلامت موجودات زنده ایجاد کرده اند؛ با این حال، شکاف های قابل توجهی در درک علمی ما از اثرات آن ها بر گیاهان زراعی، به ویژه محصولات استراتژیکی مانند گندم، وجود دارد. بیشتر مطالعات پیشین بر اکوسیستم های آبی متمرکز بوده اند و اطلاعات محدودی درباره واکنش های فیزیولوژیکی و رشدی گیاهان خاکزی در مواجهه با انواع، اندازه ها و غلظت های مختلف میکروپلاستیک ها در دست است. از این رو، بررسی دقیق اثرات میکروپلاستیک ها بر مراحل حیاتی رشد گیاهان مانند جوانه زنی، رشد ریشه و ساقه، و تغییرات بیوشیمیایی، گامی ضروری در جهت شناخت بهتر این چالش زیست محیطی و تضمین پایداری کشاورزی و امنیت غذایی به شمار می رود (De Silva et al., 2021).

در همین راستا، پژوهش حاضر به بررسی اثرات میکروپلاستیک پلی اتیلن بر فرآیند جوانه زنی و رشد گیاهچه گندم می پردازد. در این مطالعه، شاخص های مهمی نظیر درصد جوانه زنی، رشد ریشه و ساقه، وزن تر و خشک، میزان کلروفیل های a و b، کاروتنوئیدها و پرولین برگ، در معرض غلظت های مختلف میکروپلاستیک مورد ارزیابی قرار گرفته و با گروه های شاهد مقایسه شده اند. نتایج این تحقیق می تواند به درک دقیق تری از تأثیرات منفی میکروپلاستیک ها بر محصولات استراتژیک کشاورزی منجر شده و لزوم تدوین راه کارهایی جهت کاهش اثرات آن ها بر پایداری تولید و امنیت غذایی را برجسته سازد.

## مواد و روش ها

### کشت بذر

آزمایش به شکل فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار سطح صفر، ۱، ۱۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر میکروپلاستیک پلی اتیلن و در چهار تکرار انجام شد. بذر گیاه گندم (*Triticum aestivum* L.)، از دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز تهیه شد. پس از ۲۴ ساعت شناوری در آب مقطر و ۲۴ ساعت رشد درون پارچه تنظیف، درصد جوانه زنی محاسبه شد. بذرهای جوانه زده درون گلدان هایی با قطر ۱۰ سانتی متر و حاوی پرلیت کشت شد (در هر گلدان ده بذر با اندازه یکسان). محلول هوگلند (طبق جدول ۱) تهیه و به میزان یکسان به همه گلدان ها 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 ۸ 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 میلی گرم بر لیتر به گیاهچه‌های کاشته شده در محلول آبی یا مخلوط با پرلیت اضافه شد. 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 ۸ میکرومتر بود. پس از پایان تیماردهی (دو هفته 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 کارتنوئید و مقدار پرولین برداشت شدند.

### جدول ۱- ترکیبات محیط کشت هوگلند

| Substances                                               | Concentration |
|----------------------------------------------------------|---------------|
| KNO <sub>3</sub>                                         | 101.10 g/L    |
| Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 4H <sub>2</sub> O      | 236.16 g/L    |
| NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>           | 115.08 g/L    |
| MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O                     | 246.48g/L     |
| KCL                                                      | 1.864 g/L     |
| H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>                           | 0.773 g/L     |
| MnSO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O                      | 0.169 g/L     |
| ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O                     | 0.288 g/L     |
| CuSO <sub>4</sub> .SH <sub>2</sub> O                     | 0.962 g/L     |
| H <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> (0/85 MoO <sub>3</sub> ) | 0.040 g/L     |
| NaFe DTPA                                                | 30.0 g/L      |

### 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 بر حسب سانتی‌متر گزارش شد. برای اندازه‌گیری وزن تر هم 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 به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۴۵ درجه قرار گرفت تا به طور کامل خشک شد و وزن خشک نمونه‌ها اندازه‌گیری و بر حسب گرم گزارش شد.

