

INSTITUT ZA RUDARSTVO I METALURGIJU BOR

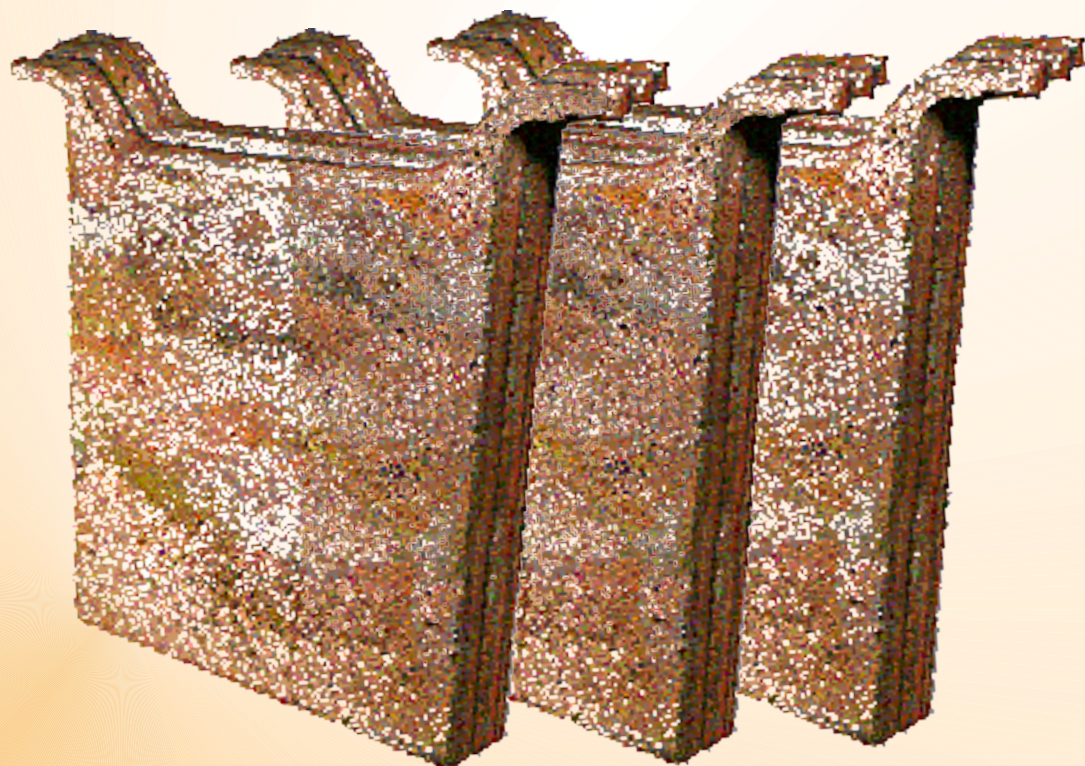


—Cu—

UDC 669.3
ISSN 0351-0212

Broj 2 Volumen 45 2020

BAKAR COPPER



BAKAR je časopis baziran na bogatoj tradiciji stručnog i naučnog rada ne samo iz oblasti dobijanja i prerade bakra, već i iz oblasti obojene i crne metalurgije, tehnologije, nanotehnologije, hemije, pripreme mineralnih sirovina, zaštite životne sredine, energetske efikasnosti, i primenjene informatike i povezanih srodnih oblasti.

Izlazi dva puta godišnje još od 1968. godine.

Glavni i odgovorni urednik

Dr Milenko Ljubojev, *naučni savetnik*,
redovni član IAS
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
E-mail: mlenko.ljubojev@irmbor.co.rs
Tel. 030/454-110

Zamenik glavnog i odgovornog urednika

Dr Ana Kostov, *naučni savetnik*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
E-mail: ana.kostov@irmbor.co.rs
Tel. 030/454-108

Urednik

Vesna Marjanović, *dipl.inž.*

Prevodilac

Nevenka Vukašinović, *prof.*

Tehnički urednik

Suzana Cvetković, *teh.*

Priprema za štampu

Vesna Simić, *teh.*

Štampa

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

Tiraž: 30 primeraka

Internet adresa

www.irmbor.co.rs

Izdavanje časopisa finansijski podržavaju

Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog
razvoja Republike Srbije
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

ISSN 0351-0212

Indeksiranje časopisa u SCIndeksu i u ISI.

Izdavač

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
19210 Bor, Zeleni bulevar 35
E-mail: institut@irmbor.co.rs
Tel. 030/436-826

Sva prava zadržana.

Uređivački odbor

Dr Mile Bugarin, *naučni savetnik*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Prof. dr Milan Antonijević, *red. prof.*
Tehnički fakultet Bor
Prof. dr Tatjana Volkov Husović, *vanr. prof.*
Tehnološko-metalurški fakultet Beograd
Doc. dr Bojan Jokić, *docent*
Fakultet primenjenih umetnosti u Beogradu
Dr Silvana Dimitrijević, *naučni saradnik*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Dr Ana Kostov, *naučni savetnik*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Dr Lidija Mančić, *viši naučni saradnik*
Institut tehničkih nauka SANU
Dr Aleksandra Milosavljević, *viši naučni saradnik*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Prof. dr Duško Minić, *red. prof.*
Fakultet tehničkih nauka Kosovska Mitrovica
Dr Milanče Mitovski
Redovni član IAS
Dr Miroslav Sokić, *naučni savetnik*
Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih
mineralnih sirovina Beograd
Dr Jasmina Stevanović, *naučni savetnik*
Institut za hemiju, tehnologiju i
metalurgiju Beograd
Dr Srećko Stopić
RWTH Aachen, IME Aachen, Nemačka
Dr Nadežda Talijan, *naučni savetnik*
Institut za hemiju, tehnologiju i
metalurgiju Beograd
Dr Viša Tasić, *naučni savetnik*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Prof. dr Vasyl Tomashyk, *red. prof.*
Ukrajinska nacionalna akademija nauka,
Institut za poluprovodničku fiziku Kijev
Dr Dejan Trifunović, *naučni saradnik*
Tehnološko-metalurški fakultet Beograd

COPPER is a journal based on the rich tradition of expert and scientific work not only in the field of copper production and treatment, but also in the field of non-ferrous and ferrous metallurgy, technology, nanotechnology, chemistry, mineral processing, ecology, energy efficiency, applied informaticc, as well as related fields of science. Since 1968, published twice a year.

Editor-in-Chief

Ph.D. Milenko Ljubojev, *Principal Research Fellow, full member of ECS*
Mining and Metallurgy Institute Bor
E-mail: milenko.ljubojev@irmbor.co.rs
Phone: +38130/454-110

Co-Editor

Ph.D. Ana Kostov, *Principal Research Fellow*
Mining and Metallurgy Institute Bor
E-mail: ana.kostov@irmbor.co.rs
Phone: +38130/454-108

Editor

Vesna Marjanović, *B.Eng.*

English Translation

Nevenka Vukašinović

Technical Editor

Suzana Cvetković

Preprinting

Vesna Simić

Printed in

Mining and Metallurgy Institute Bor

Circulation: 30 copies

Web site

www.irmbor.co.rs

COPPER is financially supported by

The Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic Serbia
Mining and Metallurgy Institute Bor

ISSN 0351-0212

Journal indexing in SCIndex and ISI.

Published by

Mining and Metallurgy Institute Bor
19210 Bor, Zeleni bulevar 35
E-mail: institut@irmbor.co.rs
Phone: +38130/436-826

All rights reserved.

Editorial Board

Ph.D. Mile Bugarin, *Principal Research Fellow*
Mining and Metallurgy Institute Bor
Prof.Ph.D. Milan Antonijević,
Technical Faculty Bor
Prof.Ph.D. Tatjana Volkov Husović
Faculty of Technology and Metallurgy Belgrade
Ph.D. Bojan Jokić
Faculty of Applied Arts in Belgrade
Ph.D. Silvana Dimitrijević, *Research Associate*
Mining and Metallurgy Institute Bor
Ph.D. Ana Kostov, *Principal Research Fellow*
Mining and Metallurgy Institute Bor
Ph.D. Lidija Mančić, *Senior Research Associate*
Institute of Technical Science of SASA
Ph.D. Aleksandra Milosavljević,
Senior Research Associate
Mining and Metallurgy Institute Bor
Prof.Ph.D. Duško Minić
Faculty of Technical Sciences Kosovska Mitrovica
Ph.D. Milanče Mitovski
Full member of ECS
Ph.D. Miroslav Sokić, *Principal Research Fellow*
Institute for Technology of Nuclear and Other Raw Materials Beograd
Ph.D. Jasmina Stevanović, *Principal Research Fellow*
Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy Belgrade
Ph.D. Srećko Stopić
RWTH Aachen, IME Aachen, Germany
Ph.D. Nadežda Talijan, *Principal Research Fellow*
Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy Belgrade
Ph.D. Viša Tasić, *Principal Research Fellow*
Mining and Metallurgy Institute Bor
Prof.Ph.D. Vasyl Tomashyk,
Institute for Semiconductor Physics of National of Sciences of Ukraine Kyiv
Ph.D. Dejan Trifunović, *Research Associate*
Faculty of Technology and Metallurgy Belgrade

UDK: 581.5:546.3:504.6(045)=163.41

ORIGINALAN NAUČNI RAD

Oblast: Zaštita životne sredine

**FITOREMEDIJACIONI POTENCIJAL VRBE U UKLANJANJU
TEŠKIH METALA IZ ŽIVOTNE SREDINE**

**PHYTOREMEDIATION POTENTIAL OF WILLOW IN REMOVING
HEAVY METALS FROM THE ENVIRONMENT**

Dragana Adamović^{1,2}, Tamara Urošević¹, Bojan Radović¹, Marija Milivojević¹,
Ivona Bezeg-Romic¹, Stefan Đordjević¹, Zorica Sovrlić¹

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju, Zeleni Bulevar 35, 19210 Bor

²Akita Univerzitet, 1-1 Tegatagakuen-machi, 010-8502 Akita, Japan

E-mail: dragana.a993@gmail.com

Izvod

Teški metali se nalaze u raznim materijalima i često mogu biti zagađivači životne sredine, ovo predstavlja sve veći problem širom sveta koji može uticati na zdravlje ljudi. Fitoremedijacija je alternativna metoda za remedijaciju zagađenih zemljišta, sedimenata i podzemnih voda zagađenih teškim metalima uz pomoć biljaka. Vrba je biljka koja može da raste u sredinama koje su zagađene teškim metalima i može apsorbovati određene teške metale kroz koren i na taj način ih eliminisati iz životne sredine. U ovom istraživanju je rađen eksperiment sa deset genotipova vrbe (7 rumunskih i 3 švedska genotipa) koji su uzgajani u suplementovanim solucijama sa četiri teška metala (Cu, Ni, Cd i Pb) i određene enzimске aktivnosti iz korenja istih radi procenjivanja efikasnosti ove biljke u procesu remedijacije životne sredine. Iz klonova vrbe kolorimetrijski su testirane aktivnosti peroksidaze (POX) i katalaze (CAT) na talasnim dužinama $\lambda=470$ nm i $\lambda=570$ nm, redom. Dobijeni rezultati pokazuju da enzimске aktivnosti variraju u zavisnosti od genotipa vrbe i koncentracije metala suplementovane solucije u kojoj je biljka bila uzgajana, svakako eksperiment je pokazao da je vrba efikasna u procesu fitoremedijacije.

Ključne reči: fitoremedijacija, vrba, teški metali, peroksidaza, katalaza

Abstract

Heavy metals are found in various materials and can often be environmental pollutants, this is a growing problem all around the world that can affect human health. Phytoremediation is an alternative approach for remediation of soils, sediments and groundwater polluted by heavy metals with the help of plants. Willow is a plant that grow in areas contaminated by heavy metals, it absorbs certain heavy metals through the roots and thus eliminates them from the environment. In order to evaluate the efficiency of willow in process of phytoremediation an experiment was performed. In the laboratory, ten genotypes of willow (7 Romanian and 3 Swedish genotypes) were grown in media supplemented with four heavy metals (Cu, Ni, Cd and Pb) and certain enzymatic activities from their roots were analyzed. Peroxidase (POX) and catalase (CAT) activities were assayed through the colorimetric method at wavelength $\lambda=470$ nm and $\lambda=570$ nm, respectively. The obtained results show that enzymatic activities vary depending on the analyzed willow genotype and the metal concentration of the supplemented solution in which the plant was grown. The experiment showed that willow is efficient in the process of phytoremediation.

Keywords: phytoremediation, willow, heavy metals, peroxidase, catalase

1. UVOD

Teški metali su grupa elemenata sa metalnim osobinama (provodljivost, duktilnost, stabilnost katjona, itd.), koji imaju atomski broj veći od 20 i gustinu veću od 5 g/cm³. Ovi metali mogu dospeti u životnu sredinu kako iz prirodnih tako i iz antropogenih izvora [1, 2, 3]. Neki teški metali su esencijalni za rast i razvoj biljaka, međutim u prekomernim količinama mogu biti toksični [2]. Prekomerna količina teških metala u životnoj sredini, koja potiče iz antropogenih izvora, najčešće rudarstvo i industrija, je sve češće prisutna širom sveta [4, 5]. Ovi zagađivači iz životne sredine mogu uticati na žive organizme i ući u lanac ishrane bioakumulacijom i biomagnifikacijom [6].

Iz tog razloga je remedijacija životne sredine veoma važna, međutim konvencionalne metode remedijacije su skupe i mogu takođe biti destruktivne po životnu sredinu [7]. Nasuprot konvencionalnim metodama, fitoremedijacija predstavlja relativno jeftinu tehniku za remedijaciju životne sredine i zadnjih godina se sve više upotrebljava širom sveta [8, 9]. Različite biljke su testirane, i u laboratoriji i u polju, kao potencijalni organizmi za remedijaciju životne sredine i mnogo vrsta se pokazalo dobro u tome [10-13]. Jedna od biljaka efikasna u fitoremedijaciji jeste i vrba [14-18].

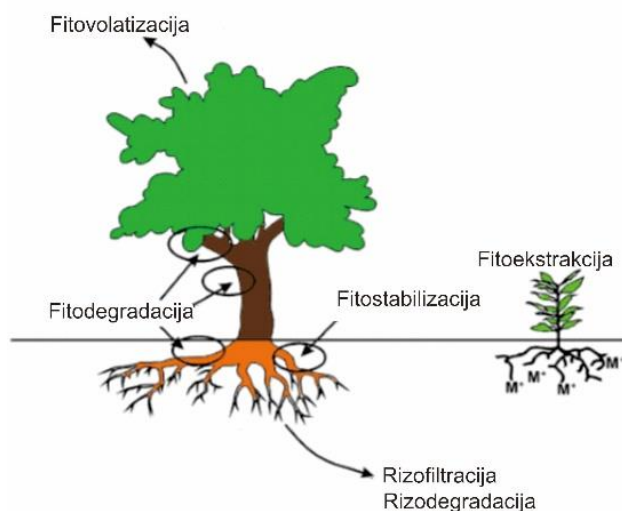
Cilj ovog rada je ispitivanje ponašanja deset genotipova vrbe koji su uzgajani u suplementovanim solucijama sa 4 teška metala (Cu, Ni, Cd i Pb), ispitivanje njihovog metaboličkog odgovora, koji se vezuje za enzimske aktivnosti peroksidaze (POX) i katalaze (CAT), i njihova efikasnost u procesu fitoremedijacije. Peroksidaza je enzim koji se uglavnom nalazi u ćelijskom zidu. Poznato je da je ovaj enzim uključen u kontrolu razvoja biljaka, lignifikaciju i odbranu od patogena [19]. Katalaza je enzim koji se nalazi u mitohondrijama i peroksisomima. Ovaj enzim katališe redukciju vodonik-peroksida oslobođenog tokom fotosinteze i pretvara ga u vodu i kiseonik [10]. Peroksidaza i katalaza spadaju u najizučavanije enzime koji se nalaze u biljkama.

2. FITOREMEDIJACIJA

Termin fitoremedijacija potiče od grčke reči *phyto*, koja znači „biljka“, i latinskog sufiksa *remedium*, značenja „u stanju da izleči“ ili „lek“ [20]. Fitoremedijacija podrazumeva korišćenje živih biljaka u tretmanu remedijacije zagađenih zemljišta, sedimenata i podzemnih voda. Ovaj proces remedijacije predstavlja relativno mladu i novu isplativu tehnologiju, koja se pokazala efikasno u otklanjanju, kako neorganskih, tako i organskih zagađivača iz životne sredine [2, 21].

Na mestima zagađenim neorganskim zagađivačima, biljke mogu stabilizovati ili eliminisati ove zagađivače sledećim mehanizmima: 1) fitostabilizacije, 2) fitoekstrakcije, i 3) rizofiltracije. Na mestima zagađenim organskim jedinjenjima,

biljke mogu razgraditi ili eliminisati ove zagađivače sledećim mehanizmima: 1) fitodegradacije, 2) rizodegradacije, i 3) fitovolatizacije [2, 17, 22-24]. Prefiks „fito“ u nazivu mehanizma sugerše da je cela biljka uključena u proces fitoremedijacije (zagađivač biva transportovan od korena do drugih delova biljke), dok prefiks „rizo“ sugerše da se remedijacija odvija samo u rizosferi, tj. samo u korenu biljke (zagađivači se ne transportuje do drugih delova biljke) (sl. 1.) [25].



Sl. 1. Mehanizmi fitoremedijacije [25]

3. MATERIJALI I METODE

Ovo istraživanje je urađeno kako bi se utvrdio metabolički odgovor vrbe na teške metale i na taj način videla efikasnost ove biljke u procesu fitoremedijacije. Biološki materijal se sastojao od 10 genotipova vrbe, 7 rumunskih (892, 1077, 1082, Cozia, Fragisal, Pesred i Robisal) i 3 švedska genotipa (Inger, Olof i Tordis). Korišćene su sadnice (klonovi) od jedne godine (oko 10 cm dužine i oko 1 cm u prečniku) sa prosečno 2-5 izdanka, koje su uzgajane u *in vitro* laboratoriji sa kontrolisanim atmosferskim uslovima (slika 2). Svaki klon je bio uzgajan u devet različitih suplementovanih solucija, po dve koncentracije Cu (250 mg/L i 500 mg/L), Ni (200 mg/L i 500 mg/L), Cd (5 mg/L i 10 mg/L), Pb (250 mg/L i 1000 mg/L) i jedna blank solucija.



Sl. 2. Fotografije klonova vrbe i laboratorije u kojoj su uzgajani isti

Za utvrđivanje metalčkog odgovora klonova vrbe određene su enzimske aktivnosti peroksidaze (POX) i katalaze (CAT). Enzimske aktivnosti svih genotipova vrbe su određene iz korenja klonova. Sveže tkivo korena je bilo homogenizovano sa 0.1M fosfatnog pufera (pH=7.5) koji sadrži 0.1 mM EDTA. Homogenati su zatim bili centrifugirani 20 minuta na 6000 obrtaja po minutu (r.p.m.), nakon čega su supernatanti bili korišćeni za enzimski test. Enzimske aktivnosti peroksidaze određene su kolorimetrijski na talasnoj dužini $\lambda=470$ nm i izražene kao varijacija apsorpcije po minutu usled oksidacije gvajakola ($C_7H_8O_2$) u prisustvu vodonik-peroksida (H_2O_2) ekstraktom iz jednog grama sveže supstance ($\Delta A/\text{min/g}$) [26, 27].

Ezimske aktivnosti katalaze su takođe određene kolorimetrijski. Metoda se zasniva na činjenici da se kalijum dihromat ($K_2Cr_2O_7$) u kiseloj sredini redukuje vodonik-peroksidom (H_2O_2) do hrom acetata ($C_4H_6CrO_4$) koje se može odrediti kolorimetrijski na talasnoj dužini $\lambda=570$ nm. Na ovaj način se određuje količina vodonik-peroksida koja je ostala nerazgrađena posle dejstva enzimskog ekstrakta po minutu i po gramu (mM $H_2O_2/\text{min/g}$) [28].

4. REZULTATI I DISKUSIJA

Kada su biljke izložene stresu koncentracije reaktivnih jedinjenja kiseonika (ROS), koje obično nastaju normalnim ćelijskim aktivnostima i imaju korisnu ulogu kao signalni molekul i regulator rasta, rastu. Rast reaktivnih jedinjenja kiseonika kod živih organizama stvara oksidativni stres. Biljke su razvile odbrambene mehanizme protiv stvaranja ovih reaktivnih jedinjenja kiseonika, ali i za eliminaciju ovih radikala, tako da u normalnim uslovima njihovo formiranje i uklanjanje bude u ravnoteži. Kada se formiranje reaktivnih jedinjenja kiseonika povećava pod stresom, biljke efikasno reaguje kroz enzimski sistem koji neutrališe ove slobodne radikale i štiti ćelije od oksidativnog stresa. Iz tog razloga je aktiviranje enzimskih sistema odgovornih za eliminaciju ovih reaktivnih, toksičnih vrsta od najvećeg značaja za upravljanje odbrambenog mehanizma biljaka.

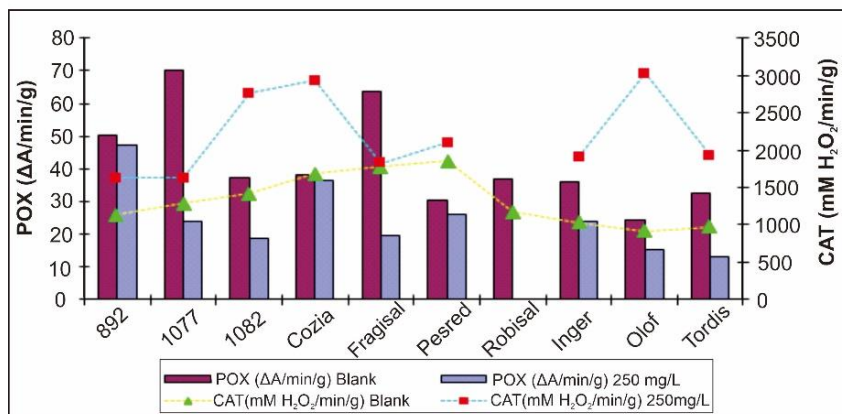
Dobijeni rezultati enzimskih aktivnosti peroksidaze (POX) i katalaze (CAT), ispitivanih iz korenja genotipova vrbe su prikazani u tabeli 1. Rezultati pokazuju da aktivnost enzima varira u zavisnosti od ispitanog genotipa vrbe i od aplikovane doze metala u soluciji u kojoj je biljka uzgajana.

Tabela 1. Aktivnosti enzima peroksidaze (POX) i katalaze (CAT) određenih u korenju rumunskih (892, 1077, 1082, Cozia, Fragisal, Pesred i Robisal) i švedskih (Inger, Olof i Tordis) genotipova vrbe podvrgnutim tretmanu sa teškim metalima (Cu, Cd i Pb)

Metali	Konc. (mg/L)	Enzimi	Genotipovi vrbe									
			892	1077	1082	Cozia	Fragisal	Pesred	Robisal	Inger	Olof	Tordis
Cu	Blank	POX	51	70	38	39	63	30	37	35	24	32
	250		47	23	19	46	20	25	n.p.	23	15	12
	500		n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
	Blank	CAT	1250	1360	1430	1650	1720	1780	1080	990	820	920
	250		1600	1600	2700	2920	1800	2150	n.p.	1850	3030	1860
	500		n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
Cd	Blank	POX	51	70	38	39	63	30	37	35	24	32
	5		43	30	16	27	16	7	11	15	32	16
	10		31	35	29	n.p.	18	10	30	34	31	12
	Blank	CAT	1250	1360	1430	1650	1720	1780	1080	990	820	920
	5		1400	2950	1500	6350	3350	2170	6400	2100	3230	2000
	10		650	1400	1650	n.p.	2100	1550	3000	1780	3750	2100
Pb	Blank	POX	51	70	38	39	63	30	37	35	24	32
	250		32	47	23	6	34	34	22	49	49	35
	1000		49	57	28	11	31	10	13	41	n.p.	11
	Blank	CAT	1250	1360	1430	1650	1720	1780	1080	990	820	920
	250		1745	1310	870	1080	1740	1745	2500	3155	2900	2350
	1000		3820	2950	2670	2450	3150	2670	5240	2720	n.p.	2670

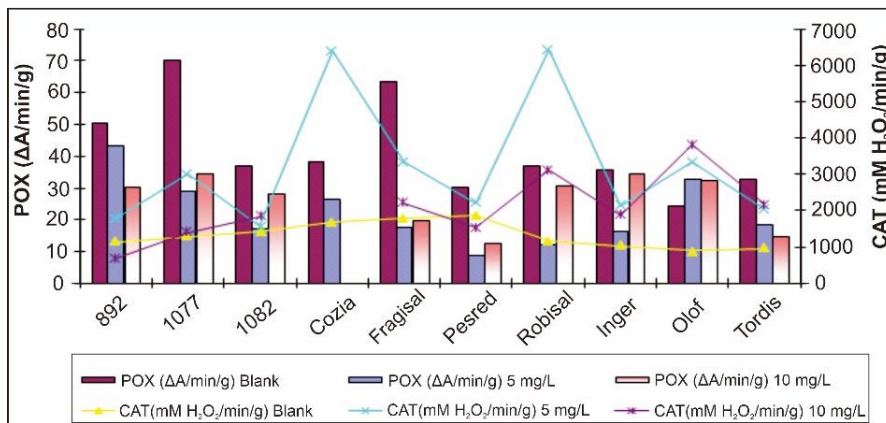
POX-peroksidaza ($\Delta A/\text{min/g}$), CAT-katalaza ($\text{mM H}_2\text{O}_2/\text{min/g}$), n.p.-biljka nije preživela

Biljke uzgajane u soluciji bakra koncentracije 500 mg/L nisu preživele. Klonovi rumunskog genotipa Robisal nisu preživeli ni kod jedne aplikovane doze bakra (250 mg/L i 500 mg/L). Aktivnost peroksidaze iz korenja biljaka uzgajanih u soluciji bakra koncentracije 250 mg/L pada u odnosu na aktivnost peroksidaze određene u korenju biljaka odgajanih u blank soluciji, nasuprot tome aktivnost katalaze na prvoj aplikovanoj dozi metala naglo raste što je prikazano na slici 3.



