

ODRŽIVE TEHNIKE UPRAVLJANJA ATMOSFERSKIM VODAMA U SLUŽBI ODVODNJAVANJA ŽELEZNIČKOG KOLOSEKA

SUSTAINABLE STORM WATER MANAGEMENT TECHNIQUES IN SERVICE OF RAILWAY TRACK DRAINAGE

JELENA DIMITRIJEVIĆ¹

ZORAN BONIĆ²

DRAGAN MILIĆEVIĆ³

Originalni naučni rad

DOI: 10.5937/VIK24375D

Rezime: Atmosferske vode koje dospevaju na železničku prugu mogu da zagađe okolno zemljište i vodna tela u neposrednoj blizini koloseka. Na osnovu podataka dostupnih istraživanja utvrđeno je da se od zagađivača u značajnim količinama izdvajaju teški metali, policiklični aromatični ugljovodonici (PAH) i herbicidi. Istraživanjima koja su izvršena na pruzi Niš-Preševo potvrđeno je da se u značajnim količinama izdvajaju teški metali. Aktuelne mere za smanjenje emisije zagađenja nisu bezbedne za efikasno suzbijanje zagađenja vode i zemljišta. U ovom radu su dati rezultati istraživanja emisije zagađenja od strane železnice i predložena su rešenja za odvodnjavanje pruga korišćenjem tehnika održivog upravljanja atmosferskim vodama.

Ključne reči: zagađenje životne sredine, odvodnja pruge, održive tehnike odvodnje

Abstract: Atmospheric water that falls on railroad tracks can pollute the surrounding soil and water bodies next to the railroad tracks. According to the existing study data, heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and herbicides are significantly separated from contaminants. The investigations carried out on the Niš-Preševo railway confirmed that heavy metals are extracted in significant quantities. Current measures to reduce pollution emissions are unsafe for the effective containment of water and soil pollution. In this paper, the results of the research on pollution emission from the railway line and proposed drainage solutions using sustainable storm water management techniques are given.

Key Words: environmental pollution, railway drainage, sustainable drainage techniques

¹ Jelena Dimitrijević, Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, Niš, jelena.dimitrijevic@gaf.ni.ac.rs, ORCID: 0009-0006-7158-0737

² Zoran Bonić, Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, Niš, zoran.bonic@gaf.ni.ac.rs, ORCID: 0000-0002-7452-6756

³ Dragan Milićević, Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, Niš, dragan.milicevic@gaf.ni.ac.rs, ORCID: 0000-0003-0617-2682

1. Uvod

Železnica je linijski infrastrukturni objekat za transport robe i putnika. Zbog svojih specifičnosti i raznovrsnosti okruženja na koja mogu uticati, železnički saobraćaj može predstavljati značajan rizik za životnu sredinu kako tokom izgradnje tako i kasnije tokom eksploatacije [1].

Sektor transporta se može smatrati važnim izvorom difuznog zagađenja životne sredine, ali su se do sada brojne studije fokusirale na zagađenje drumskog saobraćaja, dok se o železnici malo zna. Saznanja o emisijama iz redovnog saobraćaja železnice i sudbini i ponašanju supstanci u profilu pruge i okolini su oskudna u poređenju sa drumskim saobraćajem. Zbog toga je veoma teško da se proceni ekološka sudbina emisija zagađenja iz železničkog sistema i da li su standardi kvaliteta voda i zaštite zemljišta ispunjeni [2].

Dosadašnje mere smanjenja emisije zagađenja, kao što su sistemi za odvodnjavanje duž koloseka ili infiltracija oticanja, su nesigurne u smislu efikasnosti zadržavanja zagađivača vode i zemljišta [2]. Neophodni su novi pristupi upravljanju atmosferskim vodama kao rezultat ekoloških problema, urbanizacije i klimatskih promena. Da bi se efekti zagađenja minimizirali, moraju se razviti nova rešenja za upravljanje atmosferskim vodama. Danas se u svetu primenjuju nova rešenja održivog upravljanja količinom i kvalitetom atmosferskih voda, koja se javljaju pod različitim nazivima: Best Management Practices (BMP), Low Impact Development (LID), Sustainable Drainage System (SuDS), Water Sensitive Urban Design (WSUD), Low Impact Urban Design and Development (LIUDD) i td.

