



**УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПОЉОПРИВРЕДНИ ФАКУЛТЕТ**



**Департман за фитомедицину и заштиту
животне средине**

Милица Васиљевић

дипл. инж. пољопривреде

**ФИЗИОЛОШКЕ И БИОХЕМИЈСКЕ ПРОМЕНЕ СУНЦОКРЕТА
УСЛОВЈЕНЕ ПРИСУСТВОМ МИКРОПЛАСТИКЕ У ЗЕМЉИШТУ**

МАСТЕР РАД

Нови Сад, 2024.



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПОЉОПРИВРЕДНИ ФАКУЛТЕТ



Департман за фитомедицину и заштиту
животне средине

Кандидат

дипл.инж. Милица Васиљевић

Ментор

проф. др Војислава Бурсић

ФИЗИОЛОШКЕ И БИОХЕМИЈСКЕ ПРОМЕНЕ СУНЦОКРЕТА
УСЛОВЈЕНЕ ПРИСУСТВОМ МИКРОПЛАСТИКЕ У ЗЕМЉИШТУ

Мастер рад

Нови Сад, 2024.

КОМИСИЈА ЗА ОДБРАНУ И ОЦЕНУ МАСТЕР РАДА:

др Војислава Бурсић, редовни професор

Ужа научна област: Фитофармација
Пољопривредни факултет, Нови Сад
-Ментор-

др Александра Петровић, ванредни професор

Ужа научна област: Зоологија
Пољопривредни факултет, Нови Сад
-Председник-

др Јована Шућур Елез, ванредни професор

Ужа научна област: Хемија и Биохемија
Пољопривредни факултет, Нови Сад
-Члан-

Огромну захвалност дугујем својој менторки проф. др Војислави Бурсић, чије су стручност, драгоцене смернице и неизмерна подршка били кључни за завршетак овог мастер рада. Хвала Вам на сваком савету и мотивацији да стремим ка постизању високих циљева.

*Велико хвала породици и пријатељима што су веровали у мене и пружали ми
неопходан ослонац, без којих овај успех не би био могућ.*

С А Д Р Ж А Ј

1. УВОД.....	1
2. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ.....	3
2.1 ДЕФИНИЦИЈА И КАРАКТЕРИСТИКЕ ПЛАСТИКЕ	3
2.2 ВРСТЕ И ИЗВОРИ ПЛАСТИКЕ	3
2.3 ГЛОБАЛНА ДИСТРИБУЦИЈА ПЛАСТИКЕ	4
2.4 ЕФЕКТИ МИКРОПЛАСТИКЕ НА РАСТ И РАЗВОЈ БИЉАКА	7
3. ЗАДАТАК И ЦИЉ РАДА.....	10
4. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА.....	11
4.1 УЗОРКОВАЊЕ ЗЕМЉИШТА И ПРИКУПЉАЊЕ АМБАЛАЖЕ ПЕСТИЦИДА	11
4.2 ФТИР АНАЛИЗА ПЛАСТИЧНОГ МАТЕРИЈАЛА	12
4.3 ТЕСТ ОРГАНИЗАМ.....	13
4.4 ПОСТАВЉАЊЕ ОГЛЕДА.....	13
4.5 СТАТИСТИЧКА ОБРАДА ПОДАТАКА.....	15
5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА.....	16
5.1 ФТИР АНАЛИЗА ПЛАСТИЧНОГ МАТЕРИЈАЛА	16
5.2 АНАЛИЗА УТИЦАЈА МИКРОПЛАСТИКЕ НА БИЉКЕ СУНЦОКРЕТА..	17
6. ЗАКЉУЧАК	27
7. ЛИТЕРАТУРА	29
8. ПРИЛОГ	36

ФИЗИОЛОШКЕ И БИОХЕМИЈСКЕ ПРОМЕНЕ СУНЦОКРЕТА УСЛОВЉЕНЕ ПРИСУСТВОМ МИКРОПЛАСТИКЕ У ЗЕМЉИШТУ

Микропластика је постала све већи еколошки проблем, али њен утицај на биљке још увек није довољно испитан. У овом истраживању, сунцокрет је гајен у контролисаним условима са различитим концентрацијама микропластике у земљишту. На основу добијених резултата, са порастом концентрације микропластике у земљишту уочен је негативан утицај на свежу и суву масу биљака. Међутим, концентрација од 10 mg МП повољно је утицала на раст биљке сунцокрета. Мерењем садржаја хлорофила а, хлорофила б и каротеноида забележено је њихово смањење са повећањем концентрације микропластике.

Резултати овог истраживања наглашавају потребу за даљим проучавањем утицаја микропластике на пољопривредне културе. Поред тога, указују на важност развоја стратегија за смањење контаминације земљишта микропластиком како би се очувала продуктивност и здравље биљака. Рад такође истиче потребу за едукацијом о потенцијалним ризицима микропластике. Истраживање доприноси бољем разумевању сложених интеракција између загађивача и биљака у агроекосистемима.

Кључне речи: микропластика, раст биљака, земљиште

PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL CHANGES IN SUNFLOWERS DUE TO THE PRESENCE OF MICROPLASTICS IN THE SOIL

Microplastics have become an increasing environmental problem, but their impact on plants has not yet been sufficiently studied. In this research, sunflower was grown under controlled conditions with different concentrations of microplastics in the soil.

Based on the results obtained with an increase in the concentration of microplastics in the soil, a negative impact on the fresh and dry mass of plants was observed. However, a concentration of 10 mg of MP had a favorable effect on the growth of sunflower plants. By measuring the content of chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids, their decrease with increasing concentration of microplastics was recorded. The results of this research emphasize the need for further study of the impact of microplastics on agricultural crops. In addition, they point to the importance of developing strategies to reduce soil contamination with microplastics in order to preserve plant productivity and health. The paper also highlights the need for education about the potential risks of microplastics. The research contributes to a better understanding of the complex interactions between pollutants and plants in agroecosystems.

Key words: microplastic, plant growth, soil

1. УВОД

Прва истраживања на тему накупљања пластике као отпада везанасу за остатке у воденим екосистемима, рекама, језерима и океанима. Даљим анализама и истраживањима утврђени су слични нивои контаминације у слатким водама као и земљишту (Blettler, 2018). Копнени отпад заузима између 60 и 80% укупног морског отпада (~10 милиона тона). Аутори неколико радова су утврдили разне изворе копненог отпада, као што су малчирање у пољопривреди, ширење канализацијског муља или цурења са места испуштања, те транзит кроз реке (Alimi et al., 2018; Jambeck et al., 2015).

Употреба синтетичких полимера широко је распрострањена у пољопривреди. Као додаток у процесу компостирања и у функцији побољшавања карактеристика земљишта, користе се експандиране полистирен пахуљице (ПС, 5-15 mm) и полиуретанска пена (ПУ) (Stöven et al., 2015).

Кретање микропластике (МП) у земљишту омогућено је усвајањем од стране биљака путем кореновог система или земљишним микроорганизмима. Значајну улогу у премештању честица микропластике из површинских у дубље слојеве земљишта имају глисте које усвајају земљишне загађиваче ингестијом или кутикулом (Adeel et al., 2021).

Честа употреба пластике може значајно да промени састав елемената у земљишту. Преласком честица пластике на бази етилена у дубље слојеве, конкретно поливинил хлорид, утврђена је промена хлоритета земљишта (Fuller et al., 2016). Акумулација микропластике условила је модификације у микробиолошким заједницама. Један од индикатора негативног утицаја микропластике јесте повишена активност каталазе у условима веће порозности (Li et al., 2020). Као последица присуства микропластике, уочено је повећање бројности аеробних микроорганизама што доводи до промене физичко-хемијских особина земљишта. Слабија агрегација тла, условљена порозношћу земљишта има за последицу слабију укорененост биљака (De Souza Machado et al., 2018). Као важан аспект проблема накупљања микропластике, наводи

се неадекватно раздвајање отпада из компоста. Због тога се ставља све већи акценат на законске регулативе у вези са правилним раздвајањем отпада (Rillig et al., 2019). На могућност накупљања микропластике у пољопривредна земљишта, значајно доприносе отицање и ерозија тла, употреба канализационог муља и контаминиране воде у пољопривреди, агротехничке мере или употреба малч фолије (Bläsing et al., 2018).

Проучавање утицаја присуства честица микропластике на клијање семена дало је различите резултате. Позитиван ефекат испољен је на примеру клијања семена пшенице и сланутка, услед утврђених оштећења омотача семена и побољшаног процеса усвајања воде (Lian et al., 2019). На примеру изучавања раста пасуља у присуству отпадних честица полиетилена ниске густине (ЛДПЕ) није утврђен негативан ефекат на биомасу изданка, као и броја махуна што се не може односити на резултате у вези са нодулацијом корена (Meng et al., 2021). Присуство честица микропластике полистирена (ПС), полиетилена (ПЕ) и полипропилена (ПП) реципрочно су повезане са дужином корена, масе садница и листа парадајза. На примеру бундеве и краставца потврђена је смањена фотосинтетичка ефикасност и садржај хлорофила (Colzi et al., 2022). Биљке реагују на стрес инхибирањем ефикасности искориштења светлости и фиксације угљеника те повећаном синтезом природних, углавном токсичних, нуспроизвода реактивних врста кисеоника (РОС), водоник пероксида и реактивног кисеоника. Нивои ових једињења представљају показатеље промене оптималних услова средине и користе се као опште прихваћена метода за процену и упоређивање токсичности различитих загађивача у животној средини (Liang et al., 2013).

Контаминација микропластиком данас представља једно од најважнијих еколошких питања после глобалног загревања. У циљу бољег разумевања утицаја на функционисање целокупног екосистема, неопходно је истраживање потенцијалних ефеката присуства честица микропластике у земљишту на биљне културе те ће стога, у оквиру истраживања, бити проучаване физиолошке и биохемијске промене у биљкама *Helianthus annuus* L. у присуству микропластике.

2. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

2.1 ДЕФИНИЦИЈА И КАРАКТЕРИСТИКЕ ПЛАСТИКЕ

Почетком двадесетог века, Leo Baekeland је направио први синтетички полимер назван бакеалит. Олакшана производња различитих пластичних производа, уштеда енергије, технолошки напредак довели су до почетка масовне производње пластике око 1950.године (Geyer et al., 2017).