Sl. 3. Varijacija aktivnosti peroksidaze i katalaze na tretman genotipova vrbe bakrom

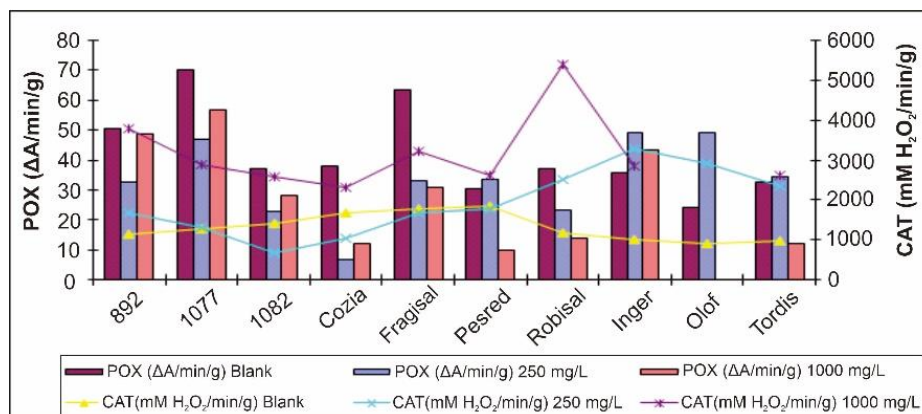
Kod biljaka uzgajanih u solucijama sa kadmijumom je primećeno da aktivnost peroksidaze pada kod svih ispitivanih genotipova vrbe pri aplikaciji obe doze metala ($Cd = 5 \text{ mg/L}$ i $Cd = 10 \text{ mg/L}$), osim kod švedskog genotipa Olof gde je primećen rast aktivnosti ovog enzima kod obe aplikovane doze metala, slika 4. Aktivnost katalaze raste naglo kod svih izučavanih genotipova vrbe pri aplikaciji prve doze kadmijuma, dok kod druge aplikovane doze aktivnost varira u zavisnosti od genotipova. Klon vrbe rumunskog genotipa Cozia nije preživeo u soluciji koja sadrži 10 mg/L Cd .



Sl. 4. Varijacija aktivnosti peroksidaze i katalaze na tretman genotipova vrbe kadmijumom

U slučaju biljaka koje su podvrgnute tretmanu olovom, primećuje se varijacija enzimske aktivnosti u zavisnosti od genotipova. Kod rumunskih genotip-

ova (osim kod genotipa Pesred) aktivnost peroksidaze opada, dok se kod švedskih genotipova aktivnost povećava kod prve aplikovane doze. Kod druge aplikovane doze olova (1000 mg/L) aktivnost peroksidaze se smanjuje u odnosu na aktivnost peroksidaze u korenu klonova uzgajanih u blank soluciji. Aktivnost katalaze ima nasumične varijacije u zavisnosti od genotipova i aplikovane doze olova što je prikazano na slici 5. Klon vrbe švedskog genotipa Olof nije preživio kod druge aplikovane doze olova.



Sl. 5. Varijacija aktivnosti peroksidaze i katalaze na tretman genotipova vrbe olovom

Biljke koje su bile uzgajane u suplementovanim solucijama nikla nisu preživele, slika 6.



Sl. 6. Fotografija biljaka koje su uzgajane u suplementovanim solucijama nikla

5. ZAKLJUČAK

Potrebna su istraživanja kako bi se otkrili načini dekontaminacije i remedijacije životne sredine. Upotreba biljaka u remedijaciji životne sredine se pokazala kao jako povoljna i efikasna metoda. Fitoremedijacija nudi jeftinu i sigurnu alternativu konvencionalnim metodama. Upotrebom sposobnosti određenih

biljaka da uklone zagađivače iz životne sredine smanjuje se rizik od zagađenja. Na osnovu rezultata enzimskih aktivnosti peroksidaze i katalaze utvrđenih iz korenja deset genotipova vrbe, može se zaključiti da je vrba efikasna u uklanjanju bakra, kadmijuma i olova iz životne sredine, dok se u eksperimentu sa niklom pokazala neefikasno.

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada evidencioni broj: 451-03-68/2020-14/200052.

LITERATURA

- [1] M. Yadav, R. Gupta, R.K. Sharma, Green and sustainable pathways for wastewater purification, *Advances in water purification techniques, Meeting the Needs of Development and Developing Countries*, (2019) 355-383.
- [2] T. Vamerali, M. Bandiera, G. Mosca, Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review, *Environmental Chemistry Letter*, 8 (2010) 1-17.
- [3] W.L.F. Brinkmann, W. Plass, The spacial distribution of heavy metals in the soil of the Steinbach basin-Rhine-Main area. *Processing of international symposium on recent investigation in the zone of aeration*, Munch, 1 (1984) 57-68.
- [4] V. Masindi, K.L. Muedi, Environmental contamination by heavy metals, Hosman El-Din M. Saleh & Refaat F. Aglan, *Intech Open* (2018).
- [5] H. Ali, E. Khan, I. Ilahi, Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bio-accumulation, *Journal of chemistry*, (2019) 1-14.
- [6] S. Manohar, C.D. Jadia, M.H. Fulekar, Impact of ganesch idol immersion on water quality, *Indian Journal of Environmental Protection*, 27(3) (2006) 216-220.
- [7] S.A. Aboulroos, M.I.D. Helal, M.M. Kamel, Remediation of Pb and Cd polluted soils using in situ immobilization and phytoextraction techniques, *Soil and Sediments Contamination*, 15 (2006) 199-215.
- [8] P.L. Gratao, M.N.V. Prasad, P.F. Cardoso, P.J. Lea, R.A. Azevedo, Phytoremediation: green technology for the clean up of toxic metals in the environment, *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1) (2005) 53-64.

- [9] N. Rajakaruna, K.M. Tompkins, P.G. Pavićević, Phytoremediation: an affordable green technology for the clean-up of metal-contaminated sites in Sri Lanka, *Ceylon Journal of Science (Biological Science)*, 35(1) (2006) 25-35.
- [10] R. Soare, M. Dinu, C. Babeanu, M. Popescu, Antioxidant enzyme activities of some Brassica species, *Bulletin UASVM Horticulture*, 74(2) (2017) 191-196.
- [11] S. Goswami, S. Das, Copper phytoremediation potential of *Calandula officinalis* L. And the role of antioxidant enzymes in metal tolerance, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 126 (2016) 211-218.
- [12] B. Wang, L. Lui, Y. Gao, J. Chen, Improved phytoremediation of oilseed rape (*Brassica napus*) by *Trichoderma* mutant constructed by restriction enzyme-mediated integration (REMI) in cadmium polluted soil, *Chemosphere*, 74 (2009) 1400-1403.
- [13] S.S. Andra, R. Datta, R. Reddy, S.K.M. Saminathan, D. Sarkar, Antioxidant enzymes response in Vetivier Grass: A reenhouse study for chelant-assisted phytoremediation of lead-contaminated residential soils, *Clean-Soil, Air, Water*, 39(5) (2011) 428-436.
- [14] P. Vervaeke, S. Luyssaert, J. Mertens, E. Meers, F.M.G. Tack, N. Lust, Phytoremediation prospects of willow stands on contaminated sediment: a field trial, *Environmental Pollution*, 126 (2003) 275-282.
- [15] Y. Cao, C. Ma, H. Chen, G. Chen, J.C. White, B. Xing, Copper stress in flooded soil: Impact on enzyme activities, microbial community composition and diversity in the rhizosphere of *Salix integra*, *Science of the Total Environment*, 704 (2020) 135350
- [16] E.M. El-Mahrouk, M.A. Hegazi, M.E. Abdel-Gayed, Y.H. Dewir, M.E. El-Mahrouk, Y. Naidoo, Phytoremediation of Cadmium-, Copper-, and Lead contaminated soil by *Salix mucronata* (Synonym *Salix safsaf*), *Horticultural Science*, 54(7) (2019) 1249-1257.
- [17] B.A. Wani, A. Khan, R.H. Bodha, *Salix*: A viable option for phytoremediation, *African Journal of Environmental Science and Technology*, 5 (2011) 567-571.
- [18] M.B. Ali, P. Vajpayee, R.D. Tripathi, U.N. Rai, S.N. Singh, S.P. Singh, Phytoremediation of lead, nickel, and copper by *Salix acmophylla* Boiss.: Role of antioxidant enzymes and antioxidant substaces, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 70 (2003) 462-469.
- [19] R.B. Van Huystee, Some molecular aspects of plants peroxidase biosynthetic studies, *Annual Review of Plant Physiology*, 38 (1987) 205-219.

- [20] I. Raskin, P.B.A.N. Kumar, S. Dushenkov, D. Salt, Bioconcentration of heavy metals by plants, *Current Opinion in Biotechnology*, 5 (1994) 285-290.
- [21] V. Krstić, D. Simonović, S. Đorđievski, B. Pešovski, T. Urošević, B. Trumić, Z. Sovrlić, Prečišćavanje otpadnih voda savremenim metodama biosorbcije i fitoremedijacijom, *Bakar*, 44 (2019) 1.
- [22] C.D. Jadia, M.H. Fulekar, Phytoremediation of heavy metals: Recent techniques, *African Journal of Biotechnology*, 8(6) (2009) 921-928.
- [23] M.S. Liphadzi, M.B. Kirkham, Phytoremediation of soil contaminated with heavy metals: a technology for rehabilitation of the environment, *South African Journal of Botany*, 71(1) (2005) 24-37.
- [24] H. Ali, E. Khan, M.A. Sajad, Phytoremediation of heavy metals- Concepts and applications, *Chemosphere*, 91 (2013) 869-881.
- [25] J. Park, J. Kim, K. Kim, Phytoremediation of soil contaminated with heavy metals using *Brassica napus*, *Geosystem Engineering*, 15(1) (2012) 10-18.
- [26] I.C. Babeanu, G. Marinescu, E. Glodeanu, G. Ciobanu, *Biochimie vegetala practica*, Ed INFO, Craiova (2003).
- [27] C. Babeanu, R. Soare, M. Dinu, Antioxidant enzyme activities in some cultivars of *Brassica oleracea* var. capitata F. alba. *SGEM Conference Proceedings*, 17(61) (2017) 471-478.
- [28] A.K. Sinha, Colorimetric assay of catalase, *Analytical Biochemistry*, 47 (1972) 389-396.

UDK: 546.26:681.586(045)=163.41

ORIGINALAN NAUČNI RAD

Oblast: Zaštita životne sredine

**MERENJE KONCENTRACIJA CO₂ U UNUTRAŠNjem VAZDUHU
OBJEKATA PRIMENOM LOW-COST SENZORA I MONITORA**

**MEASUREMENT OF CO₂ CONCENTRATIONS IN INDOOR AIR USING
LOW-COST SENSORS AND MONITORS**

Viša Tasić¹, Aca Božilov², Ivan Lazović³, Nikola Mirkov³

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Bor, E-mail: visa.tasic@irmbor.co.rs

²Univerzitet u Nišu, Fakultet zaštite na radu u Nišu, Niš

³Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča, Vinča

Izvod

Kvalitet unutrašnjeg vazduha u stambenim i poslovnim prostorijama može značajno da utiče na zdravlje i kvalitet života ljudi. Slično tome, kvalitet vazduha u učionicama može značajno da utiče na rad i sposobnost učenika i studenata da prate nastavu. Ovo je veoma važno za decu uzrasta od 7 do 10 godina, jer je to period kada je njihov fizički razvoj veoma intenzivan. Porast koncentracije CO₂ u zatvorenom prostoru često ukazuje na lošu ventilaciju same prostorije. Iz tog razloga sve je češća potreba da se meri koncentracija CO₂, sa dovoljno pouzdanim instrumentima i opremom, kako bi se izvršila procena kvaliteta unutrašnjeg vazduha u posmatranim prostorijama. U ovom radu prikazana su eksperimentalna ispitivanja mogućnosti primene low-cost senzora NDIR tipa za merenje koncentracija CO₂ u unutrašnjem vazduhu objekata. Na osnovu rezultata ispitivanja može se zaključiti da karakteristike ispitivanog senzora ispunjavaju kriterijume potrebne za indikativna merenja koncentracija CO₂ u unutrašnjem vazduhu.

Ključne reči: merenje, ugljen-dioksid CO₂, kvalitet vazduha, low-cost senzori

Abstract

Indoor air quality in residential and commercial premises can significantly affect people's health and quality of life. Similarly, air quality in classrooms can significantly affect the work and ability of students to attend classes. This is very important for children aged 7 to 10 because it is a period when their physical development is very intense. An increase in the concentration of CO₂ indoors often indicates poor ventilation of the room itself. For this reason, there is an increasing need to measure the concentration of CO₂, with sufficiently reliable instruments and equipment, in order to assess the indoor air quality in the observed rooms. This paper presents experimental tests of the possibility of using low-cost NDIR type sensors for measuring CO₂ concentrations in indoor air. Based on the test results, it can be concluded that the characteristics of the tested sensor meet the criteria required for indicative measurements of CO₂ concentrations in indoor air.

Keywords: measurement, carbon dioxide, air quality, low-cost sensors

1. UVOD

Vrednost koncentracija CO₂ u spoljašnjem vazduhu je tipično u opsegu od 350 do 400 ppm [1], a ukoliko se u okolini nalaze značajniji industrijski objekti ili je visok nivo saobraćaja, te vrednosti mogu biti i više. Glavni izvor CO₂ u prostorijama (učionicama, kancelarijama) je disanje, a nivo koncentracije CO₂ zavisi od broja ljudi, vremenskog perioda boravka u prostoriji, od količine svežeg vazduha koji ulazi spolja, veličine prostorije i koncentracije CO₂ u spoljašnjem vazduhu [2]. Porast koncentracije CO₂ ukazuje na lošu ventilaciju. Nivo CO₂ u unutrašnjem vazduhu može da se koristi kao indikator kvaliteta unutrašnjeg vazduha i zamenjuje merenje broja izmena vazduha relativno jeftinom opremom za monitoring koncentracije CO₂ u vazduhu u realnom vremenu. Prema ASHRAE standardu minimalna vrednost nivoa provetrenosti je 8 l/s po osobi, a preporučena iznosi 10 l/s [3]. Brzina emitovanja CO₂ se uglavnom menja u zavisnosti od intenziteta i vremena trajanja fizičkih aktivnosti. U slučajevima kada osobe koje borave u zatvorenom prostoru sede, brzina generisanja metaboličkog CO₂ je oko 0.3 l/s po osobi [4].

Ulazni parametri unutrašnje sredine za projektovanje i procenu energetskih karakteristika zgrada, kvaliteta unutrašnjeg vazduha, toplotnog okruženja, osvetljenja i akustika su definisani na osnovu evropskog standarda EN15251 [5], koji je usvojen i u Republici Srbiji. U ovom standardu kvalitet unutrašnjeg vazduha se kategoriše na osnovu razlika između unutrašnje i spoljašnje (I/O) koncentracije CO₂. Definisane su četiri kategorije kvaliteta vazduha, prikazane u tabeli 1, pri čemu je II kategorija preporučena za školske zgrade.

Tabela 1. Kategorije vazduha prema preporučenim I/O razlikama koncentracija CO₂

Kategorija	CO ₂ [ppm]
I	350
II	500
III	800
IV	>800

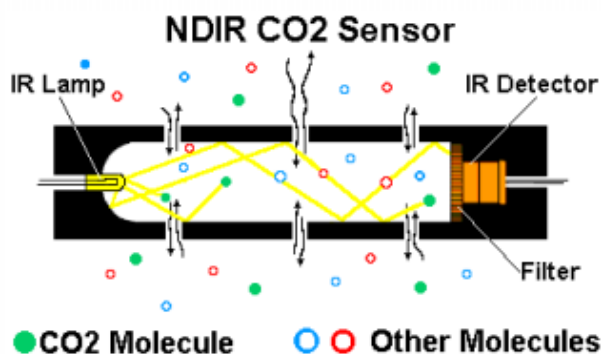
Istraživanja pokazuju da loš kvalitet vazduha u zatvorenim prostorima u školskim zgradama može prouzrokovati smanjenje sposobnosti učenika da prate nastavu. Nasuprot tome, dobar kvalitet vazduha u učionicama može poboljšati koncentraciju, a takođe i produktivnost učenika i nastavnika [6].

Cilj monitoringa CO₂ je da se obezbediti dobar kvalitet vazduha u unutrašnjem prostoru (poslovni prostor, kancelarije, učionice, prostor za stanovanje). Na osnovu rezultata CO₂ monitoringa donose se i preporuke vezane za odgovarajući stepen ventilacije unutrašnjeg prostora u posmatranim objektima.

U ovom radu prikazana su ispitivanja mogućnosti primene low-cost senzora NDIR tipa za merenje koncentracija CO₂ u unutrašnjem vazduhu.

2. CO₂ SENZORI I MONITORI

Postoje dve grupe senzora koji se najčešće koriste u uređajima za detekciju CO₂ [7]. Jednu grupu čine NDIR (Non-Dispersive InfraRed - nedisperzivni infracrveni senzor) senzori, dok drugu grupu čine, takozvani, hemijski CO₂ senzori.



Sl. 1. Osnovni delovi tipičnog NDIR CO₂ senzora

NDIR senzor je najčešće korišćeni tip CO₂ senzora za industrijska merenja. Tipični NDIR CO₂ senzor sastoji se od komore u kojoj se na jednom kraju nalazi izvor infracrvenog (IR) svetla, a na drugom kraju detektor (slika 1). IR svetlost je usmerena kroz senzorsku komoru kroz koju prolazi gas. Ispred samog IR detektora se nalazi filter koji eliminiše svu IR svetlost osim one sa talasnom dužinom 4.26 μm koju samo molekuli CO₂ mogu da apsorbuju. Koncentracija CO₂ se određuje merenjem intenziteta svetlosti koja stiže do detektora.

U tabeli 2. prikazane su tehničke karakteristike CO₂ monitora koji koriste NDIR senzor, dok je na slici 2 prikazan njihov izgled.

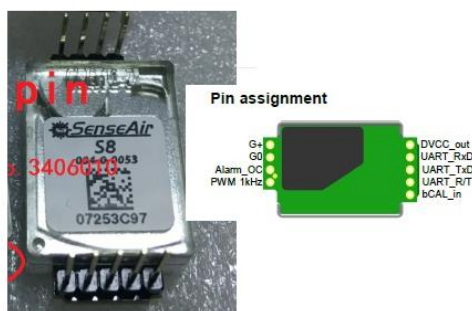
Tabela 2. Tehničke karakteristike nekih komercijalno dostupnih CO₂ monitora

Proizvođač & Model	Testo-535	TSI IAQ7515	Q-Trak 8550	EXTECH- CO250	ANTON- IAQ8494
Tip senzora	NDIR	NDIR	NDIR	NDIR	NDIR
Opseg rada (ppm)	0 - 9999	0 - 5000	0-5000	0-5000	0-9999
Tačnost	±50ppm/ ±2%	±50ppm/ ±3%	±50ppm/ ±3%	±50ppm/ ±5%	±75ppm/ ±5%
Rezolucija (ppm)	1	1	1	1	2
Temperaturni opseg rada (°C)	0 - 50	5 - 45	5-45	0 - 50	-15 - 60
RH opseg	0~99%	Up to 80%	5~95%	0~99%	0~95%
Drugi parametri koji se mere	Nema	Nema	Temperatura Vlažnost	Temperatura Vlažnost	Temperatura
Cena (EUR)	500	400	-	360	280

[Testo-535](#)[TSI IAQ7515](#)[Q-Trak 8550](#)[EXTECH-CO250](#)[Anton IAQ 8494](#)**Sl. 2.** Prenosni CO₂ monitori koji koriste CO₂ senzor NDIR tipa

3. PRIMENA LOW-COST SENZORA ZA MERENJE KONCENTRACIJE CO₂

Senzorski modul SenseAir S8 [8] je namenjen za merenje koncentracije CO₂ u vazduhu u opsegu od 400 do 2000 ppm. Ovaj modul koristi prethodno opisani NDIR princip rada. Očitavanje rezultata merenja i programiranje rada ovog modula vrši se preko serijskog porta (UART). Izgled senzorskog modula SenseAir S8 prikazan je na slici 3, a njegove tehničke karakteristike u tabeli 3. Prosečna cena ovog modula je oko 30 evra, te je iz tog razloga veoma interesantan kao moguća alternativa skupljim uređajima pri realizaciji senzorskih mreža za merenje koncentracija CO₂ u unutrašnjem vazduhu.



Sl. 3. Izgled CO₂ modula SenseAir S8 [8]

Tabela 3. Tehničke karakteristike CO₂ modula SenseAir S8

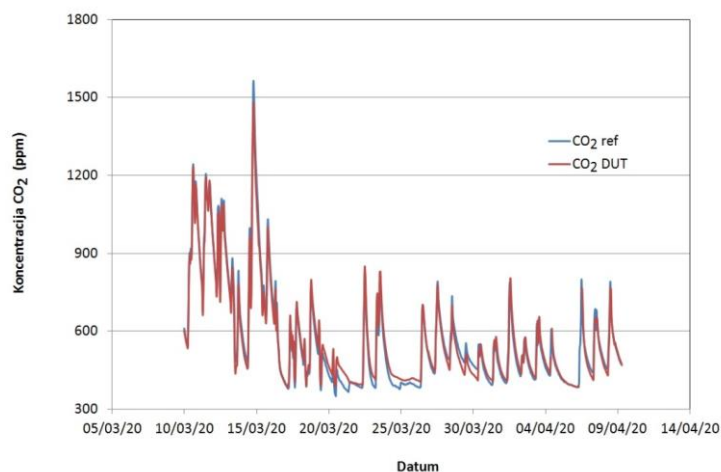
Gas koji se detektuje	CO ₂
Princip rada	Non-dispersive infrared (NDIR)
Merni opseg	400 to 2000 ppm
Interval merenja	2 sekunde
Tačnost	±70 ppm ili ±3 % od očitane vredosti
Zavisnost očitavanja od pritiska	+1.6 % od očitane vrenosti po 1 kPa odstupanja od normalnog pritiska
Vreme odziva	2 minuta do 90% od max vrednosti opsega
Temperaturni opseg rada	0 – 50 °C
Radni režim u pogledu vlažnosti vazduha	0 – 85 % RH bez kondenzacije
Dimenzije (mm)	33.5 x 20 x 8.5 mm (max)
Masa	< 8 grama
Napajanje	4.5 – 5.25V DC, nema zaštitu od prenapona i inverznog polariteta
Potrošnja struje	300 mA max , 30mA prosečno

Radi ispitivanja pouzdanosti u praktičnom radu senzorski modul SenseAir S8 ugrađen je u uređaj za merenje kvaliteta vazduha PAQMAN 2020 [9]. U laboratoriji za primenjenu elektroniku i računarsko inženjerstvo u

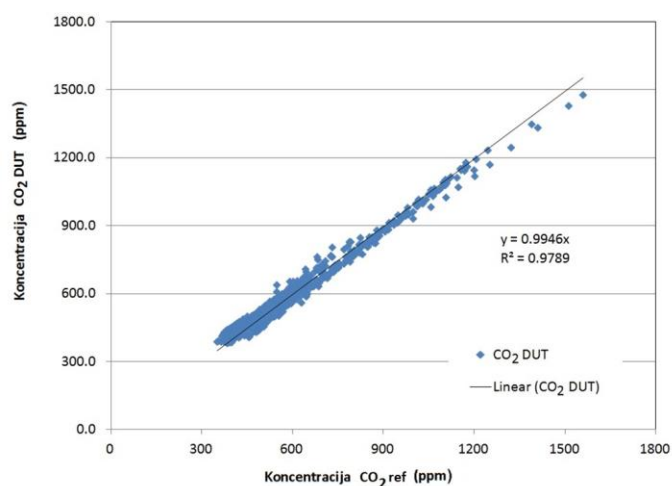
Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor vršena su uporedna merenja koncentracija CO_2 , primenom SenseAir S8 modula (Device Under Test - DUT) i pomoću instrumenta Testo 435 (ref) [10].

Uporedna merenja vršena su u trajanju od 30 dana. Upoređivane su srednje 15-minutne vrednosti izmerenih koncentracija CO_2 . Rezultati merenja prikazani su na slikama 4 i 5.

Kao referentni instrument (ref) za merenje koncentracije CO_2 korišćen je etalonirani prenosni instrument Testo 435. Na slici 4 prikazane su koncentracije CO_2 izmerene u laboratoriji u vidu linijskih dijagrama, dok je na slici 5 dat uporedni prikaz koncentracija CO_2 u vidu xy dijagrama.



