

DOI: <https://doi.org/10.61308/QZFE3835>

Замърсяването на почвите с микропластмаси и нанопластмаси: Екологични рискове и последствия за агроекосистемата и земеделието

Емил Володиев Димитров

*Институт по почвознание, агротехнологии и защита на растенията „Никола Пушкиarov“,
Селскостопанска академия*

E-mail: engineer.dimitrov@mail.bg

Резюме

Замърсяването на почвите с микропластмаси и нанопластмаси е нарастващ екологичен проблем, който оказва значително въздействие върху агроекосистемите, почвените свойства, биологичното разнообразие, хранителната верига, аграрния сектор и земеделието. Публикацията разглежда основните източници, механизми на разпространение, дълготрайни последици и потенциалните рискове за околната среда, продуктивността на земеделските култури и човешкото здраве. Замърсяването с микропластмаси и нанопластмаси може да доведе до промени в почвената структура, намалена водозадържаща способност и нарушаване на микробиологичното равновесие, което се отразява на добивите и качеството на продукцията в земеделието. Освен това, тези частици могат да бъдат абсорбирани от растенията и да се натрупват в хранителната верига, създавайки потенциални рискове за животновъдството и човешкото здраве.

Ключови думи: микропластмаса, нанопластмаса, замърсяване, почви

Soil contamination with micro- and nanoplastics: environmental risks, challenges, and consequences for agroecosystems and agriculture

Emil Volodiev Dimitrov

Institute of Soil Science, Agrotechnology and Plant Protection “Nikola Pushkarov” – Sofia, Agricultural Academy

Corresponding author: engineer.dimitrov@mail.bg

Citation: Dimitrov, E.V. (2025). Soil contamination with micro- and nanoplastics: environmental risks, challenges, and consequences for agroecosystems and agriculture. *Bulgarian Journal of Soil Science Agrochemistry and Ecology*, 59(2), 51-60 (Bg).

Abstract

Soil contamination with microplastics and nanoplastics is an escalating environmental issue that significantly impacts agroecosystems, soil properties, biodiversity, the food chain, the agricultural sector, and farming. This publication examines the main sources, mechanisms of distribution, long-term consequences, and potential risks to the environment, agricultural productivity, and human health. Pollution caused by microplastics and nanoplastics can lead to alterations in soil structure, reduced water retention capacity, and disruptions in microbial balance, which affect crop yields and the quality of agricultural production. Additionally, these particles can be absorbed by plants and accumulate in the food chain, posing potential risks to livestock and human health.

Key words: microplastic, nanoplastic, pollution, soil

Въведение

Изхвърлените пластмасови продукти представляват нарастващ глобален екологичен проблем. От 1950 насам в световен мащаб са произведени над 8,3 милиарда метрични тона пластмаса, като около 9% от тях са били рециклирани (Geyer et al., 2017). Значителна част от тези пластмаси се разпадат на микропластмаси (частици с размер под 5 mm), които са широко разпространени в различни екосистеми – океани, сладководни басейни, почви и брегови линии. Изследванията върху микропластмасите досега са се фокусирали предимно върху водната среда, но замърсяването на почвите с микропластмаси също представлява сериозен екологичен проблем. Микропластмасите могат да се натрупват в почвите, като влияят върху техните физични и химични свойства, както и върху почвената микрофлора. Замърсяването с микропластмаси (МП) и нанопластмаси (НП) в агроекосистемите представлява нарастващ екологичен и здравен проблем. Въпреки че изследванията върху пластмасовото замърсяване традиционно са фокусирани върху морската среда (do Sul and Costa, 2014), нарастват доказателствата, че селскостопанските почви могат да бъдат

значителен резервоар на тези замърсители (Jambeck et al., 2015). Тези частици могат да променят водозадържащата способност на почвата и да повлияят на разпространението на почвените микроорганизми, което от своя страна може да окаже влияние върху растежа и развитието на растенията (Perfanova et al., 2024). Микропластмасите обикновено се дефинират като пластмасови частици с размери от няколко милиметра до микрометри. Основните източници на микропластмаси в агроекосистемите включват употребата на утайки от пречиствателни станции за отпадъчни води (ПСОВ), използването на пластмасови мулчове, пестициди, торове и атмосферно отлагане (Lassen et al., 2015).

