



Názov projektu: Podpora cirkulárnej ekonomiky využitím odpadových materiálov v inovatívnych remediačných technológiách zameraných na odstraňovanie mikropolutantov z pevných matric

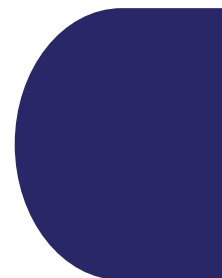
Kód projektu: 09I01-03-V04-00067

V7 Konferenčný príspevok zo zahraničného vedeckého podujatia

Veronika Špirová

14.05.2026

Financované Európskou úniou z prostriedkov Plánu obnovy a odolnosti SR



Financovaný
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD PODPREDESEDU VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY
PRE PLÁN OBNOVY
A ZNALOSTNÚ EKONOMIKU



VIA VÝSKUMNÁ
AGENTÚRA



Ministerstvo
životního prostředí

ĚKOMONITOR

EPS
biotechnology

SBORNÍK KONFERENCE

**Akce se koná pod záštitou
Ministerstva životního prostředí**



**13. až 15. května 2026
v Klubu kultury v Uherském Hradišti**

Pořádající organizace:

Vodní zdroje Ekomonitor spol. s r.o.

Píšťovy 820, 537 01 Chrudim III

Ministerstvo životního prostředí ČR

Vršovická 1442/65, 100 10 Praha 10

Štátny geologický ústav Dionýza Štúra

Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava 11

Univerzita Pardubice

Fakulta chemicko-technologická

Studentská 573, 532 10 Pardubice

Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Technická 5, 166 28 Praha 6

Technická univerzita v Liberci

Studentská 2, 461 17 Liberec

EPS biotechnology, s.r.o.

V Pastouškách 205, 686 04 Kunovice

Česká zemědělská univerzita v Praze

Kamýcká 129, 165 00 Praha 6

Univerzita Komenského v Bratislave

Prírodovedecká fakulta

Mlynská dolina, 842 15 Bratislava 4

Masarykova univerzita

Žerotínovo nám. 617/9, 601 77 Brno

DIAMO, státní podnik

Máchova 201, 471 27 Stráž pod Ralskem

Mediální partneři akce:

Tretiruka.cz

28. Pluku 524/25, 101 00 Praha 10

EnviWeb s.r.o.

Březová 6, 637 00 Brno

Předsednictvo konference, programový a organizační výbor:

čestný předseda konference

prof. Ing. Milan Pospíšil, CSc., rektor VŠCHT Praha

**Ing. Alexandra Skopcová, Mgr. Lukáš Čermák, doc. RNDr. Josef Zeman, CSc.,
doc. Ing. Josef Janků, CSc., doc. RNDr. Lubomír Jurkovič, PhD., doc. Mgr. Peter Šottník, PhD.,
Ing. Jiří Palarčík, Ph.D., prof. Dr. Ing. Miroslav Černík, CSc., Ing. Jaroslav Nosek, Ph.D.,
doc. Mgr. Martina Vítková, Ph.D., Ing. Marek Šír, Ph.D., Ing. Petr Beneš, Ph.D.,
Ing. Pavel Vostarek, Ing. Vlastimil Píštěk, Ing. Miroslav Minařík, Mgr. Jiří Kamas, Ph.D.,
Mgr. Pavel Vančura, Dr. Ing. Jiří Marek, Ing. Dagmar Bartošová,
Mgr. Marián Petrák, PhD., Bc. Klára Petráková Kánská**

Editor sborníku:

Klára Petráková Kánská

Heslo pro stažení prezentací:

260513_Sanacnietechnologie

Citace sborníku:

Sanační technologie XXVIII, 13. – 15. května 2026, Uherské Hradiště,

Klára Petráková Kánská (Edit.), str. 132

Remediation technologies XXVIII, May 13. – 15., 2026, Uherské Hradiště,

Klára Petráková Kánská (Edit.), p. 132

K tisku předáno dne 5. 5. 2026, formát A4, počet výtisků 6, počet stran 132, brož. vydání.