**سنجش محتوای کلروفیل a و b و کارتنوئید:** سنجش محتوای کلروفیل a و b و کارتنوئید برگ گیاه گندم در معرض تیمار غلظت‌های مختلف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن و نمونه شاهد به روش آرنون انجام شد (Arnon, 1949). برای این منظور، ابتدا ۰/۵ گرم از بافت تر گیاه در هاون چینی ریخته شد و با ازت مایع به خوبی سائیده و خرد گردید. ۱۰ میلی لیتر استون ۸۰ درصد به نمونه‌ها اضافه و به خوبی مخلوط شد. سپس به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفوژ شد. محلول فوقانی برای اندازه‌گیری میزان کلروفیل و کارتنوئید برداشت 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 کارتنوئید اندازه‌گیری شد (دستگاه اسپکتوفتومتر VU-VIS مدل LAMBDA 365 ساخت آمریکا). در نهایت برای سنجش محتوای کلروفیل و کارتنوئید از سه رابطه زیر استفاده و مقادیر به دست آمده بر حسب میکروگرم بر گرم وزن تر گزارش شد.

$$\text{Chl.a (mg/g FW)} = 12.25 A_{663} - 2.79 A_{646}$$

$$\text{Chl.b (mg/g FW)} = 21.50 \text{ A646} - 5.10 \text{ A663}$$

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

### اندازه‌گیری پرولین

اندازه‌گیری محتوای پرولین با استفاده از روش نین‌هیدرین: اندازه‌گیری محتوای پرولین با استفاده از اسید نین‌هیدرین طبق روش بیتس و همکاران انجام شد (Bates et al., 1973). برای این منظور ابتدا ۰/۱ گرم بافت برگ گیاه در ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوسالسیلیک ۳ درصد در هاون چینی به خوبی سائیده شد، سپس مخلوط حاصل در درون لوله آزمایش ریخته شده و ۲۰ دقیقه با سرعت ۱۳۰۰ دور در دقیقه سانتیفریوژ گردید. ۲ میلی‌لیتر از عصاره صاف شده برداشته شد و در یک لوله آزمایش ریخته شد. سپس به هر لوله ۲ میلی‌لیتر معرف نین‌هیدرین و ۲ میلی‌لیتر اسید استیک گلیسالی خالص اضافه گردید. لوله‌های آزمایش در بن ماری با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار داده شد، پس از یک ساعت لوله‌ها جهت خاتمه واکنش در داخل حمام یخ گذاشته شد. پس از سرد شدن لوله‌ها، به آن‌ها ۴ میلی‌لیتر تولوئن افزوده و ۳۰ ثانیه به هم زده شد و پس از تشکیل دو فاز مجزا، قسمت رنگی برداشته و توسط اسپکتروفتومتر میزان جذب آن‌ها در طول موج ۵۲۰ نانومتر خوانده شد. غلظت پرولین بر حسب میکرومول برگرم وزن تر با استفاده از رابطه زیر محاسبه و گزارش شد:

$$[(\mu\text{g proline/ml} \times \text{ml toluene})/115.5 \mu\text{g}/\mu\text{mole}] / [(\text{g sample})/5] = \mu\text{moles proline/g of fresh weight}$$

### 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 ۵ درصد و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel صورت پذیرفت.

### نتایج و بحث

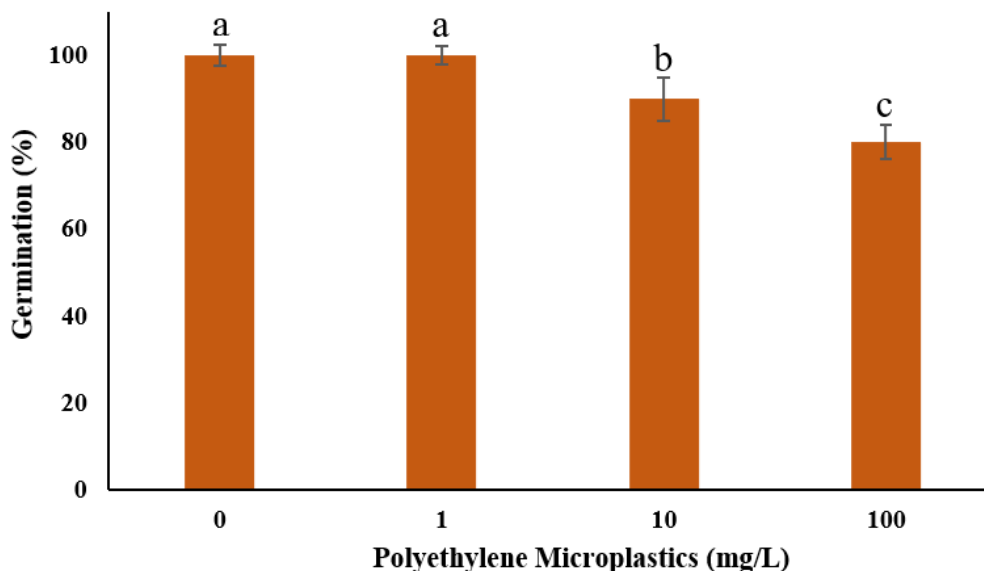
در این پژوهش، به‌منظور بررسی اثر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن بر رشد و فیزیولوژی گیاهچه‌های گندم، شاخص‌های مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفت. این شاخص‌ها شامل درصد جوانه‌زنی (جهت بررسی توان زیستی بذر در آغاز رشد)، میزان رشد ریشه و ساقه (برای سنجش توسعه ساختار گیاهی در مرحله گیاهچه‌ای)، وزن تر و خشک (به‌منظور ارزیابی 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 کمی و در مقایسه با گروه کنترل بررسی شدند و به عنوان 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 هر کدام از موارد مذکور به تفکیک 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 معنادار درصد جوانه‌زنی شد در حالی که در غلظت ۱ میلی‌گرم بر لیتر، اثر معناداری مشاهده نشد که نشان می‌دهد پاسخ گیاه به میکروپلاستیک‌ها وابسته به غلظت آن است.