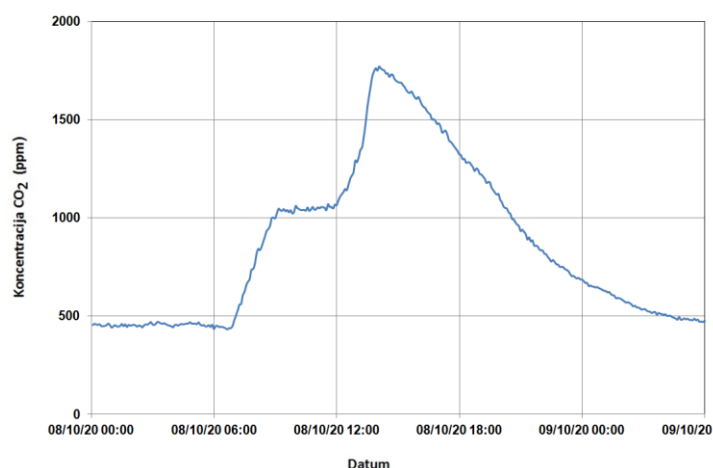
Sl. 4. Poređenje rezultata merenja koncentracije CO_2 (vremenski dijagram)



Sl. 5. Poređenje rezultata merenja koncentracije CO_2 (xy dijagram)

Poređenjem rezultata merenja dobijen je koeficijent determinacije ($R^2=0.979$) koji ukazuje na veoma jaku linearnu zavisnost između rezultata merenja referentnog instrumenta i senzora SenseAir S8 tokom celog perioda posmatranja. Ovakvi rezultati pokazuju da je posmatrani senzor ima zadovoljavajuće karakteristike u pogledu offseta i bias-a (u pogledu tačnosti i preciznosti) u odnosu na referentni uređaj.

Na slici 6 prikazan je vremenski dijagram koncentracija CO₂ u kancelariji čija je zapremina 60 m³ primenom SenseAir S8 modula u toku jednog radnog dana. U kancelariji je boravila jedna odrasla osoba u periodima od 7-9 i od 12-15 časova. U tim vremenskim intervalima, pošto nije bilo provetravanja, dolazi do naglog porasta koncentracije CO₂. U periodu od 9-12 časova, kada u kancelariji nije bilo ljudi, koncentracija CO₂ nije opadala. U susednoj kancelariji, sa kojom posmatrana kancelarija deli zajednička vrata, u posmatranom periodu bile su prisutne dve odrasle osobe, tako da koncentracija CO₂ u tom periodu nije mogla da difuziono opada, nego je čak imala blagi porast. U periodu nakon 15 časova dolazi do difuzinog opadanja koncentracija CO₂.



Sl. 6. Koncentracija CO₂ u kancelariji (bez provetravanja) u toku radnog dana

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazani su rezultati ispitivanja primenljivosti low-cost NDIR senzora SenseAir S8 za merenje koncentracija CO₂ u unutrašnjem vazduhu. Senzor je, u laboratorijskim uslovima, pokazao veoma dobru stabilnost i pouzdanost u radu. Na osnovu poređenja rezultata merenja senzora i referentnog uređaja može se zaključiti da karakteristike ispitivanog senzora ispunjavaju kriterijume potrebne za indikativna merenja koncentracija CO₂ u unutrašnjem vazduhu. Sve navedeno ukazuje na to da je senzor primenljiv za

privremena ili kontinualna indikativna merenja koncentracija CO₂ u unutrašnjem vazduhu.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2020. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-68 / 2020-14 / 200052.

LITERATURA

- [1] Apte, M. G., Fisk, W. J., Daisey, J. M., Associations between Indoor CO₂ Concentrations and Sick Building Syndrome Symptoms in U.S. Of fice Buildings: An Analysis of the 1994-1996 BASE Study Data, *Indoor Air*, 10 (2000), 4, 246-257.
- [2] Vučićević B., Turanjanin V., Jovanović M., Mirkov N., Uticaj nivoa provetrenosti na kvalitet vazduha, *TERMOTEHNIKA*, 2014, XL, 1-2, 11-17.
- [3] ASHRAE, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, in: ASHRAE Standard 62-1999, American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 1999.
- [4] ISO:7730, Moderate Thermal Environments – Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort, 1994.
- [5] https://www.sysecol2.ethz.ch/OptiControl/LiteratureOC/CEN_06_prEN_15251_FinalDraft.pdf (pristupljeno 05.10.2020.)
- [6] Shendell, D. G., Prill, R., Fisk, W.J., Apte, M.G., Blake, D., Faulkner, D., Associations between Classroom CO₂ Concentrations and Student Attendance in Washington and Idaho, *Indoor Air*, 14 (2004), 5, 333-341.
- [7] Lee, T.J., Lee, O., Kim, J., Shterengas, L., CO₂ sensor with data logger system. System, Applications and Technology Conference, Farmingdale, NY. IEEE Long Island, May 2012, Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6223210> (pristupljeno 05.10.2020.)
- [8] http://co2meters.com/Documentation/Manuals/DS_SE_0119_CM_0177_Revised8.pdf (pristupljeno 05.10.2020.)
- [9] Uređaj za merenje kvaliteta vazduha - PAQMAN 2020, Grupa autora, Tehničko rešenje M82, Arhiva Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor, 2020.
- [10] <https://docs.rs-online.com/f393/0900766b805d2931.pdf> (pristupljeno 05.10.2020.)

UDK: 628.539:614.715(045)=163.41

ORIGINALAN NAUČNI RAD

Oblast: Zaštita životne sredine

**PROCENA UTICAJA SPOLJAŠNJEG ZAGAĐENJA
SUSPENDOVANIM ČESTICAMA NA KVALITET UNUTRAŠNJEG
VAZDUHA NA TEHNIČKOM FAKULTETU U BORU**

**ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL POLLUTION
BY SUSPENDED PARTICLES ON INDOOR AIR QUALITY AT
THE TECHNICAL FACULTY IN BOR**

Viša Tasić¹, Mira Cocić², Bojan Radović¹, Aca Božilov³,
Tatjana Apostolovski-Trujić¹

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Bor,
E-mail: visa.tasic@irmbor.co.rs

²Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor

³Univerzitet u Nišu, Fakultet zaštite na radu u Nišu, Niš

Izvod

Brojne epidemiološke studije sprovedene u svetu ukazuju da izlaganje aerozagađenju suspendovanim česticama utiče na povećanje mortaliteta i morbiditeta. Poslednjih godina se posebna pažnja posvećuje kvalitetu vazduha u zatvorenom prostoru, jer ljudi provode veliki deo vremena u toku dana u zatvorenim mikrokruženjima. Kvalitet vazduha u zatvorenom prostoru, posebno u obrazovnim ustanovama, je od velike važnosti, zato što deca i učenici provode veliki deo svog vremena u obdaništima, školama i na fakultetima. Ovaj rad prikazuje deo rezultata istraživanja izloženosti studenata i nastavnika aerozagađenju suspendovanim česticama u odabranim prostorijama na Tehničkom fakultetu u Boru, Univerziteta u Beogradu.

Ključne reči: monitoring, suspendovane čestice, kvalitet vazduha, aerozagađenje

Abstract

Numerous epidemiological studies conducted worldwide indicate that exposure to airborne particulate matter has an impact on increased mortality and morbidity. In recent years, special attention has been paid to indoor air quality, as people spend much of their time during the day in indoor microenvironments. Indoor air quality, especially in educational institutions, is of great importance, because children and students spend a large part of their time in kindergartens, schools and colleges. This paper presents part of the research results about students and teachers' exposure to air pollution with suspended particulate in selected classrooms at the Technical Faculty in Bor, University of Belgrade.

Keywords: monitoring, suspended particles, air quality, air pollution

1. UVOD

Dokazano je da izloženost zagađenju vazduha suspendovanim česticama (PM) izaziva kardiovaskularne bolesti, astmu, rak pluća i druga respiratorna oboljenja [1-3]. Zbog toga je Svetska zdravstvena organizacija (WHO) propisala smernice o kvalitetu vazduha, a Savet EU je propisao Direktive o kvalitetu vazduha i druge srodne dokumente koje se odnose na koncentracije PM u vazduhu [4].

Porast koncentracija suspendovanih čestica u zatvorenom prostoru može se pripisati unutrašnjim i spoljnim izvorima. Unutrašnji izvori uključuju generisanje čestica (vezano za procese sagorevanja, spremanje hrane, upotrebu sprejeva i drugih predmeta za domaćinstvo) i njihovu resuspenziju tokom intenzivnog kretanja i drugih aktivnosti u posmatranom zatvorenom prostoru. Suspendovane čestice koje potiču iz spoljašnjeg okruženja takođe mogu značajno da doprinose nivoima koncentracije u zatvorenom prostoru.

Istraživanja pokazuju da loš kvalitet vazduha u učionicama može prouzrokovati smanjenje sposobnosti učenika da prate nastavu. Nasuprot tome, dobar kvalitet vazduha u učionicama može poboljšati koncentraciju, a takođe i produktivnost učenika i nastavnika. Nažalost, u Republici Srbiji gotovo da nema sistematskih programa praćenja kvaliteta unutrašnjeg vazduha u školama i na fakultetima, osim istraživanja koja se sprovode u okviru naučno-istraživačkih projekata.

Opština Bor smeštena je u planinskom i šumskom predelu u jugoistočnom delu Srbije. U opštini Bor živi oko 50000 stanovnika. Područje opštine je više od jednog veka glavni centar za otkopavanje i preradu rude bakra i drugih plemenitih metala. Zagađenje vazduha smatra se jednim od najvažnijih ekoloških problema. Zagađenje vazduha u urbanoj sredini grada Bora nastaje tokom rudarskih radova i različitih metalurških aktivnosti koje se odvijaju u topionici bakra u Boru. Pored toga, energetska postrojenja (Energana RTB Bor i Toplana Bor) su takođe značajan izvor zagađenja vazduha u Boru.

Bakar se u topionici u Boru do 2015. godine dobijao po klasičnom pirometalurškom postupku koji obuhvata sledeće procese: prženje koncentrata u fluosolid reaktorima, topljenja prženca u plamenim pećima, konvertovanja bakrenca i plamena rafinacija blister bakra. Ruda koja se topi u topionici bakra u Boru je tipa halkopirit-pirit sa povećanim sadržajem arsena, koji se nalazi u obliku enargita (Cu_3AsS_4) i tenantita ($\text{Cu}_6 [\text{Cu}_4 (\text{Fe}, \text{Zn})_2] \text{As}_4\text{S}_{13}$).

Oksidacija, pečenje i topljenje takvih mineralnih formi dovodi do povećanja oksida teških metala i SO_2 koji u određenim količinama kontaminiraju životnu sredinu. Zastarela tehnologija za proizvodnju bakra (klasična pirometalurgija sa plamenom peći i korišćenje SO_2 gasa u proizvodnji

H₂SO₄ sa stepenom iskorišćenja <60%) bila je glavni izvor zagađenja okoline velikih područja oko topionice (vazduh, voda i zemljište).

Količina štetnih materija koje nepovratno odlaze iz dimnjaka u atmosferu zavisi od mnogo faktora, kao što su: izbor tehnološkog postupka prerade rude bakra, sastav ulazne sirovine, temperatura i vreme trajanja procesa, tip i količina procesnih gasova i slično. Zajedničko gotovo svim tehnološkim postupcima koji se primenjuju pri preradi rude bakra je da se od toksičnih materija najviše izdvajaju As, Pb, Zn, Bi i Sb [5].

Vlada Srbije uložila je značajna sredstva u izgradnju nove topionice bakra i fabrike sumporne kiseline u Boru, koja je počela da radi u 2016. godini. Nova topionica bakra koristi fleš-smelting tehnologiju pa su i emisije otpadnih gasova iz metalurških pogona drugačijeg intenziteta i sastava.

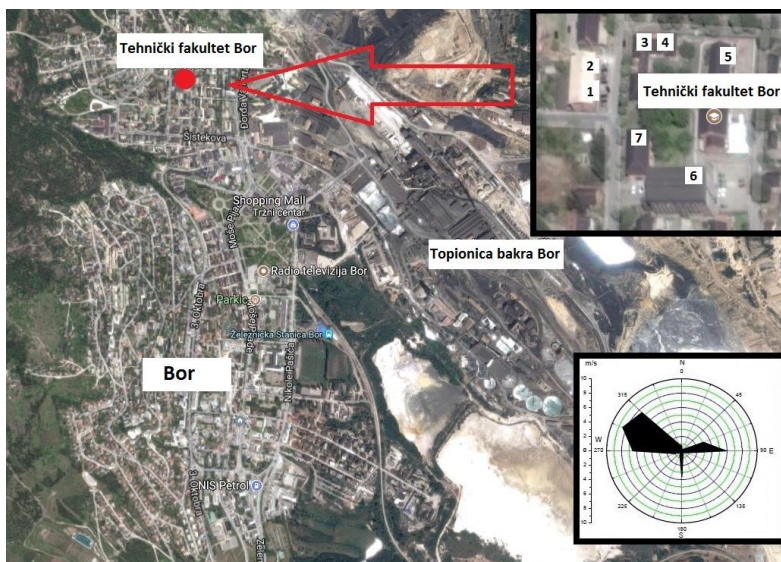
U poslednjih desetak godina vrše se intenzivna geološka istraživanja u Republici Srbiji koje sprovode inostrane kompanije. U rudarsko-topioničarskom basenu Bor došlo je do vlasničke transformacije tokom 2018. godine. Strateški partner je postao ZiJin, jedna od vodećih svetskih rudarskih kompanija u proizvodnji bakra i plemenitih metala. Formirana je nova kompanija Serbia ZiJin Bor Copper doo, sa udelom ZiJin-a od 63% i Republike Srbije sa 37% kapitala.

Sve navedene činjenice dovele su do promena koncentracije suspendovanih čestica u gradu Boru, što se odražava i na kvalitet unutrašnjeg vazduha u objektima.

U ovom radu predstavljen je deo rezultata istraživanja promena koncentracija suspendovanih čestica u prostorijama na Tehničkom fakultetu u Boru. Istraživanja su rađena u okviru projekta III42008: "Unapređenje energetske karakteristike i kvaliteta unutrašnjeg prostora u zgradama obrazovnih ustanova u Srbiji", koji je finansijski podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

2. MATERIJAL I METOD RADA

Tehnički fakultet u Boru (TF) nalazi se na oko 1 km severozapadno od topionice bakra, kao što je prikazano na slici 1. Merenja koncentracija suspendovanih čestica (PM₁₀ i PM₂₅) u odabranim prostorijama na TF sprovedena su kroz nekoliko kampanja uzorkovanja u negrejnoj (april-septembar) i grejnoj sezoni (oktobar-mart) u vremenskom periodu 2011.-2020. godine.



Sl. 1. Položaj Tehničkog fakulteta u Boru u odnosu na topionicu bakra

Merna mesta su odabrana tako da se merenjima obuhvate skoro sve zgrade Tehničkog fakulteta (TF), kao što je prikazano na slici 1. U odabranim kancelarijama (označene kao 1, 3, 4 i 6 na slici 1) boravilo je u proseku 2-5 osoba tokom radnog vremena (8:00 - 14:00). U izabranim učionicama (na slici 1 označene su brojevima 2 i 5) za vreme predavanja i vežbi (period od 8 ujutru do 18 sati popodne) bilo je maksimalno do 20 osoba. Pod kancelarije 1 pokriven je tepihom, podovi kancelarija 3, 4 i 6 su pokriveni laminatom, kao i pod učionice 5, dok je pod učionice 2 pokriven vinaz pločama. Površine prozora u kancelarijama i učionicama iznosile su od 2-4 m². Tokom negrejne sezone u kancelarijama je bar jedan prozor bio delimično otvoren tokom radnog vremena. Prosečna zapremina jedne kancelarije iznosila je 40-50 m³, dok je zapremina učionice iznosila 50 - 70 m³.

Uzorkovanje u svakoj od posmatranih prostorija vršeno je u trajanju od po najmanje dve nedelje u grejnoj i negrejnoj sezoni. Uzorkovanje suspendovanih čestica frakcije PM₁₀ vršeno je referentnim semplerima Sven/Leckel LVS3 [6] simultano, u unutrašnjem prostoru i ambijentalnom vazduhu u neposrednoj blizini TF. Pre i posle uzorkovanja merena je masa filtera saglasno proceduri propisanoj standardom SRPS EN12341:2015 [7]. Na osnovu razlike masa eksponiranih i neeksponiranih filtera i poznatog protoka vazduha kroz uzorkivač sračunate su masene koncentracije suspendovanih čestica frakcije PM₁₀.

Pored toga, merenje koncentracija suspendovanih čestica frakcija PM₁₀ i PM_{2.5} vršeno je i automatskim monitorima za rad u realnom vremenu. Za merenja koncentracija PM₁₀ i PM_{2.5} u unutrašnjem prostoru korišćeni su prenosni uređaji Turnkey Osiris [8], Dylos 1700 [9] i PAQMAN 2020 [10]. Za

merenja koncentracija PM_{10} i $PM_{2.5}$ u ambijentalnom vazduhu korišćen je automatski analizator Grimm EDM180 [11].

Prosečne dnevne koncentracije PM_{10} dobijene gravimetrijskom metodom korišćene su za korekciju rezultata real-time PM monitora kako što je predloženo u referenci [12].

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Prosečne dnevne koncentracije suspendovanih čestica PM_{10} i $PM_{2.5}$ u odabranim kancelarijama i učionicama na TF Bor u periodu (2011-2015) i u periodu (2016-2020) u toku negrejne sezone (april-septembar) prikazane su u tabelama 1 i 2.

Tabela 1. Koncentracije PM_{10} i $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) u negrejnoj sezoni u periodu 2011.-2015. godine

Prostorija	PM_{10} spolja	PM_{10} unutra	$PM_{2.5}$ spolja	$PM_{2.5}$ unutra
1	55.1	33.7	23.7	9.4
2	75.2	39.6	32.6	13.4
3	35.9	12.9	18.5	4.6
4	48.8	18.1	27.7	8.5
5	56.9	16.4	28.4	4.8
6	63.8	19.2	36.7	10.1
Srednja vrednost:	56.0	23.3	27.9	8.5
Granična vrednost:	50	50	25	25

Tabela 2. Koncentracije PM_{10} i $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) u negrejnoj sezoni u periodu 2016.-2020. godine

Prostorija	PM_{10} spolja	PM_{10} unutra	$PM_{2.5}$ spolja	$PM_{2.5}$ unutra
1	50.1	25.3	25.3	10.1
2	59.8	32.4	36.2	16.8
3	52.2	27.1	31.2	15.1
4	54.5	23.4	35.2	16.5
5	57.2	28.1	34.2	16.1
6	58.2	26.1	30.0	15.2
Srednja vrednost:	55.3	27.1	32.0	15.0
Granična vrednost:	50	50	25	25

Prosečne dnevne koncentracije suspendovanih čestica PM_{10} i $PM_{2.5}$ u odabranim kancelarijama i učionicama na TF Bor u periodu (2011-2015) i u periodu (2016-2020) u toku grejne sezone (oktobar-mart) prikazane su u tabelama 3 i 4.

Tabela 3. *Koncentracije PM_{10} i $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) u grejnoj sezoni u periodu 2011.-2015. godine*

Prostorija	PM_{10} spolja	PM_{10} unutra	$PM_{2.5}$ spolja	$PM_{2.5}$ unutra
1	21.1	13.3	10.4	5.2
2	27.8	24.2	13.9	11.8
3	35.9	14.7	22.4	6.5
4	21.3	15.1	10.6	5.6
5	52.4	14.5	28.7	6.2
6	55.6	16.5	32.7	8.0
Srednja vrednost:	35.7	16.4	19.8	7.2
Granična vrednost:	50	50	25	25

Tabela 4. *Koncentracije PM_{10} i $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) u grejnoj sezoni u periodu 2016.-2020. godine*

Prostorija	PM_{10} spolja	PM_{10} unutra	$PM_{2.5}$ spolja	$PM_{2.5}$ unutra
1	47.6	26.2	26.2	14.3
2	43.5	32.2	25.5	15.8
3	44.8	24.7	23.4	12.8
4	37.5	25.5	20.1	11.0
5	53.2	30.2	25.3	12.4
6	45.6	28.6	23.8	13.0
Srednja vrednost:	45.4	27.9	24.1	13.2
Granična vrednost:	50	50	25	25

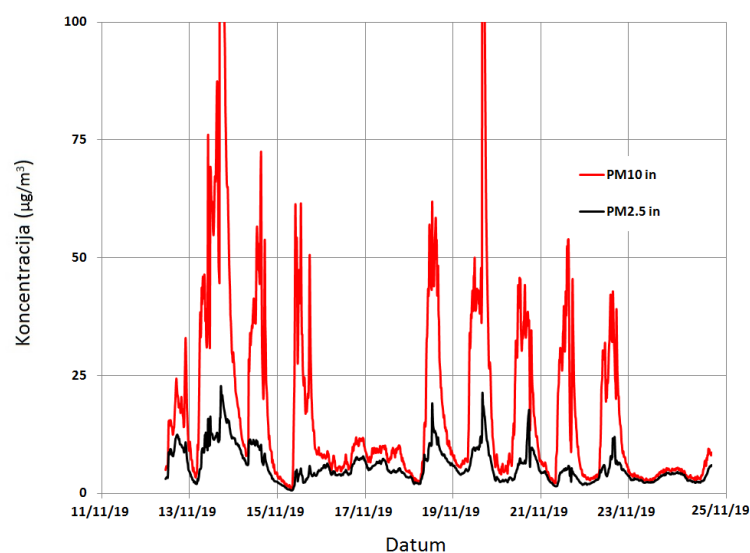
Prekoračenje dnevne granične vrednosti za koncentracije PM_{10} u ambijentalnom vazduhu primećeno je u 17% dana u grejnoj sezoni i u 40% dana tokom merenja u negrejnoj sezoni u periodu 2011.-2015. godine. Prekoračenje dnevne granične vrednosti za koncentracije $PM_{2.5}$ u ambijentalnom vazduhu primećeno je u 21% dana tokom merenja u grejnoj sezoni i u 48% u negrejnoj sezoni u periodu 2011.-2015. godine.

Prekoračenje dnevne granične vrednosti za koncentracije PM_{10} u ambijentalnom vazduhu primećeno je u 21% dana u grejnoj sezoni i u 45% dana tokom merenja u negrejnoj sezoni u periodu 2016.-2020. godine. Prekoračenje dnevne granične vrednosti za koncentracije $PM_{2.5}$ u ambijentalnom vazduhu primećeno je u 22% dana u grejnoj sezoni i u 52% dana tokom merenja u negrejnoj sezoni u periodu 2016.-2020. godine.

U toku kampanja merenja detektovano je samo nekoliko slučajeva prekoračenja dnevne granične vrednosti za koncentracije PM_{10} i $PM_{2.5}$ u unutrašnjem vazduhu. Najviše koncentracije PM zabeležene su u učionici 2 tokom radnih dana.

Poznato je da ljudske aktivnosti dovode do resuspenzije čestica sa horizontalnih površina, kao što su podovi, tepisi i nameštaj. Primer dnevnih fluktuacija koncentracija PM_{10} i $PM_{2.5}$ u toku jedne od kampanja merenja u kancelariji 1 prikazan je na slici 2. Na ovoj slici jasno se mogu uočiti dani vikenda, kada su koncentracije PM čestica (obe frakcije) bile niže u odnosu na koncentracije PM tokom radnih dana. Takođe, na istoj slici, mogu se jasno uočiti periodi kada je kancelarija čišćena. U tim vremenskim periodima koncentracije PM su naglo rasle zbog intenzivne resuspenzije čestica.

U radu [13] prosečni dnevni nivo PM_{10} u amfiteatru Fakulteta zaštite na radu u Nišu iznosio je $47.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dok je u osnovnoj školi Vožd Karađorđe, koja se nalazi u samom centru Niša, pored veoma prometne saobraćajnice, nivo PM_{10} iznosio $54.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [13]. Takođe, prosečni nivoi PM_{10} u dve osnovne škole u Boru i Zlotu, u grejnoj sezoni, iznosili su 44.2 odnosno $49.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [14]. U kabinetu hemije u gimnaziji Bora Stanković u Boru, prosečna dnevna vrednost PM_{10} iznosila je $42.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [15]. U učionici u centralnom Pragu, Češka Republika, u kojoj nije bilo mehaničke ventilacije, izmerene su koncentracije PM_{10} i $PM_{2.5}$ od 42 i $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respektivno [16]. Navedene vrednosti koncentracija PM koje su izmerene u drugim sredinama veoma su bliske vrednostima koncentracija PM koje su izmerene na TF Bor.



Sl. 2. Primer vremenskog dijagram koncentracija PM_{10} i $PM_{2.5}$ u kancelariji 1

Prosečan I/O odnos srednje dnevne koncentracije PM_{10} i $PM_{2.5}$ u negrejnoj i grejnoj sezoni u periodu 2011.-2015. godina prikazan je u tabeli 5.

Prosečan I/O odnos srednje dnevne koncentracije PM_{10} i $PM_{2.5}$ u negrejnoj i grejnoj sezoni u periodu 2016.-2020. godina prikazan je u tabeli 6.

Tabela 5. Prosečan I/O (unutra/spolja) odnos srednje dnevne koncentracije PM_{10} i $PM_{2.5}$ tokom grejne i negrejne sezone u periodu 2011.-2015. godina

Prostorija	PM_{10} I/O grejna	PM_{10} I/O negrejna	$PM_{2.5}$ I/O grejna	$PM_{2.5}$ I/O negrejna
1	0.63	0.61	0.50	0.40
2	0.87	0.53	0.85	0.41
3	0.41	0.36	0.29	0.25
4	0.71	0.37	0.53	0.31
5	0.28	0.29	0.22	0.17
6	0.30	0.30	0.24	0.28
Srednja vrednost:	0.53	0.41	0.44	0.30

Odnos I/O (unutra/spolja) koncentracije PM se često koristi da bi se potvrdilo prisustvo unutrašnjih izvora ($I/O > 1$) ili infiltracija ambijentalnog vazduha ($I/O \leq 1$). U tabelama 5 i 6 svi prikazani I/O odnosi PM su manji od 1, za obe frakcije, i u oba posmatrana perioda. Ovo ukazuje da na promenu koncentracije suspendovanih čestica u unutrašnjem prostoru TF najviše utiče infiltracija suspendovanih čestica iz spoljašnje sredine.