Vytiskla tiskárna Grafion, Pardubice, 1. vydání

© Vodní zdroje Ekomonitor spol. s r.o., Chrudim 2026

ISBN 978-80-88238-42-3

APLIKÁCIA BIOCHARU A SORBENTOV NA BÁZE ŽELEZA NA IMOBILIZÁCIU LIEČIV V PÔDE A ČISTIARENskom KALE

**Veronika Špirová¹⁾, Andrea Vojs Staňová^{2,3)}, Sofia Frišnicová¹⁾, Hana Horváthová¹⁾,
Tomáš Faragó¹⁾, Zuzana Škerliková Pilková¹⁾**

¹⁾ *Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Katedra geochémie, Ilkovičova 6, 841 05 Bratislava, Slovenská republika, e-mail: veronika.spirova@uniba.sk*

²⁾ *Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Katedra analytickej chémie, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava, Slovenská republika*

³⁾ *Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Fakulta rybářství a ochrany vod, Výzkumný ústav rybářský a hydrobiologický, Laboratoř environmentální chemie a biochemie, Zátíší 728/II, 389 01 Vodňany*

Úvod

Liečivá predstavujú rozmanitú skupinu mikropolutantov prítomnú v životnom prostredí, kde aj napriek relatívne nízkym koncentráciám ($\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$, resp. $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) pôsobia negatívne na živé organizmy [1]. Aplikáciou vyčistenej odpadovej vody, stabilizovaného čistiarenského kalu a statkových hnojív na poľnohospodársku pôdu sa rezíduá liečiv dostávajú do pôdných ekosystémov, odkiaľ môžu vstupovať do živých organizmov a migrovať do povrchových a podzemných vôd [2]. Znížiť riziká plynúce z ich prítomnosti v pôdach je možné degradáciou alebo imobilizáciou [3,4]. Práve imobilizácia môže predstavovať riešenie pre ťažko degradovateľné a mobilné liečivá. Prirodzenú schopnosť pevných matric viazať mikropolutanty je možné podporiť aplikáciou imobilizačných činidiel. Účinná sorpcia liečiv bola preukázaná pri použití biocharu a materiálov na báze železa [5,6]. Imobilizačné činidlá je možné vyrobiť z vedľajších produktov priemyselnej, poľnohospodárskej alebo potravinárskej výroby, čím sa podporuje cirkulárna ekonomika a predchádza vzniku odpadov. Tieto činidlá môžu zároveň pozitívne ovplyvniť kvalitu pôdy dodaním nutrientov nevyhnutných pre rast rastlín, úpravou pH, zvýšením vododržnej kapacity pôd a zlepšením pôdnej štruktúry [7]. Cieľom tejto štúdie bolo v laboratórnych podmienkach otestovať vplyv biocharu a železných pilín na mobilitu troch liečiv s odlišnými fyzikálno-chemickými vlastnosťami, ktoré sa často vyskytujú v životnom prostredí. Zároveň sa hodnotil aj vplyv týchto činidiel na biodostupnosť vybraných nutrientov v pôde a stabilizovanom čistiarenskom kale.

Materiál a metódy

Na experimenty boli použité štandardy liečiv karbamazepín (CBZ), diklofenak (DCF) a fexofenadín (FEX) s čistotou > 99 % (Labmix24 GmbH, Nemecko). Vybrané fyzikálno-chemické vlastnosti liečiv sú uvedené v tabuľke 1A. Na imobilizačné experimenty boli použité: biochar pripravený pyrolýzou čistiarenského kalu pri 550–600 °C (BSS) (HST Hydrostémy, Česká republika) a železné (Fe0) piliny z mechanického opracovania zliatin (CH) (Dekonta, Česká republika). Obidva materiály dodala Česká zemědělská univerzita v Prahe. Vybrané vlastnosti činidiel sú uvedené v tabuľke 1B. Aeróbne stabilizovaný čistiarenský kal pochádzal z čistiarene odpadových vôd pre 25 000 ekvivalentných obyvateľov. Pôdna vzorka bola odobratá lopatkou z hĺbky 0–20 cm zo súkromnej záhrady využívanej na pestovanie zeleniny. Vybrané vlastnosti čistiarenského kalu a pôdy sú uvedené v tabuľke 1C. Imobilizačné experimenty boli realizované v triplikátoch nasledovne: do vysušených, homogenizovaných a preosiatych (< 2 mm) vzoriek čistiarenského kalu a pôdy boli pridané sorbenty (2 hm. %) a obsah sa dôkladne premiešal. Následne sa do vzoriek pridal zásobný zmesný roztok liečiv v metanole. Po odparení metanolu bola pridaná deionizovaná voda (s prídavkom $0,2\text{ g}\cdot\text{l}^{-1}\text{ NaN}_3$ v prípade čistiarenského kalu na inhibíciu mikrobiálnej aktivity). Aplikovaná koncentrácia liečiv do pevných matric bola $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Vzorky kalu sa inkubovali 7 dní v tme na horizontálnej trepačke (100 rpm), zatiaľ čo vzorky pôdy sa inkubovali 30 dní v tme pri približne 50 % maximálnej vodnej kapacity (WHC). Odparená voda sa pravidelne dopĺňala. Po ukončení inkubácie bola kvapalná fáza oddelená centrifugáciou (9 000 rpm). Vo vzorkách pôdy predchádzala separácii extrakcia deionizovanou vodou na horizontálnej trepačke (200 rpm, 60 min). Vzorky sa následne uchovávali pri –18 °C až do analýzy.