Източници на пластамасови частици в агроекосистемата

Пластмасови мулчове, агрофилми и други пластмасови продукти

Пластмасовите мулчове и агрофилми се използват широко в земеделието за подобряване на почвената влага, контрол на плевелите и увеличаване на добивите. Тези материали, изработени предимно от полиетилен (PE),

полипропилен (PP) и полимери използвани за напоителните системи, особено тези, изработени от PVC и други пластмасови материали, могат да допринасят за замърсяването (фиг.1) с микропластмаси чрез абразия и износване. Изследванията на Sun et al. (2019) показват, че малки пластмасови частици могат да бъдат освобождавани от тръбите и да се натрупват в почвата и водните източници, всички тези материали имат важна роля в съвременните земеделски практики. Въпреки това, те представляват сериозен източник на замърсяване с микропластмаси и нанопластмаси в почвата, тъй като постепенно се разграждат под въздействието на различни фактори на околната среда (Steinmetz et al., 2016). Физическото разграждане, предизвикано от механични въздействия като обработка на почвата и ерозионни процеси, води до постепенното фрагментиране на пластмасовите мулчове и агрофилми. Ултравиолетовата (UV) радиация ускорява този процес чрез фоторазграждане, при което химичните връзки в полимерите се разпадат, улеснявайки образуването на микропластмасови частици. Освен това, температурните промени и влажността също играят роля в деградацията на пластмасовите материали, допринасяйки за тяхното разпадане на все по-малки частици (Steinmetz et al., 2016).

Освен микропластмасите, при по-нататъшното разграждане на пластмасовите мулчове и агрофилми се формират и нанопластмаси – частици с размер под 100 нанометра. Тези наночастици представляват още по-голям риск за почвената екосистема, тъй като могат лесно да проникват в порите на почвата, да се абсорбират от почвените микроорганизми и да се натрупват в хранителната верига (Rillig et al., 2017). Това може да доведе до дългосрочни промени в почвената структура и биоразнообразието, като влияе на хранителните мрежи и метаболизма на микроорганизмите. Изследванията показват, че нанопластмасите могат да взаимодействат с почвените минерали и органичната материя, променяйки структурата и химичния състав на почвата. Те също така могат да се свързват

с тежки метали и други замърсители, което увеличава тяхната токсичност (Enfrin et al., 2019). Проникването на нанопластмаси в кореновата зона на растенията може да има отрицателни последици за техния растеж и развитие, като влияе върху усвояването на хранителните вещества и водата. Освен това, има доказателства, че някои почвени микроорганизми могат да усвояват нанопластмасови частици, което потенциално може да доведе до нарушаване на почвените микробни общности и тяхната функционалност.

Органични торове и компост

Органичните торове, включително компост и оборски тор, могат да съдържат значителни количества пластмасови частици, които навлизат в агроекосистемите по непреднамерен начин. Weithmann et al. (2018) установяват, че пластмасите, съдържащи се в хранителните отпадъци и битовия компост, могат да бъдат въведени в почвата чрез прилагането на органични торове. Това представлява сериозен екологичен проблем, тъй като пластмасовите частици не се разграждат лесно и могат да останат в почвата в продължение на десетилетия. Процесът на компостиране не винаги е достатъчно ефективен за пълното разпадане на пластмасовите компоненти, особено когато се използват традиционни методи за преработка на органични отпадъци. Често битовите компости и торове съдържат пластмасови остатъци от опаковки, синтетични тъкани и биоразградими пластмаси, които не се разпадат напълно в стандартни условия на компостиране (Weithmann et al., 2018). В резултат на това микропластмасите се натрупват в почвата, като потенциално могат да окажат неблагоприятно въздействие върху почвените организми и микробната активност.

Напояване със замърсена вода

Напояването е един от основните механизми, чрез които микропластмасите и нанопластмасите навлизат в агроекосистемите. Основен източник на замърсяване с пластмасови частици са отпадъчните води, които често се използват



Фиг 1. Остатъчни фрагменти от пластмасови мулчове в почвата

Fig. 1. Residual fragments of plastic mulches in the soil

за напояване в региони с недостиг на прясна вода. Въпреки че съществуват системи за пречистване, пречиствателните станции не успяват напълно да филтрират всички пластмасови частици, което води до тяхното натрупване в селскостопанските почви (Enfrin et al., 2019).