مطابق با یافته‌های گونگ و همکاران که بر جوانه‌زنی چندین بذر گیاه انجام گردید، میکروپلاستیک، شاخص‌های جوانه‌زنی را کاهش داد (Gong et al., 2021). جوانه‌زنی بذر، به عنوان 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 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 استرس اکسیداتیو، آسیب به غشاهای سلولی، اختلال در جذب آب، مواد معدنی و کاهش فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی است (Li X et al., 2023).



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

(هر سری داده میانگین چهار تکرار است. حروف متفاوت اختلاف معناداری را در سطح  $p < 0.05$  نشان می‌دهد. Error bar بر اساس

انحراف معیار ( $\pm$  SD) می‌باشد)

#### اثر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن بر میزان رشد ریشه و ساقه گیاهچه گندم

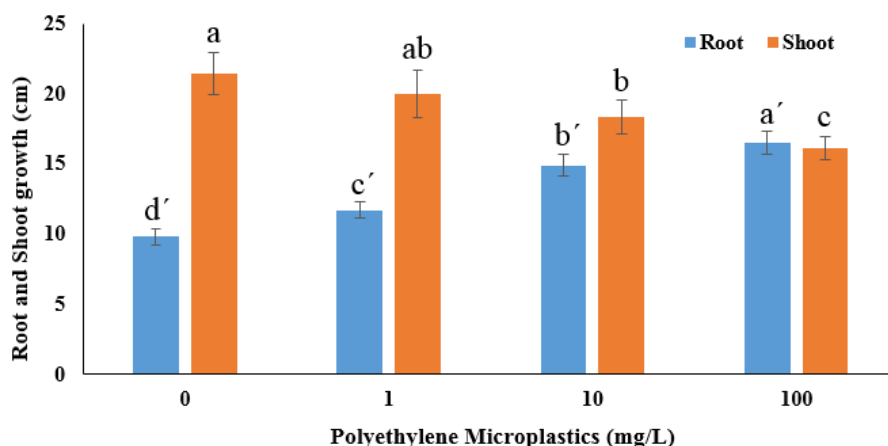
نتایج نشان داد که رشد ریشه گیاهچه گندم در هر سه غلظت میکروپلاستیک پلی‌اتیلن افزایش معنادار نسبت به نمونه شاهد داشت. این افزایش به ترتیب حدود ۱۹، ۵۲، ۶۸ درصد نسبت به نمونه شاهد در غلظت‌های ۱، ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن بود. در مقابل، رشد ساقه در دو غلظت متوسط (۱۰ میلی‌گرم بر لیتر) و شدید (۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) میکروپلاستیک پلی‌اتیلن به ترتیب حدود ۱۵ و ۲۵ درصد کاهش معنادار نسبت به نمونه شاهد داشت و نمونه تیمار ملایم (۱ میلی‌گرم بر لیتر) تأثیر معناداری 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، به طوری که 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 استرس‌های 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 مکانیسمی 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 به دلیل اختلال در هورمون‌های رشد و مسیرهای متابولیکی باشد. کاهش در تخصیص منابع به بخش‌های هوایی به نفع 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. 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 سمیت مستقیم میکروپلاستیک‌ها باشد. عدم کاهش معنادار رشد ساقه در تنش ملایم، هم می‌تواند به علت پایین بودن سطح تنش در این غلظت باشد چون به نظر می‌رسد 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 به عنوان یک سازوکار جبرانی در برابر تنش تلقی شود، اما این افزایش با کاهش رشد ساقه همراه است که می‌تواند نشان‌دهنده تأثیرات منفی بر رشد کلی گیاه باشد.