Pred analýzou boli vzorky rozmrazené, homogenizované a prefiltrované (RC; 0,22 µm). Liečivá boli stanovené metódou LC-MS/MS podľa Golovko et al. [8], nutrienty (K^+ , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , $N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$, $P-PO_4^{3-}$) boli stanovené spektrofotometricky, resp. titračne (Ca^{2+}). Do série experimentov boli zaradené aj kontrolné, referenčné a slepé vzorky. Vplyv sorbentov na mobilitu jednotlivých liečiv bol analyzovaný jednofaktorovou ANOVA-ou a následným Tukey post-hoc testom. Rozdiely boli vyhodnotené ako štatisticky významné pri $p < 0,05$.

Tab. 1: Vybrané fyzikálno-chemické vlastnosti liečiv (A), imobilizačných činidiel (B), čistiarenskeho kalu a pôdy (C). Vlastnosti liečiv sú prevzaté z databázy PubChem

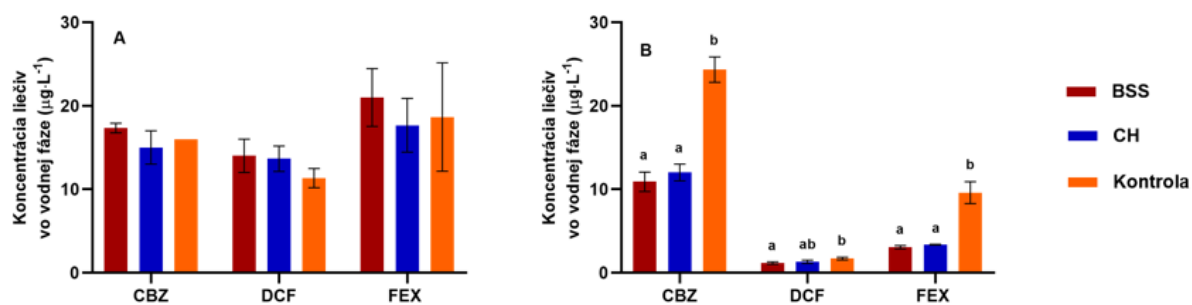
Liečivá (A)			
Liečivo	CBZ	DCF	FEX
Použitie	Antikonvulzívum	Analgetikum	Antihistaminikum
CAS	298-46-4	15307-86-5	83799-24-0
M ($g \cdot mol^{-1}$)	236,27	296,15	501,7
Rozpustnosť vo vode (25 °C)	Prakticky nerozpustný	2,37 ($mg \cdot L^{-1}$)	Slabo rozpustný
LogK _{ow}	2,45	4,51	2,81
Disociačná konštanta (pK_a)	13,9	4	4,04; 9,01
Imobilizačné činidlá (B)			
Imobilizačné činidlo	BSS	CH	
pH (H ₂ O)	11,64	9,99	
EC (H ₂ O) ($mS \cdot cm^{-1}$)	2,96	0,03	
TOC (%)	21	-	
Fe ($g \cdot kg^{-1}$)	24,4	818	
Ca ($g \cdot kg^{-1}$)	47,4	0,20	
Čistiarenský kal a pôda (C)			
Matrica	Čistiarenský kal	Pôda	
pH (H ₂ O)	7	9,15	
EC (H ₂ O) ($mS \cdot cm^{-1}$)	4,21	0,11	
TOC (%)	23,2	1,89	
Obsah vody (%)	81,4	-	
WHC (%)	-	49,3	
CaCO ₃ (%)	-	3,6	
Textúra	-	Piesok – 66 % Prach – 18 % Íl – 16 %	
Liečivá ($ng \cdot g^{-1}$)	CBZ = 13 DCF = 35 FEX = 71	< LOQ	