U ovom radu dat je prikaz rezultata istraživanja emisije zagađenja u trup železničke pruge usled odvijanja železničkog saobraćaja u Srbiji i predlog odvodnjavanja železničkih pruga korišćenjem održivih savremenih tehnologija upravljanja atmosferskim vodama kojima se pored kontrole zapremine oticanja poboljšava i kvaliteta efluenta. Osnovni cilj je da se predloži primena tehnologija koje su korišćene u odvodnjavanju urbanih sredina, sada u oblasti železnice. Prikazani rezultati i predlog rešenja su deo istraživanja koja se sprovode na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu Univerziteta u Nišu u okviru doktorske disertacije doktoranda Jelene Dimitrijević.

2. Odvodnjavanje železničkih pruga

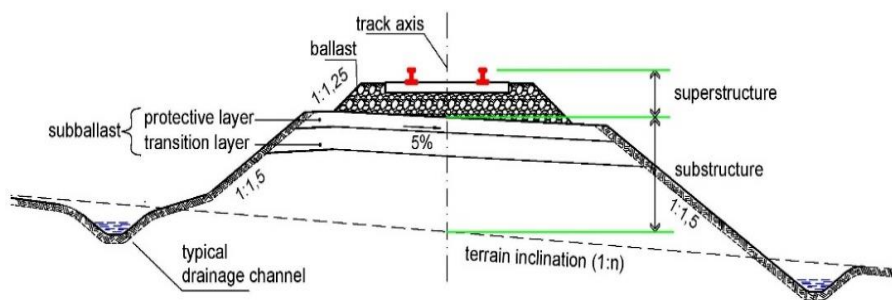
Svrha sistema za odvodnjavanje, koji se sastoji od mreže povezanih kanala i/ili cevi, je evakuacija površinskih i podzemnih voda iz zone osetljivih objekata. Nepravilan rad ili nedovoljan kapacitet sistema za odvodnjavanje može značajno oštetiti železničku infrastrukturu. Osnovni zadatak sistema za odvodnjavanje železničke pruge je da odvede vodu iz više izvora, uključujući atmosfersku vodu (kiša i

sneg), vodu koja se na kolosek izliva iz obližnjih područja i podzemne vode. Što se tiče odvodnjavanja željezničke pruge, postoji niz zahteva. Da bi se održala stabilnost koloseka tokom perioda obilnih padavina, osnovno je da se voda sa željezničke pruge ukloni što je brže moguće. Tek kada su drenažni putevi, kao što su zastor, zaštitni, prelazni sloj i odgovarajući drenažni kanali, propusni po potrebi, voda se može uspešno ukloniti sa koloseka na zastoru [3].

Zbog velike poroznosti zastora, koji efikasno odvodi vodu sa koloseka, sloj ispod zastora, koji obuhvata zaštitni i prelazni sloj, treba da ima prihvatljiv nagib. Nagib zaštitnog i prelaznog sloja, kao i vodonepropusnog sloja ispod njih tipično iznosi 3% do 5% [3].

Orijentacija kosine (jednostrano ili dvostrano odvodnjavanje) zavisi od toga da li je u pitanju jednokolosečna ili dvokolosečna pruga. Odvodni kanali su linearne konstrukcije koje mogu biti otvorene ili zatvorene. U slučaju tradicionalnog odvodnog sistema, za željeznicu na otvorenom tipični su kanali otvorenog tipa u vidu odvodnih jarkova (slika 1), dok su na stanicama u upotrebi zatvoreni drenažni kanali između koloseka.