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

(هر سری داده میانگین چهار تکرار است. حروف متفاوت اختلاف معناداری را در سطح  $p < 0.05$  نشان می‌دهد. Error bar بر اساس

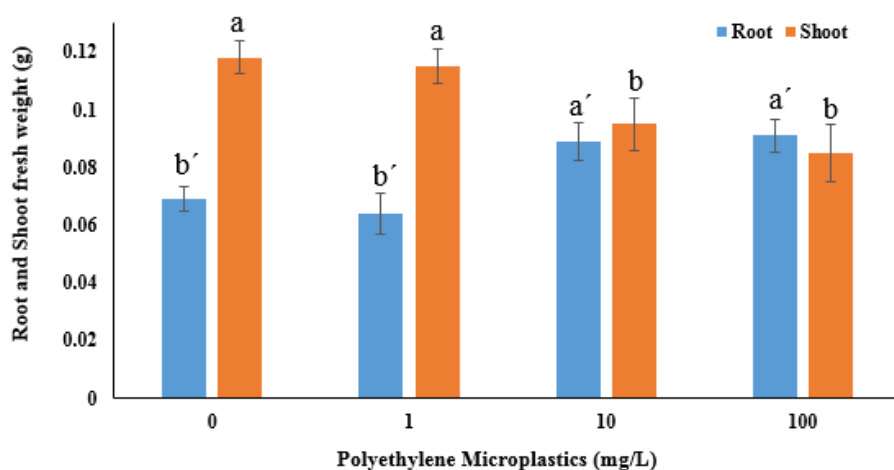
انحراف معیار ( $\pm$  SD) می‌باشد)

#### 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 میلی گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۲۸ درصد و ۳۱ درصد افزایش معناداری دارد اما در غلظت ۱ میلی گرم در لیتر تفاوت معناداری با نمونه شاهد مشاهده نشد (شکل ۳). در مورد وزن تر ساقه هم، در غلظت ۱ میلی گرم در لیتر تفاوت معناداری با نمونه شاهد مشاهده نشد، اما در دو غلظت ۱۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۲۰ درصد و ۲۸ درصد کاهش معناداری دیده شد (شکل ۳). در مورد وزن خشک ریشه و ساقه هم مشابه وزن تر، الگوی افزایش و کاهش یکسان است. وزن خشک ریشه گیاهچه گندم در دو غلظت ۱۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۳۹ درصد و ۶۹ درصد افزایش معناداری داشت (شکل ۴). همچنین در وزن خشک ساقه گیاهچه گندم در دو غلظت ۱۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۲۶ درصد و ۴۰ درصد کاهش معناداری دیده شد (شکل ۴).

به طور کلی، وزن تر و خشک ریشه در غلظت‌های بالاتر افزایش یافت، در حالی که 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 به دلیل 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

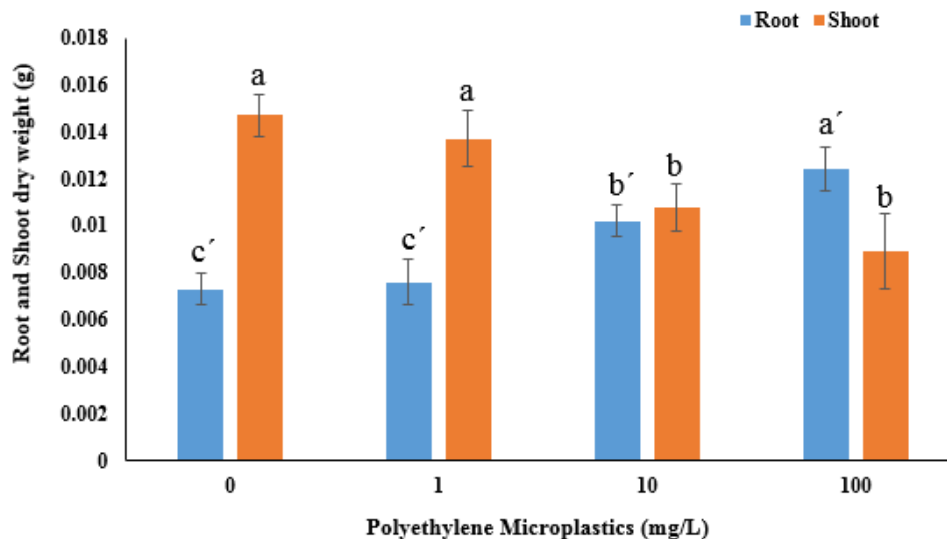
فتوسنتز، اختلال در انتقال مواد فتوسنتزی یا تأثیر منفی بر رشد مریستم‌های ناحیه هوایی باشد. در تنش کم، میزان میکروپلاستیک‌ها ممکن است به اندازه‌ای نباشد که اثرات منفی قابل توجهی بر گیاه بگذارد. در این حالت، گیاه ممکن است قادر به سازگاری با مقدار کمی میکروپلاستیک باشد و هیچ تأثیر معناداری بر رشد ساقه مشاهده نشود. همچنین ممکن است در تنش‌های کم این اثرات به طور 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 به عنوان یک مکانیسم دفاعی افزایش دهد تا از خود در برابر اثرات منفی میکروپلاستیک‌ها محافظت کند و به این دلیل وزن تر و خشک آن افزایش یابد. Gao و همکاران نیز گزارش کردند که میکروپلاستیک‌ها می‌توانند موجب کاهش رشد بخش‌های هوایی در گیاه شوند. (Gao et al., 2024).