Под појмом пластике подразумевамо широк дијапазон материјала који у току производње могу бити екструдирани, изливени, обликовани или нанесени као премаз. Полимеризацијом стиренских мономера, којој претходи каталитичка дехидрогенизација етилбензена настају синтетички ароматични полимери, да би крајњи производ, додавањем различитих хемијских адитива (катализатори, растварачи за полимеризацију, органска и неорганска једињења или антиоксиданси), био употпуњен (Larue et al., 2021). Материје са стабилним угљо-водоничним везама и термопластичношћу коју карактеришу висока прозирност, постојаност, издржљивост и лако бојење, допринеле су комерцијализацији пластике и њену широку примену (Jambeck, 2015).

Пластика, као материјал високе топлотне и електричне изолације, користи се за добијање посуда за складиштење и транспорт хране, за производњу амбалаже за паковање. Такође је примену нашла у изради играчака, канцеларијског материјала, стиропора и друго (Kik et al., 2020). Међутим, постојаност пластике доприноси њеном задржавању и накупљању у земљишту (Jambeck, 2015).

2.2 ВРСТЕ И ИЗВОРИ ПЛАСТИКЕ

Приближно 90% светске производње пластике чине полиетилен, полипропилен, поливинил хлорид (ПВЦ), полистирен и полиетилен терефталат (ПЕТ) (Larue et al.,

2021). ПВЦ пластика која се користи за израду обуће, кабаница, играчака, медицинских уређаја, грађевинског материјала добија се од фталата високе молекулске масе, попут ди(2-етихексил) фталат (ДЕХП). Фталати ниске молекуларне тежине, као што су диметил фталат (ДМП), диетил фталат (ДЕП) и дибутил фталат (ДБП) се углавном користе као фиксативи мириса/боје или као растварачи у козметици, инсектицидима и фармацеутским производима (Heudorf et al., 2007).

2.3 ГЛОБАЛНА ДИСТРИБУЦИЈА ПЛАСТИКЕ

Према Waring и Harris (2005), фталати мигрирају из предмета који садрже ПВЦ у храну, ваздух, прашину, воду и земљиште и на тај начин доприносе већој изложености људи. Horton (2017) и сарадници наводе да је количина отпада „пуштена“ у земљиште до 20 пута већа од количине у океанима. Прва истраживања на тему накупљања пластике као отпада у вези је сањеним присуством у воденим системима, рекама, језерима и океанима. Даљим анализама и истраживањем утврђени су слични нивои контаминације у слатким водама као и земљишту (Blettler 2018). На основу података о производњи пластике од 367 милиона тона до 2020. године, Ниа и сарадници(2023), предвиђају светску производњу од 3,3 милијарде тона до 2030. године.

Употреба синтетичких полимера веома је заступљена у пољопривреди. Због многих предности као што су заштита усева, повећање температуре, сузбијање корова и задржавање воде широко је распрострањена употреба фолија од полиетилена ниске густине. Временом танке пластичне фолије постају крхке, тако да фрагменти завршавају у замљишту (Lambert, 2014).

Према Bethanis и Golia (2024), честице <5 mm дефинисане су као микропластика док су оне између 1 μm и 1 nm окарактерисане као нанопластика (НП). Као примарне изворе микропластике, аутори наводе пластича влакна, фрагменте и грануле. Наведене сировине представљају улазни материјал за производњу пластичних производа те услед случајног губитка током транспорта, отицањем из прерађивачких објеката или често као резултат неправилног руковања доспевају у животну средину. Zhang et al. (2015) карактеришу микропластику као честице мале величине, велике специфичне површине и хидрофобности због чега могу бити носиоци хемикалија и контаминираних материја у животној средини.

Огледима спроведеним у делти Дунава, утврђене су честице микропластике у свим узорцима. Према примењеним методама, у једној литри воде пронађено је 46 честица пластике величине $>105 \mu\text{m}$, 95 честица $>65 \mu\text{m}$ и 2677 честица микропластике $>20 \mu\text{m}$ (Kiefer, 2023).

Bathrellos и сарадници(2013), наводе да земљиште представља највеће складиште микропластике. Као резултат пољопривредне праксе, фокус научне заједнице је тренутно померен на проучавање земљишта уследмогућности распрострањања честица пластике (Kallenbach et al., 2022). Стандардна употреба пластике (малч фолије, пластеници...) ипоједине агротехничке мереузрокују присуство честица пластике, док додатна количина МП доспева из загађене средине, површинског отицања или преноса честица ваздухом. Једном када МП доспе до пољопривредног земљишта, дистрибуирајући се преносе у дубље слојеве орањем и кроз поре које формирају микроорганизми у земљишту, где могу остати деценијама захваљујући спорој деградацији (Ge J. et al., 2021). На кретање честица микропластике утичу величина и облик самих честица. Честице распона величине од $0,1-6,0 \mu\text{m}$ се вероватно задржавају у земљишту које делује као резервоар (Grayling et al., 2018). Пољопривредне активности само су од неких спољашњих сила које утичу на миграцију већих честица микропластике у дубље слојеве земљишта.

На брзину кретања честица микропластике у земљишту утичу конвенционални поступци обраде земљишта за површински слој до 30cm (O'Connor et al., 2019). У поменутиим студијама се наводи да се сферне честице микропластике лакше крећу кроз слојеве земљишта у односу на влакна и филм. Након доспевања у земљиште, микропластика може проћи кроз многе процесе као што су везивање, разлагање, седиментација или уградња у агрегате земљишта (Zhang and Liu, 2018).

Адитиви из микропластике се ослобађају приликом разградње пластике, узрокујући загађење земљишта, при чему су фталати најзаступљенији (Nahkladakis et al., 2018). Брзина отпуштања адитива повезана је са физичким и хемијским својствима МП, медија и температуре. Процеси отпуштања адитива, као и њихова токсичност су још увек недовољно разјашњени (Koelmans et al., 2014).

Употреба компоста нашла је широку примену као побољшивач карактеристика земљишта и ђубриво. Међутим, утврђено је да је компост значајан извор МП уколико се додаје у неконтролисаним количинама. На тај начин, може неповољно да утиче на усеве или подземне воде (Bigalke et al., 2022). Различити аутори тврде да

присуство честица микро и нанопластике утиче на физичка својства земљишта, али и на земљишне организме (Prendergast-Miller et al., 2019).

Најчешћи крај ланца употребе пластике су депоније и постројења за спаљивање (Kiefer et al., 2023). Због полазних једињења који су отпорна на ензимску и хидролитичку разградњу микроорганизама, велика количина пластичних полимера накупља се у спољашњој средини. На вертикално кретање честица у дубље слојеве земљишта снажан утицај има испирање, али одређени допринос има отицање, ерозија тла, поступци обраде тла, раст кореновог система биљака и транспорт преко животиња (Zhang et al., 2020). У случају пољопривредног земљишта, најчешћи идентифицирани полимери су полиетилен, полиамид и полипропилен (Chen et al., 2020).

Микропластика се шири земљиштем различитим начинима, укључујући примену канализационог муља, употребом компоста, наводњавањем контаминираним водом, пластичним малчом, атмосферским таложењем, пластеницима или ђубрењем (Kumar et al., 2022). Hernández-Arenas и сарадници (2021), утврдили су да већина честица микропластике припада ПЕТ, ПП, пластици ниске густине (ЛДПЕ) и пластици високе густине (ХДПЕ). У односу на различите државе, прописана су ограничења употребе отпадног муља услед доказаног присуства загађивача, патогена и тешких метала. Да је канализациони муљ један од најважнијих улазних путева микропластике у земљиште, показују и истраживања спроведена у Немачкој. Иако су мере употребе ограничене на 5t суве масе канализационог муља по ha у року од 3 године, треба имати на уму да годишње 1,67-40,8 милиона пластичних предмета по ha може доћи до пољопривредних парцела само са једном апликацијом муља.

Према УС ЕПА (2012), у Сједињеним Државама предлаже се замена употребе малч фолија које који садрже ПВЦ за биоразградива решења, због раније утврђене токсичности и канцерогености (Steinmetz et al., 2016).

Балош (2024), наводи да микропластика у земљишту утиче на микроорганизме и активности ензима у делу ризосфере, чиме се утиче на минерализацију органског фосфора и кисеоника у земљишту, односно њихову расположивост. Конкретно, Kong et al. (2024), потврдили су да се са повећањем дибутил фталата смањила бројност *Proteobacteria* и повећала бројност *Chloroflexi* и *Acidobacteria*.

Разноликост микробне заједнице у земљишту под утицајем је МП, доводи до промене физичко-хемијских својстава земљишта (Bandopadhuu et al., 2018).

Променом особина земљишта мењају се морфологија и физиологија биљака, њихова вегетација и сам процес раста (Khalid et al., 2020).

Истраживањем Liu et al. (2017),указана је повећана активност аеробних микроорганизама преко индикатора каталазе. Резултати до којих су дошли Yi и сарадници (2019), сугеришу на стимулисане активности каталазе и уреазе микрофрагментима полиетилена, што утиче на бактеријске заједнице. Како наводе Liu et al., (2014) негативан утицај МП може да се одрази на инфилтрацију кишнице и воде за наводњавање утичући на својства земљишта да задржава воду. Хидрофобна површина и висок капацитет адсорпције утичу на могућност задржавања воде, транспорт и доступност хранљивих материја или загађивача што може мењати плодност земљишта (Zhang et al., 2020). Као закључак овог истраживања наводи се повећана активност азотофиксирajuћих бактерија из породица *Burkholderiaceae* и *Pseudomonadaceae*услед присуства честица ПЕ и ПВЦ у земљишту. De Souza Machado et al. (2018), проучавали су утицај микропластике на структуру земљишта. Оглед је обухватао честице различитих типова пластике (ПА влакна, ПА перле, ПС влакна и ПЕ фрагменти). Њихови резултати су указали да МП утиче на запреминску густину, капацитет задржавања воде и водостабилне агрегате земљишта. Током 5 недеља трајања огледа,присуство полиестерских влакна су довела до значајног смањења густине и водостабилности агрегата у односу на остале типове пластике као и негативне ефекте МП у погледу квалитета земљишта и укоренености биљака.