Takođe, na osnovu podataka iz tabela 5 i 6, može se uočiti da je u periodu rada nove topionice (2016-2020) došlo do blagog porasta I/O odnosa PM_{10} i $PM_{2.5}$ i u grejnoj i u negrejnoj sezoni. Ovo navodi na zaključak da je sa promenom tehnologije topljenja došlo i do promene sastava suspendovanih čestica, pošto znatan udeo ukupne mase PM u spoljašnjem vazduhu u Boru i dalje potiče iz emisija otpadnih gasova iz metalurških postrojenja u topionici bakra.

Tabela 6. Prosečan I/O (unutra/spolja) odnos srednje dnevne koncentracije PM_{10} i $PM_{2.5}$ tokom grejne i negrejne sezone u periodu 2016.-2020. godina

Prostorija	PM_{10} I/O grejna	PM_{10} I/O negrejna	$PM_{2.5}$ I/O grejna	$PM_{2.5}$ I/O negrejna
1	0.55	0.50	0.55	0.40
2	0.74	0.54	0.62	0.46
3	0.55	0.52	0.55	0.48
4	0.68	0.43	0.55	0.47
5	0.57	0.49	0.49	0.47
6	0.63	0.45	0.55	0.51
Srednja vrednost:	0.62	0.49	0.55	0.47

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazani su rezultati ispitivanja uticaja spoljašnjeg zagađenja suspendovanim česticama na kvalitet unutrašnjeg vazduha na Tehničkom fakultetu u Boru. Rezultati merenja su pokazali da, i pored toga što su spoljašnje koncentracije PM_{10} i $PM_{2.5}$ tokom kampanje merenja bile u proseku za oko 20% (PM_{10}) odnosno 50% ($PM_{2.5}$) vremena iznad dnevnih graničnih vrednosti, to nije dovelo do značajne pojave prekoračenja graničnih vrednosti PM unutar posmatranih prostorija na TF u Boru. To znači da ne postoje značajni izvori suspendovanih čestica unutar posmatranih prostorija. Na porast koncentracija PM_{10} i $PM_{2.5}$ na TF Bor, pored spoljašnje koncentracije PM, najviše utiče resuspenzija čestica uslovljena aktivnostima nastavnika i studenata, i aktivnostima čišćenja. Koncentracije PM unutar prostorija TF Bor niže su, ili vrlo slične, koncentracijama PM koje su izmerene u učionicama osnovnih i srednjih škola u Boru, Nišu i nekim obrazovnim ustanovama u Evropi, pre svega zbog manjeg broja studenata u posmatranim prostorijama. Dalja istraživanja treba nastaviti u cilju poređenja hemijskog sastava PM unutar prostorija na TF Bor u odnosu na hemijski sastav PM u spoljašnjoj sredini.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, projekat br. III42008: "Unapređenje energetskih karakteristika i kvaliteta unutrašnjeg prostora u zgradama obrazovnih ustanova u Srbiji" i Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2020. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-68/2020-14 / 200052.

LITERATURA

- [1] Kampa, M., Castanas, E., Human Health Effects of Air Pollution., Environ. Pollut., 2008, 151, pp. 362–367.
- [2] Anderson, H.R., Bremner, S.A., Atkinson, R.W., Harrison, R.M., Walters, S., Particulate matter and daily mortality and hospital admissions in the West Midlands conurbation of the United Kingdom: associations with fine and coarse particles, black smoke and sulphate, Occup. Environ. Med., 2001, 58, pp. 504–510.
- [3] Pope, C.A., Burnett, R.T., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Kazuhiko, I., et al., Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution, J. Am. Med. Assoc., 2002, 287, pp. 1132–1141.

- [4] EU, 2008. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and the Council of 21 May 2008 on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe
- [5] Jovanović, D., Prospekcija i analiza eko stanja grada Bora i okoline sa posebnim osvrtom na aeriozagadenje, magistarska teza, TMF Beograd, Univerzitet u Beogradu, 2001.
- [6] <https://www.environmental-expert.com/products/leckel-model-lvs3-mvs6-small-filter-device-634768> (pristupljeno 05.10.2020.)
- [7] SRPS EN 12341:2015 Vazduh ambijenta - Standardna gravimetrijska metoda merenja za određivanje PM10 ili PM2.5 masene koncentracije suspendovanih čestica https://iss.rs/sr_Cyrl/publication/show/iss:pub:50728 (pristupljeno 05.10.2020.)
- [8] Turnkey Instruments, Airborne Particle Monitors, Turnkey Instruments Ltd., 2006.
<https://turnkey-instruments.com/wp-content/uploads/2016/11/Turnkey-Dust-Monitors.pdf> (pristupljeno 05.04.2020.)
- [9] <http://www.dylosproducts.com/dcpmaq.html> (pristupljeno 05.10.2020.)
- [10] Uređaj za merenje kvaliteta vazduha - PAQMAN 2020, Grupa autora, Tehničko rešenje M82, Arihiva Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor, 2020.
- [11] http://www.mets-oman.biz/METS_3_Grimm_Environmental_EDM180.pdf (pristupljeno 05.10.2020.)
- [12] Ramachandran, G., Adgate, J.L., Pratt, G.C., Sexton, K., Characterizing indoor and outdoor 15-minute average PM2.5 concentrations in urban neighbourhoods, *Aerosol Sci Technol.*, 2003, 37 pp. 33-45.
- [13] Kovačević, R., Tasić, V., Živković, M., Živković, N., Đorđević, A., Manojlović, D., Jovašević-Stojanović M., Mass Concentrations and Indoor-Outdoor Relationships of PM in Selected Educational Buildings in Niš, Serbia, *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 2015, 21 (1/II) pp. 149-158.
- [14] Lazović, I., Jovašević-Stojanović, M., Živković, M., Tasić, V., Stevanović, Ž., PM and CO₂ Variability and Relationship in the Different School Environments, *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 2015, 21 (1/II) pp. 179-187.
- [15] Tasić, V., Kovačević, R., Jovašević-Stojanović, M., Apostolovski - Trujić, T., Šteharinik, M., Stanković, S., 2015, Analiza suspendovanih čestica PM10 u gimnaziji 'Bora Stanković' u Boru, Bakar, Broj 1, Vol. 40, str. 63-74, 2015., ISSN 0351-0212
- [16] Gaidajis G., Angelakoglou K., Indoor air quality in university classrooms and relative environment in terms of mass concentrations of particulate matter, *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng*, 2009, 44(12) pp.1227-32.

UDK: 628.51:669.04:504.06(045)=163.41

ORIGINALAN NAUČNI RAD

Oblast: Zaštita životne sredine

**MOGUĆNOST PRIMENE PROCESA
STABILIZACIJE/SOLIDIFIKACIJE OTPADNIM
MATERIJALIMA BOGATIM ARSENUM
GENERISANIH U TOPIONICAMA BAKRA**

**POSSIBILITY OF APPLYING THE
STABILIZATION / SOLIDIFICATION PROCESS ON
ARSENIC-RICH WASTE MATERIALS
FORMED IN COPPER SMELTING PLANTS**

Vesna M. Marjanović, Radmila Marković
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor,
E-mail: vesna.marjanovic@irmbor.co.rs

Izvod

U ovom radu dat je literaturni pregled objavljenih radova iz oblasti stabilizacije/solidifikacije otpadnih materijala. Izbor metode zavisi od vrste otpada, sadržaja opasnih i štetnih komponenti i primenjuje se kao predtretman opasnog otpada pre odlaganja na deponiju. Veliki uticaj na efikasnost procesa stabilizacije/solidifikacije ima izbor aditiva, a koji zavisi od vrste otpada i uslova starenja produkta ovog procesa. Određivanje efikasnosti procesa vrši se fizičkim i hemijskim testovima. Cilj izbora optimalnog procesa stabilizacije/solidifikacije otpadnog materijala koji sadrži arsen, a koji nastaje kao posledica metalurških aktivnosti u procesu toljenja koncentrata bakra, je smanjenje negativnog uticaja na životnu sredinu.

Ključne reči: proces stabilizacije/solidifikacije, stabilizacija arsena, prašina iz topionica bakra

Abstract

This paper presents a literature review of published works in the field of stabilization/solidification of waste materials. The choice of method depends on the type of waste, the content of hazardous and harmful components and is applied as a pre-treatment of hazardous waste before disposal at the landfill. The choice of additives has a great influence on the efficiency of the stabilization/solidification process, which depends on the type of waste and the aging conditions of the product of this process. The efficiency of the process is determined by physical and chemical tests. The aim of choosing the optimal process of stabilization/solidification of waste material containing arsenic, which occurs as a result of metallurgical activities in the process of smelting copper concentrate, is to reduce the negative impact on the environment.

Keywords: stabilization/solidification process, arsenic stabilization, copper smelter dusts

1. UVOD

Procesi stabilizacije/solidifikacije počeli su da se primenjuju od 1950. godine za tretman radioaktivnog i opasnog otpada. Danas se ovi procesi primenjuju za tretman i remedijaciju kontaminiranog zemljišta i otpada koji potiče iz tehnoloških procesa kao i za uklanjanje širokog spektra zagađujućih materija iz različitih materijala i kontaminiranog otpada [1].

Stabilizacija se odnosi na tehnike kojima se hemijskim postupcima smanjuje potencijalna opasnost otpada i zagađujuće materije prevode u manje rastvorljive, mobilne ili toksične oblike, pri čemu fizičke karakteristike otpada ne moraju da se menjaju u toku stabilizacije. *Solidifikacija* se odnosi na tehnike koje enkapsuliraju otpad, formiraju čvrst materijal, a da pri tome ne mora doći do hemijske reakcije između zagađujuće materije i aditiva koji služe za solidifikaciju. Dobijeni proizvod je u obliku monolitnog bloka, materijala koji je sličan glini, granulisanih čestica ili u nekom drugom fizičkom obliku, koji se obično smatra „čvrstom supstancom“ [2].

1.1. Vezivna sredstva i reagensi koji se koriste u procesima stabilizacije/solidifikacije

Neorganska vezivna sredstva koja se koriste kao aditivi u procesima stabilizacije/solidifikacije (S/S) su: cement, pepeo, kreč, rastvorljivi silikati, pocolani, bentonit, glina, šljaka visokih peći i drugi materijali. Ovi materijali se koriste u više od 90 % procesa S/S, jer su jeftina i lakša za primenu od organskih.

Organski aditivi (asfalt, epoksid, poliestar i polietilen) se koriste u procesima S/S radioaktivnog otpada ili specifičnih i opasnih organskih jedinjenja [3].

U tabeli 1 je dat pregled primene procesa S/S za različite vrste otpada.

Tabela 1. Preporučeni procesi S/S u zavisnosti od vrste otpada

Proces S/S	Primena
Solidifikacija sa cementom	Muljevi, kontaminirana zemljišta
Solidifikacija sa krečom	Otpad od desulfurizacije otpadnih gasova, drugi neorganski otpad
Solidifikacija sa termoplastičnim materijalima	Radioaktivni otpad
Inkapsulacija	Muljevi, tečnosti
Vitrifikacija	Ekstremno opasan otpad, radioaktivni otpad

1.2. Ispitivanje efikasnosti procesa stabilizacije/solidifikacije hemijskim i fizičkim metodama

Hemijske metode ispitivanja stabilisanog/solidifikovanog materijala koje se koriste za lužne rastvore i procese rastvaranja, difuzije i spiranja su:

1. *Toxicity Characteristic Leaching Procedure - TCLP test* - simulira uslove na deponiji, izračunava se stepen izluženja zagađujućih materija iz otpada, a na osnovu dobijenih vrednosti izluženja vrši se klasifikacija otpada.

2. *Synthetic Precipitation Leaching Procedure-SPLP test* - koristi se za procenu uticaja zagađenog zemljišta na podzemne vode i simulira dejstvo kiselih kiša na zagađeni materijal (*US EPA Metod 1312*).

3. *Statički i polu-dinamički testovi luženja* - koriste se za određivanje luživosti zagađujuće materije iz solidifikovanog otpada u formi monolita (American National Standards Institute— ANSI/Measurement of the Leachability of Solidified Low-Level Radioactive Wastes by a Short-Term Test Procedure - ANS 16.1) [4,5].

4. *Testovi za ekstrakciju* - DIN 38414 S4 test je nemački standardni metod za određivanje luživosti muljeva i sedimenata u vodi, a koristi se za ispitivanje efikasnosti imobilizacije As i drugih elemenata (Pb, Sb) u S/S uzorku.

Za fizičko ispitivanje stabilisanog/solidifikovanog materijala koristi se Test jednoaksijalne pritisne čvrstoće - UCS test, za osnovno poređenje između nestabilizovanog i stabilizovanog otpada. S/S materijali sa pritisnom čvrstoćom većom od 0,35 MPa imaju zadovoljavajuću snagu kompresije [6]. Ispitivanja se izvode u različitim vremenskim intervalima od 1, 3, 7, 14, 28, 90, itd. dana da bi se pratile promene mineralogičkog sastava otpada u vremenu i izloženosti uticaju životne sredine [7].

2. RASPROSTRANJENOST HEMIJSKIH VRSTA ARSENA U ŽIVOTNOJ SREDINI

Arsen (As) je metaloid koji u zavisnosti od modifikacije pokazuje metalne ili nemetalne osobine. Može biti samorodan i u obliku jedinjenja (sulfida) i nalazi se i u velikom broju minerala. Arsen najčešće gradi sledeća jedinjenja: arsen(III)-oksid (As_2O_3), arsen(V)-oksid (As_2O_5), arsenasta kiselina (H_3AsO_3) i jedinjenja As sa S, F, Cl, Br, H, i dr. [9].

Mobilizacija As u životnoj sredini je posledica meteoroloških, geohemijskih i bioloških reakcija. Vulkanska aktivnost je najznačajniji prirodni izvor arsena. Antropogene aktivnosti (rudarstvo, obojena metalurgija, sagorevanje fosilnih goriva, i dr.) značajno doprinose povećanju koncentracije As i zagađenju životne sredine [11]. Procenjuje se da je antropogena emisija tri

puta veća od prirodne [12]. Kao sastavni deo stena i zemljišta, arsen rastvaranjem dospeva u podzemne vode, reke i jezera, a samim tim i u vodu za piće.

Neka od neorganskih vrsta arsena koje se javljaju u prirodi su:

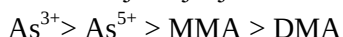
1. arsenasta kiselina (H_3AsO_3 , H_2AsO_3^- , HAsO_3^{2-}) u kojima je As^{3+} ,
2. arsenova kiselina (H_3AsO_4 , H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-}) u kojima je As^{5+} ,
3. gas arsin (AsH_3) u kojima je As^{3-} itd. [15].

Organska jedinjenja arsena takođe postoje u prirodi, najčešće kao metil forme: dimetilarsenova kiselina $(\text{CH}_3)_2\text{AsO}(\text{OH})$ - DMA, monometilarsenova kiselina $\text{CH}_3\text{AsO}(\text{OH})_2$ - MMA, trimetilarsin $(\text{CH}_3)_3\text{As}$, itd.

U vodenim rastvorima preovlađuju neorganske vrste arsena znatno više nego organske vrste i to: trovalentni oblik As ($\text{As}(\text{III})$, arsenit) i petovalentni oblik As ($\text{As}(\text{V})$, arsenat). Na slici 1, prikazana je strukturna razlika između arsenata i arsenita. Jedinjenja arsena postoje u vodenim rastvorima u kombinaciji sa kiseonikom zbog visokog afiniteta, tj. arsen je prisutan u anjonskom obliku [8].

Efikasnost uklanjanja je uglavnom niža za As^{3+} u odnosu na As^{5+} u oblasti prirodnih voda, jer su pri toj pH vrednosti As^{3+} vrste nenaelektrisane (H_3AsO_3) [9].

Toksičnost jedinjenja arsena opada sledećim redosledom [10]:



U sredinama gde vladaju aerobni uslovi i u neutralnim sredinama, preovlađuje As^{5+} , za razliku od redukcione sredine i anaerobnih uslova u kojima postoji As^{3+} , koje je najtoksičnije oksidaciono stanje arsena. Sa povećanjem pH vrednosti raste i rastvorljivost i mobilnost vrsta arsena u vodi [11].

3. VEZIVNA SREDSTVA I REAGENSI ZA STABILIZACIJU As

Vezivna sredstva koja se najčešće koriste kao reagensi za stabilizaciju As su:

- *Portland cement* - (Ordinary Portland Cement - OPC). On se najčešće koristi.
- *Kreč* (kalcijum-oksidi- CaO), formiran talog kalcijum-arsenata ($\text{Ca}_4(\text{OH})_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}_5(\text{AsO}_4)_3\text{OH}$, i $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) je stabilno jedinjenje koje imobilizuje As. Dodatak cementa i kalcijuma minimizira luženje As iz industrijskog otpada sa visokim sadržajem As. Glavni razlog za veoma malo luženje arsena je formirano stabilno jedinjenje kalcijum-arsenat CaHAsO_3 .
- *Fero-sulfat* ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), čijom upotrebom nastaje nerastvorno jedinjenje gvožđe-arsenat (FeAsO_4) i gvožđe-hidroksid ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) koji kada se talože adsorbiraju arsen.

- *Soli gvožđa* upotreba feri i fero soli za stabilizaciju arsena je preporučena zbog veće rastvorljivosti fero-hidroksida u odnosu na feri-hidroksid i stvaranja većeg molekula feri-hidroksid-arsena u odnosu na fero jedinjenja arsena.
- *Pepeo*, kao aditiv može da se koristi sa drugim vezivima, kao što su cement i kreč. Smeše sa OPC i pepelom (klasa F) su znatno smanjile koncentraciju As u luženom rastvoru iz matrice OPC i pepeo i matrica pepela je postala progresivno veća u funkciji vremena.

4. PRIMENA PROCESA STABILIZACIJE/SOLIDIFIKACIJE NA OTPADNIM MATERIJALIMA IZ PIRO-METALURŠKIH PROCESA PRERADE BAKRA

Hemijske i mineraloške karakteristike prašine koja nastaje u pirometalurškim procesima ekstrakcije bakra zavisi od: karakteristika sulfidne rude, vrste i sadržaja pratećih elemenata, tipa reaktora koji se koriste u različitim fazama procesa i uslova pod kojima rade. Svi ovi faktori utiču na hemijske i mineraloške karakteristike prašine iz procesa topljenja, čime se objašnjava njihova različitost i shodno tome proces koji treba izabrati za njihov tretman, a koji se zasniva na ponovnom iskorišćenju korisnih i stabilizaciji nepoželjnih elemenata prisutnih u prašini [12].

U radu *Morales A. i sar.* [13] opisani su hidrometalurški procesi dobijanja bakra i stabilizacije arsena iz prašine koja potiče iz otpadnih gasova topionice bakra. Mineraloški sastav uzoraka prašine pokazuje da je to kompleksni materijal, koji se sastoji uglavnom od oksidovanih minerala (halkocijanit, cinkotit, magnetit, cuprospinel, anglesit, claudetit, arsenolitan, tenorit i kuprit) i minerala koji sadrže sumpor (digenit, bornit, kubanit i anilit). Glavni elementi u ovom materijalu određeni su XRF analizom. Hemijski sastav je: Cu (26%), Fe (14%), As (8,2%), S (5,6%), Pb (5,1%), Zn (4,6%), Bi (1,1%) i Mo, Cd (<1,0%). Luženje ovog materijala sa vodom dovelo je do delimičnog rastvaranja bakra, cinka i arsena (kao sulfata i sulfida i oksida arsena). Klasifikacijom ostataka od luženja na hidrociklonu, dobijene su dve frakcije: krupnija frakcija koja je bogata bakrom (uglavnom u spinel fazama i sumpornim vrstama) i koja može biti reciklirana u peći za topljenje i sitnija – fina frakcija koja je bogata arsenom i koja se može pomešati sa muljem otpadnih voda iz fabrike papira, tako da se dobije inertan ostatak koji se može odlagati na deponije [14].

Generisani mulj sa visokim sadržajem arsena ne može se odlagati direktno na deponije, zbog mogućnosti kontaminacije podzemnih voda. Visoka koncentracija arsena u rastvoru koji je dobijem izluživanjem zahteva tretman pre odlaganja na deponiju. Tretman S/S koristi se za smanjenje mobilnosti arsena, kako ne bi predstavljao opasnost po životnu sredinu. Različite tehnike za odlaganje mulja koriste se u zavisnosti od tipa supstance koja se odlaze i ekološki prihvatljivih

uslova. Ovo uključuje procese gde se koristi portland cement, tehnologije na bazi kreča, bitumena, procesi sa emulgacijom asfalta, istiskivanje polietilenom i vitrifikacija [14,15].

Alkalne matrice, kao što su Ca(OH)_2 i cement, obično se koriste u otpadnom materijalu, jer su jeftine, lako se inkorporiraju u mokar otpad i njihova alkalnost smanjuje rastvorljivost mnogih neorganskih toksičnih ili štetnih metala [16]. Četiri vezivna sastojka (portland cement, pepeo, šljaka visoke peći, glina) kao i različite kombinacije i koncentracije soli fosfata imaju veliku mogućnost primene za ove vrste muljeva. Singh T. S. i sar. [17] ukazali su na mogućnost bezbednog uklanjanja As(III) aktiviranim aluminijum-oksidiom, tj. glinicom, jer je As(III) otrovniji i mobilniji od As(V). Ovi materijali pomešani su sa čvrstim otpadom koji sadrži As u različitim odnosima prikazani su u tabeli 2.

Tabela 2. Odnos čvrstog otpada i aditiva za S/S procese

Sastav matrice	Odnos (w/w)
AA+C	3:1
AA+C+FA	3:1:0,5
AA+C+FA+CH	3:1:0,5:0,5
AA+C+FA+PS	3:1:0,5:0,5
AA+C+PS	3:1:0,5
AA+C+PM	3:1:0,5

AA - aktivni aluminijum-oksidi, C – cement, FA – leteći pepeo,

CH – kalcijum-hidrokid, PS – polistiren, PM – polimetilen metakrilat

Luživost arsena iz različitih materijala, procenjuje se metodom ANS 16.1.- (Measurement of the Leachability of Solidified Low-Level Radioactive Wastes by a Short-Term Test Procedure). Ukupna frakcija arsena koji se luži određuje se u funkciji vremena [18]. Prema ANS 16.1 standardu, efikasnost difuzije se određuje pomoću sledeće jednačine:

$$D = \left(\frac{a_n}{A_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{V}{S} \right) \cdot T \quad (1)$$

gde je:

D - efikasnost difuzije (cm^2/s),

V - zapremina uzorka (cm^3),

S - geometrijska površina uzorka (cm^2),

$(\Delta t)_n$ - trajanje n- tog intervala luženja (s), i

a_n , A_0 - koncentracija solidifikovane vrste u n-tom luženju i na početku.

Indeks luživosti (L) je kvalitativni parametar, koji je odnosi na materijal za koji se utvrđuje luživost. Indeks luženja difuzione vrste izračunava se iz sledećih jednačina:

$$L = \left(\frac{1}{m}\right) \sum_{n=1}^m \left(\log \left(\frac{b}{D_e}\right)\right)_n \quad (2)$$

$$L = \left(\frac{1}{m}\right) \sum_{n=1}^m (-\log(D_e))_n \quad (3)$$

gde je:

L - indeks lužljivosti

$b=1$ (cm^2/s),

n - broj određenih perioda luženja, i

m - ukupan broj individualnih perioda luženja.

Prema teoriji penetracije, pod pretpostavkom da je koeficijent difuzije i da je čvrsta površina polu-beskonačni medijum, fluks difuzije (J) na površini čvrsta supstanca/rastvor izračunava se iz jednačine [18]:

$$J = \sqrt{\frac{D_e}{\pi t}} C_0 \quad (4)$$

gde je:

J - fluks difuzije ($\text{mg}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$),

C_0 - početna koncentracija supstance koja se prati u toku procesa luženja (mg/cm^3),

D_e - koeficijent efektivne difuzije (cm^2/s), i

t - vreme luženja (s).

Ukupna količina izluženog arsena, koji je difundovao iz srednje površine u vremenu t (M_t) može biti izveden iz predhodne jednačine integracijom u vremenu i površini, a izveli su je Dutre i sar. [6]:

$$M_t = 2M \frac{S}{V} \sqrt{\frac{D_e t}{\pi}} \quad (5)$$

gde je:

M_t - ukupna količina izluženog As (mg),

M - sadržaj As u početnom uzorku, S/S otpada (mg),

S - površina uzorka (cm^2), i

V - zapremina uzorka (cm^3).

Luženje arsena iz S/S matrice se vrši uglavnom procesom difuzije. Pretpostavljajući konstantan koeficijent difuzije za svaku S/S matricu,

kumulativno učešće supstance (CFR) može biti definisano kao odnos ukupne količine izluženog arsena M_t prema sadržaju As u početnom uzorku M i dato je sa:

$$CFR = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{S}{V} \sqrt{D_e t} \quad (6)$$

gde je:

GFR - kumulativno učešće supstance koja se luži,

S - površina uzorka (cm^2),

V - zapremina uzorka (cm^3),

D_e - koeficijent efektivne difuzije (cm^2/s), i

t - vreme luženja (s).

4.1. Indeks luživosti

Kontaminirani otpad koji ima indeks luživosti: $L < 6,5$ smatra se veoma mobilnim, kada je $6,5 < L < 8,0$ smatra se umereno mobilnim, a za $L > 8,0$ smatra se veoma malo mobilnim.