Výsledky a diskusia

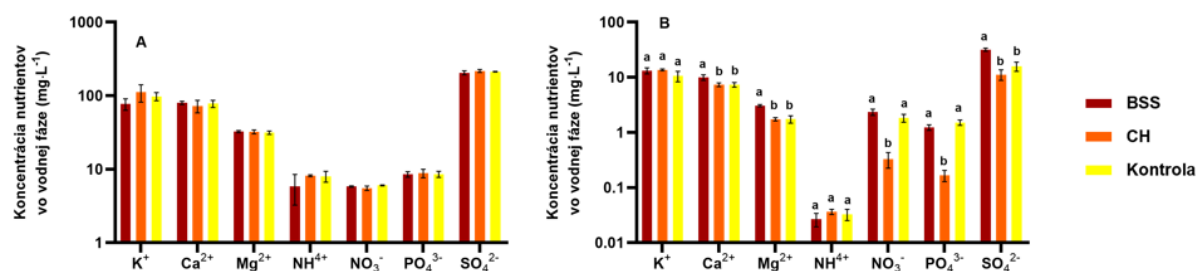
Aplikácia BSS a CH nevedla v čistiarenskom kale k štatisticky významným zmenám vo vodou extrahovateľnej frakcii liečiv, pričom najvyššiu mobilitu vykazoval FEX (obr. 1A, tabuľka 2). Absenciu jednoznačného účinku činidiel možno vysvetliť ich nízkou aplikačnou dávkou a zároveň vysokým obsahom rozpustených a koloidných častíc v čistiarenskom kale, ktoré môžu s liečivami interagovať, čím sa imobilizačný efekt činidiel stáva menej zreteľný [9,10]. Komplexný charakter čistiarenskeho kalu sa pravdepodobne odrazil aj vo vyššej variabilite výsledkov. Podobne sa nepreukázal ani vplyv činidiel na biodostupnosť živín (obr. 2A).

Naproti tomu, v pôde bol vplyv činidiel na zníženie mobility liečiv signifikantný (obr. 1B, tabuľka 2), čo je v zhode so zisteniami štúdií Caban et al. [11] a Li et al. [12], ktorí uvádzajú, že biochar zvyšuje retenčnú kapacitu pôdy a znižuje vodou extrahovateľnú frakciu liečiv, najmä pri zlúčeninách v neutrálnej alebo kationovej/zwitteriónovej forme. Činidlá na báze Fe(0) môžu poskytovať sorpčné pozície prostredníctvom čerstvých korózných produktov Fe(II)/Fe(III) [13]. Z uvedených dôvodov reagovali CBZ a FEX výrazne na obe činidlá, čo naznačuje, že mohli efektívne interagovať s uhlíkovými aj minerálnymi sorpčnými miestami. Pri DCF bol účinok činidiel menej výrazný, keďže už v kontrolnej

vzorky vykazoval najnižšiu extrahovateľnosť, a teda obmedzený priestor na ďalšiu imobilizáciu. Výraznejší efekt pri BSS pravdepodobne súvisel s kombinovaným uhlíkovo-minerálnym charakterom tohto materiálu a so zvýšenou dostupnosťou dvojmocných kationov, ktoré môžu podporovať väzbu aniónových zlúčenín [14]. Naopak, železné piliny zrejme neposkytli výrazne viac sorpčných miest vhodných pre DCF, pravdepodobne v dôsledku pasivácie povrchu [15] alebo konkurencie hydroxidových aniónov o sorpčné miesta [16]. Činidlá v pôde ovplyvnili aj biodostupnosť nutričov (obr. 2B). Koncentrácie Ca^{2+} , Mg^{2+} a SO_4^{2-} boli vo vodnej fáze v prítomnosti BSS vyššie v porovnaní s kontrolou, čo je spôsobené schopnosťou biocharov s vyšším podielom minerálnej frakcie uvoľňovať nutrienty do roztoku [7]. Naopak, CH znížili koncentrácie PO_4^{3-} a NO_3^- , čo je spôsobené afinitou Fe oxihydroxidov k PO_4^{3-} [17] a schopnosti Fe(0) redukovať NO_3^- [18].