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 معناداری را در سطح  $p < 0.05$  نشان می‌دهد. Error bar بر اساس

انحراف معیار ( $\pm$  SD) می‌باشد)



شکل ۴- وزن خشک ریشه و ساقه گیاهچه گندم در معرض غلظت‌های مختلف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن.

(هر سری داده میانگین چهار تکرار است. حروف متفاوت اختلاف معناداری را در سطح  $p < 0.05$  نشان می‌دهد. Error bar بر اساس

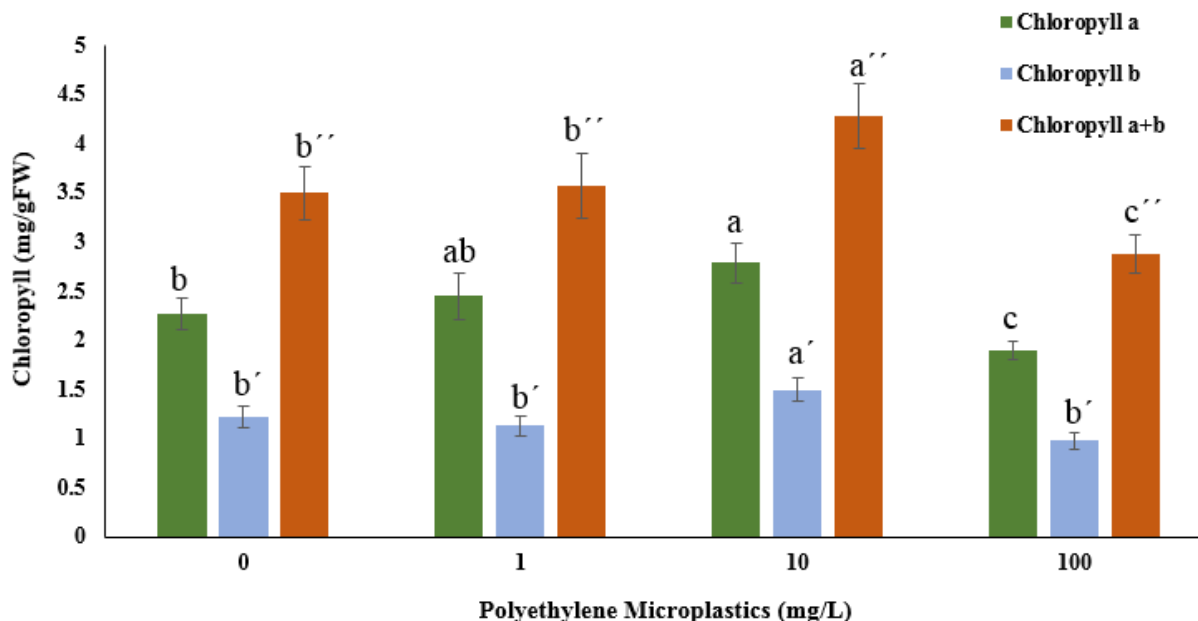
انحراف معیار ( $\pm$  SD) می‌باشد)

