

**NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU FAKULTETA ZA FIZIČKU HEMIJU**

**Predmet:** Izveštaj Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata  
Mirjane Čujić, master fizikohemičara

Odlukom Nastavno-naučnog veća Fakulteta za fizičku hemiju, sa II redovne sednice održane 13. novembra 2015. godine, imenovani smo za članove Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata **mastera fizikohemičara Mirjane Čujić**, pod naslovom: **Radionuklidi i teški metali u zemljištu u okolini termoelektrane “Nikola Tesla” u Obrenovcu: faktori koji utiču na njihovu migraciju – prostorna distribucija – procena radijacionog uticaja na živi svet.**

Izrada doktorske disertacije pod navedenim naslovom odobrena je odlukom Nastavno-naučnog veća sa IX redovne sednice od 17. jula 2014. godine. Na osnovu te odluke, Veće naučnih oblasti prirodnih nauka Univerziteta u Beogradu je na svojoj IX sednici od 25. septembra 2014. godine dalo saglasnost da se prihvati predložena tema doktorske disertacije.

Kandidat Mirjana Čujić je urađenu doktorsku disertaciju predala Fakultetu za fizičku hemiju 8. juna 2015. godine. Na osnovu pregleda i analize te disertacije podnosimo Veću sledeći

**I Z V E Š T A J**

**A. Prikaz sadržaja disertacije**

Doktorska disertacija master fizikohemičara Mirjane Čujić je napisana na 146 strana, a u skladu sa *Uputstvom za oblikovanje doktorske disertacije Univerziteta u Beogradu*. Sastoji se od sledećih celina: *Sažetak* (4 strane), *Uvod* (2 strane), *Teorijske osnove* (27 strana), *Materijali i metode rada* (27 strana), *Rezultati i diskusija* (53 strane), *Zaključak* (4 strane), *Literatura* - 198 navoda (20 strana), *Prilozi* (5 strana), *Biografija* (2 strane). Disertacija sadrži 23 slike (od toga je 1 slika iz literature, a 23 slika predstavlja vlastite rezultate) i 26 tabela (od toga su 7 tabele sa podacima iz literature, a 19 tabela sa vlastitim rezultatima).

U delu *Sažetak*, na srpskom i engleskom jeziku, predstavljeni su problematika kojom se disertacija bavi i najvažniji zaključci.

U poglavlju *Uvod* kratko je opisana aktuelnost problematike koja je bila predmet istraživanja kao i cilj doktorske disertacije.

U poglavlju *Teorijske osnove* prikazano je poreklo radionuklida i teških metala u životnoj sredini, sa naglaskom na termoelektrane kao jedan od izvora kontaminacije životne sredine ovim elementima. Opisani su fizičko-hemijski faktori koji mogu uticati na njihovu migraciju, kao i značaj monitoringa radionuklida i teških metala u životnoj sredini. Prikazani su osnovi interpolacije podataka iz životne sredine, sa naglaskom na metodu kriginga. U daljem tekstu dat je uticaj jonizujućeg zračenja na živi svet (čoveka i biotu),

rizik, štetnost kao i zaštita od zračenja. Predstavljene su osnove softverskih modela za procenu doza zračenja na biotu (ERICA Tool i RESRAD BIOTA)

U poglavlju *Materijali i metode rada* opisani su: istraživani prostor, način sakupljanja i pripreme uzoraka, korišćene merne metode (gamaspektrometrija sa procenom merne nesigurnosti; plamena metoda atomske apsorpcione spektrometrije, način određivanja koncentracije teških metala itd.). Takođe je opisan postupak izračunavanja pokazatelja zagađenja zemljišta metalima, kao i korišćene statističke metode analize podataka (jednofaktorska analiza varijanse, hijerarhijska metoda grupisanja, geostatistička analiza), zatim postupak izračunavanja jačine doze i procena radijacionog rizika na čoveka. U ovom delu su opisani način izračunavanja doze zračenja na biotu korišćenjem softverskih modela.