Rezultati koji su dobijeni za eksperimentalni indeks luživosti pokazali su da je solidifikacija svih uzoraka dobro izvedena u eksperimentalnim uslovima, kao i da je vrednost indeksa luživosti za svaki uzorak bila veća od 8,0 (tabela 3) [4].

Tabela 3. Efektivni koeficijent difuzije (D_e) i indeks luživosti (L) za ispitivane muljeve sa sadržajem As

Sastav	Efektivni koeficijent difuzije $D_e (10^{-10}) (\text{cm}^2/\text{s})$		Indeks luživosti (L)	
	Standard ANS 16.1	Teorija penetracije	Standard ANS 16.1	Teorija penetracije
AA+C	8,95	8,04	9,0	9,0
AA+C+FA	1,17	1,59	10,2	9,7
AA+C+FA+CH	0,512	0,893	10,66	10,0
AA+C+FA+PS	6,64	9,93	9,4	9,0
AA+C+PS	26,5	19,5	9,5	8,7
AA+C+PM	8,75	14,3	9,2	8,8

4.2. Mogući razlozi imobilizacije arsena u cementnim matricama

Kalcit koji se formira tokom reakcije karbonizacije zatvara pore u cementnoj matrici, što ometa migraciju zagađujućih materija iz matrice, kao i prolaz atmosferskog CO_2 u unutrašnjost matrice. Ovaj proces može biti

odgovoran za smanjenje luženja iz matrica sa cementom i Ca(OH)_2 . Taloženje i formiranje nerastvornog oblika (kalcijum-arsenita) u cementu, takođe doprinose niskom izluživanju iz solidifikovanih uzoraka [19,20].

Smanjenje koncentracije arsena u procednim vodama, uglavnom As(III) , je posledica formiranja nerastvornog CaHAsO_3 u procednim vodama u prisustvu Ca(OH)_2 [16].

Drugi glavni razlog za imobilizaciju arsena u cementnim S/S matricama može biti zbog alkalne prirode i kapaciteta puferovanja, koji obezbeđuje kalcijum-hidroksid.

Prisustvo Ca takođe je uticalo na luženje arsena iz S/S matrica, veći stepen luženja zabeležen je u slučaju AA+C od AA+C+FA i AA+C+FA+CH [15,21].

Dodavanje kalcijuma i silicijum-dioksida poboljšava koeficijent difuzije. Pocolanski proizvodi reakcije formiraju se sa dodatkom pepela i takođe utiču na smanjenje luživosti arsena.

Dve različite procedure za ispitivanje i optimizovanje otpada procesom S/S, kako bi se smanjilo luženje uglavnom arsena su:

1. Direktna solidifikacija sa dodatkom kreča, cementa i vode u otpadni materijal;
2. Oksidacija otpada, pre očvršćavanja, sa H_2O_2 , pri čemu se As(III) transformiše u As(V) .

5. ZAKLJUČAK

Prikazani su rezultati prethodnih istraživanja i mogućnosti primene procesa S/S na različite vrste otpadnih materijala, kao i efikasnost aditiva u zavisnosti od udela i vrste otpada.

Sistematizovani podaci za otpadni materijal sa povećanim sadržajem As koji nastaje u procesima topioničke prerade ruda bakra treba da pomognu pri izboru optimalnog procesa S/S za dalja istraživanja u oblasti smanjenja negativnog uticaja na životnu sredinu.

Primenom procesa S/S menjaju se fizičke karakteristike otpada, sprečava se nastanak velike količine procednih voda na deponijama sa visokim sadržajem opasnih i štetnih komponenti, čime se postiže dvostruki efekat, štiti se životna sredina sa jedne strane, a sa druge strane smanjuju se troškovi procesa zbrinjavanja opasnog otpada, jer nema potrebe za instalacijom i radom sistema za prečišćavanje otpadnih/procednih voda sa deponije.

Proces stabilizacije/solidifikacije sa cementom je pogodna tehnika za smanjenje luživosti otpadnog materijala koji sadrži As. Dodavanje kalcijuma i silicijum-dioksida poboljšava se koeficijent difuzije. Proizvodi koji se formiraju u reakciji pocolana sa dodatkom pepela, takođe su doveli do smanjenja luživosti arsena. Taloženje i konverzija u ne-rastvorljivi oblik (kalcijum-arsenit) u cementu, takođe doprinosi mehanizmu niskog izluženja u očvrnutim uzorcima. Izbor postupka S/S, tj. izbor aditiva jedan je od ključnih elemenata koji utiče na efikasnost primenjenog postupaka. Najbitniji korak u procesu S/S otpadnog materijala predstavlja kvalitativna i kvantitativna analiza otpadnog materijala, na osnovu koje se može izvršiti izbor pravog aditiva.

Fizičkim i hemijskim metodama vrše se ispitivanja S/S proizvoda, na osnovu kojih se vrši njegova kategorizacija.

Takođe, neophodno je proveriti uticaj starenja nastalog produkta S/S procesa na mobilnost opasnih i štetnih komponenti iz S/S otpadnog materijala. Poboljšanje efikasnosti procesa S/S moguće je primenom procesa predtretmana.

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada evidencioni broj: 451-03-68/2020-14/200052.

LITERATURA

- [1] Wilk C. M. (A), Applying Solidification/Stabilization for Sustainable Redevelopment of Contaminated Property. LEHP, QEP, LEED AP Program Manager, Waste Treatment Portland Cement Association
- [2] EPA, 1999., Solidification/stabilization resource guide, EPA/542-B-99-002 (1999), <http://epa.gov/tio/download/remed/solidstab.pdf>
- [3] Fleri M. A., Whetstone G. T., In situ stabilisation/solidification: Project lifecycle, J. Hazard. Mater., 2007; 141: 441–456.
- [4] Dutre V., Vandecasteele C., An Evaluation of the Solidification/ Stabilization of Industrial Arsenic Containing Waste Using Extraction and Semi-Dynamic Leach Tests, Waste Manage. (Oxford, U. K.). 1996; 16(7): 74. 625–631. (A)
- [5] ANS, 1986, Measurements of the Leachability of Solidified Low-Level Radioactive Wastes, ANSI/ANS 16.1, American Nuclear Society, La Grandge Park, IL, 1986.

- [6] Zinck J., [Internet]. Canada: Review of Disposal, Repro-Cessing and Reuse Options for Acidic Drainage Treatment Sludge, The Mining Association of Canada, MEND and CENMET Mining and Mineral Sciences Laboratories, MEND Report 3. 42. 3, 2005: 3.
- [7] Malviya R., Chaudhary R., Factors Affecting Hazardous Waste Solidification/Stabilization: A Review., *J. Hazard. Mater. B.* 2006; 137 (1): 267–276.
- [8] Wee H. Y., Characterization and Stabilization of Arsenic In Water Treatment Residuals.A Thesis. 2003.
- [9] Smedley P.L., Kinniburgh, D.G., A Review of the Source, Behaviour and Distribution of Arsenic in Natural Waters, *Appl. Geochem.* 2002; 17: 517–568.
- [10] Kenyon, E.M., Hughes, M.F. A Concise Review of the Toxicity and Carcinogenicity of Dimethylarsinic Acid, *Toxicology.* 2001; 160(1-3): 227–236.
- [11] Matschullat, J., Arsenic in the Geosphere - A Review, *Sci. Total Environ.* 2000; 249: 297–312.
- [12] Davenport W.G., King M., Schlesinger M., Biswas A.K., *Extractive Metallurgy of Copper*, Fourth Edition, Elsevier Science Ltd.; 2002, p. 432.
- [13] Morales A., Cruells M., Roca A., Bergó R., Treatment of Copper Flash Smelter Flue Dusts for Copper and Zinc Extraction and Arsenic Stabilization. *Hydrometallurgy.* 2010;105: 148 -154.
- [14] Vandecasteele C., Dutre C., Geysen D., Wauters G., Solidification/stabilisation of Arsenic Bearing Fly Ash from the Metallurgical Industry. Immobilisation Mechanism of Arsenic. *Waste Manage. (Oxford, U. K.).* 2002; 22: 143–146.
- [15] Leist M., Casey R.J., Caridi D., The Fixation and Leaching of Cement Stabilized Arsenic. *Waste Manage. (Oxford, U. K.).* 2003; 23(4): 353–359.
- [16] U.S. Department of Energy, 1999. Stabilization using Phosphate Bonded Ceramics, Innovative Technology-Summary, Report, DOE/EM-0486, 1999, <http://infohouse.p2ric.org/ref/13/12699.pdf>
- [17] Singh T. S., Pant K.K., Solidification/stabilization of Arsenic Containing Solid Wastes using Portland Cement, Fly Ash and Polymeric Materials. *J. Hazard. Mater. B*131; 2006: 29–36.
- [18] Dutre V., Vandecasteele C., Immobilization Mechanism of Arsenic in Waste Solidified Using Cement and Lime. *Environ. Sci. Technol.* 1998; 32(18): 2782-2787. (B)

- [19] Stronach S.A., Walker N.L., Macphee D.E., Glasser F.P., Reaction Between Cement and As(III) Oxide; The System CaO-SiO₂-As₂O₃-H₂O at 25°C, Waste Manage. (Oxford, U. K.), 1997; 17(1): 9–13.
- [20] Glasser F.P., Fundamental Aspects of Cement Solidification and Stabilization, J. Hazard. Mater. 1997; 52(2-3):151–170.
- [21] Dermatas D., Moon D.H., Menounou N., Meng X., Hires R., An Evaluation of Arsenic Release from Monolithic Solids Using a Modified Semi-Dynamic Leaching Test. J. Hazard. Mater. 2004; 116(1-2): 25–38.

UDK: 006.07(045)=163.41

ORIGINALAN NAUČNI RAD

Oblast: Ekonomija i menadžment

SWOT ANALIZA – INSTRUMENT ZA EFIKASNO UPRAVLJANJE

SWOT ANALYSIS - AN INSTRUMENT FOR EFFICIENT MANAGEMENT

Slavica Miletić, Zdenka Stanojević-Šimšić, Ana Kostov, Emina Požega
Mining and Metallurgy Institute Bor, Zeleni bulevar 35, 19210 Bor, Serbia
E-mail: slavica.miletic@irmbor.co.rs

Izvod

SWOT analiza je najvažniji tehnički menadžerski alat koji služi za efikasno upravljanje organizacijom. Za analizu poslovanja menadžeri koriste SWOT analizu kao korisnu tehniku za razumevanje snaga i slabosti kompanije i prepoznavanje prilika i pretnji iz okruženja. SWOT analiza kao pomoćni alat omogućava menadžerima jasno definisanu strategiju organizacije. Rezultati SWOT analize menadžerima daju jasnu sliku gde se kompanija nalazi u odnosu na konkurenciju.

Ključne reči: SWOT analiza, efikasno upravljanje, strateško planiranje

Abstract

SWOT analysis is the most important technical management tool that serves to effectively manage the organization. For business analysis, managers use SWOT analysis as a useful technique for understanding the strengths and weaknesses of a company and identifying opportunities and threats from the environment. SWOT analysis as an auxiliary tool provides managers with a clearly defined strategy of the organization. The results of the SWOT analysis give managers a clear picture of where the company is in relation to the competition.

Keywords: SWOT analysis, efficient management, Strategic planning

1. UVOD

SWOT analiza je alat koji se koristi u strateškom planiranju i odlučivanju organizacije. Osnivač SWOT analize je Albert Humphrey. Tehnika SWOT analize razvijena je na Stanford univerzitetu u periodu 1960.-1970. Sastoji se iz dva dela: internih faktora iz kompanije (snage i slabosti) i eksternih faktora iz okruženja (šanse i pretnje). Analiza internih i eksternih okruženja utiču na održivost organizacije. Tehnika SWOT analize menadžerima omogućava da se sazna nova perspektiva organizacije.

Savremeno poslovanje zahteva analizu strateškog planiranja. Strateško planiranje je način da se pomogne kompaniji da bude produktivnija pomažući joj u raspodeli raspoloživih resursa radi postizanja ciljeva. Strateško planiranje je ključ uspeha strateškog upravljanja [1]. Strateško upravljanje omogućava

kompaniji da bude više proaktivna nego reaktivna u oblikovanju sopstvene budućnosti. Omogućava kompaniji da pokreće i utiče – umesto samo da odgovara na aktivnosti – i tako vrši kontrolu nad sopstvenom sudbinom [2].

Strateško upravljanje sastoji se od analiza, odluka i radnji koje kompanija preduzima u cilju stvaranja i održavanja konkurentskih prednosti. Strateško upravljanje se sastoji iz misije, vizije, ciljeva, spoljašnje i unutrašnje analize, SWOT analize. Sprovođenje SWOT analize podrazumeva ocenu poslovanja svih faktora u kompaniji (proizvodnje, marketinga, nabavke, finansija, upravljanja, i dr). Eksterna analiza identifikuje kritične pretnje i mogućnosti u svom konkurentskom okruženju. Interna analiza pomaže kompaniji da identifikuje svoje organizacione snage i slabosti. Strateška analiza menadžerima pruža priliku za brzo prepoznavanje rizika, slabosti, mogućnosti i šansi kompanije [3].

Zadatak SWOT analize je da pomogne menadžerima u procesu donošenja odluke pri odabiru najboljeg rešenja radi efikasnijeg održivog poslovanja.

2. METODOLOGIJA RADA

Tehnika analiziranja internih faktora (snage i slabosti) i eksternih faktora (mogućnosti i pretnje) naziva se SWOT analiza [4]. SWOT analiza pruža mogućnost menadžerima organizacije da izgrade efikasnu organizacionu i konkurentsku strategiju. SWOT analiza ima dve dimenzije: Internu (unutrašnja) i eksternu (spoljašnja). Unutrašnja dimenzija uključuje organizacione faktore, snage i slabosti, a spoljašnja dimenzija uključuje faktore životne sredine, mogućnosti i pretnje. SWOT analiza daje mogućnost menadžerima organizacije da na osnovu njenog okruženja izaberu najbolju strategiju. Ona je jednostavna za sprovođenje i ako se pravilno primeni daje dobru osnovu za formiranje strategije organizacije [5]. SWOT analiza je jednostavno, ali moćno sredstvo za određivanje resursa i nedostataka organizacije, njenih tržišnih prilika i spoljnih pretnji u njenoj budućnosti [6].

Prednost SWOT analize nalazi se u kvantitativnom pregledu SWOT faktora i uključivanja preferencije donosioca odluka u situaciji planiranja [7]. SWOT metoda može da se kombinuje sa mnogim metodama višekriterijumskog odlučivanja (MCDM). U praksi se najčešće koristi hibridni model SWOT i AHP (Analitički hijerarhijski proces). Hibridni SWOT i AHP model se koristi u strateškom odlučivanju [8]. Njegov tvorac je Kurttilaa, M. sa saradnicima [7]. Prednost ovog modela je kvantitativno ispitivanje SWOT faktora koji su uključeni kao kriterijumi u AHP metodi za izbor najbolje alternative.

Hibridni model SWOT i AHP primenjene su u mnogim oblastima za rešavanje realnih problema: za strateško odlučivanje [8-10], u oblasti zaštite životne sredine [11], telekomunikacijama [12], u energetici [13] i drugim oblastima.

Komponente SWOT analize su: snaga, slabosti, mogućnosti i pretnje.

- S - snaga (eng. strengths) - Organizaciona snaga definiše situaciju u kojima je organizacija efikasnija u poređenju sa konkurentima, jednostavno da odgovori na pretnje spoljašnjeg okruženja. Snaga je nešto što organizacija dobro radi ili karakteristika koju organizacija ima što joj daje važnu sposobnost [14].
- W - slabosti (eng. weaknesses) - Slabost organizacije je aspekt gde je organizacija manje efikasna u odnosu na konkurentnu organizaciju. To znači da joj nešto nedostaje u poređenju sa drugom organizacijom što je dovodi u nepovoljni položaj [14]. Slabost organizacije može da bude u nedostatku finansijskih resursa, imidža, brenda, markentiške veštine i upravljačke sposobnosti [15]. Menadžerima organizacija je jednako važno da su upoznati i sa slabostima i sa snagom organizacije.
- O - mogućnosti (eng. opportunities) - Mogućnosti, to su pogodne situacije za organizaciju. To su ustvari mogućnosti u spoljašnjem svetu gde organizacija može svojom snagom da prevaziđe slabosti, a to znači da neutrališe pretnju [16].
- T - pretnje (eng. threats) - Stanje koje ugrožava zadatke i ciljeve organizacije naziva se pretnja. Pretnje su situacije koje nastaju kao rezultat promena u neposrednom okruženju koje sprečavaju postojanje organizacije ili gubitak superiornosti u odnosu na konkurenciju [17].

Rezultat analize je matrica pozitivnih i negativnih faktora na koje ispitanici treba da se fokusiraju i prikazani su u Tabeli 1.

Tabela 1. SWOT matrica

Interni faktori	Externi faktori	
Snaga	Mogućnosti	Poželjni faktori
Slabost	Pretnja	Nepoželjni faktori

Cilj SWOT analize je da se utvrdi:

1. Konkurentnost;
2. Definisanje strategije;
3. Povećanje finansijskih sredstava;
4. Kvalitet proizvoda i usluga; i
5. Zadovoljstvo korisnika proizvoda i usluga.

Da bi sproveli SWOT analizu menadžeri ili donosioci odluka organizacije A formiraju globalnu SWOT matricu. Okvir za istraživanje i pitanja za sprovođenje SWOT analize data su u Tabeli 2. Daje se neograničeni broj faktora (72), koji mogu da se koriste za izradu SWOT analize (Tabela 2). Potrebno je odrediti snage, slabosti, prilike i pretnje vezane za strategiju organizacije A.

Tabela 2. Globalna SWOT matrica

Snage	Slabosti
S ₁ – Dovoljno ambicioznih mladih stručnih kadrova S ₂ – Stalna edukacija zaposlenih S ₃ – Precizno definisanje vizije S ₄ – Kopetencija menadžmenata S ₅ – Radna disciplina S ₆ – Multidisciplinarnost S ₇ – Timski rad i sinergija S ₈ – Ambicioznost i posvećenost S ₉ – Praćenje budućih trendova S ₁₀ – Komunikacija zaposlenih sa menadžmentom S ₁₁ – Savremena oprema S ₁₂ – Fleksibilnost organizacijske promene S ₁₃ – Poverenje lidera, poštovanje S ₁₄ – Uspostavljena hijerarhija S ₁₅ – Međunarodna saradnja S ₁₆ – IT podrška S ₁₇ – Metodološka znanje S ₁₈ – Iskustvo u poslu S ₁₉ – Saradnja sa korisnicima S ₂₀ – Forsiranje mladih od starijih S ₂₁ – Međusobno poštovanje i uvažavanje S ₂₂ – Zastupljenost visokoškolaca S ₂₃ – Akreditacija S ₂₄ – Implementacija ISM (QMS; EMS; OHSAS, HACCP, ISO 22000, i dr).	W ₁ – Timski rad – proporcionalnost angažovanja u timu (postojanje želje da se bude član tima) W ₂ – Kvalitet zaposlenih W ₃ – Kriterijumi kod prijema kadrova W ₄ – Međusobna komunikacija (deljenje informacije) W ₅ – Uslovi za rad W ₆ – Zainteresovanost za promene W ₇ – Angažovanost zaposlenih W ₈ – Pristup različitim vrstama poslova W ₉ – Postojanje pozitivnog konflikta W ₁₀ – Kvalitet i kvantitet informacija ili informativnih časopisa W ₁₁ – Saradnja sa privredom W ₁₂ – Postojanje praktičnog iskustva kod mladih kadrova W ₁₃ – Periodični brainstorming ili uopšte ne postoji W ₁₄ – Poštovanje ugovora o radu W ₁₅ – Shvatanje radnih obaveza W ₁₆ – Angažovanost za otklanjanje sklonosti ogovaranju kolega W ₁₇ – Postojanje inicijative kod mladih za nove stvari W ₁₈ – Međusobna saradnja zaposlenih W ₁₉ – Trend povećanja kvaliteta rada (motivisanost) W ₂₀ – IT Oprema W ₂₁ – Donošenje odluka na adekvatan način
Mogućnosti	Pretnje
O ₁ – Finansijska situacija u okruženju O ₂ – Saradnja sa inostranim fakultetima i institutima O ₃ – Pogrančna saradnja O ₄ – Održavanje integriteta instituta O ₅ – Akreditacija isturenih odeljenja O ₆ – Saradnja sa fakultetima i institutima u zemlji O ₇ – Prihvatanje savremenih modela poslovanja O ₈ – Jačanje marketinških aktivnosti O ₉ – Kvalitet dostupnih časopisa O ₁₀ – Promocija na konferencijama O ₁₁ – Novi ciklus projekata ministarstva nauke O ₁₂ – Novi projekti EU O ₁₃ – Definisanje specifičnih zahteva korisnika O ₁₃ – Zadovoljstvo korisnika proizvodom i uslugom	T ₁ – Kapacitet tržišta T ₂ – Stabilnost tržišta T ₃ – Fleksibilnost praćenja promena zahteva korisnika T ₄ – Ublažavanje (kada postoje) predrasuda T ₅ – Stanje privrede u regionu T ₆ – Integritet instituta T ₇ – Ekonomsko stanje u zemlji T ₈ – Lokacija T ₉ – Zastupljenost transfera iz budžeta T ₁₀ – Podrška vlasnika organizacije T ₁₁ – Kvalitet znanja kadidata za novo zapošljavanje T ₁₂ – Odnos autorsora prema procesima i zahtevima T ₁₃ – Zadovoljstvo korisnika proizvodima i uslugama

Stvara se finalna SWOT matrica rangiranjem globalne matrice koja sadrži 72 faktora. Prilikom odlučivanja donosioci odluka uključuju samo najvažnije faktore u opsegu od 1 do 5. Faktori koji će se koristiti u SWOT analizi prikazani su u Tabeli 3.

Tabela 3. *Prosečna ocena težine za SWOT faktore*

SWOT Faktori	Srednja ocena
S3	4,2
S4	4,9
S6	4,4
S10	4,1
S11	5
S15	4,0
S19	4,2
S21	4,4
S23	4,6
S24	4,6
W20 –S	4,6
W1	3,4
W2	3,3
W4	3,4
W9	3,4
W13	3,3
W16	2,9
W18	3,3
O3	4,1
O4	4,4
O5	4,2
O6	4,0
O7	4,0
O9	4,1
O11	4,0
O13	4,2
O14	4,3
T6-O	4,6
T1	3,1
T2	3,0
T4	3,4
T5	2,7
T5	2,6
T8	3,3
T9	3,1
T10	3,2
T12	3,4
O1-T	2,9
O8-T	3,4
O9-T	3,4

Na osnovu rangiranja faktora formirana je finalna SWOT matrica prikazana u Tabeli 4.

Tabela 4. Finalna SWOT matrica

SNAGE	SLABOSTI
S3 - Precizno definisana vizija S4 - Kompetencija menadžmenta S6 - Multidisciplinarnost S10 - Komunikacija zaposlenih sa menadžmentom S11 - Savremena oprema S15 - Međunarodna saradnja S19 - Saradnja sa korisnicima S21 - Međusobno poštovanje i uvažavanje S22 - Zastupljenost visokoškolaca S23 - Akreditacija S24 - Implementacija IMS-a (QMS; EMS; OHSAS, HACCP, ISO 22000, i dr). W20 - IT oprema	W1 - Neustaljena svest o značaju timskog rada W2 - Kvalitet zaposlenih W4 - Međusobna komunikacija (deljenje informacija) W9 - Postojanje pozitivnog konflikta W13 - Periodični brainstorming ili uopšte ne postoji W16 - Angažovanost za otklanjanje sklonosti ogovaranja kolega W18 - Međusobna saradnja S1 - Nedovoljno ambicioznih mladih stručnih kadrova
MOGUĆNOSTI	PRETNJE
O3 - Pogranična saradnja O4 - Održavanje integriteta instituta O5 - Akreditacija isturenih odeljenja O6 - Saradnja sa fakultetima i institutima u zemlji O7 - Prihvatanje novih modela poslovnja O9 - Kvalitet dostupnih časopisa O11 - Novi ciklus projekata ministarstva nauke O13 - Definisanost specifičnih zahteva korisnika O14 - Zadovoljstvo korisnika proizvodom i uslugom T6 - Integritet instituta	T1 - Kapacitet tržišta T2 - Stabilnost tržišta T4 - Ublažavanje (kada postoje) predrasude o institutu T5 - Stanje privrede u regionu T7 - Ekonomsko stanje u zemlji T8 - Lokacija instituta T9 - Zastupljenost transfera iz budžeta T10 - Podrška vlasnika instituta T12 - Odnos autsorsa prema procesima i zahtevima instituta O1 - Finansijska situacija u okruženju O8 - Jačanje marketniške aktivnosti O10 - Promocija na konferencijama

Finalna SWOT matrica pokazuje koje su snage, slabosti, mogućnosti i pretnje organizacije A. Strategija organizacije A se gradi na snazi i mogućnostima, a njihove slabosti treba prepoznati i poboljšati, što je prikazano u Tabeli 4. Pretnje organizacije A predstavljaju prepreku za organizacioni uspeh i mogu prouzrokovati finansijsku štetu. Spoljne mogućnosti i pretnje se odnose na ekonomske, sociološke, ekološke, kulturološke, političke, demografske, globalne trendove i oni mogu značajno koristiti ili štetiti organizaciji. Eksternom analizom je utvrđeno da najveći uticaj na organizaciju imaju globalni trendovi [3]. Iz finalne SWOT matrice

menadžeri zaključuju da stanje organizacije iz slabosti ili pretnje okoline mogu pretvoriti u snagu ili mogućnosti u cilju tržišne konkurencije.