Obr. 1: Priemerné koncentrácie liečiv vo vodnej fáze na konci imobilizačných experimentov (panel A – čistiarenský kal, panel B – pôda). Odlišné malé písmená nad stĺpcami na paneli B označujú štatisticky významné rozdiely ($p < 0,05$) medzi činidlami pre každé liečivo samostatne. Rozdiely medzi činidlami v čistiarenskom kale (panel A) neboli štatisticky významné ($p > 0,05$). Chybové úsečky znázorňujú štandardnú odchýlku ($n = 3$).



Obr. 2: Priemerné koncentrácie nutričov vo vodnej fáze na konci imobilizačných experimentov (panel A – čistiarenský kal, panel B – pôda). Odlišné malé písmená nad stĺpcami na paneli B označujú štatisticky významné rozdiely ($p < 0,05$) medzi činidlami pre každý nutričnú samostatne. Rozdiely medzi činidlami v čistiarenskom kale (panel A) neboli štatisticky významné ($p > 0,05$). Chybové úsečky znázorňujú štandardnú odchýlku ($n = 3$). Hodnoty sú vynesené na logaritmickú os y.

Tab. 2: Priemerná účinnosť činidiel $\pm$ štandardná odchýlka na mobilizáciu (kladné hodnoty) a imobilizáciu (záporné hodnoty) liečiv v čistiarenskom kale a pôde v porovnaní s kontrolnou vzorkou

Liečivo	Matrica + činidlo	Účinnosť (%)
CBZ	Čistiarenský kal + BSS	+8,33 $\pm$ 3,61
	Pôda + BSS	-54,9 $\pm$ 7,46
	Čistiarenský kal + CH	-6,25 $\pm$ 12,5
	Pôda + CH	-50,6 $\pm$ 4,23
DCF	Čistiarenský kal + BSS	+23,3 $\pm$ 8,82
	Pôda + BSS	-31,0 $\pm$ 10,6
	Čistiarenský kal + CH	+22,2 $\pm$ 25,5
	Pôda + CH	-23,7 $\pm$ 6,65
FEX	Čistiarenský kal + BSS	+22,0 $\pm$ 42,0
	Pôda + BSS	-67,7 $\pm$ 4,36
	Čistiarenský kal + CH	+6,53 $\pm$ 51,2
	Pôda + CH	-64,5 $\pm$ 5,27

Záver

V čistiarenskom kale sa vodou extrahovateľná frakcia liečiv po aplikácii činidiel výraznejšie nezmenila. Naopak, v pôde bola koncentrácia CBZ a FEX vo vodnej fáze po pridaní obidvoch činidiel výrazne nižšia v porovnaní s kontrolou. Pokles koncentrácie DCF bol tiež zaznamenaný, avšak efekt bol menej zreteľný pravdepodobne v dôsledku relatívne vysokej afinity natívnej pôdy k DCF. Činidlá zároveň ovplyvnili aj koncentráciu niektorých nutrientov, ktoré sa po aplikácii BSS zvýšili a po aplikácii CH znížili. Výsledky poukazujú na potenciál využívania odpadových materiálov, ktorý spája ochranu životného prostredia pred znečistením s princípmi cirkulárnej ekonomiky a udržateľným poľnohospodárstvom. Ďalší výskum by sa mal zamerať na optimalizáciu dávky činidiel a overenie ich dlhodobého účinku v reálnych podmienkach, najmä v komplexných maticiach, ako sú čistiarenské kaly, kde bol ich účinok obmedzený.

Podakovanie

Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09I01-03-V04-00067.