U poglavlju *Rezultati i diskusija* su prikazani rezultati dobijeni na osnovu eksperimentalnih analiza sakupljenih uzoraka na istraživanom prostoru i rezultati dobijeni primenom softverskih modela. Sve to je praćeno diskusijom u kontekstu postavljenog cilja.

U delu *Zaključak* sumirani su svi zaključci izvedeni iz rezultata dobijenih u doktorskoj disertaciji.

## B. Opis rezultata teze

U ovoj disertaciji određene su: koncentracije aktivnosti radionuklida  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  i  $^{137}\text{Cs}$  metodom gamaspektrometrije; koncentracije teških metala Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, V i Zn metodom plamene atomske apsorpcione spektrometrije; fizičko-hemijske karakteristike (granulometrijski sastav, pH vrednost, specifična električna provodljivost ( $K$ ), sadržaj ukupnog organskog ugljenika ( $TOC$ ), količina karbonata ( $c_{CO_3}$ ), ukupni kapacitet izmene katjona u zemljištu ( $CEC$ )) u sakupljenim uzorcima zemljišta sa 95 lokacija u periodu 2011-2013. godine, u okolini termoelektrane „Nikola Tesla“ (TENT) u Obrenovcu.

Srednje vrednosti koncentracija aktivnosti ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) analiziranih radionuklida određene gamaspektrometrijskom metodom na istraživanom prostoru iznosile su:  $^{238}\text{U}$  ( $51\pm 4$ ),  $^{226}\text{Ra}$  ( $43\pm 4$ ),  $^{232}\text{Th}$  ( $47\pm 2$ ),  $^{40}\text{K}$  ( $560\pm 20$ ) i  $^{137}\text{Cs}$  ( $23\pm 1$ ). Masene koncentracije elemenata u uzorcima zemljišta iznosile su od 2,1 do 5,9  $\text{mg kg}^{-1}$  za U, od 5,8 do 15,0  $\text{mg kg}^{-1}$  za Th i od 1,2 do 2,4% za K. Srednje vrednosti koncentracija ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) teških metala određene atomskom apsorpcionom spektrometrijom iznosile su: Cd ( $0,2\pm 0,02$ ), Co ( $13,4\pm 1,3$ ), Cr ( $32,2\pm 2,0$ ), Cu ( $18,2\pm 1,2$ ), Fe ( $29030\pm 1100$ ), Mn ( $610\pm 50$ ), Ni ( $55,9\pm 2,2$ ), Pb ( $24,1\pm 1,9$ ), V ( $67,1\pm 2,6$ ) i Zn ( $79,6\pm 3,3$ ). Srednje vrednosti fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta na istraživanom prostoru određenih standardnim laboratorijskim metodama iznosile su: pesak (10,6 %), glina (29,3%), prah (60,1%), pH (6,85),  $K$  ( $130,6 \mu\text{S cm}^{-1}$ ),  $TOC$  (1,6%),  $c_{CO_3}$  (3,2%),  $CEC$  ( $49,9 \text{ cmol kg}^{-1}$ ).

Sa ciljem određivanja zagađenja zemljišta navedenim teškim metalima na istraživanom prostoru izračunati su sledeći parametri: faktor obogaćenja, geo-akumulacioni indeks, faktor kontaminacije i indeks zagađenja. Dobijeni rezultati ukazuju da postoji kontaminacija zemljišta na pojedinim lokacijama istraživanog prostora.

Prostorna distribucija radionuklida i teških metala na istraživanom prostoru izvršena je korišćenjem ArcGIS programa. Dobijeni rezultati pokazuju da je distribucija najviših vrednosti koncentracija aktivnosti  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$  u pravcu jugo-zapada u odnosu na TENT. Distribucija  $^{40}\text{K}$  pokazuje najviše vrednosti koncentracija aktivnosti na prostoru gde su zastupljeni planosoli, dok je distribucija  $^{137}\text{Cs}$  heterogena. Na osnovu mapa prostorne distribucije uočeno je da koncentracije Co, Fe i V imaju sličnu prostornu varijaciju. Najviše koncentracije Cd, Mn, Ni i Pb određene su u blizini deponija pepela. Najviše koncentracije Co, Cr, Cu i Zn nalaze se na prostoru između blokova A i B TENT.