3. ZAKLJUČAK

Savremeno poslovanje koristi SWOT analizu poslednjih pedeset godina u polju strateškog upravljanja kao dragocenu tehniku za planiranje i donošenja odluka. SWOT analiza uključuje određivanje cilja organizacije i analizira povoljne i nepovoljne unutrašnje i spoljašnje faktore za postizanje zadatog cilja. Ona može da bude deo analitičkog odlučivanja. Opasnost kod organizacije javlja se ako se ne preduzmu odgovarajuće mere koje pruža SWOT analiza.

Na osnovu SWOT analize organizacije A za strateško planiranje je urađen plan prevazilaženja slabosti i iskorišćenje mogućnosti. Plan je sledeći: Povećanje pogranične saradnje, Održavanje integriteta, Akreditacija isturenih odeljenja, Saradnja sa fakultetima i institutima u zemlji, Prihvatanje novih modela poslovanja, Kvalitet dostupnih časopisa, Novi ciklus projekata ministarstva nauke, Definisanost specifičnih zahteva korisnika, Zadovoljstvo korisnika proizvodom i uslugom i Integritet.

SWOT analiza ne daje odgovore već predstavlja:

- način na koji će organizacije biti efikasne;
- gde se nalaze u odnosu na konkurenciju; i
- način pretvaranja slabosti ili pretnje u snage ili mogućnosti.

Savremeno poslovanje zahteva čestu izradu SWOT analize, ali, nažalost, malo pažnje je posvećeno njenom razumevanju i primeni.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2020. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-68/2020-14/200052.

LITERATURA

- [1] Gurel, E., Tat, M., SWOT Analysis: A. Theoretical Review, The Journal of International Social. Research, 10(51) (2017) 994-1006.
- [2] David, F.R., Strategic Management-Concepts and Cases, 9th Edition, USA, Pearson Education, 2003, p.15.
- [3] Miletić, S., Stanojević Šimšić, Z., Strategic analysis of organization by AHP method, Innovation as an initiator of the development “innovations - basis for development” International Thematic Monograph – Thematic Proceedings, 2018, pp. 289-307.

-
- [4] Houben, G., Lenie, K., Vanhoof, K., A knowledge-based SWOT-analysis system as an instrument for strategic planning in small and medium sized enterprises, *Decision Support Systems*, 26 (1999) 125-135.
 - [5] Kajanus, M., Kangas, J., Kurttila, M., The use of value focused thinking and the A'WOT hybrid method in tourism management, *Tourism Management*, 25 (2004) 499–506.
 - [6] Thompson, A.A., Strickland, A.J., Gamble, J.E., *Crafting and Executing Strategy - Concepts and Cases*, 15th Edition, USA, McGraw-Hill/Irwin, 2007.
 - [7] Kurttilaa, M., Pesonena, U.M., Kangas, J., Kajanus M., Utilizing the analytic hierarchy process AHP in SWOT analysis - a hybrid method and its application to a forest-certification case, *Forest Policy and Economics*, 1 (2000) 41-52.
 - [8] Bartusková, T., Kresta, A., Application of AHP method in external strategic analysis of the selected organization, *Procedia Economics and Finance*, 30 (2015) 146– 154.
 - [9] Erdila, A., Erbiyik, H., Selection Strategy via Analytic Hierarchy Process: An Application, *Procedia Soc Behav Sci*, 195 (2015) 2618-2628.
 - [10] Miletić, S., Implementation of the SWOT methods: a case study, 10th International Symposium on Natural Resources Management, Faculty of Management Zaječar, Megatrend University Belgrade, 26. September 2020, Zaječar, pp. 126-129, ISBN: 978-86-7747-624-3.
 - [11] Eslamipoor, R., Sepehriar, A., Firm relocation as a potential solution for environment improvement using a SWOT-AHP hybrid method, *Process safety and environmental protection*, 92 (2014) 269–276.
 - [12] Mehmooda, F., Hassannezhada, M., Abbasb, T., Analytical investigation of mobile NFC adaption with SWOT-AHP approach: A case of Italian Telecom, *Procedia Technology*, 12 (2014) 535–541.
 - [13] Stojčetočić, B., Nikolić, Đ., Velinov, V., Bogdanović, D., Application of integrated strengths, weaknesses, opportunities, and threats and analytic hierarchy process methodology to renewable energy project selection in Serbia, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 8(3) (2016) 035906.
 - [14] Thompson, A.A., Strickland, A.J., *Strategy Formulation and Implementation*, 4th Edition, USA, Irwin, Inc, 1989, p. 109.
 - [15] Pearce, J.A., Robinson, R.B., *Strategic Management*, 4th Edition, USA, Irwin, Inc, 1991, p. 182.
 - [16] Harrison, J.S., St. John, C.H., *Foundations in Strategic Management*, 3. Baski, USA, South Western, 2004.
 - [17] Ülgen, H., Mirze, S.K., *İşletmelerde Stratejik Yönetim*, 5. Baski, İstanbul, Beta Basım Yayım, 2010, p. 161.

UDK: 656.054(045)=163.41

NAUČNI RAD

Oblast: Informacione tehnologije i softversko inženjerstvo

LINIJSKA KOORDINACIJA RADA SEMAFORA

LINE COORDINATION OF TRAFFIC LIGHTS

Milan Radivojević

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Zeleni bulevar 35, 19210 Bor

E-mail: milan.radivojevic@irmbor.co.rs

Izvod

U mnogim naseljenim mestima postoje jedna, ili više primarnih saobraćajnica (koridora), jednosmernih, ili dvosmernih, na kojima se nalaze više raskrsnica. Ove saobraćajnice zahtevaju poseban pristup u regulisanju saobraćaja, kako bi se na njima obezbedilo njegovo kvalitetno i bezbedno odvijanje. Ako se upravljanje saobraćajem u ovakvim slučajevima realizuje pomoću semaforских sistema instalisanih na svim raskrsnicama duž primarne saobraćajnice, signalni planovi pojedinačnih raskrsnica moraju biti usaglašeni. Usaglašavanje njihovog rada naziva se linijska koordinacija svetlosne signalizacije (zeleni talas) i ono, u osnovi podrazumeva usklađivanje vremena trajanja zelenog svetla na semaforima tako da se omogući efikasno kretanje vozila kroz niz raskrsnica. U ovom radu predložena su dva moguća rešenja jednosmerne linijske koordinacije svetlosnih signala gde se koordinacija i dužina ciklusa mogu usklađivati sa vremenski promenljivim protocima saobraćaja.

Ključne reči: linijska koordinacija, raskrsnica, svetlosna signalizacija

Abstract

In many inhabited areas, there are one or more primary roads (corridors), one-way or two-way, where there are several intersections. These roads require a special approach in traffic regulation, in order to ensure its quality and safe operation. If traffic management in such cases is realized by means of traffic light systems installed at all intersections along the primary road, the signal plans of individual intersections must be harmonized. Harmonization of their work is called line coordination of light signalization (green wave) and it basically implies harmonization of the duration of green light at traffic lights so as to enable efficient movement of vehicles through intersections. In this paper, two possible solutions of one - way line coordination of light signals are proposed, where the coordination and cycle length can be harmonized with time by varying traffic flows.

Keywords: line coordination, intersection, traffic lights

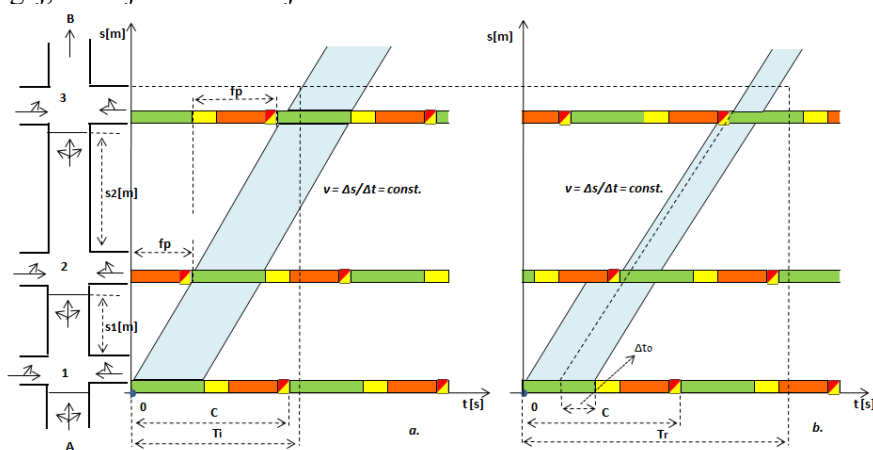
1. UVOD

Kvalitetno i bezbedno odvijanje saobraćaja duž određenog koridora na kome se nalaze više raskrsnica i gde se regulisanje saobraćaja realizuje upotrebom semaforских sistema, danas se najčešće obezbeđuje koordinacijom rada svetlosnih signala. Koordinacija signala značajno smanjuje ukupno vreme putovanja, broj zaustavljanja i kašnjenje vozila koja se kreću koridorom. U gradskim sredinama u kojima jednosmerni putevi okružuju blokve zgrada i gde često postoje parovi jed-

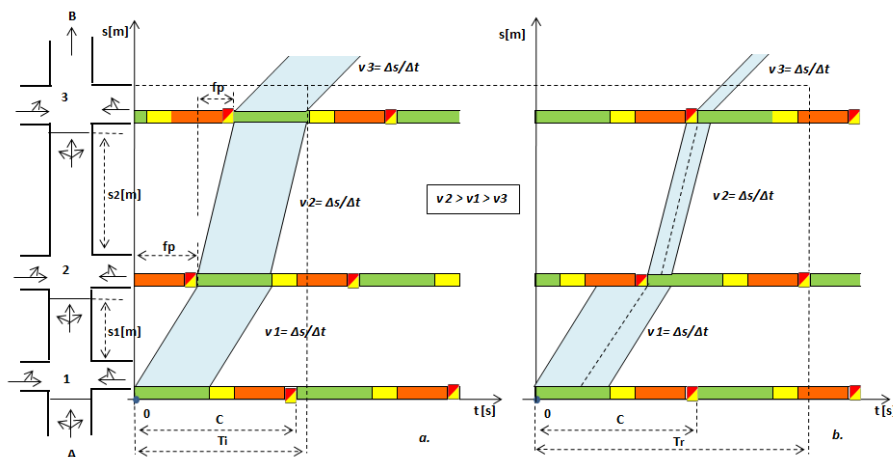
nosmernih ulica, veoma je značajna koordinacija svetlosnih signala čime se obezbeđuje nesmetano odvijanje saobraćaja, [1]. U praksi se na važnijim ulicama (smerovima) koordiniraju semafori sistemi raskrsnica koje su međusobno udaljene do 800 m, [2]. Pri linijskoj koordinaciji rada semafora, *osnovni uslov* je da svi semafori sistemi moraju imati *istu dužinu trajanja ciklusa*, [1,3].

Za analizu koordinacije signala i modifikovanje signalnih planova najčešće se koriste vremensko-prostorni dijagrami. Vremensko prostorni dijagram je vizuelno sredstvo koje prikazuje kretanje skupa vozila u istom smeru i istom srednjom brzinom duž posmatrane saobraćajnice, ili (za slučaj da se iz nekih razloga ne može obezbediti ista vrednost srednje brzine vozila celom dužinom primarne saobraćajnice) u istom smeru i različitim srednjim brzinama između susednih raskrsnica, [3,4]. Koordinacija svetlosnih signala je uspostavljena ako skup vozila može doći do signalisane raskrsnice u zelenom intervalu i nastaviti dalje kretanje saobraćajnicom, bez usporavanja, ili zaustavljanja. Idealnu koordinaciju signala je veoma teško realizovati u praksi, jer ona zavisi od velikog broja faktora (topologija mreže, dvosmerna, ili jednosmerna saobraćajnica, obim saobraćaja, struktura saobraćajnog toka, režima saobraćaja u oblasti raskrsnica i drugi).

Na slikama 1 i 2 prikazane su dve varijante rada svetlosnih signala na jednoj proizvoljnoj jednosmernoj saobraćajnici na kojoj se nalaze tri raskrsnice. Raskrsnice su na međusobnim rastojanjima s_1 i s_2 metara i u opštem slučaju je $s_1 \neq s_2$. Varijanta a) prikazuje idealnu koordinaciju svetlosnih signala na raskrsnicama, dok varijanta b) prikazuje slučaj rada signala kada koordinacije nema. Nedostatak koordinacije jasno se uočava na slici 1b), gde se vidi da od ukupnog broja vozila koja, tokom zelenog dela faze, prolaze kroz raskrsnicu 1, samo jedan deo (vozila koja kroz raskrsnicu 1 prođu u vremenskom intervalu Δt_0) prolazi kroz sve raskrsnice bez zaustavljanja. Veći deo ukupnog broja vozila zaustavlja se na drugoj, a manji deo na trećoj raskrsnici.



Sl. 1. Vremensko-prostorni dijagram svetlosnih signala na jednosmernoj saobraćajnici sa tri raskrsnice, srednja brzina duž koridora $v = \text{const.}$ a) idealna koordinacija, b) nema koordinacije, ili je loše realizovana



Sl. 2. Vremensko-prostorni dijagram svetlosnih signala na jednosmernoj saobraćajnici sa tri raskrsnice, različita vrednost srednje brzine duž koridora,
a) idealna koordinacija, b) nema koordinacije, ili je loše realizovana

Kao i kod izolovane raskrsnice, i u slučaju linijske koordinacije može se govoriti o kvalitetu koordinacije i nivou usluge. Kvalitet koordinacije (slike 1 i 2) definiše se kao odnos stvarnog vremena kretanja vozila duž razmatrane deonice (T_r) i vremena kretanja vozila pri idealnoj koordinaciji (T_i). Što je njegova vrednost bliža jedinici, to je koordinacija rada signala povoljnija i obrnuto.

Sa druge strane, nivo usluge za saobraćajnicu (koridor), na čijim raskrsnicama se upravljanje saobraćajem realizuje koordinacijom svetlosnih signala, određuje se na osnovu vrednosti srednje brzine vozila koja se kreću duž koridora i koja se izračunava po formuli [5]:

$$v = \frac{L}{T(j)L+d} [\text{km/s}] = \frac{3600L}{T(j)L+d} [\text{km/h}] \quad (1)$$

gde su: v – srednja brzina kretanja vozila na deonici dužine L , L – dužina deonice izražena u km, $T(j)$ – čisto vreme putovanja vozila na koridoru po km i d – ukupni gubici vremena po vozilu nastali kao posledica prolaska vozila kroz raskrsnice posmatrane saobraćajnice.

Osnovni pojam kod linijske koordinacije rada semafora je fazni pomak (fp) koji predstavlja razliku vremena početaka zelenih faza susednih raskrsnica, odnosno razliku trenutka početka zelenog vremena na nizvodnoj raskrsnici i i trenutka početka zelenog vremena na susednoj uzvodnoj raskrsnici j (slike 1 i 2). Idealni fazni pomak definiše se kao onaj pomak koji omogućava da prvo vozilo iz kolone dolazi na sledeću raskrsnicu tačno u trenutku paljenja zelenog svetla i izračunava se po formuli:

$$fp_{ij} = d + s_{ij} / v_{ij} \quad (2)$$

gde su d – ukupni vremenski gubici po vozilu nastali kao posledica prolaska vozila kroz raskrnicu, s_{ij} – rastojanje (m) između posmatranih susednih raskrsnica i v_{ij} – srednja brzina kretanja vozila („preporučena brzina“) (m/s) na deonici koridora između raskrsnica i i j .

Ako je srednja brzina vozila jednaka duž cele dužine primarne saobraćajnice, onda je $v_{ij} = v = \text{const}$. Za slučaj prikazan na slici 1, pod postavkom da su $d = 10$ s i $v = 40$ km/h = 11,11 m/s, $s_{21} = 100$ m i $s_{32} = 230$ m, vrednosti idealnih faznih pomaka iznose: $fp_{21} = 19,00$ s i $fp_{32} = 30,70$ s.

Za koridor sa raskrsnicama koja su na istim rastojanjima kao u prethodnom slučaju i vrednostima srednjih brzina $v_{21} = 45$ km/h = 12,50 m/s i $v_{32} = 60$ km/h = 16,67 m/s (slika 2), vrednosti idealnih pomaka iznose: $fp_{21} = 18$ s i $fp_{32} = 23,80$ s.

2. OSNOVNI ELEMENTI SISTEMA ZA KOORDINACIJU RADA SEMAFORA

Danas se u praksi koriste različiti sistemi linijske koordinacije koji su grupisani u tri celine i to: *simultani*, *alternativni* i *progresivni* sistemi. Simultani i alternativni sistemi koordinacije koriste se u uslovima kada su rastojanja između raskrsnica jednaka i kada sve raskrsnice u okviru istog trajanja ciklusa imaju istu faznu podelu. Pri regulisanju saobraćaja progresivnim sistemom koordinacije rada semafora, koji se može primenjivati i u uslovima kada rastojanja između raskrsnica nisu jednaka, vozilima se obezbeđuje zeleno svetlo onim redom kako pristižu na pojedinim nizvodnim raskrsnicama duž koridora kojim putuju. Osnovni elementi koji se koriste pri projektovanju ovakvih sistema su srednja brzina vozila („preporučena brzina“) [6], i dužina trajanja ciklusa [7]. Srednja brzina vozila je neposredno povezana sa protokom, odnosno gustinom toka i, posebno u gradskim sredinama, odgovarajućim zakonskim ograničenjima, tako da je njena vrednost u intervalu od 30 do 60 km/h. Dužina trajanja ciklusa je ista za sve raskrsnice i određuje se na osnovu ciklusa *kritične (merodavne)* raskrsnice [3]. Obzirom da se tokom vremena protok i gustina saobraćaja duž primarne saobraćajnice i na raskrsnicama menjaju, neophodno je da se posle svakog unapred određenog vremenskog perioda (intervala) vrši usklađivanje dužine trajanja ciklusa sa tokovima saobraćaja kako bi se obezbedilo da, tokom vremena, kvalitet koordinacije bude na zadovoljavajućem nivou.

Osnovni elementi sistema za koordinaciju rada semafora instalisanih na raskrsnicama duž primarne saobraćajnice su signalni kontroleri (prihvataju signalne planove i generišu odgovarajuće signalne pojmove), detektori vozila (najčešće se instaliraju na raskrsnicama) i lanterne. Svaki pojedinačni kontroler povezan je (optičkim kablovima, telefonskom linijom, bežičnom mrežom, ili na neki dugi način) sa glavnim signalnim kontrolerom koji se može instalirati na jednoj od raskrsnica u nizu (*upravljačka raskrsnica*) i komunicirati sa central-

nim sistemom za upravljanje saobraćajem na širem području. Signalni planovi se učitavaju u svaki pojedinačni kontroler posredstvom glavnog kontrolera sistema.

Postojeća tehnologija omogućava da se danas konfigurišu takvi sistemi za koordinaciju rada koji, pored učitavanja i sinhronizacije signalnih planova, imaju mogućnost praćenja, prikupljanja i obrade podataka o saobraćaju na pojedinačnim raskrsnicama, analize dobijenih rezultata i realizacije drugih funkcija. Zahvaljujući tome moguće je, pored ostalog, da se na relativno jednostavan način odredi koja je raskrsnica, tokom zadatog vremenskog intervala, merodavna i kolika je vrednost njenog ciklusa. Name, detektori koji su instalisani na raskrsnicama omogućavaju da se za određeni vremenski interval određuju protoci saobraćaja na svim pristupnim trakama svake raskrsnice k i da se na bazi toga određuju koeficijenti iskorišćenja y_{ki} svake saobraćajne trake:

$$y_{ki} = q_{ki} / S_{ki} \quad (3)$$

gde su q_{ki} – saobraćajni protok i S_{ki} – zasićeni saobraćajni protok i -te saobraćajne trake raskrsnice k .

Na osnovu ovih podataka izračunavaju se koeficijenti iskorišćenja kapaciteta svake raskrsnice Y_k :

$$Y_k = \sum_{i=1}^p Y_{ki} \quad (4)$$

gde su $Y_{ki} = \max_j \{y_{kj}(i)\}$ i p - broj faza k -te raskrsnice.

Raskrsnica čiji je koeficijent iskorišćenja Y_k najeveći je *kritična*, ili *merodavna* raskrsnica. Za kritičnu raskrsnicu vrši se proračun dužine trajanja ciklusa i raspodele zelenih vremena po fazama i to najčešće korišćenjem Websterovog modela, odnosno:

$$C_m = (1.5 \cdot d + 5) / (1 - Y_m) \quad (5)$$

$$g_r = (Y_{mp} / Y_m) \cdot (C_m - L), \quad r = 1, 2, \dots, p \quad (6)$$

gde su C_m – dužina trajanja ciklusa merodavne raskrsnice, Y_m – koeficijent iskorišćenja kapaciteta merodavne raskrsnice i $Y_{mp} = \max_j \{y_{mj}(i)\}$.

Postupak se ponavlja za svaki zadati vremenski interval što znači da u posmatranim (merodavnim) vremenskim intervalima ne mora ista raskrsnica da bude merodavna. Dužina vremenskog intervala, tokom kojeg se vrši usklađivanje vremena trajanja ciklusa, bira se unapred i može biti od nekoliko sekundi (ne manja od prosečne dužine trajanja ciklusa) pa do nekoliko sati.

Sistemi sa ovakvom konfiguracijom mogu se koristiti za koordinaciju rada semafora sa adaptivnim režimom rada. Određeni problemi u toku rada ovih sistema mogu se pojaviti zbog eventualnih kvarova na sistemu za komunikaciju između kontrolera pojedinačnih raskrsnica.

3. PREDLOŽENA METODOLOGIJA

Metodologija koja se predlaže u ovom radu obuhvata linijsku koordinaciju rada semafora na jednosmernoj (slika 1) saobraćajnici koja ima n – svetlosno signalisanih raskrsnica. Na svim raskrsnicama saobraćajni tokovi su grupisani u okviru dve faze ($p=2$). Mogući pravci i smerovi kretanja vozila prikazani su na slikama 1 i 2 Smer glavne saobraćajnice A-B predstavlja *smer nizvodno*. Pojedinačne raskrsnice označene su simbolima $R_1, R_2, R_3, \dots R_i \dots R_n$, pri čemu se index i povećava u *smeru nizvodno*. Neka su:

- $d_i = d$ – ukupni prosečni vremenski gubici po vozilu (u sekundama) raskrsnice $R_i, i = 1, 2, \dots n$,
- s_{ij} – rastojanje između susednih raskrsnica (u metrima), $i = 1, 2, 3, \dots n-1, j = i + 1$, mereno od kraja i –te do zaustavne linije susedne raskrsnice,
- v_{ij} – prosečna brzina kretanja vozila (m/s) duž glavne saobraćajnice,
- $t_{i,j}$ – vreme kretanja vozila između susednih raskrsnica i i j ,

$$t_{i,j} = d_i + s_{ij} / v_{ij}, i = 1, 2, \dots n-1, j = i + 1 \quad (7)$$

- fp_{ij} – fazni pomak (offset) između susednih raskrsnica j i i ; određuje se kao:

$$fp_{ij} = t_{i,j}, \text{ ako je } t_{i,j} < C_m;$$

$$fp_{ij} = t_{i,j} - C_m, \text{ ako je } C_m \leq t_{i,j} < 2C_m; \text{ i}$$

$$fp_{ij} = t_{i,j} - 2C_m, \text{ ako je } t_{i,j} \geq 2C_m \quad (8)$$

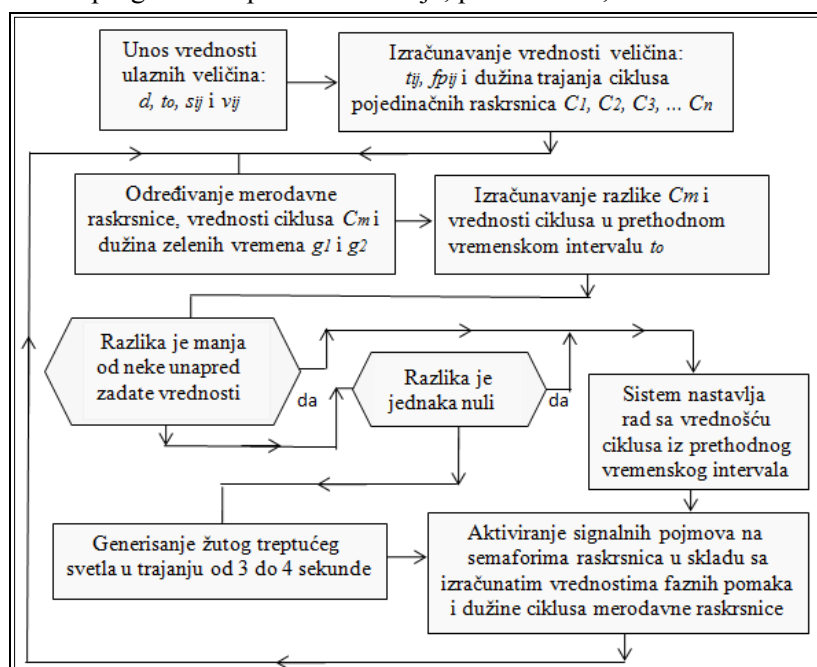
- t_o – vremenski interval (u sekundama) posle koga se vrši usklađivanje dužine trajanja ciklusa sa tokovima saobraćaja duž koridora i na raskrsnicama.

Tekući i naredni vremeski interval, ako se tekući i naredni ciklusi razlikuju za više od unapred zadate vrednosti, razdvojeni su treptućim žutim svetlom u trajanju od 3-4 sekunde. Ako je ta razlika manja od ove vrednosti, ili ako su ciklusi merodavnih raskrsnica isti u toku dva, ili više uzastopnih vremenskih intervala, do promene dužine trajanja ciklusa neće doći (izostaje treptuće žuto svetlo) i sistem radi sa ciklusom određenim u prethodnom vremenskom intervalu t_o . Treptuće žuto svetlo upozorava vozače na promenu dužine trajanja ciklusa.