#### 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 ۱ میلی گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن) تفاوت معناداری با نمونه شاهد ندارد، اما در مواجهه با تنش متوسط (غلظت ۱۰ میلی گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن) افزایش معنادار به میزان ۲۲ درصد در مقایسه با نمونه شاهد مشاهده شد. در مقابل، در شرایط تنش شدید (غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن) کاهش معناداری در مقایسه با نمونه شاهد به میزان ۱۶ درصد نشان داد. در شرایط تنش، گیاه ممکن است تلاش کند تا کارایی جذب نور را افزایش دهد. کلروفیل، به عنوان 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 مکانیسم 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. در تنش شدید و غلظت‌های بالای میکروپلاستیک، گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) 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 گندم در معرض تنش کم و متوسط (غلظت ۱ و ۱۰ میلی گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن) تفاوت معناداری با نمونه شاهد نداشت ولی در معرض تنش شدید (غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن) کاهش معناداری در مقایسه با نمونه شاهد به میزان 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 می‌تواند 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 از این رو تفاوت معناداری با نمونه شاهد مشاهده نمی‌شود. اما در شرایط تنش شدید، افزایش قابل توجه استرس اکسیداتیو و تجمع ROS و آسیب به ساختار کلروپلاست‌ها، همراه با اختلال در

سنتز رنگدانه‌ها به ویژه 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 پژوهش ما، Li و همکاران در سال ۲۰۲۳ نشان دادند که تیمار با غلظت بالای میکروپلاستیک به طور قابل توجهی محتوای رنگدانه‌های گیاهی (کلروفیل a، b، و کلروفیل کل) را کاهش می‌دهد (Li et al., 2023).

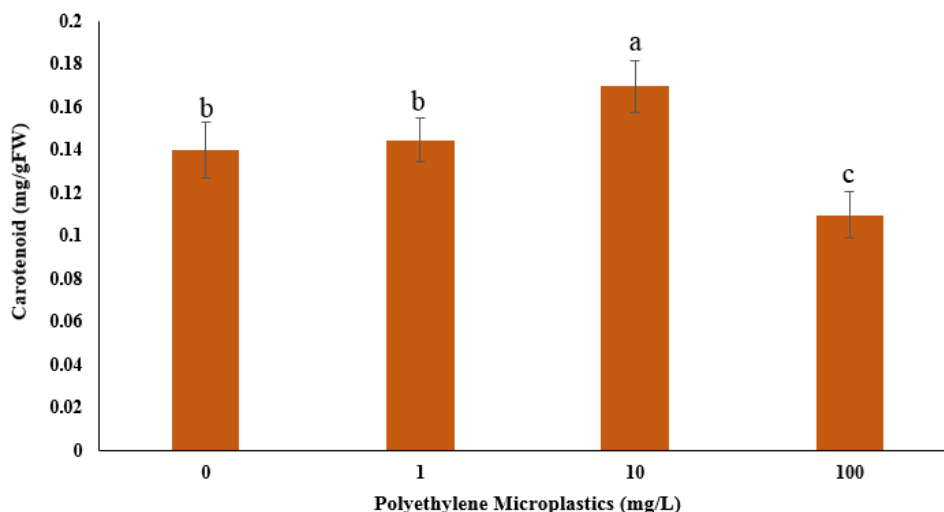


شکل ۵- کلروفیل a، b و مجموع a و b برگ گیاهچه گندم در معرض غلظت‌های مختلف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن.

(هر سری داده میانگین چهار تکرار است. حروف متفاوت اختلاف معناداری را در سطح  $p < 0.05$  نشان می‌دهد. Error bar بر اساس انحراف معیار ( $\pm$  SD) می‌باشد)

#### اثر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن بر کارتنوئید گیاهچه گندم

همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده شد، میزان کارتنوئید در غلظت ۱ میلی‌گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن تفاوت معناداری با نمونه شاهد نداشت، درحالی‌که در غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن افزایش معنادار به میزان ۲۱ درصد در مقایسه با نمونه شاهد مشاهده شد، اما در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن کاهش معناداری در مقایسه با نمونه شاهد به میزان 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 استرس است. در غلظت کم، میکروپلاستیک‌ها تأثیر قابل توجهی بر محتوای کارتنوئیدها 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 کارتنوئیدها به عنوان یک مکانیسم دفاعی در برابر استرس اکسیداتیو پاسخ دهد، زیرا کارتنوئیدها نقش آنتی‌اکسیدانی داشته و از سلول‌ها در برابر آسیب‌های ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) محافظت می‌کنند. با این حال، در غلظت‌های بسیار بالا، تنش ناشی از میکروپلاستیک‌ها به حدی شدید می‌شود که باعث آسیب به ساختارها و عملکرد سلولی، کاهش سنتز کارتنوئیدها و افزایش تخریب آن‌ها می‌گردد، که منجر به کاهش محتوای کارتنوئیدها می‌شود. این تغییرات نشان‌دهنده پاسخ غیرخطی گیاه به سطوح مختلف تنش است. در آزمایش مشابهی مشخص شد که در پاسخ به تنش میکروپلاستیک، میزان کارتنوئید، مشابه کلروفیل افزایش می‌یابد (Pignattelli et al., 2020).