Jačina doze gama-zračenja poreklom od  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  izračunata na osnovu koncentracija aktivnosti navedenih radionuklida kretala se u opsegu 41,9-94,9 nGy h<sup>-1</sup>, sa srednjom vrednošću od 75,3 nGy h<sup>-1</sup> izračunatoj za 95 lokacija istraživanog prostora. Dobijena srednja vrednost ukupne jačine doze u ovom radu nešto je viša u odnosu na svetski prosek (60 nGy h<sup>-1</sup>). Srednja vrednost godišnje efektivne doze iznosila je 92,4 μSv (51,4-116,4 μSv), što je znatno niže od maksimalno dozvoljene doze od 1 mSv za stanovništvo, ali je više od srednje vrednosti na svetskom nivou, koja prema Komisiji Ujedinjenih nacija za efekte jonizujućih zračenja (UNSCEAR 2010) iznosi 70 μSv za zračenje poreklom od prirodnih izvora na otvorenom prostoru. Srednja vrednost faktora rizika pojave kancera iznosi  $3,5 \times 10^{-4}$  i bliska je u poređenju sa svetskim prosekom prema UNSCEAR (2000) čija je vrednost  $2,9 \times 10^{-4}$ . Srednja vrednost indeksa radijacionog rizika usled terestrijalnog izlaganja ( $H_{ext}$ ) iznosi 0,44 (0,25-0,55). Vrednost ovog indeksa ukazuje na to da na istraživanom prostoru ne postoji značajan radijacioni rizik za stanovništvo usled zemljišnog izlaganja.

Primenom *ERICA Tool*-a, nivo 2, izvršeno je izračunavanje doza zračenja i procena radijacionog rizika na biotu istraživanog prostora. Prilikom izračunavanja doze zračenja na biotu korišćene su koncentracije aktivnosti radionuklida u zemljištu određene merenjima na istraživanom prostoru. Za referentne organizme, za koje je vršena procena, najveća doza zračenja usled spoljašnjeg izlaganja potiče od  $^{137}\text{Cs}$ , opsezi doza iznosili su  $9,00 \times 10^{-3}$  -  $3,10 \times 10^{-2}$  μGy h<sup>-1</sup>, i  $^{226}\text{Ra}$ , opsezi doza iznosili su  $1,08 \times 10^{-2}$  -  $5,46 \times 10^{-2}$  μGy h<sup>-1</sup>. Najviša doza zračenja usled unutrašnjeg izlaganja za referentne organizme potiče od  $^{226}\text{Ra}$  kod: glista, saprofitnih beskičmenjaka i letećih insekata ( $3,54 \times 10^{-1}$  μGy h<sup>-1</sup>); ptica ( $3,11 \times 10^{-1}$  μGy h<sup>-1</sup>); trava i bilja ( $1,47 \times 10^0$  μGy h<sup>-1</sup>); puževa ( $3,90 \times 10^{-1}$  μGy h<sup>-1</sup>) i žbunova ( $2,70 \times 10^0$  μGy h<sup>-1</sup>). Kod sisara (velikih i malih) najveći doprinos dozi zračenja usled unutrašnjeg izlaganja potiče od  $^{210}\text{Po}$  ( $1,32 \times 10^{-1}$  μGy h<sup>-1</sup>) i  $^{226}\text{Ra}$  ( $3,70 \times 10^{-1}$  i  $3,59 \times 10^{-1}$  μGy h<sup>-1</sup>). Briofite i lišajevi dozu usled unutrašnjeg izlaganja najviše dobijaju od  $^{210}\text{Po}$  ( $3,81$  μGy h<sup>-1</sup>),  $^{226}\text{Ra}$  ( $5,90$  μGy h<sup>-1</sup>),  $^{234}\text{U}$  ( $1,75$  μGy h<sup>-1</sup>) i  $^{238}\text{U}$  ( $1,54$  μGy h<sup>-1</sup>). Kod drveća najveća doza usled unutrašnjeg izlaganja potiče od  $^{210}\text{Po}$  ( $1,09 \times 10^{-1}$  μGy h<sup>-1</sup>). Ukupna doza zračenja (μGy h<sup>-1</sup>) usled terestrijalnog izlaganja za referentne organizme na istraživanom prostoru iznosila je kod: amfibija ( $6,25 \times 10^{-1}$ ), gliste ( $6,14 \times 10^{-1}$ ), saprofitni beskičmenjaci ( $5,15 \times 10^1$ ), ptice ( $3,75 \times 10^{-1}$ ), leteći insekti ( $4,62 \times 10^{-1}$ ), trave i bilje ( $2,93 \times 10^0$ ), lišajevi i briofite ( $1,44 \times 10^{+1}$ ), sisari – veliki ( $6,56 \times 10^{-1}$ ), sisari – mali ( $6,50 \times 10^{-1}$ ), puževi ( $5,92 \times 10^{-1}$ ), gmizavci ( $6,62 \times 10^{-1}$ ), žbunovi ( $3,68 \times 10^0$ ), drvo ( $2,66 \times 10^{-1}$ ). Preporučena skrining doza *ERICA Tool*-a iznosi 10 μGy h<sup>-1</sup>. Na istraživanom prostoru višu vrednost od skrining doze ima grupa lišajevi i briofite, za koje je procenjena ukupna doza zračenja 14,4 μGy h<sup>-1</sup>.