- $C1, C2, C3, \dots Cn$ – izračunate vrednosti ciklusa na kraju vremenskog intervala t_o sa kojima bi tokom narednog vremenskog intervala, da su izolovane, radile raskrsnice $R_1, R_2, R_3, \dots R_n$,
- $C_m = \max(C1, C2, C3, \dots Cn)$ – vrednost dužine trajanja ciklusa merodavne raskrsnice,
- $C = C_m$ - zajednička vrednost dužine trajanja ciklusa raskrsnica tokom vremenskog intervala t_o .

Između raskrsnica $R_1, R_2, R_3, \dots R_n$, jedna raskrsnica je označena kao *upravljačka*. U predloženom modelu *upravljačka raskrsnica* je R_1 . Ona je povezana sa kontrolerima ostalih raskrsnica odgovarajućim kablovima, ili bežičnom vezom i u njoj je smešten računarski sistem na kome je instalisan program za kontrolu i koordinaciju rada svih semafora na raskrsnicama duž koridora.

Linijaska koordinacija rada semafora na jednosmernom koridoru sa n – raskrsnica realizuje se u skladu sa blok dijagramom koji je prikazan na slici 3. Na osnovu blok dijagrama može se izraditi algoritam i realizovati odgovarajuća aplikacija za automatsku koordinaciju rada semafora upotrebom nekog od standardnih programskih paketa kao što je, primera radi, LabVIEW.



Sl. 3. Blok dijagram jednosmerne linijske koordinacije rada semafora

4. ZAKLJUČAK

Na primarnim jednosmernim saobraćajnicama na kojima se nalazi više raskrsnica i na kojima se upravljanje saobraćajem ostvaruje pomoću svetlosnih signala, signalni planovi raskrsnica moraju biti usaglašeni kako bi se obezbedio viši nivo usluge, bezbednije odvijanje saobraćaja, kao i manji broj zaustavljanja i ravnomernija brzina vozila.

U ovom radu predloženi su jedna od mogućih metoda i odgovarajući blok dijagram za linijsku koordinaciju svetlosnih signala na jednosmernim primarnim saobraćajnicama na kojima su inicijalno definisani dozvoljeni pravci i

smerovi kretanja vozila. Na osnovu predloženog blok dijagrama može se izraditi algoritam i odgovarajuće aplikativno rešenje koje se može praktično realizovati upotrebom PC računarskih sistema. Računarski sistem i aplikativno rešenje instalisano na njemu mogu biti locirani u upravljačkoj raskrsnici odakle se, tokom rada sistema, vrši upravljanje i koordinacija svetlosnih signala na ostalim raskrsnicima duž koridora.

LITERATURA

- [1] Schroeder J. Bastian, PhD, Traffic Operations, 2016.
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/coordination-signal>
- [2] Keshuang, T., Li, K., Li, M., Liu, D., Isolated control versus coordinated control, 2019.
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/coordination-signal>
- [3] Teodorović, D., Janić, M., Traffic Control for Arterial Streets, 2017.
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/coordination-signal>
- [4] Department of Transport and Main Roads, Traffic Signals Information (n.d.), Queensland Government, 09.11.2020.
<https://www.tmr.qld.gov.au/Travel-and-transport/Road-and-traffic-info/Traffic-Signals-Information.aspx>
- [5] Koordisan rad svetlosnih signala duž poteza, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, 2013.
<https://www.docsity.com/sr/koordinisan-rad-svetlosnih-signala-skripte-saobracajni-fakultet/263297/>
- [6] Pravilnik o saobraćajnoj signalizaciji, „Službeni glasnik RS“, broj 85/17.
- [7] Hari, K., Vinay K., Dr. Ch. Hanumantha R., Signal design using Webster's method, Indian J.Sci.Res. 17(2) (2018) 12-16.

UDK: 621.2.016.25(045)=163.41

NAUČNI RAD

Oblast: Energetika

**POBOLJŠANJE KVALITETA NAPONA U
ELEKTROENERGETSKIM MREŽAMA KOMPENZACIJOM
REAKTIVNE SNAGE POMOĆU KONDENZATORSKIH BATERIJA**

**THE IMPROVEMENT OF VOLTAGE QUALITY IN
ELECTRO-ENERGETIC GRIDS BY COMPENSATING
REACTIVE POWER USING CAPACITOR BATTERIES**

Nenad Marković¹, Slobodan Bjelić², Filip Marković²

¹Akademija strukovnih studija Kosovsko Metohijska,
Odsek Uroševac – Leposavić, 38218 Leposavić, Srbija

²Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, Univerzitet u Prištini,
Kneza Miloša 7, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija
E-mail: nen.mark74@yahoo.com

Izvod

U savremenom projektovanju potrebna je matematičko-računarska podrška koja obuhvata kompleksne analitičke metode, algoritme i programe za izbor električnih šema, parametara i režima rada elektroenergetske mreže. Jedan od važnijih zadataka tog naprednijeg metoda projektovanja je racionalan izbor načina kompenzacije i regulacije napona i samih uređaja koji će taj cilj ostvariti. Predloženi metod u ovom radu se zasniva na principu da se odstupanja određuju pomoću naponskih dijagrama. Deo paketa u MATLAB Simulink-u `psb1rcompenssed` i šema za simulaciju su fleksibilni jer se mogu prikazati i normalni režimi rada i režimi poremaćaja. Njegova prednost je što, pored tačnosti u simulaciji promene napona, omogućava i unapređenje kako modela mreže, tako i programa. Ima posebne prednosti kao što je detaljan uvid u sve komponente modela i programa i unošenje različitih izmena koje se inače ne bi mogle uneti u raspoložive programske pakete.

Ključne reči: električna mreža, kvalitet, odstupanje napona, kompenzacija, regulacija napona

Abstract

Modern design requires mathematical and computer support that includes complex analytical methods, algorithms and programs for the selection of electrical schemes, parameters and models of operation of the electrical grid. One of the most important tasks of this advanced, modern method, of design is to make a rational choice of ways of compensation and regulation of voltage, and to choose devices that will help reach that goal. Method proposed in this paper is based on principle that suggests identifying deviations by using voltage diagrams. Part of MATLAB Simulink package, `psb1rcompenssed`, and simulation scheme are considered to be flexible because of their ability to show both normal operation mode (normal state) and disturbance mode (fault processes). Its main advantage is that, in addition to accuracy it has in voltage change simulation, it also enables the improvement of both the network model and the program. Some of its special advantages include

detailed insight into all components of the model and the program, and the ability to make various changes, which would otherwise be impossible to make using available software packages.

Keywords: *electrical grid, quality, voltage disturbance, compensation, voltage regulation*

1. UVOD

Nominalni napon mreže je definisan u IEC 60038 [1] kao „napon sa pripadnim karakteristikama kojim je obeležena mreža/postrojenje“. Uređaji u mrežama sa nominalnim naponom do 1 kV moraju da odgovore svim tehničkim zahtevima za nominalni napon mreže, kako u odnosu na režim, tako i za nivo izolacije.

U mnogim državama sveta dozvoljena je promena napona na uvodnim klemama u opsegu do $\pm 5\%$ garantovane nominalne vrednosti (u nekim državama i do $\pm 6\%$). IEC i nacionalni standardi [2] preporučuju da se NN oprema projektuje i ispita njeno funkcionisanje pri promeni napona u opsegu $\pm 10\%$ nominalnog napona [3].

Iako se u nacionalnim normama mnogih zemalja na nivou VN (visokih), NN (niskih) i SN (srednjih) napona preporučuju vrednosti odstupanja od $\pm 5\%$ napona, te vrednosti su prema IEC 60038 [1] standardizovane samo za trofazne četvorožične NN sisteme, pa je iz tih tazloga u EU od 2008. godine dozvoljeno odstupanje mreža do 230V/400V+10%/-10%. Međutim, postavlja se pitanje na kom nivou napona treba ostvariti regulaciju odstupanja napona od propisanih, u zavisnosti od strukture mreže i karakteristika opreme (ako režim pretežno određuje faktor snage opterećenja). Odstupanje napona na sabirnicama u razvodnom postrojenju prenosi se u elektroenergetsku mrežu standardnih napona i zato, za smanjenje odstupanja IEC standardi predviđaju tri grupe metoda i uređaja i to:

- centralna regulacija napona u centru napajanja koja se koristi za mreže sa homogenim opterećenjima,
- diferencirana-lokalna regulacija napona u određenim delovima mreže sa linijskim regulatorima koji su uključeni na posebnu grupu vodova za mreže nivoa 6-20 kV (za sabirnice pojedinih sekcija), i
- treća grupa je predviđena za distributivne mreže sa pretežno nehomogenim opterećenjima koja se napajaju iz distributivnih transformatora spojenim na zajedničke sabirnice [4].

Sa teorijskog aspekta, za obezbeđenje potrebnog nivoa i oblika napona prijemnika može se koristiti:

- regulacija napona na sabirnicama u centru napajanja,
- promena impedansi pojedinih elemenata u mreži,
- promena vrednosti reaktivne struje koja prolazi kroz mrežu,
- promena prenosnog odnosa distributivnih transformatora i autotransformatora (linijski regulatori) [5].

Za primenu nabrojanih metoda potrebna su posebna tehnička sredstva kao što su transformatori sa regulatorima primarnog napona, RPN i linijski regulatori i upravljanje baterijama kondenzatora.

Regulacija primarnog napona transformatora je prva mera centralizovane regulacije napona u distributivnoj mreži kada se u normalnim režimima ostvaruje regulacija u vreme u kome se očekuje povećanje ili sniženje opterećenja u (MW). Iako se ova regulacija koristi u našim distributivnim preduzećima, ona nije celishodna i treba je koristiti samo ako posebni tehnološki procesi zahtevaju visok kvalitet napona (električne peći).

Ako su poznate aktivne i reaktivne snage u nekoj tački dalekovoda i naponi ili dijagrami napona na početku voda, odstupanja napona u toj tački se mogu odrediti po metodu koji je izveden iz zavisnosti između snage koju prenosi vod i napona u tački gde je priključen konzum [6,7].

2. METOD PRORAČUNA ODSUPANJA NAPONA POMOĆU NAPONSKIH DIJAGRAMA

Dijagrami napona su funkcije napona u zavisnosti od prividne snage koje su izražene u jediničnim vrednostima (per unit sistem) $U_{*p} = f(s)$ ako su i impedanse voda z_{*p} i napona izvora U_{*i} izražene u p.u. sistemu. Na slici 1 su dati dijagrami $U_{*p} = f(s)$ za radijalne mreže ili za mreže sa paralelnim vodovima koji se mogu svesti na radijalne.

Svi proračuni povezani sa korišćenjem funkcija $U_{*p} = f(s)$ su zasnovani na poznatim relacijama:

$$S_b = \sqrt{3}U_b I_b, z_b = \frac{U_b}{\sqrt{3}I_b}10^3 = \frac{U_b^2}{S_b}10^3, z_* = \frac{Z}{Z_b} = Z \frac{S_b}{U_b^2}10^3 \quad (1)$$

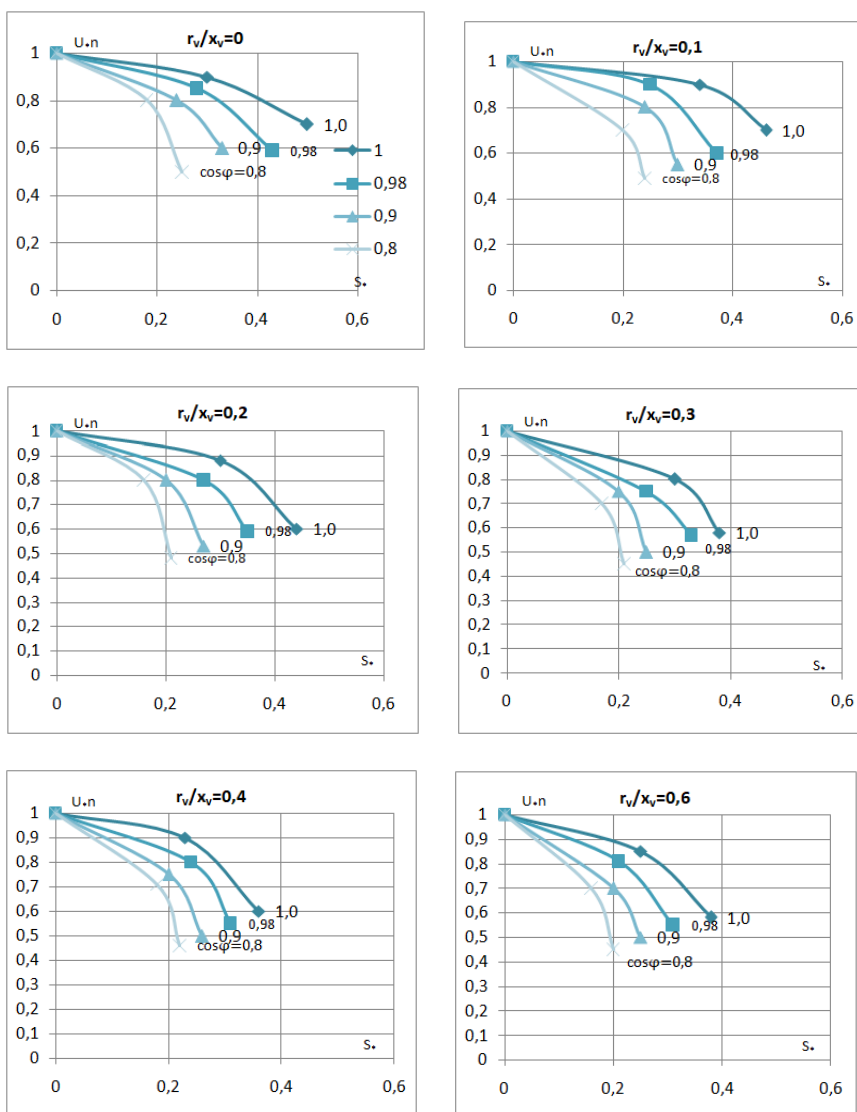
gde su S_b , U_b , I_b , Z_b fazne vrednosti snage u (VA), napona u (V), struje u (A) i impedanse u (Ω), z_* puna impedansa voda u jediničnim (p.u.) vrednostima.

Iz relacije (1) za punu vrednost impedanse se dobija:

$$z_*' = z_* \frac{S_b'}{S_b} \left(\frac{U_b}{U_b'} \right)^2 \quad (2)$$

Relacija (2) omogućava proračun i prelazak na računanje sa jedne od baznih vrednosti impedanse z_*' na drugu sa indeksom ($'$). Ova relacija se može napisati u sledećem obliku:

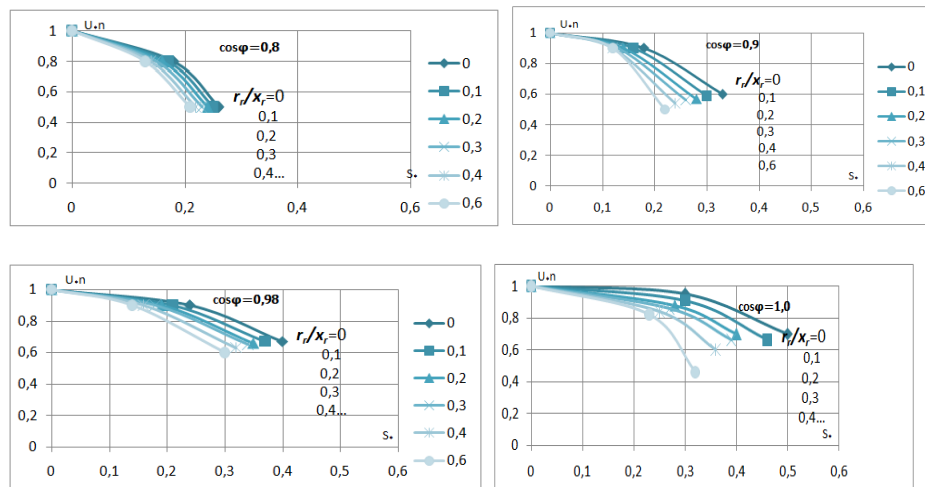
$$S'_b = S_b \frac{z'_*}{z} \left(\frac{U'_b}{U_b} \right)^2 \quad (3)$$



Sl. 1. Dijagram $U_{*p} = f(s)$ za radialne mreže ili za mreže koje se mogu svesti na radialne

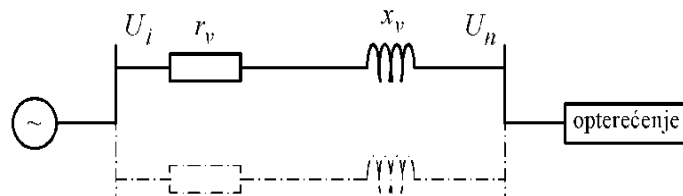
Na slici 2 su konstruisani dijagrami pod pretpostavkom da je jedinična impedansa kola u p.u. sistemu jednaka jedinici, pa se i u relaciji (2) može staviti $z'_* = 1$. Ako se takođe pretpostavi da je $U_b = U'_b$ dobijamo:

$$S'_b = \frac{S_b}{z_*} \quad (4)$$



Sl. 2. Funkcionalna zavisnost $U_{*p} = f(s)$ za paralelne vodove istih karakteristika

Primena metode sličnosti proizilazi iz saznanja da električne mreže na nivou potrošnje rade kao otvorene mreže i mogu se svesti na strukturu prikazanu na slici 3 (bez dela koji je označen isprekidanom linijom).

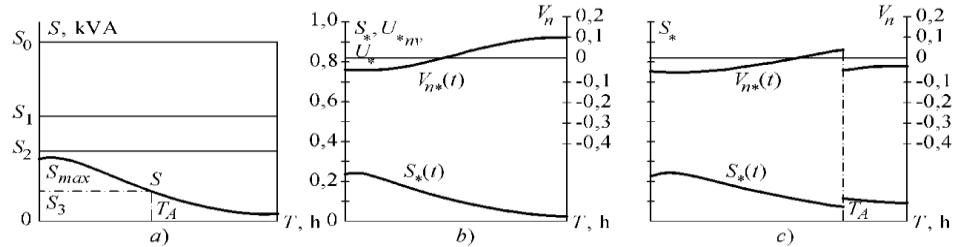


Sl. 3. Najjednostavnija električna mreža (radijalna)

Za ilustracije primene priloženog metoda izabran je idealni primer kada je efektivna vrednost napona izvora nepromenljiva $U_i = const.$, sredstava za regulaciju napona u mreži nema, a koeficijent snage opterećenja (potrošnje) k_s u toku perioda od jedne godine se ne menja-ostaje neizmenjen.

Bazna vrednost snage S_b je snaga izvora ili veća od nje $S_b \geq S_i$, kao i bazni napon $U_b \geq U_i$. Iz vrednosti r_v i x_v , slika 2, računa se vrednost impedanse voda z_v i svodi na bazne uslove prema relaciji (1).

Iz relacije (4) određuje se nova vrednost bazne snage S'_b za koju će jedinična vrednost impedanse kola biti jednaka 1. Prema dijagramu opterećenja S_t predstavljenom na slici 4.a) dobija se dijagram opterećenja u p.u. sistemu, slika 4.b), $S_*(t) = S(t)/S'_b$. Dalje se koriste dijagrami na slici 2 i ako se kao parametar usvoji vrednost faktora snage $\cos\varphi$, bira se dijagram koji u traženoj šemi odgovara vrednosti r_v/x_v . Za izabrani dijagram i zavisnost $S_*(t)$ konstruiše se na slici 4.b) dijagram odstupanja napona za tačku u kojoj je priključeno opterećenje V_p .



Sl. 4. a) Dijagram opterećenja $S_*(t)$, b) dijagram opterećenja u p.u. sistemu, c) funkcija odstupanja napona $V_p(t)$ u čvoru potrošnje

U p.u. sistemu, u svakom trenutku vrednost V_p se određuje po kriterijumu pada napona kao razlika:

$$V_p = \frac{U_{*p}U_b - U_n}{U_n} \quad (5)$$

gde je U_n nazivni (*nominalni) napon analizirane distributivne mreže.

Posle analize ovog primera mogu se razmatrati složeniji slučajevi regulacije napona. Ako se prepostavi da se u prethodno razmatranoj šemi mreže, slika 3, može realizovati stepenasta regulacija napona (na primer u čvoru u kome je priključen konzum, suprotnoj tački voda u odnosu na tačku gde je izvor napajanja), napon na početku voda, zavisno od potrošnje, može da bude jednak nominalnom ili da od njega bude veći za 5-10% [2]. Tada se, za proračun moraju zadati dve vrednosti baznog napona U_{b1} i U_{b2} od kojih svaka odgovara jednoj od vrednosti napona izvora U_1 (kV) i U_2 (kV). Proračuni se izvode prema relacijama (2-4) a referentni dijagram je dijagram napona $V_n(t)$ na slici 4.c).

Kada postoji fina regulacija napona a regulator priključen redno na vod, mora se uzeti u obzir korekcija impedanse voda za vrednost impedanse

regulacionog uređaja i to kao da je na impedansu voda priključen redno vezani element ΔZ_v . Pored te korekcije taj slučaj se ni u čemu drugom ne razlikuje od prethodnog. Ako se regulacija napona izvodi izmenom snage paralelno uključene baterije kondenzatora konzuma potrošnje, za svaku od mogućih vrednosti $\cos\varphi$ se mogu konstruisati funkcije odstupanja napona $V_p(t)$. Za to se mogu koristiti krive na slici 2, ali se mora uzeti u obzir promena snage S_* koja je povezana sa promenom snaga baterije kondenzatora.

3. REGULACIJA NAPONA I KOMPENZACIJA REAKTIVNE SNAGE POMOĆU KONDENZATORSKIH BATERIJA

Naponi i gubici snage zavise od raspodele aktivnih i reaktivnih snaga između izvora, vodova i transformatora u ograncima mreže i njihovih karakteristika, zbog čega su važne i sledeće dopunske, detaljnije mere [8]:

- potrošači sa vremenski promenljivim opterećenjem treba da se priključuju direktno na jaku mrežu,
- potrebno je smanjenje induktivne reaktanse vodova i povećanje snage transformatora u mreži,
- raspoređivanje potrošača sa većim opterećenjem na posebne vodove,
- ograničenje polazne struje u elektromotornim pogonima,
- automatska regulacija pobuda sinhronih motora velike snage,
- primena paralelnog rada više vodova i više transformatora gde je to moguće,
- karakteristična opterećenja treba da se napajaju iz posebnih vodova, i
- potrebna je redna i kapacitivna kompenzacija na vodovima većih induktivnih reaktansi i opterećenja.

Predpostavka je da se bez kondenzatora za rednu kompenzaciju može preći sa napona U_1 na napon U_2 . Uz parametre koji su isti i za mrežu sa kondenzatorom i bez njega i referentnom jednačinom za stabilan prenos snage dobija se:

$$\frac{E_1 U_1}{x_{k1} + x_{v1}} \sin \theta = \frac{E_2 U_2}{x_{k2} + x_{v2} (1 - k)} \sin \theta \quad (6)$$

gde su x_{v1} i x_{v2} induktivne reaktanse u prvoj i drugoj varijanti a x_{k1} i x_{k2} reaktanse krajnjih uređaja (terminala).

Prema relaciji (6) stepen kompenzacije sa redno spojenim kondenzatorom pokazuje da je to najekonomičnije rešenje za zadate snage opterećenja na zadatom rastojanju.

Koeficijent snage opterećenja (potrošnje) k_s je:

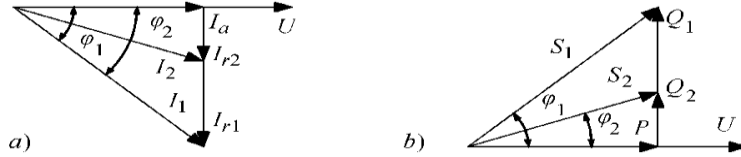
$$k_s = \frac{x_{k1} + x_{v1}}{x_{v2}} \left(\frac{x_{k2} + x_{v2}}{x_{k1} + x_{v1}} - \frac{U_2^2}{U_1^2} \right) \quad (7)$$

Induktivne reaktanse terminalnih uređaja za prvu i drugu varijantu x_{k1} i x_{k2} spojene su relacijama:

$$\frac{U_2^2}{U_1^2} \sin \theta = \frac{x_{k2} + (1 - k_s)x_{v2}}{x_{k1} + x_{v1}}, \quad x_{k1} = x_{k2} \frac{U_1^2}{U_2^2} \quad (8)$$

Lokalna regulacija napona primenom kondenzatorskih baterija se koristi u mreži sa većim reaktivnim snagama samo ako je kondenzator u stanju da proizvede dovoljnu vrednost reaktivne snage [9].

Kompenzacija reaktivne snage je mera koja daje brojne tehničke efekte, a investicija uložena u te mere se brzo vraća i višestruko isplati. Analize su pokazale da bi se kompenzacijom reaktivne snage na nivo $\cos \varphi = 0,95$ smanjili gubici u distributivnoj mreži za 15%. U nekim delovima smanjenje gubitaka bi bilo i veće, jer je faktor snage nizak. Pored regulisanja napona, kompenzacija reaktivne snage, tj. proizvodnja te snage, kod kupca smanjuje i reaktivnu snagu prenetu vodovima, a time i struju. Gubitak je srazmeran kvadratu struje; smanjenjem struje smanjuju se gubici snage i energije. Odnosi gubitaka pre i posle kompenzacije ustanoviće se iz vektorskih dijagrama na slici 5.a) i 5.b).