2.4 ЕФЕКТИ МИКРОПЛАСТИКЕ НА РАСТ И РАЗВОЈ БИЉАКА

У студији Jiang et al. (2019), праћен је утицај три различите концентрације 100 nm ПС честица микропластике (10, 50, 100 mg L⁻¹). Утврђено је да честице од 5 µm ПС, због веће величине, не могу лако ући у биљку и стога се акумулирају на површини корена *Vicia faba*L. Као закључак наводе да су честице микропластике ПС од 100 nm доспеле у корен *Vicia faba* блокирајући поре унутар ћелијског зида што је за последицу имало поремећен транспорт нутријената и токсичне ефекте. Ови резултати показују да 100 nm микропластике ПС могу активирати антиоксидативни одбрамбени механизам ћелија при нижим концентрацијама, док при вишим концентрацијама произведени вишак реактивних врста кисеоника (РОС) не може бити брзо елиминисан што доводи до повећане пероксидације липида. На примеру

зелене салате, резултати истраживања показали су већи степен оштећења ћелија корена него листова. Наводи се површина корена као главно место агрегације микропластике, што доводи до појаве тзв. ефекта сенке и блокаде апсорпције хранљивих материја (Gao et al., 2019). Студије Bai H. et al. (2024) су показале негативан утицај честица полистирена на раст корена садница јагоде, уз неприметан ефекат на број листова биљака.

Према резултатима истраживања из 2019. године, Lian и сарадници су забележили стимулативни ефекат микропластике на клијање семена пшенице. Смањивањем концентрација присутне микропластике, испољавају се инхибиторни ефекти на клијање семена. Каснија истраживања су објаснила могуће разлике услед величине честица и набоја на честицама микропластике (Weber et al., 2018; Ge et al., 2021). Повећана клијавост сланутка (*Cicer arietinum*L.) утврђена је након излагања честицама ПЕТ пластике услед способности оштећивања омотача семена и побољшавања процеса упијања воде (Mondal et al., 2022). Meng (2021) је открио да примена различитих концентрација ЛДПЕ на биљке пасуља није имала значајан утицај на биомасу изданака, корена и плодова или број махуна упоређењу са контролним третманом. Међутим, ЛДПЕ је показао значајан утицај на нодулацију корена, што представља потенцијалну претњу расту биљака. Резултати истраживања су указали да ПЕМП није имао приметну токсичност на раст биљака, док је концентрација од 0,1% ПЛАМП значајно смањила дужину корена за 27,53% у поређењу са контролом. Активност супероксид дисмутазе није имала значајну промену, док пад активности пероксидазе и повећање активности каталазе сугерише да је антиоксидативни одбрамбени систем соје поремећен (Lian, 2022). Према Li и сарадницима (2021), додавање пластичних опилака имало је значајан утицај на клијање соје и било је у обрнутој корелацији са повећањем концентрације пластике од 0,1 до 1%. Shi и сарадници (2022) су известили да су дужина корена и свежа маса садница парадајза смањене услед присуства микропластике, односно ПС, ПЕ и ПП. Осим тога, приметили су да је додатак ПЕ значајно смањио површину листа соје.

Микропластика омета раст корена пиринча смањујући садржај лигнина и изазивајући оксидативни стрес у корену у вегетативној фази, што може довести до ометања метаболизма водоника и смањеног садржаја хлорофила у изданцима (Yang, 2022). Студија на зеленој салати показала је појаву оксидативног стреса у виду синтезе водоник пероксида, чија концентрација је већа при акутној него хроничној изложености у сваком третману микропластиком, с изузетком биљака третираних

ПВЦ-ом (Pignattelli et al., 2020). Ефикасност антиоксидативног система у *L. minor* није била довољна да отклони оштећења изазвана присуством арсена у комбинацији са микропластиком (Ozfidan et al., 2023). У листовима и корену салате уочена је повећана активност супероксид дисмутазе услед присуства полиметил метакрилата (ПММА). Концентрација испод 10 mgL^{-1} ПММА утицала је на повећање каталазе и пероксидазе у листовима, али ове одбрамбене активности нису успеле да спрече напад радикала (Yildiztugay et al., 2022). Као природни нуспроизводи метаболизма, углавном токсични, стварају се реактивне врсте кисеоника (Mittler et al., 2004). Фактори средине као што су салинитет, суша, ниске температуре, токсичност метала, загађивачи ваздуха, УВ-Б зрачење и високе дозе пестицида, као и инфекција патогеном доводе до појачане производње РОС у биљним ћелијама, оксидативног стреса, јонске неравнотеже, недостатка нутријената и осмотског стреса (Хие, 2019). Оксидативно оштећење се сматра главним ћелијским ефектом и постало је опште прихваћена метода за процену и упоређивање токсичности различитих загађивача у животној средини (Liang et al., 2013).

3. ЗАДАТАК И ЦИЉ РАДА

Задатак рада је прикупљање амбалаже пестицидних препарата уз одређивање њиховог хемијског састава методом ФТИР-а. Следећи корак ће бити прављење микропластике од прикупљене пестицидне амбалаже те процена утицаја МП на сунцокрет. Током испуњавања задатка рада, одредиће се дужина корена и надземног дела поника, као и свежа и сува маса истих, одређивање хлорофила а, б и каротеноида како би се утврдило да ли присуство МП има негативан (инхибиторни) или позитиван утицај на испитиване особине тест биљака.

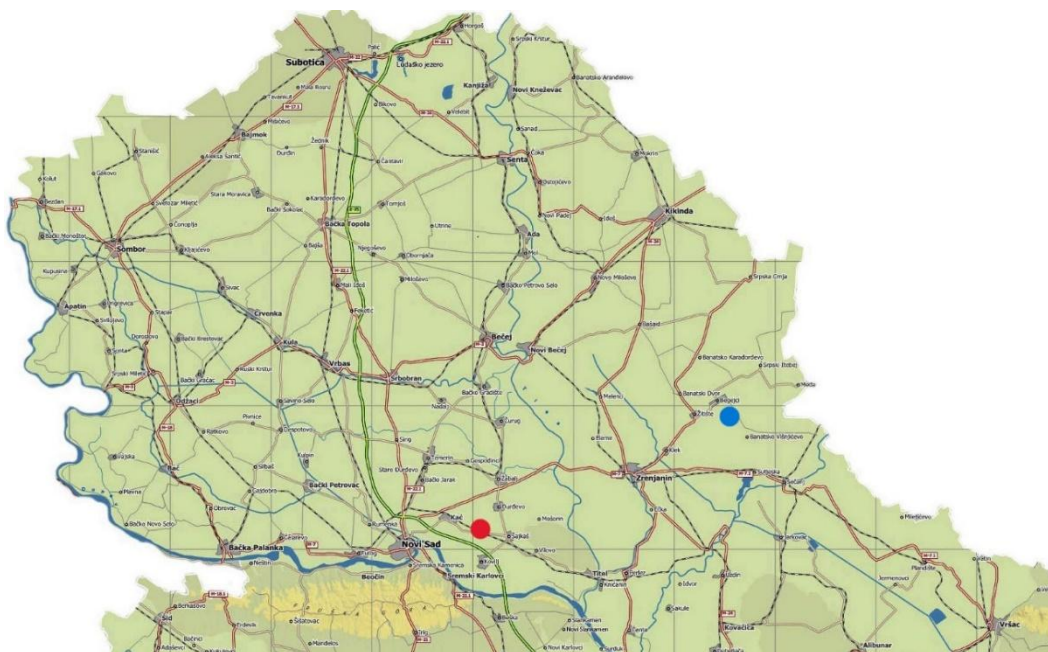
Циљ истраживања је да се испита утицај присуства микропластике, која потиче од одбачене амбалаже пестицидних препарата, у пољопривредном земљишту на гајену биљну врсту сунцокрет *Helianthus annuus* L.

4. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

Истраживања су рађена у Лабораторији за биолошка истраживања и пестициде, Департман за Фитомедицину и заштиту животне средине и Лабораторији за биохемију, Департман за ратарство и повртарство на Пољопривредном факултету, Универзитета у Новом Саду.

4.1 УЗОРКОВАЊЕ ЗЕМЉИШТА И ПРИКУПЉАЊЕ АМБАЛАЖЕ ПЕСТИЦИДА

Пољопривредно земљиште је узорковано са локалитета Торак, док је пластична пестицидна амбалажа прикупљена на локалитету Будисава (Слика 1).



Слика 1. Мапа са локалитетима узорковања земљишта (плава тачка) и локалитетима прикупљања пестицидне амбалаже (црвена тачка)

Са парцеле до 5 наметодом „шаховске табле“ ашовом је узето земљиште са дубине од 30 cm, односноузето је 17узорака који супромешани. Након хомогенизације, припремљен је репрезентативан узорак од 20 kg за постављање експеримента. Прикупљени узорци земљишта су осушени на ваздуху и уситњени до величине честица <2 mm, у складу са ISO 11464: 2004док су физичко-хемијске карактеристике земљишта урађене у складу са ISO:1987 и ISO 8245 и табеларно су приказане у табели 1.

Дистрибуција величине честицапроцењена након раздвајања честица у следећим величинама фракције наведених у табели 1 уз приказ основних физичко-хемијских карактеристике земљишта.

Табела 1. Карактеристике земљишта (Балош, 2024)

Узорак	Крупни песак (%)		Ситни песак(%)	Муљ (%)	Глина(%)	Класа земљишта према текстури	
	2-0,2 mm		0,2-0,02 mm	0,02-0,002 mm	< 0,002 mm		
Торак	1,26		35,50	30,20	33,04	Глинаста иловача	
Торак	pH		СаСО ₃ (%)	Органска материја(%)	Укупни N (%)	AL-P ₂ O ₅ mg 100 g ⁻¹	AL-K ₂ O mg 100g ⁻¹
	KCl	H ₂ O					
	7,32	8,33					
		10,66	3,11	0,213	18,66	42,69	

Пластична пестицидна амбалажа је прикупљенапо принципу случајног избора, да би се после утврђивања карактеристике пластике, ручно секли узорци пестицидне амбалаже на комадиће мање од 5 mm у пречнику.