Primenom *RESRAD BIOTA*-e, nivo 3, izvršeno je izračunavanje doza zračenja i procena radijacionog rizika na biotu istraživanog prostora. Prilikom izračunavanja doze zračenja na biotu korišćene su koncentracije aktivnosti radionuklida u zemljištu određene na istraživanom prostoru. U proceni su korišćene referentni organizmi (životinje i biljke) koje se po defaultu nalaze u programu, ali su i modelovani novi organizmi za koje se zna da naseljavaju istraživani prostor. Rezultati su pokazali da je najveći doprinos ukupnoj dozi zračenja za default organizme poreklom od  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{226}\text{Ra}$ . Ukupna doza zračenja usled zemljišnog izlaganja radionuklidima za referentne životinje iznosila je 6,96 μGy h<sup>-1</sup>, a za referentne biljke iznosila je 3,06 μGy h<sup>-1</sup>. Najveći doprinos ukupnoj dozi zračenja za modelovane organizme poreklom je od  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{210}\text{Pb}$ . Najviša doza zračenja za modelovane organizme procenjena je za velike sisare (srna i divlja svinja) i iznosila je 4,5 μGy h<sup>-1</sup>, dok je najmanja doza procenjena za amfibije (žaba) 1,5 μGy h<sup>-1</sup>.

Primenom *ERICA Tool*-a i *RESRAD BIOTA*-e je zaključeno da ne postoji radijacioni rizik na biotu na osnovu preporuka DOE/IAEA i ICRP-a, za koje je skrining doza za zemljišne životinje i biljke iznosi 40-400 μGy h<sup>-1</sup> i 400-4000 μGy h<sup>-1</sup>, redom.