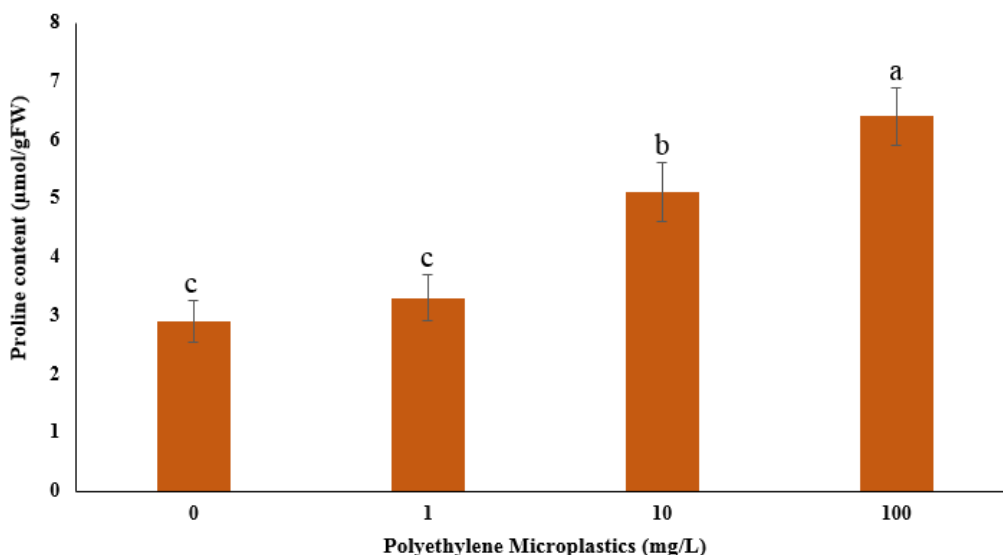
شکل ۶- کارتنوئید برگ گیاهچه گندم در معرض غلظت‌های مختلف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن.

(هر سری داده میانگین چهار تکرار است. حروف متفاوت اختلاف معناداری را در سطح  $p < 0.05$  نشان می‌دهد. Error bar بر اساس

انحراف معیار ( $\pm$  SD) می‌باشد)

#### 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 به ترتیب ۷۵ درصد و ۱۲۰ درصد افزایش معناداری دارد اما در غلظت ۱ میلی‌گرم در لیتر تفاوت معناداری 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 استرس اکسیداتیو محافظت می‌کند. در غلظت‌های بالاتر میکروپلاستیک، تنش وارد شده به گیاه شدیدتر است و در نتیجه گیاه با افزایش سنتز پرولین سعی در حفظ تعادل و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو دارد. در غلظت پایین‌تر (۱ میلی‌گرم بر لیتر)، تنش ممکن است به اندازه‌ای نباشد که باعث القای پاسخ دفاعی قابل توجهی شود، بنابراین تفاوت معناداری با نمونه شاهد مشاهده نمی‌شود. یافته‌های ما با نتایج چن و همکاران در سال ۲۰۲۳ که نشان دادند که القای تنش میکروپلاستیک در گیاه ماش (*Vigna radiata* L.) منجر به افزایش پرولین می‌شود، مطابقت داشت (Chen et al., 2023). پرولین به‌عنوان یک اسیدآمین شبه‌غیرضروری، در شرایط تنش اکسیداتیو نقش حفاظتی چندگانه‌ای در سلول‌های گیاهی ایفا می‌کند. یکی از مهم‌ترین عملکردهای آن، مهار مستقیم گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) از طریق عمل به‌عنوان پایدارکننده ردوکس است؛ پرولین می‌تواند به‌عنوان دهنده الکترون با ROS واکنش دهد و از آسیب به ساختارهای حیاتی سلولی جلوگیری کند. همچنین، این ترکیب در پایداری ساختار پروتئین‌ها و غشاهای زیستی مؤثر است، به‌گونه‌ای که از دناتوراسیون پروتئین‌ها و پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی که از پیامدهای مستقیم ROS 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، به صورت غیرمستقیم نیز در کاهش تنش اکسیداتیو ایفای نقش کند. در مجموع، پرولین با مشارکت در مکانیسم‌های مستقیم و غیرمستقیم، به‌عنوان یک مولکول کلیدی در کاهش آسیب‌های ناشی از استرس اکسیداتیو عمل می‌کند (Szabados and Savoure, 2010).