4.2 ФТИР АНАЛИЗА ПЛАСТИЧНОГ МАТЕРИЈАЛА

Узорци МП су при различитим експерименталним условима окарактерисани применом инфрацрвене спектроскопије са Фуријеовом трансформацијом (ФТИР). ФТИР анализа је изведена у опсегу од 4000-400 cm⁻¹ и у дифузном режиму рефлексије, на резолуцији од 4 cm⁻¹ са брзином од 60 скенова по анализи. Добијени ФТИР спектри су након снимања поређени са доступном литературом и софтверском библиотеком података. За ФТИР анализу добијених спектра коришћене су следеће софтверске библиотеке: Polymer Additives and Plasticizers,

Aldrich Polymers, Aldrich Vapor Phase Sample library, Aldrich Condensed Phase Sample library, Synthetic Fibers by Microscope, HR Spectra Polymers and Plasticizers by ATR – corrected, Humel Polymer Sample Library. Критеријум за квалитативну анализу према „library search“ методи биле су „similarity match“ вредности као и асигнација трака. Коришћене су „similarity match“ вредности преко 60% и барем две врло интензивне траке карактеристичне за дату врсту полимера МП.

4.3 ТЕСТ ОРГАНИЗАМ

Нетретирано семе сунцокрета (*Helianthus annuus* L., хибрид Круна) у биотесту добијено је из Института за ратарство и повртарство, Института од националног значаја за Републику Србију. Коришћене методе у циљу одређивања утицаја МП на физиолошке и популационе карактеристике сунцокрета урађене су у складу са ISO стандардима, односно SRPS EN ISO 11268-1: 2016, SRPS EN ISO 17512-1: 2020 и SRPS EN ISO 11268-2: 2023.

4.4 ПОСТАВЉАЊЕ ОГЛЕДА

Оглед је подељен у три групе, које су постављене у пет понављања. У оквиру огледа, у пет понављања постављене су три групе, наиме контрола, оглед са додатих 10 mg МП и група са 20 mg МП. Након мешања МП са земљиштем и стављања у саксије, засејане сусеменке сунцокрета. Два семена сунцокрета су засејана у сваку саксију (Слика 2). Потом су саксије постављене у комору за раст са контролисаним условима (температура, влажност и светло/мрачни режим). Након одређеног времена, у зависности од простора за биљке, саксије су уклоњене из комора. Биљке су биле у саксијама укупно 40 дана од дана када су посејане у саксије.

Након 40 дана, биљке су пажљиво извађене из земље да се не би оштетио корен. Корен је опран и осушен. Прво је измерена укупна свежа маса целе биљке, а после тога, биљке су остављене да се природно суше, при чему је након 48 сати мерена сува маса корена, стабла и укупна маса корена и стабла.

Табела 2. Услови у комори

Температура	Влага	Дневно/ноћни режим
$25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$	$60 \pm 5\%$	16:8 часова

**Слика 2.** Биљке након две недеље од постављања огледа (оригинал)

Анализа утицаја присуства МП на биљке се прати преко одређивања хлорофила а, б и каротеноида спектрофотометријском методом у све три групе биљака, као и мерењем дужине корена и надземног дела поника, уз одређивање свеже и суве масе истих стандардизованим методама.

За сваку групу биљака пажљиво су узимани надземни делови биљака, да би се избегло механичко оштећење. Након што је изрезан, биљни материјал се хомогенизује у присуству растварача (ацетон). У циљу добијања филтрата екстрахованог пигмента, узорак се из Бихнеровог левка преноси у одмерни суд од 25 mL, допуни до црте ацетоном и промућка. Добијени раствор је разблажен ацетоном у односу 1:10. Након што је екстракт промућкан на вортекс миксеру, анализиран је

спектрофотометријски читавањем апсорбанције на таласним дужинама 662, 644 и 440 nm.

За израчунавање количине хлорофила а и б и укупних каротеноида користили су се Wetstein обрасци (mg/L).

$$\text{Хлорофил а} = 9,784 \times A_{662} - 0,990 \times A_{644}$$

$$\text{Хлорофил б} = 21,426 \times A_{644} - 4,650 \times A_{662}$$

$$\text{Каротеноиди} = 4,695 \times A_{440} - 0,268 \times (a+b)$$

A₆₆₂ - читавање апсорбанце на таласној дужини 662 nm

A₆₄₄ - читавање апсорбанце на таласној дужини 644 nm

A₄₄₀ - читавање апсорбанце на таласној дужини 440 nm

Након прорачуна концентрације (mgL⁻¹) утврђена је количина пигмената у биљном материјалу, према обрасцу:

$$C = \frac{C1 \times V \times R}{G \times 1000}$$

C1 = концентрација пигмената (mg L⁻¹)

V = запремина екстракта (mL)

R = разблажење

G = маса биљног материјала (g)

4.5 СТАТИСТИЧКА ОБРАДА ПОДАТАКА

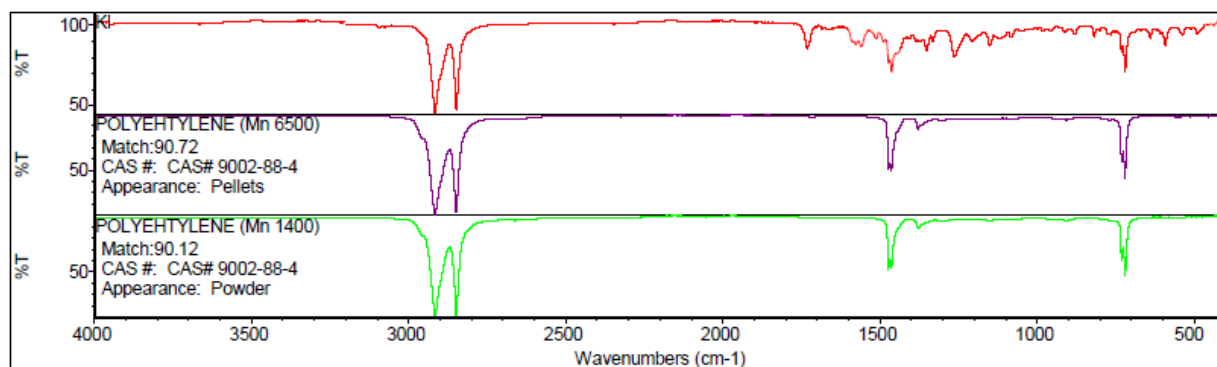
Статистичка обрада података вршена је употребом софтверског пакета Statistika 14.0.0.15 (TIVCO, Software Inc., Универзитетска лиценца) применом одговарајућих једнофакторијалне анализе варијансе (АНОВА). Утврђене статистичке значајности тестиране су Фишеровим НЗР тестом, за ниво значајности p<0.05 - статистички значајно и p<0.01 - високо статистички значајно.

5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

5.1 ФТИР АНАЛИЗА ПЛАСТИЧНОГ МАТЕРИЈАЛА

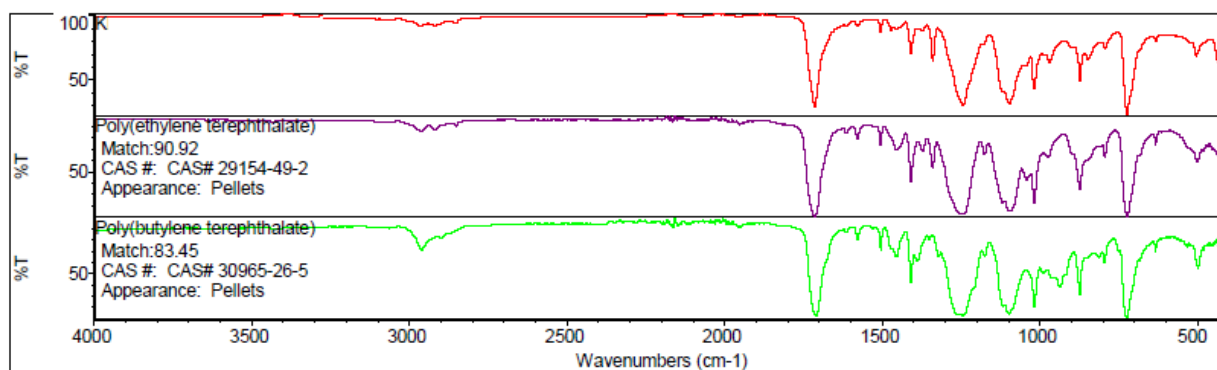
Помоћу ФТИР анализе је извршена карактеризација пластичног материјала. ФТИР спектар добијен приликом анализе амбалаже пестицида указује на специфичне траке на $2921,54$ и $2852,31\text{ cm}^{-1}$ које представљају специфичне траке за C–H вибрације карактеристичне за истезање алкил групе. Додатно, на $1743,72\text{ cm}^{-1}$ вибрације које су специфичне за спрезање C=O групе у карбонилној групи, а на $1458,37$ и $1160,58\text{ cm}^{-1}$ вибрације које указују на присуство C–O спрезање карбоксилне и етарске (C–O–C) функционалне групе, редом. Такође се могу уочити траке на $1357,70$ и $1268,27\text{ cm}^{-1}$ које указују на истежуће деформације C–O функционалне групе као и трака на 712 cm^{-1} специфична за интеракцију поларне етарске групе и ароматичног прстена (Балош, 2024).

Резимирано, пластика која је детектована код амбалаже пестицида је полиетилен и полистирен (Слика 3).



Search results list of matches

Index	Match	Compound Name	Library Name
1	104	90.72 POLYETHYLENE (Mn 6500)	HR Spectra Polymers and Plasticizers by ATR
2	102	90.12 POLYETHYLENE (Mn 1400)	HR Spectra Polymers and Plasticizers by ATR
3	103	90.12 POLYETHYLENE (Mn 1800)	HR Spectra Polymers and Plasticizers by ATR
4	58	89.08 Polyethylene, oxidized	HR Spectra Polymers and Plasticizers by ATR
5	49	86.43 Polyethylene, high density	HR Spectra Polymers and Plasticizers by ATR
6	10	86.02 Ethylene/ethyl acrylate copolymer	HR Spectra Polymers and Plasticizers by ATR
7	101	83.01 POLYETHYLENE (Mn 900)	HR Spectra Polymers and Plasticizers by ATR
8	37	81.25 Polyamide resin	HR Spectra Polymers and Plasticizers by ATR
9	1364	80.33 Hexatriacontane	Hummel Polymer and Additives
10	1908	78.72 Doocosanol	Hummel Polymer and Additives



Search results list of matches

Index	Match	Compound Name	Library Name
1	57	90.92 Poly(ethylene terephthalate)	HR Spectra Polymers and Plasticizers by ATR
2	40	83.45 Poly(butylene terephthalate)	HR Spectra Polymers and Plasticizers by ATR
3	207	80.66 POLYESTER	Synthetic Fibers by Microscope
4	232	79.04 POLYESTER	Synthetic Fibers by Microscope
5	277	78.56 POLYESTER	Synthetic Fibers by Microscope
6	205	78.47 POLYESTER	Synthetic Fibers by Microscope
7	234	78.33 POLYESTER	Synthetic Fibers by Microscope
8	210	78.13 POLYESTER	Synthetic Fibers by Microscope
9	267	77.81 POLYESTER	Synthetic Fibers by Microscope
10	211	76.88 POLYESTER	Synthetic Fibers by Microscope

Слика 3. ФТИР спектар добијен приликом анализе узорка пестицидне амбалаже

5.2 АНАЛИЗА УТИЦАЈА МИКРОПЛАСТИКЕ НА БИЉКЕ СУНЦОКРЕТА

Након 40 дана од постављеног огледа, биљке су пажљиво извађене како би се измерила укупна свежа маса целе биљке (Слике 4 и 5), а после тога, биљке су остављене да се природно суше, при чему је након 48 сати мерена укупна сува маса корена и стабла.