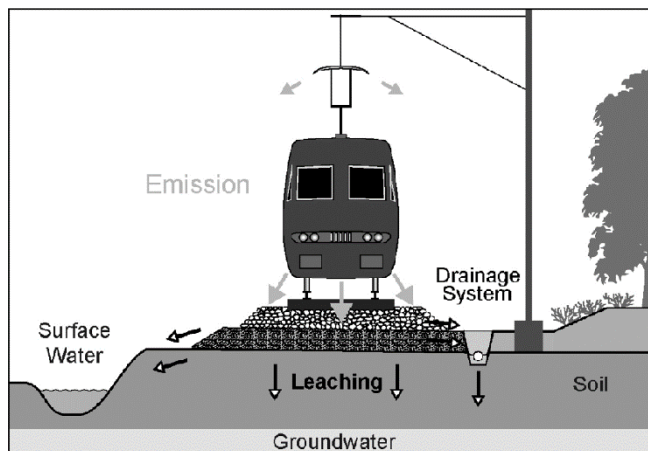
U zavisnosti od položaja u odnosu na osu koloseka, kanali za odvodnjavanje se mogu kategorisati kao uzdužni (paralelni sa osom koloseka duž bočnih strana), poprečni (upravni ili nagnuti na osu koloseka) ili aksijalni (duž ose koloseka). Recipijent za prijem vode iz kanala za odvodnjavanje je najbliža reka.



Slika 1. Karakteristični poprečni presek željezničke pruge sa elementima za odvodnjavanje [3]

Figure 1. Characteristic cross section of the railway track with drainage elements [3]

Atmosferske vode koje padaju na željezničke pruge delimično se slivaju površinski, a delimično infiltriraju u podzemlje [4] noseći različite zagađivače. Neki od zagađivača direktno dospevaju u površinske i podzemne vode, a neki ostaju u u zemljištu u okruženju pruge, da bi na kraju dospeli u podzemne vode (slika 2) [5].



Slika 2. Prostorna distribucija supstanci koje se emituju redovnim radom željeznice i njihovi putevi do podzemnih i površinskih voda [5]

Figure 2. Spatial distribution of substances emitted by regular railway operation and their pathways to groundwater and surface water [5]

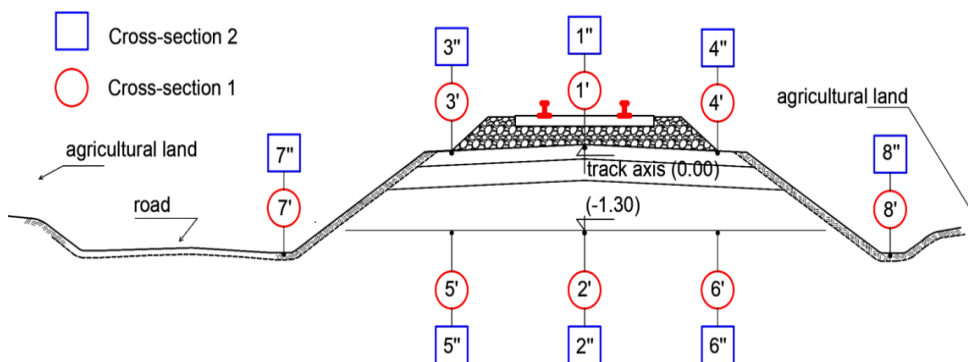
Na osnovu dosadašnjih oskudnih istraživanja među zagađivačima iz redovnog saobraćaja željeznice izdvajaju se policiklični aromatični ugljovodonici (PAH), teški metali (gvožđe, bakar, cink, mangan, hrom) i herbicidi (glifosat) [6]. Takođe, potvrđeno je značajno prisustvo gvožđa u blizini željezničke pruge. Pored gvožđa zabeleženi su i aluminijum, kalcijum, silicijum i sumpor [5]. Količina padavina ima direktan uticaj na oslobađanje policikličnih aromatičnih ugljovodonika [6, 7]. U poređenju sa drumskim saobraćajem, ukupne emisije zagađenja iz željezničkog sistema su daleko niže, ali nisu zanemarljive [8]. Izvori zagađivanja se ne mogu potpuno zanemariti jer proizilaze iz rada i održavanja transportnog sistema [7, 9].