## C. Uporedna analiza rezultata disertacije sa rezultatima iz literature

U literaturi se može naći veliki broj radova čiji je cilj istraživanja procena kontaminacije radionuklidima i teškim metalima u okolinama termoelektrana (Papp, Z., Dezso, Z. and S. Daroczy. *Significant radioactive contamination of soil around a coal-fired thermal power plant*. J Environ Radioact, 2002. 59(2): p. 191-205.; Petrotou, A., Skordas, K., Papastergios, G. and A. Filippidis. *Factors affecting the distribution of potentially toxic elements in surface soils around an industrialized area of northwestern Greece*. Environmental Earth Sciences, 2012. 65(3): p. 823-833.; Rodriguez-Iruretagoiena, A., Fdez-Ortiz de Vallejuelo, S., Gredilla, A., Ramos, C.G., Oliveira, M.L., Arana, G., de Diego, A., Madariaga, J.M. and L.F. Silva. *Fate of hazardous elements in agricultural soils surrounding a coal power plant complex from Santa Catarina (Brazil)*. Sci Total Environ, 2015. 508: p. 374-82. ). Mađusobne korelacije radionuklida, teških metala i fizičko-hemijskih karakteristika uzoraka iz životne sredine mogu se analizirati hemometrijskim metodama (Facchinelli, A., Sacchi, E. and L. Mallen. *Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils*. Environ Pollut, 2001. 114(3): p. 313-24.; Charro, E., Pardo, R. and V. Pena. *Chemometric interpretation of vertical profiles of radionuclides in soils near a Spanish coal-fired power plant*. Chemosphere, 2013. 90(2): p. 488-96.; Chandrasekaran, A., Ravisankar, R., Harikrishnan, N., Satapathy, K.K., Prasad, M.V. and K.V. Kanagasabapathy. *Multivariate statistical analysis of heavy metal concentration in soils of Yelagiri Hills, Tamilnadu, India-- spectroscopical approach*. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc, 2015. 137: p. 589-600.). Geostatističkom analizom može se odrediti prostorna distribucija radionuklida i teških metala na istraživanom prostoru (Dai, L., Wei, H. and L. Wang. *Spatial distribution and risk assessment of radionuclides in soils around a coal-fired power plant: a case study from the city of Baoji, China*. Environ Res, 2007. 104(2): p. 201-8.; Charro, E., Pardo, R. and V. Pena. *Statistical analysis of the spatial distribution of radionuclides in soils around a coal-fired power plant in Spain*. J Environ Radioact, 2013. 124: p. 84-92.). Na osnovu vrednosti koncentracija radionuklida u zemljištu može se proceniti radijacioni rizik na stanovništvo (Taskin, H., M. Karavus, P. Ay, A. Topuzoglu, S. Hidiroglu and G. Karahan. *Radionuclide concentrations in soil and lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in Kırklareli, Turkey*. J Environ Radioact, 2009. 100(1): p. 49-53.; Lu, X., Parmaksiz, A., P. Arikian, M. Vural, E. Yeltepe and I. Tukenmez. *(2)(2)(6)Ra, (2)(3)(2)Th and (4)(0)K radionuclides enhancement rate and dose assessment for residues of lignite-fired thermal power plants in Turkey*. Radiat Prot Dosimetry, 2011. 147(4): p. 548-54.; Li, X., Yun, P., Luo, D., Wang, L., Ren, C. and C. Chen. *Measurement of natural radioactivity and assessment of associated hazards in soil around Baoji second coal-fired thermal power plant, China*. Radiat Prot Dosim, 2012. 148: p. 219-226.). Za procenu radijacionog rizika na biotu poslednjih godina sve više se koriste softverski modeli (USDOE. (United States Department of the Environment), RESRAD-BIOTA: A Tool for Implementing a Graded Approach to Biota Dose Evaluation. (ISCORS Technical Report 2004-02 DOE/EH-0676), Washington, USA, 2004.; Brown, J.E., B. Alfonso, R. Avila, N.A. Beresford, D. Copplestone, G. Prohl and A. Ulanovsky. *The ERICA Tool*. J Environ Radioact, 2008. 99(9): p. 1371-83.; Wood, M.D., W.A. Marshall, N.A. Beresford, S.R. Jones, B.J. Howard, D. Copplestone and R.T. Leah. *Application of the ERICA Integrated Approach to the Drigg coastal sand dunes*. J Environ Radioact, 2008. 99(9): p. 1484-95.; Vandenhove, H., J. Vives i Batlle and L. Sweeck. *Potential radiological impact of the phosphate industry on wildlife*. Journal of Environmental Radioactivity, 2015. 141(0): p. 14-23.).