Слика 4. Биљке са 10 mg МП (оригинал)



Слика 5. Биљке са 20 mg МП (оригинал)

Резултати мерења свеже и суве масе биљака сунцокрета третираних различитим концентрацијама микропластике, као и дужине стабла и корена, табеларно су приказане (Табела 2).

Табела 3. Резултати раста биљака контрола и третман

	СВЕЖА МАСА(g)	СУВА МАСА (g)	ДУЖИНА СТАБЛА(cm)	ДУЖИНА КОРЕНА (cm)
КОНТРОЛА				
1.	1,316	0,1193	20,8	6,8
2.	1,3176	0,1319	20,3	6,7
3.	1,4832	0,1552	21,2	9,3
4.	1,4535	0,1222	19,5	8,9
5.	1,1030	0,0988	19,6	5,4
Третман са 10mg МП				
6.	1,2795	0,1172	21,0	5,1

7.	1,2382	0,0882	21,1	6,0
8.	1,2860	0,1040	24,1	2,9
9.	1,2646	0,1123	24,1	6,1
10.	1,2767	0,0893	24,2	6,3
Третман са 20mg МП				
11.	1,0582	0,1113	17,9	2,1
12.	1,0662	0,0939	21,7	3,5
13.	1,2275	0,1329	20,6	5,3
14.	1,0307	0,1067	19,7	4,7
15.	1,0574	0,0820	21,7	4,2

Добијени резултати указују на смањење свеже масе биљака са порастом концентрације микропластике. Уколико би се упоређивале просечне вредности контроле као и третираних биљака добио би се График 1.

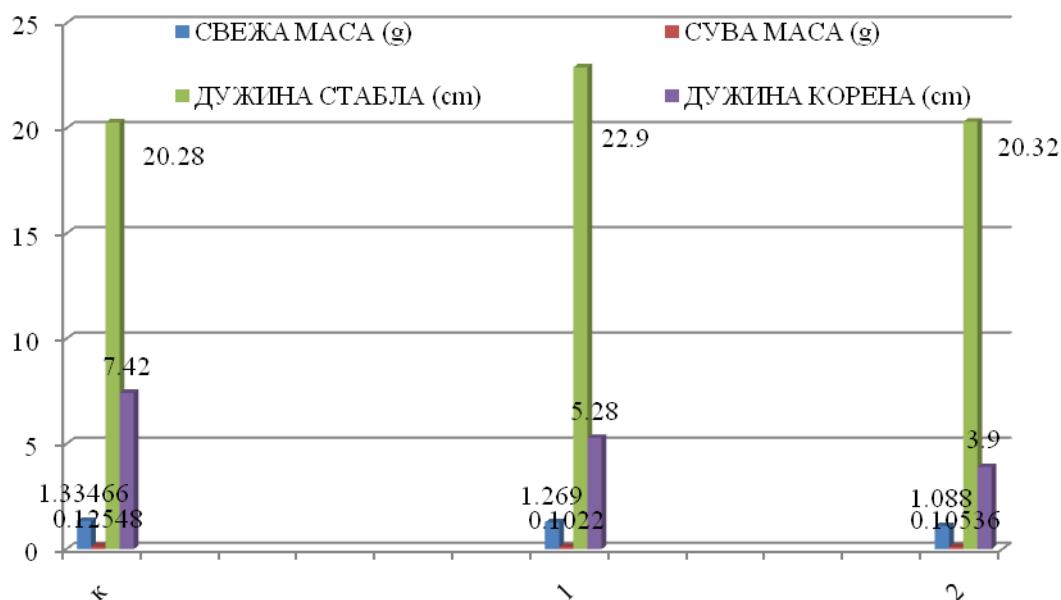


График 1. Поређење утицаја МП на раст биљке сунцокрета

Са графика се јасно уочава да су свежа маса, сува маса и дужина корена биле у паду са порастом количине изложености микропластике. Једино одступање се јавило код дужине стабла јер је уочено да је концентрација од 10 mg МП повољно утицала на раст биљке сунцокрета.

Применом једнофакторијалне анализе варијансе констатоване су статистички високо значајне разлике у измереним вредностима свеже масе биљака (График 2) и дужине корена (График 3) ($p_{sm}=0,005296$ и $p_{dk}=0,008045$ за $p<0,01$). Разлике у дужини

стабала биле су статистички значајне ($p_{ds}=0,018216$ за $p<0,05$) (График 4), док разлике у вредностисуве масе биљака нису биле статистички значајне (График 5) ($p_{sm}=0,125045$ за $p<0,05$).

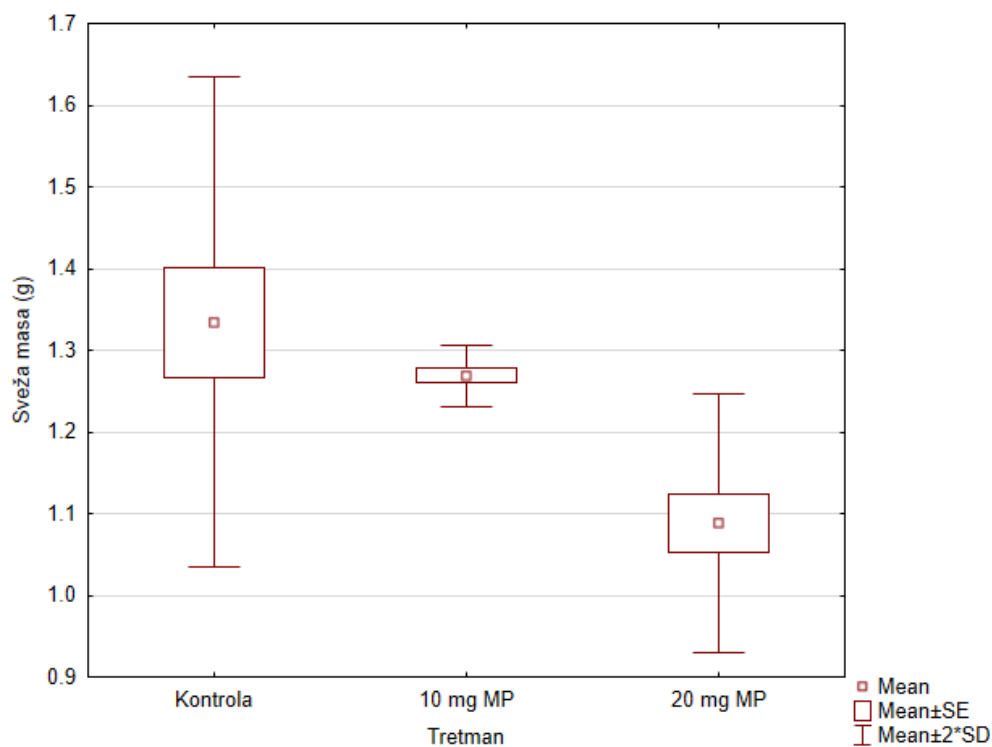


График 2.Измерене вредности свеже масе биљака сунцокрета (g)

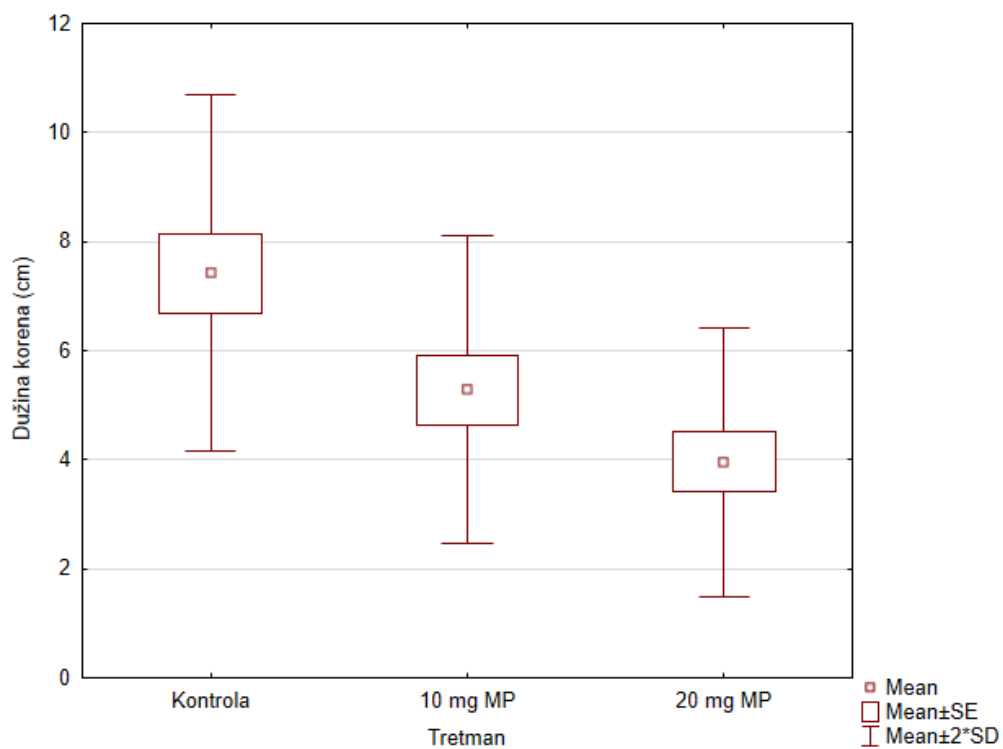


График 3.Измерене вредности дужине корена биљака сунцокрета (cm)