3. Određivanje sadržaja teških metala u nasipu željezničke pruge

Područje istraživanja je bilo na magistralnoj željezničkoj pruzi Niš-Preševogranica sa Republikom Severnom Makedonijom, na deonici Belotinac-Međurovo, Srbija, od km 253+072,00 do km 253+283,00. Željeznički kolosek se oslanja na balast, tako da se gornji stroj sastoji od balasta, drvenih pragova sa šinama i pričvrstnih sredstava tipa K. Električna vuča je u upotrebi od 1974. godine. Na osnovu raspoloživih podataka prethodni remont pruge izvršen je 1965. godine i obuhvatao je gornji i donji stroj. U periodu od rekonstrukcije do danas zamenjeni su samo pojedinačni elementi gornjeg stroja [10]. U istraživanju su sagledana dva relevantna poprečna preseka. Za izbor pozicija poprečnih preseka presudna je bila okolnost da su u tom trenutku, za potrebe rekonstrukcije, uklonjeni postojeći elementi i slojevi gornjeg stroja, kao i nasip pruge na deonici od 211 m. Odabrana

lokacija je ocenjena kao povoljna za istraživanje, jer su istraženi poprečni preseki bili smešteni u nasipu, što je isključilo uticaj sadržaja koji mogu da otiču iz okolnog zemljišta pri obilnim padavinama.

Pored zahteva da posmatrani poprečni preseki budu u nasipu, ispunjen je i uslov da budu što dalje jedan od drugog, na rastojanju većem od 100 m, kako bi se izbegli eventualni identični uticaji. U pogledu položaja trase u odnosu na teren i uređenja okolnih površina, dva ispitivana preseka razlikovala su se samo po visini nasipa [10].

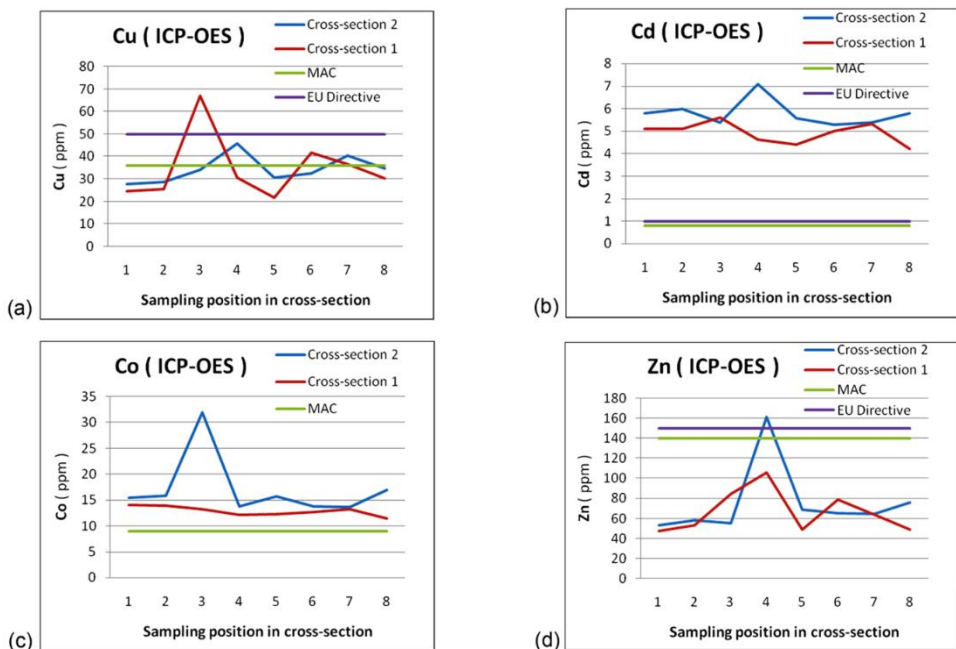


Slika 3. Tipičan poprečni presek železničke pruge i mesta uzorkovanja [10]
Figure 3. Typical cross-section of the railway and locations from where samples were collected [10]

Uzorci zemljišta su prikupljeni prilikom uklanjanja gornjeg stroja i nasipa u toku radova na rekonstrukciji pruge, pri čemu je uzorkovanje vršeno odgovarajućim ručnim alatom. Mesta uzorkovanja na izabranim poprečnim presecima definisana su prema načinu odvodnjavanja sa železničkog koloseka. Položaj i dubina mesta uzorkovanja kao i obeležavanje uzoraka su detaljno prikazani na slici 3. Prikupljeno je osam uzoraka po preseku, odnosno ukupno 16 uzoraka. Označena mesta uzoraka 1' - 8' odgovaraju poprečnom preseku br. 1, dok oznake 1'' - 8'' odgovaraju poprečnom preseku br. 2.