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

(هر سری داده میانگین چهار تکرار است. حروف متفاوت اختلاف معناداری را در سطح  $p < 0.05$  نشان می‌دهد. Error bar بر اساس

انحراف معیار ( $\pm$  SD) می‌باشد)

### 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 معناداری بر جوانه‌زنی بذر دارد، اما در غلظت پایین (۱ میلی‌گرم بر لیتر) تأثیر قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد. همچنین، رشد ریشه در تمام غلظت‌ها افزایش یافت که ممکن است به‌عنوان یک مکانیسم 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، اما وزن تر و خشک ساقه کاهش یافت. میزان کلروفیل a و b در غلظت متوسط افزایش کرد، اما در غلظت بالا کاهش یافت که نشان‌دهنده ایجاد استرس اکسیداتیو در تنش‌های شدید است. کارنتنوئید نیز در غلظت متوسط افزایش یافت، اما در غلظت بالا کاهش یافت که نشان از نقش آن در مقابله با استرس اکسیداتیو دارد. در نهایت، محتوای پرولین در غلظت‌های بالا به طور قابل توجهی افزایش یافت و نشان‌دهنده فعال‌سازی مکانیسم‌های 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 به نوعی 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 افزایش‌اند. بنابراین، استفاده از مالچ‌های زیست‌تخریب‌پذیر به جای 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 AL. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine pollution bulletin*, 62(8), 1596-1605.
2. Arnon, D.I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplast polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24, 1-15.
3. Boonsong P, Ussawarujikulchai, A, Prapagdee, BPansak, W. (2025). Contamination of microplastics in greenhouse soil subjected to plastic mulching. *Environmental Technology & Innovation*, 37, 103991.
4. Chen F, Aqeel, M, Khalid, N, Nazir, A, Irshad, MK, Akbar, MU, Alzuaibr, FM, 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.
6. De Silva YSK, Rajagopalan, UM, Kadono, H. (2021). Microplastics on the growth of plants and seed germination in aquatic and terrestrial ecosystems. *Global Journal of Environmental Science & Management (GJESM)*, 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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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*, 171658.

17. Li R, Tu, C, Li, L, Wang, X, Yang, J, Feng, Y, Zhu, X, Fan, Q, Luo, 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/10.1016/j.jhazmat.2023.131675>
18. Li X, Wang, R, Dai, W, Luan, Y, Li, J. (2023). Impacts of micro (nano) plastics on terrestrial plants: germination, growth, and litter. *Plants*, 12(20), 3554.
19. Lian J, Wu, J, Xiong, H, Zeb, A, Yang, T, Su, X, Su, L, Liu, W. (2020). Impact of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of hazardous materials*, 385, 121620.
20. Liang R, Zhang, C, Zhang, R, Li, Q, Liu, H, Wang, 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.
21. Pignattelli S, Broccoli, A, Renzi, M. (2020). Physiological responses of garden cress (*L. sativum*) to different types of microplastics. *Science of The Total Environment*, 727, 138609. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138609>
22. Rillig MC, Lehmann, A, de Souza Machado, A, Yang, G. (2019). Microplastic effects on plants. *New phytologist*, 223(3), 1066-1070.
23. Rochman CM, Brookson, C, Bikker, J, Djuric, N, Earn, A, Bucci, K, Athey, S, Huntington, A, McIlwraith, H, Munno, K. (2019). Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite. *Environmental toxicology and chemistry*, 38(4), 703-711.
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.
25. Szabados L, Savoure, A. (2010). Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in plant science*, 15(2), 89-97.
26. Tian L, Jinjin, C, Ji, R, Ma, Y, Yu, X. (2022). Microplastics in agricultural soils: sources, effects, and their fate. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 25, 100311.
27. Yan Y, Yang, H, Du, Y, Li, X, Li, X. (2024). Effects and molecular mechanisms of polyethylene microplastic oxidation on wheat grain quality. *Journal of Hazardous Materials*, 134816.
28. Yao Z, Seong, H.J, Jang, Y.S. (2022). Environmental toxicity and decomposition of polyethylene. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 242, 113933.
29. Zhou Y, Wang, J, Zou, M, Jia, Z, Zhou, S, Li, Y. (2020). Microplastics in soils: A review of methods, occurrence, fate, transport, ecological and environmental risks. *Science of the Total Environment*, 748, 141368.