- Пречиствателните станции за отпадъчни води представляват един от основните маршрути за разпространение на микропластмасови частици в околната среда. Проучванията на Murphy et al. (2016) и Mintenig et al. (2017) установяват, че макар и значителна част от пластмасовите частици да бъдат задържани в утайките на пречиствателните станции, малки фрагменти с размер под 5 mm остават във филтрираната вода и впоследствие попадат в напоителните системи.

- Водите, използвани за селскостопанско напояване, често произхождат от повърхностни източници, като реки и езера, които са замърсени с микропластмаси, идващи от градските и

индустриални зони (Browne et al., 2010). Пластмасови частици могат да попадат във водните басейни чрез неправилно изхвърлени пластмасови отпадъци, промишлени емисии или атмосферни отлагания.

Атмосферно отлагане

Атмосферното отлагане е един от важните пътища за навлизането на пластмасови частици в агроecosистемите. Изследванията показват, че микропластмасите и нанопластмасите могат да бъдат разпространявани чрез въздуха на големи разстояния, преди да се отложат върху почвата и растителността (Dris et al., 2016). Това е особено значимо в селскостопанските райони, разположени в близост до урбанизирани и индустриални центрове, както и в зони с интензивно движение на превозни средства, които допринасят за замърсяването на въздуха с микропластмаси.

Основни източници на микропластмаси

ВЪВ ВЪЗДУХА

Основните източници на микропластмаси във въздуха са градските и индустриалните зони, където пластмасовите отпадъци и износването на пластмасови материали водят до отделянето на малки частици в атмосферата (Allen et al., 2019). Двигателите с вътрешно горене, горенето на пластмасови отпадъци и промишлените емисии също са значими фактори, допринасящи за разпространението на микропластмаси във въздуха.

Дребните пластмасови частици могат да бъдат транспортирани на големи разстояния чрез атмосферните течения, преди да се отложат върху земеделските земи. Bergmann et al. (2019) установяват, че микропластмасите се намират дори в отдалечени планински райони и полярни региони, което показва глобалния мащаб на този вид замърсяване.

Проучванията на Kole et al. (2017) показват, че износването на автомобилни гуми генерира големи количества микропластмаси, които могат да бъдат пренасяни чрез вятъра и да се отлагат върху почвата. Това е особено проблематично в селскостопанските райони, разположени в близост до натоварени пътни артерии.

Влияние и движение на микропластмасите и нанопластмасите в почвата

След като попаднат в почвата, микропластмасите и нанопластмасите преминават различни процеси на трансформация, включително стареене, абсорбция и транспорт (UNEP, 2014). Тези процеси са сложни и се влияят от редица фактори като тип почва, климатични условия, химически състав на пластмасовите частици и наличието на почвени микроорганизми (de Souza Machado et al., 2018). Микропластмасите и нанопластмасите оказват значително влияние върху почвените екосистеми и могат да се разпространяват в различни почвени хоризонти чрез физични, химични и биологични процеси. Техният малък размер и химичен състав позволяват взаимодействие с почвените частици, водните потоци и живите организми, което може да доведе до значителни екологични последици (de Souza Machado et al., 2018). Биологичните

ефекти на микропластмасите върху растенията, като най-силно засегнати са забавеният растеж, са обобщени на фигура 2.

- Пластмасовите частици могат да бъдат транспортирани в почвата чрез инфилтрация на вода, капилярни сили и ерозионни процеси (Zhang et al., 2020).

- Големината на частиците и тяхната плътност определят тяхната мобилност – нанопластмасите са значително по-лесно подвижни в сравнение с микропластмасите и могат да проникнат по-дълбоко в почвените хоризонти (Lehner et al., 2019).

- Дъждовните и напоителните води могат да пренасят пластмасови частици както вертикално, така и хоризонтално, което води до тяхното натрупване в различни почвени слоеве (Rillig et al., 2017).