Skeniranje uzoraka u prvom ciklusu ispitivanja obavljeno je korišćenjem ručnog rendgenskog fluorescentnog (XRF) spektrometra (proizvodnja LANScientific, model RTU-KSRF7460), u Laboratoriji za geotehniku Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Nišu [10].

Postupak određivanja tragova i vrsta metala u navedenim uzorcima obavljen je i na ICP-OES (optička emisiona spektrometrija sa indukovanom spregnutom plazmom) spektrometru (iCAP 6000 serija, proizvođača Thermo Naučna kompanija), u Laboratoriji za analitičku i fizičku hemiju. Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta u Nišu [10].



Slika 4. Koncentracija teških metala na poprečnim presecima 1 i 2 sa maksimalno dozvoljenim vrednostima prema MAC i Direktivi EU, merene ICP-OES: (a) bakar - Cu; (b) kadmijum - Cd; (c) kobalt - Co; (d) cink - Zn

Figure 4. Heavy metal concentration on cross-sections 1 and cross-section 2 with maximum allowable values according to MAC and EU Directive, measured by ICP-OES: (a) copper - Cu; (b) cadmium - Cd; (c) cobalt - Co; (d) zinc - Zn

Rezultati ispitivanja iz oba postupka analizirani su prema maksimalno dozvoljenoj koncentraciji opasnih metala (MAC) prema nacionalnim propisima Republike Srbije i prema vrednostima preporučenim u zemljama Evropske unije (EU) [10]. Deo rezultata ispitivanja na ICP-OES spektrometru prikazan je na slici 4.

Rezultati ispitivanja pokazuju da je evidentirano prisustvo velikog broja različitih teških metala u železničkom telu kao posledica železničkog saobraćaja. Maksimalno dozvoljene koncentracije (MAC) za kadmijum, kobalt, bakar, cink, nikl, vanadijum, hrom i barijum, propisane za Republiku Srbiju i vrednosti za nikl, bakar, kadmijum i cink, prema Direktivi EU su prekoračene. Od toga su kadmijum, kobalt, bakar i cink prema MAC-u, a kadmijum, bakar i cink prema Direktivi EU potvrđeni kao metali skloni ispiranju u nedozvoljenim količinama. Iako su koncentracije drugih metala bile manje od preporučenih, važno je uzeti u obzir ove vrednosti, jer teški metali imaju tendenciju akumulacije [10].

Kod većine ispitivanih teških metala je zapažena njihova ujednačena koncentracija po poprečnom preseku, upoređujući vrednosti na ispitivanim lokacijama. Na osnovu vrednosti koncentracije po dubini nasipa, potvrđena je migracija metala [10].

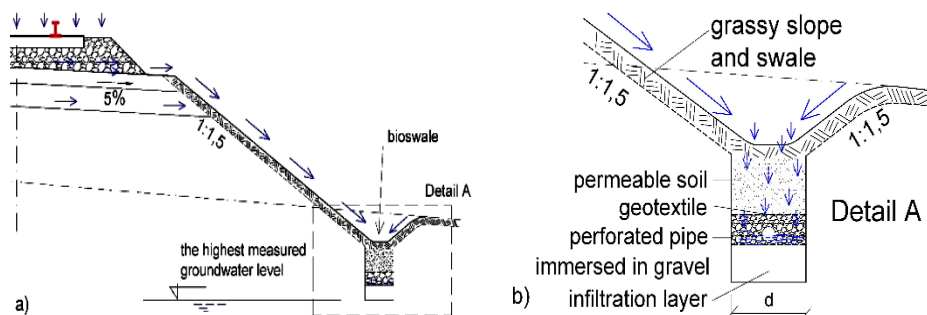
Ovi zaključci predstavljaju polaznu osnovu za dodatna istraživanja problematike taloženja teških metala na i oko železničkih pruga i definisanje novog pristupa za odvodnjavanje pruge.