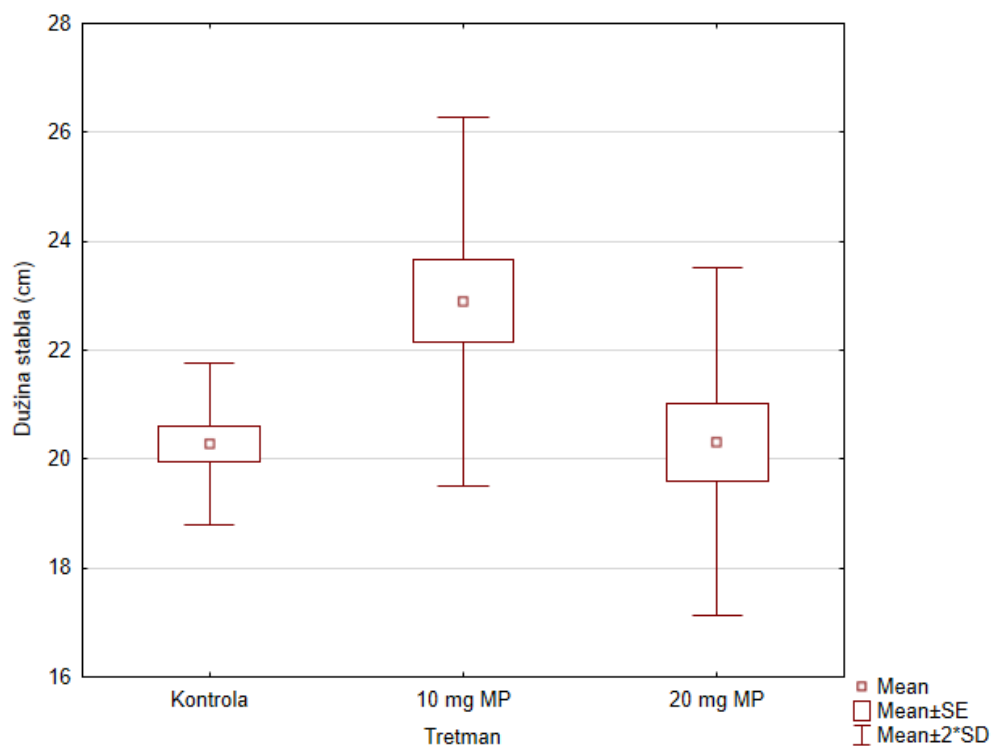


График 4. Измерене вредности дужине стабала биљака сунцокрета (cm)

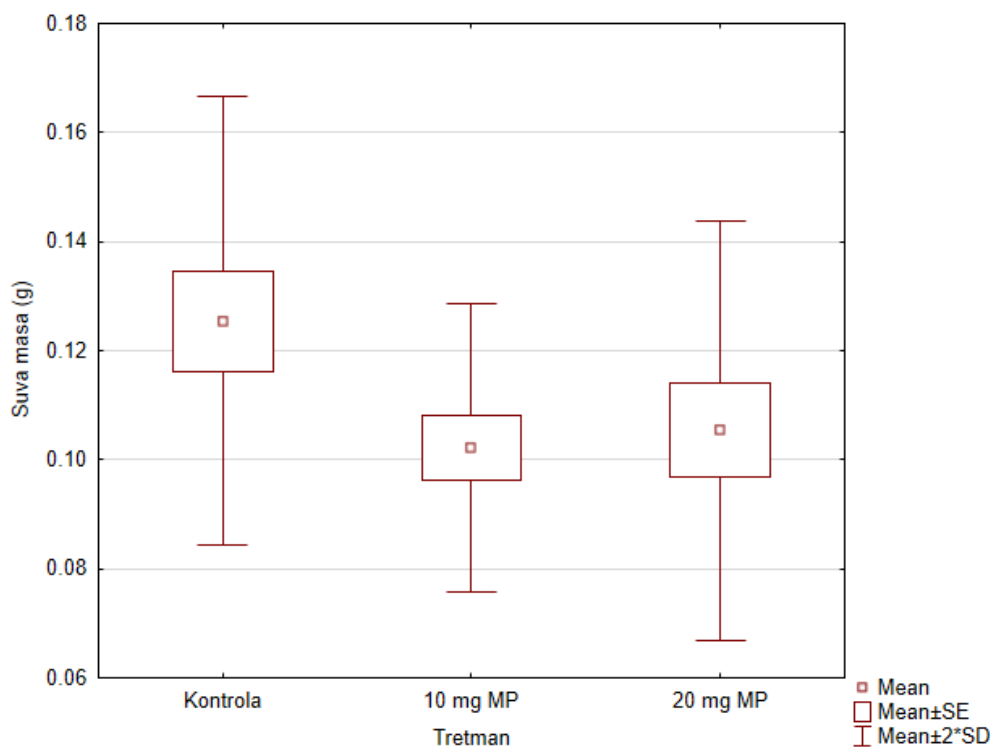


График 5. Измерене вредности суве масе биљака сунцокрета (g)

Фишеров НЗР тест је нагласио постојање разлика између свеже масе биљака које су гајене у земљишном систему оптерећеном са 20 mg микропластике и контролне групе (без додате МП) као високо статистички значајне ($p < 0,01$), а при поређењу самасом биљака у третману са 10 mg микропластике као статистички значајне ($p < 0,05$) (Табела 3).

Табела 4. Резултати Фишеоровог НЗР теста за измерене вредности свеже масе биљака (g)

LSD test; Error: Between MS = 0,00975, df = 12,000			
Tretman	{kontrola} 1.3347	{ 10 mg MP } 1.2690	{ 20 mg MP } 1.0880
kontrola		0,313712	0,001927
10 mg MP	0,313712		0,013356
20 mg MP	0,001927	0,013356	

Исти тест је нагласио постојање статистички значајних разлика ($p < 0,05$) између дужине стабаласунцокрета гајеног у систему оптерећеном са 10 mg микропластике и остале две групе: контролом и третманом са 10 mg микропластике (Табела 4).

Табела 5. Резултати Фишеоровог НЗР теста за измерене вредности дужине стабла (cm)

LSD test; Error: Between MS = 1,9780, df = 12,000			
Tretman	{kontrola} 1.3347	{ 10 mg MP } 1.2690	{ 20 mg MP } 1.0880
kontrola		0,012246	0,964871
10 mg MP	0,012246		0,013313
20 mg MP	0,964871	0,013313	

Најуочљивије разлике у хомогеним групама али и у статистичкој значајности разлика констатоване су када је Фишеровим НЗР тестом анализирана дужина корена сунцокрета. Том приликом уоченесу разлике у измереним вредностима дужине корена биљака из контролне групе и обе групе биљака које су гајене у земљишним системима оптерећеним микропластиком, и то: високо статистички значајне разлике у третману са 20 mg и статистички значајне у третману са 10 mg микропластике.

Табела 6. Резултати Фишеровог НЗР теста за измерене вредности дужине корена (cm)

LSD test; Error: Between MS = 2,0590, df = 12,000			
Tretman	{kontrola} 1.3347	{ 10 mg MP } 1.2690	{ 20 mg MP } 1.0880
kontrola		0,036178	0,002473
10 mg MP	0,036178		0,171459
20 mg MP	0,002473	0,171459	

Приликом спектрофотометријског одређивања утицаја присуства МП, односно одређивања хлорофила а, б и каротеноида у све три групе биљака, припремљени су екстракти (Слика 6), а добијени резултати су приказани табеларно (Табела 6).



Слика 6. Узорци за спектрофотометријску анализу (оригинал)

Табела 7. Утицај МП на хлорофил и каротеноиде

	Хлорофил а (mg g ⁻¹)	Хлорофил б (mg g ⁻¹)	Каротеноиди (mg g ⁻¹)
Контрола	0,091	0,129	0,034
10mg МП	0,066	0,058	0,017
20mg МП	0,055	0,055	0,015

Табеларно су приказане апсорбанције при одговарајућим таласним дужинама, док вредности 9,784; 0,990; 21,426; 4,650 и 0,288 представљају моларне апсорпционе коефицијенте по Холму (1954) и Ветстеин-у (1957) за ацетон и дужину оптичког пута од 1 cm (Smiljić et al., 2018).

Наведени резултати показују да примењене концентрације микропластике утичу на садржај хлорофила а, хлорофила б и каротеноида у биљкама. Најмањи садржај пигмента забележен је у третману са највећом концентрацијом МП (20 mg). Највећа разлика у садржају пигмената између третираних и контролних биљака измерена је за хлорофил б што указује да је ова врста пигмената најосетљивија.

Нема много литературних података који су обрађивали тематику наших истраживања што указује на њихову конкурентност и иновативност.

На примеру зелене салате (*Lactuca sativa L.*) Lian и сарадници (2021), су указали да примена честица ПС смањује садржај каротеноида и хлорофил а и б, што директно утиче на суву масу и висину изданака као и површину листа. Према Pignattelli (2021), услед присуства различитих честица микропластике значајно је повећана производња водоник пероксида, самим тим је нарушен процес фотосинтезе. Микропластика може да изазове стрес код биљака инхибирањем ефикасности искориштења светлости. Код испитиваних C4 биљака (кукуруз) долази до инхибиције фиксације угљеника (Liet al., 2023). У таквим условима, строма хлоропласта накупља више електрона, што истовремено може изазвати производњу реактивних врста кисеоника супероксид-радикала ($O_2^{\cdot-}$) и водоник-пероксида (H_2O_2) у корену (Gao et al., 2019) уз узроковање генотоксичних ефеката (Jiang et al., 2019). Смањен садржај хлорофила и фотосинтетичка ефикасност у биљкама бундеве повезани су са токсичношћу, насталом излагањем честицама микропластике (Zhang, 2022). ПС у концентрацији од 50 mg L^{-1} величине од 10 до 700 nm утицао је на смањење садржаја хлорофила и метаболизам шећера у биљкама краставца (Li et al., 2021).

Адаптивни одговор сунцокрета на стрес је углавном акумулирање неорганских јона уместо синтезе органских једињења како би смањио потенцијал воде у ћелијама, односно уштедео потрошњу енергије (Liu, 2010). Vieira (2004) наводи да је смањена синтеза прекурсора у биосинтези хлорофила ALA (5-аминолаевулинска киселина), реакција биљака сунцокрета на стрес изазван NaCl. Наведено истраживање поткрепљено је подацима из 1998. године, који указују да биљке сунцокрета реагују на стрес смањеним садржајем хлорофила, те нарушавањем односа тј. конвертовањем хлорофила б у хлорофил а.