Sl. 5. a) Dijagram fazora struja, b) dijagram trougao snaga

Gubitak snage pre kompenzacije je:

$$\Delta P_1 = k \cdot R \cdot I_1^2 \quad (9)$$

Kompenzacijom reaktivne snage, odnosno proizvodnjom dela reaktivne struje iz kompenzatora $I_C = I_{r1} - I_{r2}$ smanjuje se vodom proticana reaktivna struja sa I_{r1} na I_{r2} , odnosno prividna struja sa I_1 na I_2 tako da su gubici snage nakon kompenzacije:

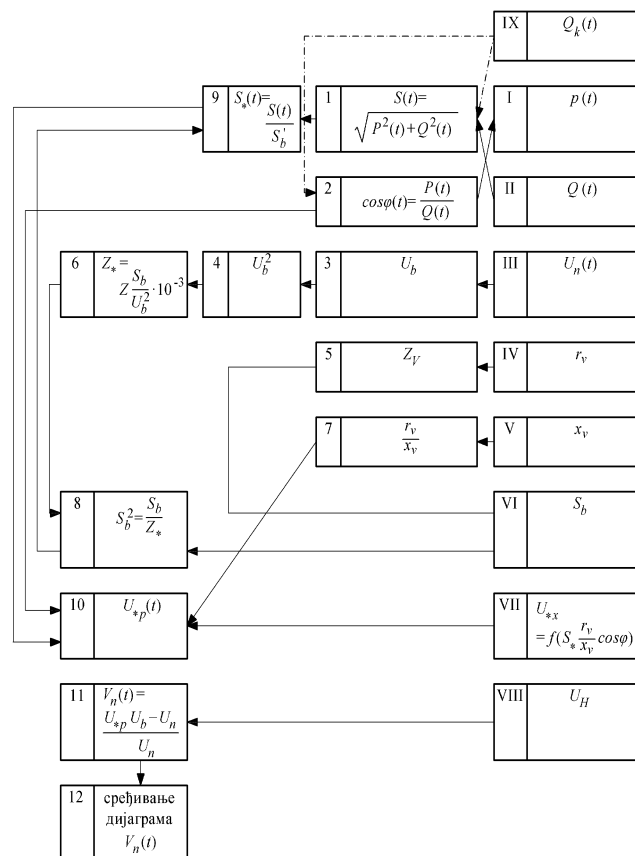
$$\Delta P_2 = k \cdot R \cdot I_2^2 \quad (10)$$

Izjednačenjem vrednosti za aktivnu komponentu struje $I_a = I_1 \cdot \cos \varphi_1$ и $I_a = I_2 \cdot \cos \varphi_2$ koja je pre i posle kompenzacije ostala nepromenjena, dolazi se do gubitka snage posle kompenzacije:

$$\Delta P_2 = \Delta P_1 \cdot \frac{\cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2} \quad (11)$$

Za regulaciju napona i kompenzaciju snage odnos gubitaka pre i posle kompenzacije je obrnuto proporcionalan kvadratima faktora snage koji važe pre i posle kompenzacije. Elementi rednog rezonantnog kola, zbog povećanja struja i (padova) napona rezonantnog harmonika, trpe preopterećenja po struji i povišene napone, tako da ukupne vrednosti struje i napona mogu premašiti najviše dozvoljene vrednosti. U tom smislu su posebno ugroženi kondenzatori.

Proračun uz podršku računara i Dijagram toka proračuna prikazan je na slici 6. Traženi podaci označeni su rimskim brojevima a redosled arapskim. Isprekidane linije pokazuju mogućnost regulacije snage kondenzatorskih baterija prema vrednostima odstupanja napona.



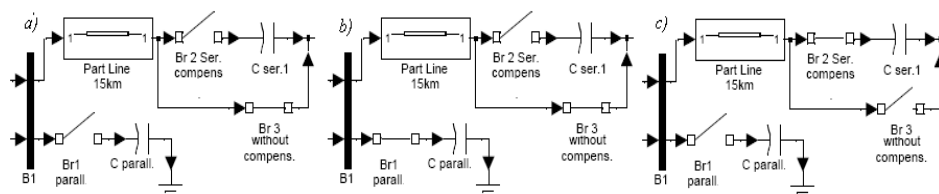
Sl. 6. Postupak proračuna odstupanja napona i drugih potrebnih vrednosti uz pomoć računara

4. MODEL SIMULACIJE I REZULTATI

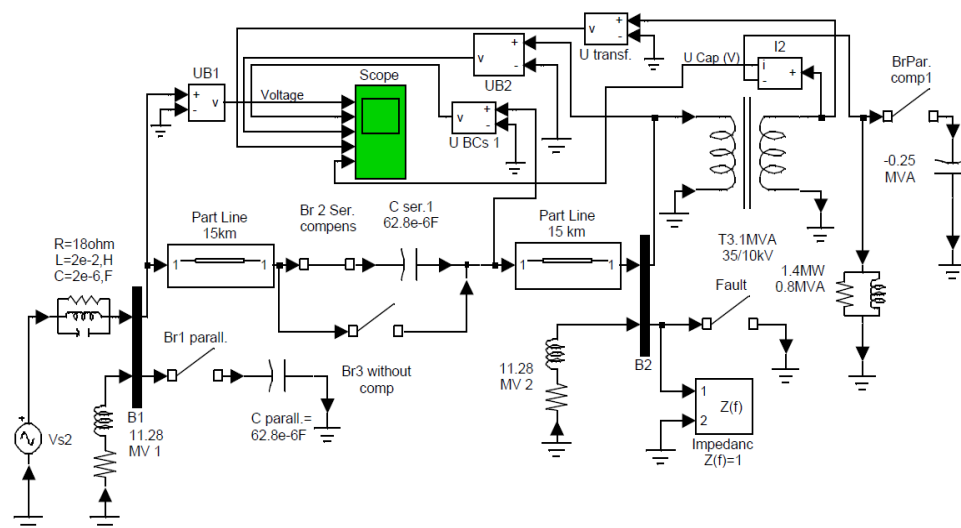
Priprema računarskih programa u metodu organizovanog modelovanja se u tehničkoj literaturi naziva predprocesiranjem (formiranje modela tehničkog sistema). Sistem prethodno izvedenih jednačina se lako implementira u blokove koje nudi softverski paket MATLAB Simulink [10]. Program za simulaciju je realizovan prema šemama datim na slici 7 i 8 u novom subprogramu “psb1rcompensed.mdl”. Prednost simulacije u odnosu na praktičan model je u tome što je ona potpuno bezopasna, kako za pogonski sistem, tako i za personal, a pri tome se dobijeni rezultati veoma dobro slažu sa realnim stanjem i procesima.

Simulaciona šema na slikama 7 i 8 sadrži sledeće parametre: kapacitivno opterećenje za potencijalnu kompenzaciju faktora snage, NN i SN nivo napona, dužine deonice od po 15 km, dva opterećenja od 11 MVA, transformator 1,6 MVA i 35/0,4 kV i LR opterećenje na NN nivou od 1,6 MVA.

U šemama na slikama 7 i 8 simuliran je proces u odnosu na predpostavljeni faktor snage svih opterećenja, $\cos\varphi \approx 0,88$. Takođe je predpostavljena i pozicija uređaja za regulaciju napona kao i kompenzacije: a) bez kompenzacije, b) sa paralelnom kompenzacijom na sabirnicama B1 i c) sa rednom kompenzacijom na sredini voda, mesto Cs.



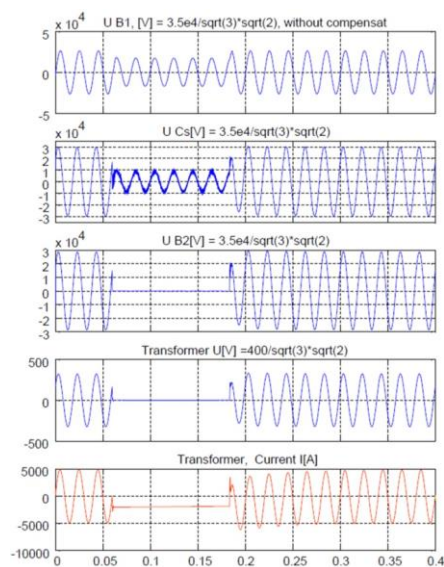
Sl. 7. Položaj sklopki u šemi pomoću koje je ostvarena simulacija kompenzacije u radialnoj mreži 35/10 kV: a) mreža bez kompenzacije, b) kompenzacija sa paralelnom spojenim vezom i c) kompenzacija sa redno spojenom baterijom kondenzatora kapacitivnosti $C = 62,8 \mu F$



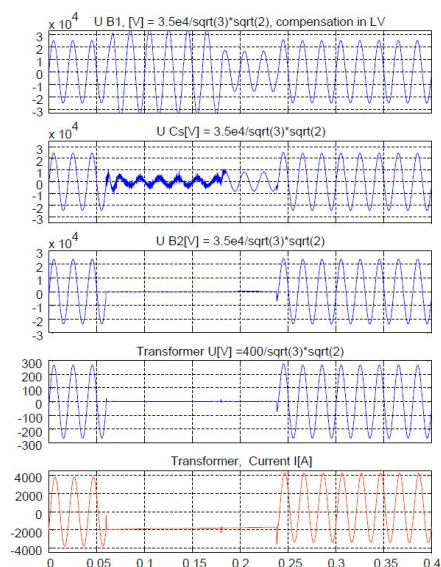
Sl. 8. Šema simulacije procesa u radijalnoj mreži kompenzovanoj pomoću baterije kondenzatora

U režimu rada u kome su tri faze VN i SN radijalne mreže nejednako opterećene, mera za povećanje kvaliteta je povećanje pouzdanosti, ali je ona tehnički ograničena. Razlog ograničenja su nejednake fazne struje i struje koje otiču ka zemlji, otkloni i nesimetrije napona na opterećenjima, viši harmonici, i dr. Analiza i prikazani oblik dijagrama na slici 9 pokazuju da je najbolji efekat regulisanja odstupanja napona i kompenzacije varijanta šeme pod c) redna kompenzacija, na SN nivou na sredini voda, mesto Cs. Oblik dijagrama i vrednosti napona na SN i NN nivou na slici 9.d) to i potvrđuju.

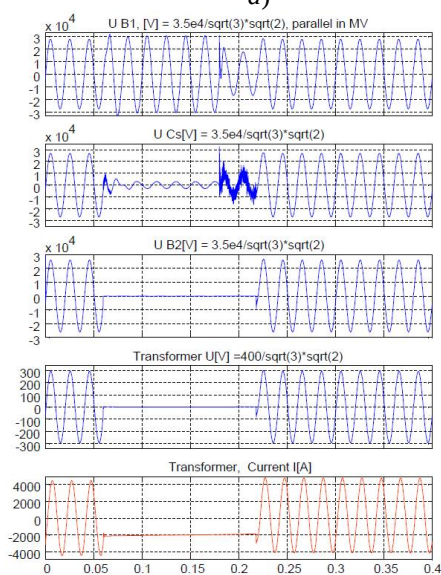
Zbog složenosti postupka kompletna analiza mreže i svi proračuni nisu u ovom radu mogli biti opisani. Raspoloživi su samo analiza i proračun za izabrani primer radijalne mreže posebno, isključivo preko matematičkih modela i uz podršku računara. Za složenije slučajeve na raspolaganju je podrška računara čiji se program može uraditi pomoću dijagrama toka prikazanog na slici 6.



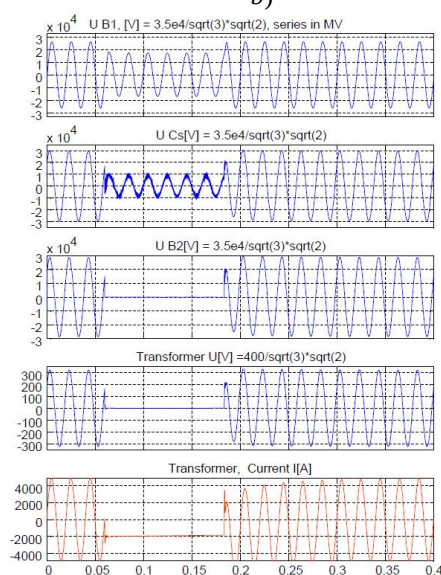
a)



b)



c)



d)

Sl. 9. Dijagram struja i napona: a) bez kompenzacije, b) sa kompenzacijom na NN nivou, c) paralelna kompenzacija na SN nivou, d) redna kompenzacija na SN nivou na sredini voda

5. ZAKLJUČAK

Osnovni problem koji se javlja pri projektovanju je kako stvoriti što verniji matematički model oslonjen na što tačniju strukturu elektroenergetske mreže u kojoj se mogu analizirati promene u normalnom režimu i režimu poremećaja. Na NN nivou (široka potrošnja) se sve više povećava potrošnja reaktivne energije. Pojava je vezana za visoke temperature u letnjem periodu, kada se koriste rashladni uređaji. Nadležna distributivna preduzeća u ovim periodima imaju velike tehničke gubitke u mrežama. Pored tehničkih, povećavaju se i komercijalni gubici, jer distributivno preduzeće kupuje reaktivnu energiju, a kupac nije u obavezi da je plaća pošto ima brojilo za merenje aktivne energije. Problem se rešava ugradnjom kondenzatorskih baterija i uz mala ulaganja dobija se veći efekat kompenzacije.

Realna elektrodistributivna mreža se razlikuje od idealne mreže, pored ostalog i zato što se neprestano menja faktor snage ($\cos\varphi$) potrošnje. To unosi velike teškoće u proračune i analize naponskih režima rada realnih distributivnih mreža, ali se teškoće mogu prevazići uz podršku računara. Iz analize osnovne strukture električne mreže (uz izvesna saznanja o efikasnosti napajanja usvojene strukture električne mreže) omogućava se dobijanje kriterijuma za ocenu kvaliteta napona na izabranom čvoru opterećenja.

Mora se primetiti da se pri rešavanju praktičnih zadataka redovno moraju apostrofirati ne jedan nego dva domena dozvoljenih vrednosti odstupanja napona: jedan je za stanje $j = 0$, a drugi za stanje $j \neq 0$, pri čemu je druga oblast uvek šira od prve, pošto tada deluju normativne preporuke koje dozvoljavaju povećanje domena odstupanja napona u režimima posle kvarova.

LITERATURA

- [1] Standard IEC 60038, International Electrotechnical Commission-IEC Standards, <http://www.iec.ch/>
- [2] N.A. Marković, S.N. Bjelić, Zaštita od opasnog dejstva električnog napona (prenapona) – odabrana poglavlja, Kvar, Kraljevo, 2020, 25–47.
- [3] ISS, Institut za standardizaciju Srbije, <http://www.iss.rs/standard/>
- [4] M. Tanasković, T. Bojković, D. Perić, Distribucija električne energije, Akademska misao, Beograd, 2010.
- [5] S. Bjelić, Protection Techniques in Electrical Energy Networks, Kvar, Kraljevo, 2018.
- [6] S. Bjelić, N. Marković, Tehnika relejne zaštite, Kvar, Kraljevo, 2017.

- [7] S. Bjelić, N. Marković, U. Jakšić, B. Jovanović, B. Prlinčević, MATLAB application for analysis and evaluation of electric energy transmission stability of long transmission lines, (2017) 160–165.
- [8] S. Bjelić, Z. Bogićević, Analyses of changes in power system elements - AI-based method and mathematical model for analysis of current and voltage in elements of power systems, LAP LAMBERT Academic Publishing, September 2016.
- [9] A.S. Jović, LM. Korunović, Uticaj kondenzatorskih baterija na struju opterećenja distributivnih transformatora, Tehnika – Elektrotehnika 66 (2017) 4, 554–562.
- [10] MATLAB SIMULINK Sim Power System, Copyright 1984-2002 The Math Works, Version 6.5.0,180913a, June 2, 2000.

UPUTSTVO AUTORIMA

Časopis BAKAR izlazi dva puta godišnje i objavljuje naučne, stručne i pregledne radove. Za objavljivanje u časopisu prihvataju se isključivo originalni radovi koji nisu prethodno objavljivani i nisu istovremeno podneti za objavljivanje negde drugde. Radovi se anonimno recenziraju od strane recenzenta posle čega uredništvo donosi odluku o objavljivanju. Rad priložen za objavljivanje treba da bude pripremljen prema dole navedenom uputstvu da bi bio uključen u proceduru recenziranja. Neodgovarajuće pripremljeni rukopisi biće vraćeni autoru na doradu.

Obim i font. Rad treba da je napisan na papiru A4 formata (210x297 mm), margine (leva, desna, gornja i donja) sa po 25 mm, u Microsoft Wordu novije verzije, fontom Times New Roman, veličine 12, sa razmakom 1,5 reda, obostrano poravnat prema levoj i desnoj margini. Preporučuje se da celokupni rukopis ne bude manji od 5 strana i ne veći od 10 strana.

Naslov rada treba da je ispisan velikim slovima, bold, na srpskom i na engleskom jeziku. Ispod naslova rada pišu se imena autora i institucija u kojoj rade. Autor rada zadužen za korespondenciju sa uredništvom mora da navede svoju e-mail adresu za kontakt u fusnoti.

Izvod se nalazi na početku rada i treba biti dužine do 200 reči, da sadrži cilj rada, primenjene metode, glavne rezultate i zaključke. Veličina fonta je 10, italic.

Glavne reči se navode ispod izvoda. Treba da ih bude minimalno 3, a maksimalno 6. Veličina fonta je 10, italic.

Izvod i glavne reči treba da budu date i na engleski jezik.

Osnovni tekst. Radove treba pisati jezgrovito, razumljivim stilom i logičkim redom koji, po pravilu, uključuje uvodni deo s određenjem cilja ili problema rada, opis metodologije, prikaz dobijenih rezultata, kao i diskusiju rezultata sa zaključcima i implikacijama.

Glavni naslovi trebaju biti urađeni sa veličinom fonta 12, bold, sve velika slova i poravnati sa levom marginom.

Podnaslovi se pišu sa veličinom fonta 12, bold, poravnato prema levoj margini, velikim i malim slovima.

Slike i tabele. Svaka ilustracija i tabela moraju biti razumljive i bez čitanja teksta, odnosno, moraju imati redni broj, naslov i legendu (objašnjenje oznaka, šifara, skraćenica i sl.). Tekst se navodi ispod slike, a iznad tabele. Redni brojevi slika i tabela se daju arapskim brojevima.

Reference u tekstu se navode u ugličastim zagradama, na pr. [1,3]. Reference se prilažu na kraju rada na sledeći način:

[1] B.A. Willis, Mineral Processing Technology, Oxford, Pergamon Press, 1979, str. 35. (za poglavlje u knjizi)

[2] H. Ernst, *Research Policy*, 30 (2001) 143–157. (za članak u časopisu)

[3] www: <http://www.vanguard.edu/psychology/apa.pdf> (za web dokument)

Navođenje neobjavljenih radova nije poželjno, a ukoliko je neophodno treba navesti što potpunije podatke o izvoru.

Zahvalnost se daje po potrebi, na kraju rada, a treba da sadrži ime institucije koja je finansirala rezultate koji se daju u radu, sa nazivom i brojem projekta; ili ukoliko rad potiče iz magistarske teze ili doktorske disertacije, treba dati naziv teze/disertacije, mesto, godinu i fakultet na kojem je odbranjena. Veličina fonta 10, italic.

Radovi se šalju prevashodno elektronskom poštom ili u drugom elektronskom obliku.

Adresa uredništva je:

Časopis BAKAR

Institut za rudarstvo i metalurgiju

Zeleni bulevar 35, 19210 Bor

E-mail: nti@irmbor.co.rs ; ana.kostov@irmbor.co.rs

Telefon: 030/454-260; 030/454-108

Svim autorima se zahvaljujemo na saradnji.

INSTRUCTIONS FOR THE AUTHORS

COPPER Journal is published twice a year and publishes the scientific, technical and review paper works. Only original works, not previously published and not simultaneously submitted for publications elsewhere, are accepted for publication in the journal. The papers are anonymously reviewed by the reviewers after that the Editorial decided to publish. The submitted work for publication should be prepared according to the instructions below as to be included in the procedure of reviewing. Inadequate prepared manuscripts will be returned to the author for finishing.

Volume and Font Size. The paper needs to be written on A4 paper (210x297 mm), margins (left, right, top and bottom) with each 25 mm, in the Microsoft Word later version, font Times New Roman, size 12, with 1.5 line spacing, justified to the left and right margins. It is recommended that the entire manuscript cannot be less than 5 pages and not exceed 10 pages.

Title of Paper should be written in capital letters, bold, in Serbian and English. Under the title, the names of authors and their affiliations should be written. Corresponding author must provide his/her e-mail address for contact in a footnote.

Abstract is at the beginning of the paper and should be up to 200 words include the aim of the work, the applied methods, the main results and conclusions. The font size is 10, italic.

Keywords are listed below the abstract. They should be minimum 3 and maximum of 6. The font size is 10, italic.

Abstract and Keywords should be also given in English language.

Basic Text. The papers should be written concisely, in understandable style and logical order that, as a rule, including the introduction part with a definition of the aim or problem of the work, a description of the methodology, presentation of the obtained results as well as a discussion of the results with conclusions and implications.

Main Titles should be done with the font size 12, all capital letters and aligned to the left margin.

Subtitles are written with the font size 12, bold, aligned to the left margin, large and small letters.

Figures and Tables. Each figure and table must be understandable without reading the text, i.e., must have a serial number, title and legend (explanation of marks, codes, abbreviations, etc.). The text is stated below the figure and above the table. Serial numbers of figures and tables are given in Arabic numbers.

References in the text are cited in square brackets, e.g. [1,3]. References are enclosed at the end of the paper as follows:

[1] B.A. Willis, Mineral Processing Technology, Oxford, Pergamon Press, 1979, p. 35. (*for the chapter in a book*)

[2] H. Ernst, *Research Policy*, 30 (2001) 143–157. (*for the article in a journal*)

[3] <http://www.vanguard.edu/psychology/apa.pdf> (*for web document*)

Citation of the unpublished works is not preferable and, if it is necessary, as much as possible completed data source should be listed.

Acknowledgement is given, as needed, at the end of the paper and should include the name of institution that funded the given results in the paper, with the project title and number; or if the work is resulted from the master thesis or doctoral dissertation, it should give the title of thesis/dissertation, place, year and faculty/university where it was defended. Font size is 10, italic.

The manuscripts are primarily sent by e-mail or in other electronic form.

Editorial Address: Journal COPPER
Mining and Metallurgy Institute Bor
35 Zeleni bulevar, 19210 Bor
E-mail: nti@irmbor.co.rs; ana.kostov@irmbor.co.rs
Telephone: +381 30/454-260; +381 30/454-108

We are thankful for all authors on cooperation.

SADRŽAJ
CONTENS

Dragana Adamović, Tamara Urošević, Bojan Radović, Marija Milivojević,
Ivona Bezeg-Romić, Stefan Đordjević, Zorica Sovrlić

**FITOREMEDIJACIONI POTENCIJAL VRBE U UKLANJANJU
TEŠKIH METALA IZ ŽIVOTNE SREDINE**

PHYTOREMEDIATION POTENTIAL OF WILLOW IN REMOVING
HEAVY METALS FROM THE ENVIRONMENT1

Viša Tasić, Aca Božilov, Ivan Lazović, Nikola Mirkov

**MERENJE KONCENTRACIJA CO₂ U UNUTRAŠNJEM VAZDUHU
OBJEKATA PRIMENOM LOW-COST SENZORA I MONITORA**

MEASUREMENT OF CO₂ CONCENTRATIONS IN INDOOR AIR USING
LOW-COST SENSORS AND MONITORS 11

Viša Tasić, Mira Cocić, Bojan Radović, Aca Božilov, Tatjana Apostolovski-Trujić

**PROCENA UTICAJA SPOLJAŠNJEG ZAGAĐENJA SUSPENDOVANIM
ČESTICAMA NA KVALITET UNUTRAŠNJEG VAZDUHA NA
TEHNIČKOM FAKULTETU U BORU**

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL POLLUTION BY
SUSPENDED PARTICLES ON INDOOR AIR QUALITY AT
THE TECHNICAL FACULTY IN BOR 19

Vesna M. Marjanović, Radmila Marković

**MOGUĆNOST PRIMENE PROCESA STABILIZACIJE/SOLIDIFIKACIJE
OTPADNIM MATERIJALIMA BOGATIM ARSENOM GENERISANIH U
TOPIONICAMA BAKRA**

POSSIBILITY OF APPLYING THE STABILIZATION / SOLIDIFICATION
PROCESS ON ARSENIC-RICH WASTE MATERIALS FORMED IN
COPPER SMELTING PLANTS29

Slavica Miletić, Zdenka Stanojević-Šimšić, Ana Kostov, Emina Požega

SWOT ANALIZA – INSTRUMENT ZA EFIKASNO UPRAVLJANJE

SWOT ANALYSIS - AN INSTRUMENT FOR EFFICIENT MANAGEMENT41

Milan Radivojević

LINIJSKA KOORDINACIJA RADA SEMAFORA

LINE COORDINATION OF TRAFFIC LIGHTS49

Nenad Marković, Slobodan Bjelić, Filip Marković

**POBOLJŠANJE KVALITETA NAPONA U ELEKTROENERGETSKIM
MREŽAMA KOMPENZACIJOM REAKTIVNE SNAGE POMOĆU
KONDENZATORSKIH BATERIJA**

THE IMPROVEMENT OF VOLTAGE QUALITY IN ELECTRO-ENERGETIC GRIDS
BY COMPENSATING REACTIVE POWER USING CAPACITOR BATTERIES57