4. Integrirani pristup upravljanju atmosferskim vodama

Integrirani pristup upravljanju atmosferskim vodama se definiše kao poseban pristup izgradnji ili rekonstrukciji koji ima za cilj da simulira prirodne i hidrološke procese na području na kome se izvodi, što bliže njihovom stanju pre izgradnje. Kako god da se zovu (LID, VSUD, SuDS, ...), tehnike samoodržive odvodnje imaju veoma slične ciljeve: regulacija hidrološkog ciklusa vode na održiv način, održavanje ili vraćanje režima protoka što je bliže moguće prirodnim uslovima, zaštita i remedijacija kvaliteta vode (površinske i podzemne vode), očuvanje vodnih resursa i doprinos poboljšanju pejzaža i biodiverziteta tretiranog područja. LID tehnike su podeljene u dve kategorije: tehnike zasnovane na infiltraciji i tehnike zasnovane na zadržavanju vode. LID elementi se mogu klasifikovati kao tačkasti, linearni ili površinski, a obzirom na karakteristike železničkih pruga kao moguće rešenje za odvodnjavanje atmosferskih voda nameću se linijski LID elementi [3]. Kao drenažni vodovi na otvorenim prugama se obično koriste obični travnati ili betonski kanali (slika 1). Pregledom dostupne literature nisu pronađeni podaci o karakteristikama ovakvih kanala, kako u pogledu hidroloških svojstava tako i u pogledu poboljšanja kvaliteta vode.

Kanali sa vegetacijom (bio-swale) (slika 5) zbog svog dizajna i fleksibilnosti mogu su korisni kao linijski elementi za odvodnjavanje železničkih pruga i mogu biti zamena običnim travnatim ili betonskim kanalima. Napravljeni su od lokalnog zemljišta sa zatravljenim kosinama radi sprečavanja erozije. Njihova primarna funkcija je da smanje količinu oticaja zadržavanjem vode, filtracijom i/ili infiltracijom i smanje brzinu oticanja. Zbog male brzine oticaja uzrokovane vegetacijom, sedimentacija je primarni mehanizam uklanjanja zagađivača, a poboljšanje kvaliteta vode se postiže i infiltracijom, filtracijom, sorpcijom (adsorpcijom i apsorpcijom) i nekim biološkim procesima. Sprovedena istraživanje za odvodnjavanje autoputa utvrdila su da za manje padavina skoro da nema oticanja iz kanala, jer je infiltracija potpuna, uz napomenu da su kanali za odvodnjavanje na autoputevima po položaju i geometriji veoma slični kanalima za odvodnjavanje železničkih pruga i da se razlikuju samo po veličini. Izgled kanala sa vegetacijom (bio-swale) sa filterskim slojevima za odvodnjavanje železničkog koloseka sugerise primer prikazan na slici 5.

Zavisno od karakteristika lokacije i konfiguracije terena mogu se primeniti i ostali linijski i/ili površinski LID elementi, što će biti predmet daljih istraživanja.



Slika 5. Bio swale: a) predlog lokacije i oblika, b) detalj bio swale [3]
 Figure 5. Bio swale: a) proposal for the location and shape, b) detail of the bio swale [3]

5. Zaključak

Zbog svojih specifičnosti i raznovrsnosti okruženja na koja mogu uticati, železničke pruge mogu predstavljati značajan rizik za životnu sredinu kako tokom izgradnje tako i kasnije tokom eksploatacije. Rezultati ispitivanja izvršenih na pruzi Niš-Preševo pokazuju da je evidentirano prisustvo velikog broja različitih teških metala u železničkom telu kao posledica železničkog saobraćaja, od kojih značajan broj prevazilazi dozvoljene koncentracije propisane prema regulativi Republike Srbije, kao i prema Direktivi EU. Iako su koncentracije drugih metala manje od preporučenih, važno je uzeti u obzir i ove vrednosti, jer teški metali imaju tendenciju akumulacije.

Dosadašnje mere smanjenjem emisije zagađenja su nesigurne u smislu efikasnosti zadržavanja opasnosti od zagađenja vode i zemljišta. Da bi se efekti zagađenja minimizirali, moraju se razviti nova rešenja za upravljanje atmosferskim vodama.