Са друге стране, нивои РОС-а су показатељи промене оптималних услова околине те се значајно повећавају услед стреса. Забележени негативни утицаји услед присуства микропластике уочени су кроз смањени раст и поремећен процес фотосинтезе.

Физичке промене се односе на поремећај протока воде, односно хемијски индукцијом РОС. На добијене резултате такође треба узети у обзир утицаје врсте, фазе раста, методе експерименталног рада и трајање истраживања (Lague, 2021).

6. ЗАКЉУЧАК

На основу извршених испитивања присуства микропластике у узорку земљишта и њеног физиолошког и биохемијског утицаја на биљке сунцокрета, може се закључити:

- Земљиште са локалитета „Торак“, коришћеног у испитивању, карактерише висок проценат глине(33,04%) и значајно присуство ситног песка (35,50%). Количина крупног песка (1,26%) и муља (30,20%) је мања. Садржај органске материје је 3,11%. Добијени резултати указују на структуру глиновите иловаче коју карактерише лоша дренажа и тешкоће у обради земљишта. Висок удео глине може утицати на компактност земљишта и смањену пропустљивости за воду и ваздух, причему је примећено задржавање микропластичних честица.
- Упоредивањем праћених параметара добијених у контроли, у односу на третмане у којима је коришћена микропластика у количини од 10 и 20 mg, може се закључити да обе концентрације МП негативно утичу на раст биљака, односно да доводе до смањења свеже и суве масе као и дужине корена.
- Резултати су показали одступање код параметра дужине стабла, где је третман у концентрацији од 10 mg МП утицао повољно на ову карактеристику гајених биљака сунцокрета.
- Повећањем концентрације МП у земљишту уочено је смањење садржаја хлорофила а, хлорофила б и каротеноида, што указује на потенцијалне негативне ефекте микропластике на физиолошке и биохемијске карактеристике тестираних биљака.
- Применом једнофакторијалне анализе варијансе констатоване су статистички високо значајне разлике у измереним вредностима свеже масе биљака и

дужине корена ($p_{sm}=0,005296$ и $p_{dk}=0,008045$ за $p<0,01$). Разлике у дужини стабала биле су статистички значајне ($p_{ds}=0,018216$ за $p<0,05$), док разлике у вредности суве масе биљака нису биле статистички значајне ($p_{sm}=0,125045$ за $p<0,05$).

- Најјучљивије разлике у хомогеним групама али и у статистичкој значајности разлика констатоване су када је Фишеровим НЗР тестом анализирана дужина корена сунцокрета. Том приликом уочене су разлике у измереним вредностима дужине корена биљака из контролне групе и обе групе биљака које су гајене у земљишним системима оптерећеним микропластиком, и то: високо статистички значајне разлике у третману са 20 mg и статистички значајне у третману са 10 mg микропластике.

7. ЛИТЕРАТУРА

1. Adeel M., Shakoor N., Hussain T., Azeem I., Zhou P., Zhang P. (2021). Bio-interaction of nano and bulk lanthanum and ytterbium oxides in soil system: Biochemical, genetic, and histopathological effects on *Eisenia fetida*. *J. Hazardous Mater.* 415, 125574. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125574.
2. Alimi O. S., Farner Budarz J., Hernandez L. M., Tufenkji N. (2018). Microplastics and Nanoplastics in Aquatic Environments: Aggregation, Deposition, and Enhanced Contaminant Transport, *Environ. Sci.*, 52, 170.
3. Bai H., Yang H., Huang Y. (2024). Distribution of microplastics and their effects on nutrient absorption in strawberry plants, *Scientia Horticulturae*, Volume 3322, 2024, 113214, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113214>.
4. Baloš M. (2024). Biomonitoring mikroplastike u poljoprivrednom zemljištu, Doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet.
5. Bandopadhyay S., Martin-Closas L., Pelacho A.M., Debruyne J.M. (2018). Biodegradable plastic mulch films: impacts on soil microbial communities and ecosystem functions. *Front. Microbiol.* 9, 819.
6. Bathrellos G., Gaki-Papanastassiou K., Skilodimou H., Skianis G., Chousianitis K. (2013). Assessment of rural community and agricultural development using geomorphological-geological factors and GIS in the Trikala prefecture (Central Greece). *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment.* 27. 573-588. 10.1007/s00477-012-0602-0.
7. Bethanis J., Golia E.E. (2024). Micro- and nano-plastics in agricultural soils: A critical meta-analysis of their impact on plant growth, nutrition, metal accumulation in plant tissues and crop yield. *Appl. Soil Ecol.* 194, 105202.

8. Bigalke M., Fieber M., Foetisch A., Reynes J., Tollan P.(2022). Microplastics in agricultural drainage water: a link between terrestrial and aquatic microplastic pollution. *Sci. Total Environ.* 806, 150709.
9. Blasing M., Amelung W.(2018). Plastics in soil: Analytical methods and possible sources. *Sci. Total Environ.* 612, 422–435.
10. Blettler M., Abrial E., R. Khan F., Sivri N., Espinola L. (2018). Freshwater plastic pollution: Recognizing research biases and identifying knowledge gaps, *Water Research*, Volume 143, 416-424, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.015>
11. Chen Y., Leng Y., Liu X., Wang J.(2020). Microplastic pollution in vegetable farmlands of suburb Wuhan, central China, *Environmental Pollution*, Volume 257, 113449, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113449>
12. Colzi I., Renna L., Bianchi E., Castellani M. B., Coppi A., Pignattelli S. (2022). Impact of microplastics on growth, photosynthesis and essential elements in *Cucurbita pepo* L. *J. Hazardous Mater.* 423, 127238. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127238
13. De Souza Machado A. A., Lau C. W., Till J., Kloas W., Lehmann A., Becker R.(2018). Impacts of microplastics on the soil biophysical environment. *Environ Sci. Technol.* 52, 658 9656-9665
14. Fuller S., Gautam A.(2016). A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction. *Environmental Science & Technology* 50, 5774–5780
15. Gao M., Liu Yu, Song Z.,(2019). Effects of polyethylene microplastic on the phytotoxicity of di-n-butyl phthalate in lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *ramosa* Hort), *Chemosphere*, Volume 237, 124482
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124482>
16. Ge J., Li H., Liu P., Zhang Z., Ouyang Z., Guo X. (2021). Review of the toxic effect of microplastics on terrestrial and aquatic plants. *Sci. Total Environ.* 791, 148333. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148333
17. Geyer R., Jambeck J., Lavender K. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made *Journal Article*, *TA - Science Advances*, PG - e1700782, VI – 3, IP – 7 AID. 10.1126/sciadv.1700782 PMID – 28776036, 4099 -
<https://www.science.org/doi/abs/10.1126/sciadv.1700782>
18. Grayling K.M., Young S.D., Roberts C.J., de Heer M.I., Shirley I.M., Sturrock C.J.(2018). The application of X-ray micro Computed Tomography imaging for tracing particle movement in soil. *Geoderma.* 321, 8-14

19. Hahladakis J., Velis C.A., Weber R., Iacovidou E., Purnell P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *J. Hazard. Mater.* 344, 179–199
20. Hernández-Arenas R., Beltrán-Sanahuja A., Navarro-Quirant P., Sanz-Lazaro C. (2021). The effect of sewage sludge containing microplastics on growth and fruit development of tomato plants. *Environ. Pollut.* 268, 115779.
doi: 10.1016/j.envpol.2020.115779
21. Heudorf U., Mersch-Sundermann V., & Angerer J. (2007). Phthalates: toxicology and exposure. *International journal of hygiene and environmental health*, 210(5), 623–634.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2007.07.011>
22. Horton A. A., Walton A., Spurgeon D. J., Lahive E., Svendsen C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *The Science of the total environment*, 586, 127–141.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>
23. Hua Z., Ma S., Ouyang Z., Liu P., Qiang H., Guo X. (2023). The review of nanoplastics in plants: detection, analysis, uptake, migration and risk. *TrAC Trends Anal. Chem.* 158, 116889 <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116889>
24. Institute for Standardization of Serbia (1987), SRPS H,Zi,111:1987 - Standard for Soil Analysis Methods, Belgrade, Serbia: Institute for Standardization of Serbia,
25. Institute for Standardization of Serbia (2007), SRPS ISO 8245:2007 Water quality - Guidelines for the determination of total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC).
26. Jambeck J., Geyer P., Wilcox C., Siegler T., Perryman M., Andrady A., Narayan R., Law K. (2015). Marine pollution. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science (New York, N.Y.)*. 347. 768-771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
27. Jiang X., Chen H., Liao Y., Ye Z., Li M., Klobučar G. (2019). Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant *Vicia faba*, *Environmental Pollution* doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.055>
28. Kallenbach E.M.F., Rødland E.S., Buenaventura N.T., Hurley R. (2022). Microplastics in Terrestrial land Fresh water Environments. Springer, *Chemoecology*, 87–130.
29. Khalid N., Aqeel M., Noman A. (2020). Microplastics could be a threat to plants in terrestrial systems directly or indirectly, *Environmental Pollution*, Volume 267, 115653, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115653>

30. Kiefer T., Knoll M., Fath A. (2023). Comparing Methods for Microplastic Quantification Using the Danube as a Model. *Microplastics* 2, 322-333. <https://doi.org/10.3390/microplastics2040025>
31. Kik K., Bukowska B., Sicinska P. (2020). Polystyrene nanoparticles: Sources, occurrence in the environment, distribution in tissues, accumulation and toxicity to various organisms. *Environmental Pollution*, 262, 114297
doi:10.1016/j.envpol.2020.114297
32. Koelmans A.A., Besseling E., Foekema E.M. (2014). Leaching of plastic additives to marine organisms. *Environ. Pollut.* 187, 49–54
33. Kong W., Jalalah M., Alsareii S., Harraz F., A. Almadiy A., Thakur N., Salama E. (2024). Occurrence, characteristics, and microbial community of microplastics in anaerobic sludge of wastewater treatment plants, *Environmental Pollution*, Volume 344, 123370, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123370>.
34. Kumar A., Mishra S., Pandey R., Yu Z. G., Kumar M., Khoo K. S. (2022). Microplastics in terrestrial ecosystems: Un-ignorable impacts on soil characterizes, nutrient storage and its cycling. *TrAC Trends Analytical Chem.* 158, 116869. doi: 10.1016/j.trac.2022.116869
35. Lambert S., Sinclair C.J., Boxall A.B. (2014). Occurrence, degradation and effect of polymer-based materials in the environment. *Rev Environ Contamin Toxicol* 227:1–53
36. Larue C., Sarret G., Castillo-Michel H., & Pradas Del Real, A. E., (2021). A Critical Review on the Impacts of Nanoplastics and Microplastics on Aquatic and Terrestrial Photosynthetic Organisms. *Small (Weinheim an der Bergstrasse, Germany)*, 17(20), e2005834
37. Li B., Huang S., Wang H., Liu M., Xue S., Tang D., Cheng W., Fan T., Yang X. (2021). Effects of plastic particles on germination and growth of soybean (*Glycine max*): A pot experiment under field condition, *Environmental Pollution*, Volume 272, 116418, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116418>
38. Li C., Busquets R., Campos L. (2020). Assessment of microplastics in freshwater systems: A review, *Science of The Total Environment*, Volume 707, 135578, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135578>.
39. Li Y., Feng H., Xian S., Wang J., Zheng X., Song X. (2023). Phytotoxic effects of polyethylene microplastics combined with cadmium on the photosynthetic performance of maize (*Zea mays* L.), *Plant Physiology and Biochemistry*, Volume 203, 108065, ISSN 0981-9428, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108065>.