- Почвените организми като дъждовни червеи, мравки и други безгръбначни могат да транспортират микропластмасови и нанопластмасови частици чрез своите движения и храносмилателни процеси (Rillig et al., 2017).

- Някои микроорганизми могат да адсорбират нанопластмаси, което влияе върху тяхната мобилност и взаимодействие с почвената органична материя (Qiu et al., 2024).

- Микро- и нанопластмасите могат да адсорбират тежки метали и органични замърсители, като по този начин увеличават токсичността на почвата (Hodson et al., 2017).

- Нанопластмасите са особено опасни, тъй като могат да проникват в порите на почвените минерали и да влияят на капацитета на почвата да задържа вода и хранителни вещества (Lehner et al., 2019).

Тези промени могат да повлияят върху кореновото развитие на растенията и да намалят продуктивността на почвата. Движението и въздействието на микропластмасите и нанопластмасите в почвата са сложни процеси, които могат да доведат до значителни екологични и селскостопански последици.

Блокиране на кореновите пори и влияние върху водния баланс

Биологични ефекти от микропластмаса при растения – в %



Фиг. 2. Процентно въздействие на микропластмасово замърсяване върху биологичните процеси при растенията

Fig. 2. Percentage-Based Impact of Microplastic Contamination on Plant Biological Processes

Микропластмасите в почвата могат да променят нейната структура и хидрофизични свойства, което води до намалена водозадържаща способност и нарушен воден баланс в кореновата зона (de Souza Machado et al., 2018; Rillig et al., 2019; Zhang et al., 2018). Тези процеси могат да намалят достъпа на растенията до вода и хранителни вещества, което води до стрес и намаляване на продуктивността на културите. Блокирането на кореновите пори от микропластмасови и нанопластмасови частици е сериозен проблем, който влияе върху водния баланс, усвояването на хранителни вещества и цялостното здраве на растенията. Тези ефекти могат да доведат до намалена продуктивност на културите и дългосрочни последици за селското стопанство.

Механизъм на блокиране на кореновите пори

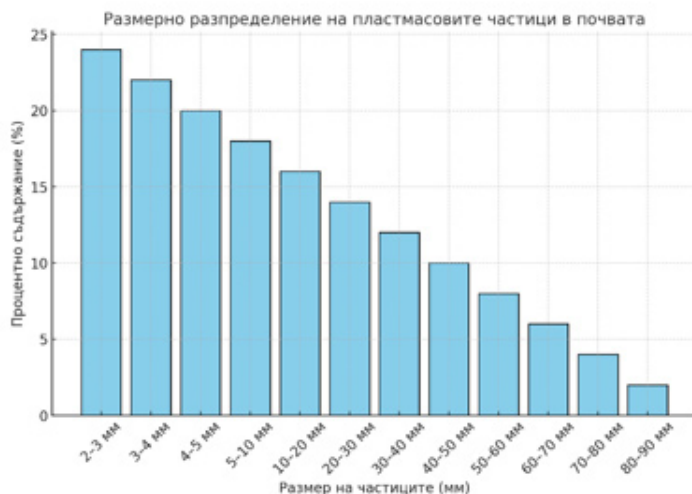
Натрупването на микропластмаси в кореновата зона може да доведе до механично блокиране на порите, което намалява инфилтрацията и задържането на вода (Wang et al., 2022). Полимерните частици могат да се натрупат върху кореновата повърхност и да образуват бариера,

която възпрепятства водния поток и обмена на газове (Masciarelli et al., 2024). Микропластмасите могат да намалят капилярния потенциал на почвата, което ограничава движението на водата и води до изсушаване на кореновата зона (Cramer et al., 2023). Пластмасовите частици могат да променят почвените агрегати и да намалят порьозността, което влияе върху капацитета на почвата да задържа и отдава влага (Rillig et al., 2021). Микропластмасите могат да се свързват с почвените минерали и органичната материя, което може да намали достъпността на водата и хранителните вещества за растенията (de Souza Machado et al., 2018). Частиците могат да променят динамиката на водното разпределение в почвата, създавайки зони с прекомерно натрупване на влага или зони с прекомерно изсушаване (Wu et al., 2019).