Do danas, po našem saznanju i dostupnoj literaturi, na prostoru oko termoelektrane „Nikola Tesla“ (TENT) u Obrenovcu, nije izvršena sveobuhvatna analiza uzoraka zemljišta

na sadržaj radionuklida, teških metala i fizičko-hemijskih karakteristika. U okviru ovog rada na istraživanom prostoru nad skupom podataka primenjene su metode hijerarhijske analize grupisanja i geostatističke analize. Obe primenjene metode ukazale su na ponašanje ovih elemenata na istraživanom prostoru. Dobijeni rezultati u okviru ove doktorske disertacije doprineće boljem razumevanju migracije ovih zagađujućih supstancija u životnoj sredini. Pored navedenog izvršena je procena radijacionog uticaja na živi svet, kao posledica rada termoelektrane. Na osnovu svih izmerenih i procenjenih parametara na istraživanom prostoru u okolini TENT ne postoji radijacioni rizik za stanovništvo. Po prvi put izvršena je procena rizika na biotu primenom softverskih modela ERICA Tool i RESRAD BIOTA na prostoru potencijalno ugroženom radom termoelektrane. Dobijeni rezultati ukazali su da ne postoji radijacioni rizik na biotu istraživanog prostora, pri čemu je najviša ukupna doza zračenja procenjena za lišajeve i briofite.

## **D. Naučni radovi i saopštenja u kojima su publikovani rezultati iz doktorske disertacije**

### **M21 Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu**

1. Ćujić, M., Dragović, S., Đorđević, M., Dragović, R., Gajić, B., Miljanić, Š. *Radionuclides in the soil around the largest coal fired power plant in Serbia: radiological hazard, relationship with soil characteristics and spatial distribution*. Environmental Science and Pollution Research 22 (2015) 10317-10330, DOI: 10.1007/s11356-014-3888-2.
2. Ćujić, M., Dragović, S., Đorđević, M., Dragović, R., Gajić B. *Environmental assessment of trace metals around the largest coal fired power plant in Serbia*. Catena, <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.12.001>.

### **M33 Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini**

3. Ćujić, M., Petrović, J., Đorđević, M., Dragović, R., Dragović, S. The radiological hazard due to naturally occurring radionuclides in soil around thermoelectric power plant, The Second International Conference on Radiation and Dosymetry in Various Fields of Research, RAD 2014, Niš, Serbia, May 27-30, 2014, Proceedings, 87-90.

## E. Zaključak komisije

Na osnovu izloženog može se zaključiti da rezultati kandidata master fizikohemičara Mirjane Čujić prikazani u okviru ove doktorske disertacije predstavljaju originalan i značajan naučni doprinos oblasti fizičke hemije, posebno radiohemije. Postoje takođe i praktični doprinosi izraženi u zaključku da na istraživanom prostoru u okolini termoelektrane »Nikola Tesla« u Obrenovcu ne postoji radijacioni rizik po stanovništvo. Po prvi put je za taj prostor izvršena i procena rizika na biotu primenom softverskih modela ERICA Tool i RESRAD BIOTA i zaključeno da on ne postoji. Za očekivati je da se ovi moćni softveri nađu i u zakonskoj regulativi Republike Srbije, po ugledu na Evropsku Uniju.

Deo rezultata doktorske disertacije kandidata je publikovan u vrhunskim međunarodnim časopisima, kao i u vidu saopštenja na međunarodnim naučnim skupovima.

Na osnovu izloženog, Komisija pozitivno ocenjuje doktorsku disertaciju master fizikohemičara Mirjane Čujić pod naslovom: **Radionuklidi i teški metali u zemljištu u okolini termoelektrane "Nikola Tesla" u Obrenovcu: faktori koji utiču na njihovu migraciju – prostorna distribucija – procena radijacionog uticaja na živi svet**, i predlaže Nastavno-naučnom veću Fakulteta za fizičku hemiju da je prihvati i odobri njenu javnu odbranu, čime bi bili ispunjeni svi uslovi da kandidat stekne zvanje *doktor fizičkohemijskih nauka*.

### ČLANOVI KOMISIJE:

---

dr Šćepan Miljanić  
redovni profesor Fakulteta za fizičku hemiju

---

dr Snežana Dragović  
naučni savetnik Instituta za nuklearne nauke „Vinča“

---

dr Ljubiša Ignjatović  
vanredni profesor Fakulteta za fizičku hemiju

---

dr Miroslav Kuzmanović  
vanredni profesor Fakulteta za fizičku hemiju

---

dr Ljiljana Janković-Mandić  
naučni saradnik Instituta za nuklearne nauke „Vinča“

U Beogradu, 11.12.2015.