40. Lian J., Liu W., Meng L., Wu J., Chao L., Zeb A., Sun Y. (2021). Foliar-applied polystyrene nanoplastics (PSNPs) reduce the growth and nutritional quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.), *Environmental Pollution*, Volume 280, 116978, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116978>.
41. Lian J., Shen M., Liu W. (2019). Effects of microplastics on wheat seed germination and seedling growth. *J. Agro-Environment Sci.* 38 (4), 737–745.
42. Liang L., Gao C., Luo M., Wang W., Zhao C., Zu Y., Efferth T., Fu Y. (2013). Dihydroquercetin (DHQ) induced HO-1 and NQO1 expression against oxidative stress through the Nrf2-dependent antioxidant pathway. *Journal of agricultural and food chemistry*, 61(11), 2755–2761. <https://doi.org/10.1021/jf304768p>.
43. Liu E.K., He W.Q., Yan C.R.(2014). 'White revolution' to 'white pollution'—agricultural plastic film mulch in China. *Environ. Res. Lett.* 9 (9), 091001.
44. Liu H.F., Yang X.M., Liu G.B., Liang C.T., Xue S., Chen H., Ritsema C.J., Geissen V, (2017). Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil. *Chemosphere* 185, 907e917.
45. Meng F., Yang X., Riksen M., Xu M., & Geissen, V. (2021). Response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) growth to soil contaminated with microplastics. *The Science of the total environment*, 755(Pt2), 142516. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142516>.
46. Mittler R., Vanderauwera S., Gollery M., Van Breusegem F. (2004). Reactive oxygen gene network of plants. *Trends in plant science*, 9(10), 490–498. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2004.08.009>
47. Mondal N. K., Kundu S., Debnath P., Mondal A., Sen K. (2022). Effects of polyethylene terephthalate microplastic on germination, biochemistry and phytotoxicity of *Cicer arietinum* L. and cytotoxicity study on *Allium cepa* L. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 94, 103908. doi: 10.1016/j.etap.2022.103908.
48. O'Connor D., Pan S. Z., Shen Z. T., Song Y. N., Jin Y. L., Wu W. M.(2019). Microplastics undergo accelerated vertical migration in sand soil due to small size and wet-dry cycles. *Environ. 31 Pollut.* 249, 527-534.
49. Ozfidan-Konakci C., Yildiztugay E., Arikan B., Alp-Turgut F. N., Turan M., Cavusoglu H., Sakalak H. (2023). Responses of individual and combined polystyrene and polymethyl methacrylate nanoplastics on hormonal content, fluorescence/photochemistry of chlorophylls and ROS scavenging capacity in *Lemna*

- minor under arsenic-induced oxidative stress. *Free radical biology & medicine*, 196, 93–107. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2023.01.015>.
50. Pignattelli S., Broccoli A., Piccardo M., Terlizzi A., Renzi M. (2021). Effects of polyethylene terephthalate (PET) microplastics and acid rain on physiology and growth of *Lepidium sativum*. *Environ. Pollut.* 282, 116997. doi: 10.1016/j.envpol.2021.116997.
51. Prendergast-Miller M.T., Katsiamides A., Abbass M., Sturzenbaum S.R., Thorpe K.L., Hodson M.E.(2019). Polyester-derived microfibre impacts on the soil-dwelling earthworm *Lumbricus terrestris*. *Environ. Pollut.* 251, 453–459.
52. Rillig M.C., Lehmann A., de Souza Machado A.A., Yang G., (2019). Microplastic effects on plants. *New Phytol.* 223, 1066–1070. <https://doi.org/10.1111/nph.15794>.
53. Shi R., Liu W., Lian Y., Wang Q., Zeb A., Tang J. (2022). Phytotoxicity of polystyrene, polyethylene and polypropylene microplastics on tomato (*Lycopersicon esculentum* L.), *Journal of Environmental Management*, Volume 317, 115441, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115441>.
54. Smiljić M., Stankov-Jovanović V., Ćirić S., Stamenković N., Ilić M., Jakšić T., Živić N., Stamenković S., Marković M. (2018). Sadržaj pigmenata hloroplasta u lekovitoj biljci *Teucrium chamaedrys* sa sanirane deponije rudarsko metalurškog hemijskog kombinata “Trepča”, XXIII Savetovanje o biotehnologiji, Čačak, Zbornik radova, 358-363.
55. Steinmetz Z., Wollmann C., Schaefer M., Buchmann C., David J., Tröger J., Muñoz K., Frör O. Schaumann G.E. (2016). Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? *Science of the Total Environment* 550: 690–705.
56. Stöven K., Jacobs F., Schnug E. (2015). Mikroplastik: ein selbstverschuldetes Umweltproblem im Plastikzeitalter. *J Kulturpflanzen* 67:241–250.
57. Vieira Santos C.(2004).Regulation of chlorophyll biosynthesis and degradation by salt stress in sunflower leaves, *Scientia Horticulturae*, 103 (1), 93-99, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.04.009>.
58. Waring R.H., Harris R.M. (2005). Endocrine disrupters: a human risk? *Mol Cell Endocrinol* 244:2-9.
59. Weber A., Scherer C., Brennholt N., Reifferscheid G., Wagner M. (2018). PET microplastics do not negatively affect the survival, development, metabolism and

- feeding activity of the freshwater invertebrate *Gammarus pulex*. *Environ. Pollut.* 234, 181–189. doi: 10.1016/j.envpol.2017.11.014
60. Xie X., He Z., Chen N., Tang Z., Wang Q., & Cai, Y. (2019). The Roles of Environmental Factors in Regulation of Oxidative Stress in Plant. *BioMed research international*, 2019, 9732325. <https://doi.org/10.1155/2019/9732325>.
61. Yang C., Gao X.,(2022). Impact of microplastics from polyethylene and biodegradable mulch films on rice (*Oryza sativa* L.), *Science of The Total Environment*, Volume 828, 154579, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154579>.
62. Yi X., Wang J., Li Z., Zhang Z., Chi T., Guo M., et al. (2019). The effect of polystyrene plastics on the toxicity of triphenyltin to the marine diatom *skeletonema costatum*—influence of plastic particle size. *Environ. Sci. pollut. Res.* 26, 25445–25451. doi: 10.1007/s11356-019-05826-3
63. Yildiztugay E., Ozfidan-Konakci C., Arikan B., Nur Alp F., Elbasan F., Zengin G., Cavusoglu H, Sakalak H.(2022). The hormetic dose-risks of polymethyl methacrylate nanoplastics on chlorophyll a fluorescence transient, lipid composition and antioxidant system in *Lactuca sativa*, *Environmental Pollution*, Volume 308, 119651, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119651>.
64. Zhang G. S., Zhang F. X., Li X. T. (2018). Effects of polyester microfibers on soil physical properties: Perception from a field and a pot experiment. *Sci. Total Environ.* 670: 1-7.
65. Zhang W., Ma X., Zhang Z. (2015). Persistent organic pollutants carried on plastic resin pellets from two beaches in China. *Mar. Pollut. Bull.* 99, 28e34.
66. Zhang Y., Cai C., Gu Y., Shi Y., Gao X., (2022). Microplastics in plant-soil ecosystems: A meta-analysis, *Environmental Pollution*, Volume 308, 119718, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119718>.
67. Zhang Y., Kang S., Allen S., Allen D., Gao T., Sillanpaa M. (2020). Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives, *Earth-Science Reviews*, Volume 203, 103118, ISSN 0012-8252, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103118>.

8. ПРИЛОГ

ИЗВОРИ СЛИКА:

Слика 1. Мапа са локалитетима прикупљених узорака земљишта и локалитетима узорковања пластичног репроматеријала (извор: <https://www.381info.com/autokarta-srbije>)

Слика 2. Биљке након двије седмице од постављања огледа (извор: оригинал)

Слика 3. ФТИР спектар добијен приликом анализе појединих узорака пестицидне амбалаже (извор: проф. Тубић)

Слика 4. Биљке из огледа са 10mg микропластике (извор: оригинал)

Слика 5. Биљке из огледа са 20mg микропластике (извор: оригинал)

Слика 6. Узорци за анализу спектрофотометром (оригинал)

ТАБЕЛЕ:

Табела 1. Карактеристике земљишта (Балош, 2024)

Табела 2. Услови у комори

Табела 3. Резултати раста биљака контрола и третман

Табела 4. Резултати Фишеровог НЗР теста за измерене вредности свеже масе биљака (g)

Табела 5. Резултати Фишеровог НЗР теста за измерене вредности дужине стабла (cm)

Табела 6. Резултати Фишеровог НЗР теста за измерене вредности дужине корена (cm)

Табела 7. Утицај МП на хлорофил и каротеноиде

ГРАФИКОНИ:

График 1. Поређење утицаја МП на раст биљке сунцокрета

График 2. Измерене вредности свеже масе биљака сунцокрета (g)

График 3. Измерене вредности дужине корена биљака сунцокрета (cm)

График 4. Измерене вредности дужине стабала биљке сунцокрета (cm)

График 5. Измерене вредности суве масе биљака сунцокрета (g)