Влияние върху растежа и развитието на растенията

1. Редуциран воден достъп

- Намалената водозадържаща способност и намалената инфилтрация на вода могат да доведат до физиологичен стрес за растенията, забавен растеж и понижен добив (Li et al.,



Фиг. 3. Размерното разпределение на пластмасовите частици в почвата
Fig. 3. Size distribution of plastic particles in the soil

Илюстрация на проникването на микропластмаси в човешкото тяло



Фиг. 4. Проникване на микропластмаса в човешкото тяло чрез храната (плодове, зеленчуци, месо)
Fig. 4. Penetration of microplastics into the human body through food (fruits, vegetables, meat)

2022).

- Някои растения могат да променят стратегията си за усвояване на вода, като увеличават дълбочината на корените си, което води до преразход на енергия (Jia et al., 2023).

2. Затруднено усвояване на хранителни вещества

- Наличието на микропластмасови частици

може да повлияе на йонния обмен и да намали достъпността на макро- и микроелементи като азот, фосфор и калий (Milne et al., 2024).

- Инхибираният прием на вода и хранителни вещества може да доведе до понижен фотосинтетичен капацитет и намалена биомаса на растенията.

3. Възможна токсичност и взаимодействие с химикали

- Някои пластмасови частици могат да освобождават добавки и остатъчни замърсители, които да взаимодействат с корените на растенията и да повлияят на тяхното развитие (Hodson et al., 2017).

- Токсичните вещества, абсорбирани върху повърхността на микропластмасите, могат да преминат в кореновата система и да навлязат в хранителната верига.

Размерно разпределение на пластмасовите частици в почвата

Според “Plastic Atlas” (2020), размерното разпределение на пластмасовите частици в почвата е показано на фигура 3, като най-голям дял имат малките частици (2–3 mm), а с увеличаване на размера процентното съдържание намалява. Това показва, че в почвата преобладават по-дребните пластмасови фрагменти, които се натрупват и разпространяват по-лесно.

Риск от пренасяне в хранителната верига

Микропластмасите и нанопластмасите в почвата могат да навлязат в хранителната верига чрез различни механизми, като поглъщане от почвени организми, абсорбция от растенията и натрупване в животинските организми. Това поражда сериозни екологични и здравни рискове, които все още не са напълно проучени, но стават все по-актуална тема в научните изследвания (Lehner et al., 2019). Нанопластмасите имат способността да проникват през кореновите пори и да достигат до тъканите на растенията, като се натрупват в листата и плодовете (Skaba et al., 2025). Проучванията на Milne et al. (2024) показват, че нанопластмасите могат да се разпространяват в съдовата система на растенията, което повишава риска от навлизането им в хранителната верига чрез консумация на селскостопански продукти. Животните, които се хранят с растения, замърсени с микропластмаси, могат да абсорбират тези частици, които впоследствие се пренасят към по-високите трофични нива (Hodson et al., 2017). Животните, отглеждани за консумация, като

добитък и риба, могат да бъдат изложени на микропластмасово замърсяване чрез храната и водата, което представлява потенциален риск за човешкото здраве (Wang et al., 2022) (фиг. 4).

Изследванията показват, че микропластмаси могат да бъдат открити в плодове, зеленчуци и месни продукти, което поражда загриженост относно дългосрочните ефекти върху човешкото здраве (Milne et al., 2024). Нанопластмасите са особено опасни, тъй като могат да преминават през биологичните бариери и да навлизат в клетките, където могат да предизвикат оксидативен стрес и възпалителни реакции (Skaba et al., 2025). Микропластмасите са открити в човешката храносмилателна система, белите дробове и кръвния поток, което предполага, че хроничното излагане на тези частици може да има сериозни здравни последици (Lehner et al., 2019).