Literatúra

- [1] VINAYAGAM V., MURUGAN S., KUMARESAN R., NARAYANAN M., SILLANPÄÄ M., VO D.V.N, KUSHAWA O. S., JENIS P., POTDAR P., GADIYA S. (2022): Sustainable adsorbents for the removal of pharmaceuticals from wastewater: A review. *Chemosphere*, 300, 134597.
- [2] KODEŠOVÁ R., ŠVECOVÁ H., KLEMENT A., FÉR M., NIKODEM A., FEDOROVA G., RIEZNYK O., KOČÁREK M., SADCHENKO A., CHROŇÁKOVÁ A., GRABIC R. (2024): Contamination of water, soil, and plants by micropollutants from reclaimed wastewater and sludge from a wastewater treatment plant. *Sci. Total Environ.*, 907, 167965.
- [3] BIEL-MAESO M., GONZÁLEZ-GONZÁLEZ C., LARA-MARTÍN P. A., CORADA-FERNÁNDEZ F. (2019): Sorption and degradation of contaminants of emerging concern in soils under aerobic and anaerobic conditions. *Sci. Total Environ.*, 666, 662-671.
- [4] XU Y., YU X., XU B., PENG D., GUO X. (2021): Sorption of pharmaceuticals and personal care products on soil and soil components: Influencing factors and mechanisms. *Sci. Total Environ.*, 753, 141891.
- [5] IHSANULLAH I., KHAN M. T., ZUBAIR M., BILAL M., SAJID M. (2022): Removal of pharmaceuticals from water using sewage sludge-derived biochar: A review. *Chemosphere*, 289, 133196.
- [6] ISLAM MD. A., NAZAL M. K., ANGOVE M. J., MORTON D. W., HOQUE K. A., REAZ A. H., ISLAM M. T., KARIM S. M. A., CHOWDHURY A.-N. (2024): Emerging iron-based mesoporous materials for adsorptive removal of pollutants: Mechanism, optimization, challenges, and future perspective. *Chemosphere*, 349, 140846.
- [7] WEI C., LIU L., YI W., YU R., XU Y., ZENG S. (2024): Characteristics of nutrients and heavy metals release from sewage sludge biochar produced by industrial-scale pyrolysis in the aquatic environment and its potential as a slow-release fertilizer and adsorbent. *J. Environ. Manag.*, 366, 121871.
- [8] GOLOVKO O., KOBÁ O., KODEŠOVÁ R., FEDOROVA G., KUMAR V., GRABIC R. (2016): Development of fast and robust multiresidual LC-MS/MS method for determination of pharmaceuticals in soils. *Environ. Sci. Pollut. R.*, 23, 14068-14077.
- [9] O'KEEFE J., AKUNNA J. (2022): Assessment of leachable and persistent dissolved organic carbon in sludges and biosolids from municipal wastewater treatment plants. *J. Environ. Manag.*, 307, 114565.
- [10] LIU Y. Y., PTACEK C. J., BEAUCHEMIN S., MACKINNON T., BLOWES D. D. (2022): Effect of composting and amendment with biochar and woodchips on the fate and leachability of pharmaceuticals in biosolids destined for land application. *Sci. Total Environ.*, 810, 151193.
- [11] CABAN M., FOLENTARSKA A., LIS H., KOBYLIS P., BIELICKA-GIELDOŃ A., KUMIRSKA J., CIESIELSKI W., STEPŃOWSKI P. (2020): Critical study of crop-derived biochars for soil amendment and pharmaceutical ecotoxicity reduction. *Chemosphere*, 248, 125976.
- [12] LI Y., HE J., QI H., LI H., BOYD S.A., ZHANG W. (2020): Impact of biochar amendment on the uptake, fate and bioavailability of pharmaceuticals in soil-radish systems. *J. Hazard. Mater.*, 398, 122852.

- [13] FUJIOKA N., SUZUKI M., KUROSU S., KAWASE Y. (2016): Linkage of iron elution and dissolved oxygen consumption with removal of organic pollutants by nanoscale zero-valent iron: Effects of pH on iron dissolution and formation of iron oxide/hydroxide layer. *Chemosphere*, 144, 1738-1746.
- [14] SHIRANI Y., SONG H., BHATNAGAR A. (2020): Efficient removal of diclofenac and cephalexin from aqueous solution using *Anthriscus sylvestris*-derived activated biochar. *Sci. Total Environ.*, 745, 140789.
- [15] BAE S., COLLINS R. N., WAITE T. D., HANNA K. (2018): Advances in Surface Passivation of Nanoscale Zerovalent Iron: A Critical Review. *Environ. Sci. Technol.*, 52(21), 12010-12025.
- [16] MISHRA S., TIWARI M. K. (2025): Adsorptive removal of diclofenac on nanoporous anoxic sewage sludge biochar: Investigating the influence of carbonization temperature, residence time and specific Fe(III) infusion. *Sep. Purif. Technol.*, 354, 129322.
- [17] AI H., ZHANG K., PENN C. P., ZHANG H. (2023): Phosphate removal by low-cost industrial byproduct iron shavings: Efficacy and longevity. *Water Res.*, 246, 120745.
- [18] LIU Y., WANG J. (2019): Reduction of nitrate by zero valent iron (ZVI)-based materials: A review. *Sci. Total Environ.*, 671, 388-403.