U radu se predlaže rešavanje problema odvodnjavanja atmosferskih voda sa železničke pruge integrisanim pristupom upravljanja atmosferskim vodama. Ovakav pristup je do sada korišćen u urbanim sredinama, ali nema ograničenja da se on primeni na železničke pruge, kao zamena postojećih tradicionalnih sistema za odvodnjavanje železničkih pruga.

Prikazani rezultati i predlog rešenja su deo istraživanja koja se sprovode na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu Univerzitet u Nišu u okviru doktorske disertacije doktoranda Jelene Dimitrijević. Pregledom dostupne literature nisu pro-

nađeni primeri primene ovakvog pristupa kod odvodnjavanja železničkih koloseka, tako da se za sada ne mogu praviti poređenja predloženog pristupa sa sličnim pristupima u svetu, jer jer nema poznatih primera iz prakse.

Predlog razmatran u ovom radu trebalo bi dalje implementirati na konkretnu deonicu železničke pruge, pri čemu bi performanse koje se zaista mogu očekivati od ovakvih rešenja, kao i procenat prečišćavanja zagađivača trebalo odrediti pomoću odgovarajućih softverskih paketa i potvrditi odgovarajućim eksperimentalnim istraživanjem.

6. Zahvalnica

Autori izražavaju zahvalnost Fondu za nauku Republike Srbije koji finansira naučno-istraživački projekat „Novi koncept u poboljšanju geotehničkih svojstava tla – hemijski elektrokinetički tretman zemljišta (ElectroSoil)“, br. 7742530, u okviru koga je nabavljen XRF spektrometar korišćen za istraživanja prikazana u ovom radu.

7. Literatura

- [1] E. Murnane, A. Heap and A. Swain, Control of water pollution from linear construction projects. *Technical guidance*, CIRIA, CIRIA C648, London, 2006.
- [2] Burkhardt, Michael, Luca Rossi, and Markus Boller, Diffuse release of environmental hazards by railways, *Desalination* 226(1-3), 106-113, doi: 10.1016/j.desal.2007.02.102, 2008.
- [3] J. Dimitrijević, Z. Bonić, D. Milićević, Z. Zafirovski, Contemporary methods for protecting soil and water from the impact of railway traffic, *Facta Universitatis Series: Architecture and Civil Engineering* 8(10), 1-16., DOI: 10.2298/FUACE1401001S, 2008.
- [4] Sañudo R, Miranda M, García C, García-Sánchez D, Drainage in railways, *Construction and Building Materials*, 210, pp. 391-412, 2019.
- [5] R. Lorenzo, R. Kaegi, R. Gehrig and B. Grobety, Particle emissions of a railway line determined by detailed single particle analysis, *Atmospheric Environment*, Vol. 40, pp.7831-7841, 2006.
- [6] M. Burkhardt, L. Rossi and M. Boller, *Release of various Substances to the Environment by Regular Railway Operations*, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Dübendorf, Switzerland, 2014.
- [7] S. M. Kang J. J. Morell J. Simonsen and S. Lebow, Creosote movement from treated wood immersed in fresh water, *Forest Products Journal*, Vol. 55, No.12, pp. 42-46, 2005.
- [8] L. Becker, G. Matuschek, D. Lenoir and A. Kettrup, Leaching behaviour of wood treated with creosote, *Chemosphere*, Vol. 42, pp. 301-308, 2001.

- [9] P. T. Vo, H. H. Ngo, W. Guo, J. L. Zhou, A. Listowski, B. Du, Q. Wei and X. T. Bui, Stormwater quality management in rail transportation – Past, present and future, *Science of the Total Environment*, 512-513, pp. 353-363, 2015.
- [10] J. Dimitrijević, Z. Bonić, Z. Zafirovski, D. Milićević, D.M. Djordjević, E. Zlatanović, J. Mrmošanin, N. Marinković, LID Approach to Railway Track Drainage: Determination of Heavy Metal Content in the Embankment of Railway, *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 68(3), 872–882, 2024, <https://doi.org-10.3311/PPci.23433>