Заклучение

Замърсяването на почвите с микро- и нанопластмаси е глобален проблем, чието въздействие върху агроecosистемите, земеделието и човешкото здраве все още не е напълно изяснено. Съществува достатъчно научна информация, че тези пластмасови частици се натрупват в почвата, като променят нейните физични, химични и биологични свойства. В резултат на това се влошава почвеното плодородие, нарушават се водните и хранителните потоци и се застрашава селскостопанската продуктивност. Още по-притеснителен е фактът, че пластмасовите частици могат да бъдат усвоени от растенията и животните, което поставя под въпрос безопасността на хранителната верига. Борбата със замърсяването на почвите с микро- и нанопластмаси изисква координирани усилия между научната общност, държавните институции и земеделските производители. Единствено чрез устойчиви стратегии и дългосрочни политики може да се ограничи негативното въздействие на пластмасите върху почвените екосистеми и продоволственията сигурност. Микропластмасите и нанопластмасите са

нарастваща заплаха за почвите! Необходими са спешни научни изследвания и регулации, за да се гарантира устойчиво земеделие и безопасност на храните.

Конфликт на интереси: авторите декларираат липсата на конфликт на интереси

Литература

Allen, S., Allen, D., Phoenix, V. R., Le Roux, G., Durántez Jiménez, P., Simonneau, A., ... & Galop, D. (2019). Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nature geoscience*, 12(5), 339-344.

Bergmann, M., Mützel, S., Primpke, S., Tekman, M. B., Trachsel, J., & Gerdt, G. (2019). White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic. *Science Advances*, 5(8), eaax1157.

Browne, M. A., Galloway, T. S., & Thompson, R. C. (2010). Spatial patterns of plastic debris along estuarine shorelines. *Environmental science & technology*, 44(9), 3404-3409.

Cramer, A., Schmidtman, J., Benard, P., Kaestner A., Engelhardt, M., Peiffer, S., & Carminat, A. (2023). Ferrihydrite coating reduces microplastic induced soil water repellency. *Environmental Science Processes & Impacts*, 25, 1094-1101.

de Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Till, J., Kloas, W., Lehmann, A., Becker, R., & Rillig, M. C. (2018). Impacts of microplastics on the soil biophysical environment. *Environmental Science & Technology*, 52(17), 9656-9665.

Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C., & Tassin, B. (2016). Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? *Marine Pollution Bulletin*, 104(1-2), 290-293.

Enfrin, M., Dumée, L. F., & Lee, J. (2019). Nano/microplastics in water and wastewater treatment processes – Origin, impact and potential solutions. *Water Research*, 161, 621-638.

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.

Hodson, M. E., Duffus-Hodson, C. A., Clark, A., Prendergast-Miller, M. T., & Thorpe, K. L. (2017). Plastic bag derived-microplastics as a vector for metal exposure in terrestrial invertebrates. *Environmental Science & Technology*, 51(8), 4714-4721. doi:10.1021/acs.est.7b00635.

do Sul, J. A. I., & Costa, M. F. (2014). The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental pollution*, 185, 352-364.

Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., ... & Law, K. L. (2015).

Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768-771.

Jia, L., Liu, L., Zhang, Y., Fu, W., Liu, X., Wang, Q., ... & Huang, L. (2023). Microplastic stress in plants: effects on plant growth and their remediations. *Frontiers in plant science*, 14, 1-21. doi: 10.3389/fpls.2023.1226484.

Kole, P. J., Löhr, A. J., Van Belleghem, F. G. & Ragas, A. M. (2017). Wear and tear of tyres: A stealthy source of microplastics in the environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(10), 1265.

Lassen, C., Hansen, S. F., Magnusson, K., Noren, F., Bloch Hartmann, N. I., Jensen, P. R., Nielsen, T. G., & Brinch, A. (2015). Microplastics – Occurrence, Effects and Sources of Releases to the Environment in Denmark, <https://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2015/10/978-87-93352-80-3.pdf> (last accessed 12.12.2024).

Lehner, R., Weder, C., Petri-Fink, A., & Rothen-Rutishauser, B. (2019). Emergence of nanoplastic in the environment and possible impact on human health. *Environmental Science & Technology*, 53(4), 1748-1765.

Li, S., Ding, F., Flury, M., Wang, Z., Xu, L., Li, S., Jones, D. L., & Wang, J. (2022). Macro- and microplastic accumulation in soil after 32 years of plastic film mulching. *Environmental Pollution*, 300, 118945.

Masciarelli, E., Casorri, L., Di Luigi, M., Beni, C., Valentini, M., Costantini, E., ... & Reale, M. (2024). Microplastics in Agricultural Crops and Their Possible Impact on Farmers' Health: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(1), 45.

Milne, M. H., De Frond, H., Rochman, C. M., Mallos, N. J., Leonard, G. H., & Baechler, B. R. (2024). Exposure of US adults to microplastics from commonly-consumed proteins. *Environmental Pollution*, 343, 123233. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123233>.

Mintenig, S. M., Int-Veen, I., Loder, M. G., Primpke, S., & Gerdt, G. (2017). Identification of microplastic in effluents of wastewater treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging. *Water Research*, 108, 365-372.

Murphy, F., Ewins, C., Carbonnier, F., & Quinn, B. (2016). Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment. *Environmental Science & Technology*, 50(11), 5800-5808.

Perfanova, J., Doneva, K., Kercheva, M., & Valchovski, H. (2024). Effects of microplastics, vermicompost and zeolite on microflora of soils with different physical properties. *Bulgarian Journal of Soil Science, Agrochemistry and Ecology*, 58, 3-13.

Plastic Atlas: Facts and figures about the world of synthetic polymers. A Region First Edition (2020). MENA Region First Edition, <https://ps.boell.org/sites/default/files/2020-09/Plastic%20Atlas%202020%20-%20English.pdf> (last accessed 02.03.2025).

Qiu, X., Ma, S., Pan, J., Cui, Q., Zheng, W., Ding, L., ... & Rillig, M. C. (2024). Microbial metabolism influences

microplastic perturbation of dissolved organic matter in agricultural soils. *The ISME journal*, 18(1), 1-12.

Rillig, M. C., Leifheit, E., & Lehmann, J. (2021). Microplastic effects on carbon cycling processes in soils. *PLoS Biology*, 19(3), e3001130.

Rillig, M. C., Lehmann, A., de Souza Machado, A. A., & Yang, G. (2019). Microplastic effects on plants. *New phytologist*, 223(3), 1066-1070. doi: 10.1111/nph.15794.

Rillig, M. C., Ziersch, L., & Hempel, S. (2017). Microplastic transport in soil by earthworms. *Scientific Reports*, 7, 1362.

Skaba, D., Fiegler-Rudol, J., Dembicka-Mączka, D., & Wiench, R. (2025). Nanoplastics and Immune Disruption: A Systematic Review of Exposure Routes, Mechanisms, and Health Implications. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(11), 5228.

Sun, J., Dai, X., Wang, Q., Van Loosdrecht, M. C., & Ni, B. J. (2019). Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal. *Water research*, 152, 21-37.

Steinmetz, Z., Wollmann, C., Schaefer, M., Buchmann, C., David, J., Tröger, J., ... & 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.

UNEP (2014). *Valuing Plastics: The Business Case for Measuring, Managing and Disclosing Plastic Use in the Consumer Goods Industry* <https://www.slideshare.net/sustainablebrands/valuing-plastic-the-business-case-for-measuring-managing-and-disclosing-plastic-use-in-the-consumer-goods-industry-36391779> (last accessed 14.01.2025).

Wang, F., Wang, Q., Adams, C. A., Sun, Y., & Zhang, S. (2022). Effects of microplastics on soil properties: current knowledge and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127531. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127531>.

Weithmann, N., Möller, J. N., Löder, M. G. J., Piehl, S., Laforsch, C., & Freitag, R. (2018). Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. *Science Advances*, 4(4), eaap8060.

Wu, P., Huang, J., Zheng, Y., Yang, Y., Zhang, Y., He, F., ... & Gao, B. (2019). Environmental occurrences, fate, and impacts of microplastics. *Ecotoxicology and environmental safety*, 184, 109612.

Zhang, G. S., & Liu, Y. F. (2018). The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China. *Science of the Total Environment*, 642, 12-20.

Zhang, Y., Gao, T., Kang, S., Allen, S., Luo, X., & Allen, D. (2020). Microplastics in glaciers of the Tibetan Plateau: Evidence for the long-range transport of microplastics. *Science of the Total Environment*, 758, 143634.

Received: 20th March 2025, **Approved:** 15th May 2025,
Published: June 2025